



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

***DISSERTAÇÃO DE MESTRADO***

***“Utilização de Dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo na Baía de Guajará, Belém-PA”.***

Dissertação apresentada por:  
**FABRÍCIO DIAS GONÇALVES**

BELÉM  
2005.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS  
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica**

**“Utilização de Dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamento de Óleo na Baía de Guajará, Belém-PA”.**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR  
**FABRÍCIO DIAS GONÇALVES**

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

Data de Aprovação:      /      /

**Comitê de Tese:**

---

Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador)

---

Dr. Waldir Renato Paradella (INPE)

---

Dr. Fernando Pellon de Miranda (Petrobras)

---

BELÉM  
2005

---

*Para Walter, Raimunda, Édila, Núbia, Quésia,  
Evelyn e minha querida avó Benedita (in memorian).*

---

## ***AGRADECIMENTOS***

Gostaria de expressar meus agradecimentos a todos que, de uma forma ou de outra, colaboraram para a realização deste trabalho; o que pode parecer mera formalidade, no entanto, para mim representa uma pequena demonstração de gratidão às pessoas e instituições que acreditaram e não mediram esforços para a realização desta Dissertação. Assim, gostaria de agradecer especialmente:

Ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (CPGG) do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará pela oportunidade de desenvolver este trabalho, assim como pela utilização de sua infra-estrutura.

A CAPES pela concessão de uma bolsa de mestrado que permitiu minha dedicação exclusiva ao desenvolvimento desta Dissertação.

Aos Projetos PIATAM Mar e PETROMAR pelo suporte para realização desta Dissertação, projetos estes que são financiados, respectivamente, pela Petrobras e FINEP/CT-PETRO. Assim como, gostaria de estender estes agradecimentos a todos seus participantes.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho pelas oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional, pela orientação desta Dissertação e, antes de tudo, pela amizade que tem sido construída ao longo destes anos. Às vezes olhando para trás, observamos que poderíamos ter feito mais naquele tempo, mas a questão é que naquele tempo não éramos capazes de observar isto.

Ao Dr. Waldir Renato Paradella pelas dicas na utilização das diversas técnicas de processamento digital de imagens SAR, bem como pelas sugestões e generosas palavras de incentivo. Ao Dr. Fernando Pellon de Miranda pela revisão detalhada desta Dissertação e pelas sugestões valiosas que permitiram uma melhora significativa na versão final deste trabalho.

Aos Drs. Mário Ivan Cardoso e Marcelo Cohen pela avaliação deste trabalho, pelas sugestões e palavras de incentivo.

Ao Msc. Carlos Beisl e à Fernando Ledo pela ajuda no processamento das imagens RADARSAT-1 W1, bem como na utilização do programa PCI Geomatica.

Aos amigos do Laboratório de Analise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), Francisco Ribeiro (Tatu), Glenda Carvalho, Afonso Quaresma (Alhonso), Paula Lima, Sheila Gatinho, Messiana Boulhosa, Rosana Helena, Edmilson das Mercês, Fernando Souza, Helenice Silva, Lourival Júnior, Valéria Pinheiro, Ronaldo Paiva (Cachorrão), Elainy Martins, Eduardo Moreira, Antônio Marçal.

Aos amigos do Centro de Geociências (CG), Cleber Ladeira (Lobinho), José de Arimatéia (Ari), Carlos Marcelo (Miojo), Elen Lopes, Gisele dos Anjos, Luiz Cláudio (Boizinho), Kirkpatrick Monteiro (Craca Velha), Fernanda Gisele, Teresa Cristina, Marcely Neves, Fábio Glayson (Slot), Wiverson de Souza (Negão), Aderson Lima (Tachí), Wilson Bastos (Sr. Wilson),

---

À Eliete, Heloide, Nilcione e Francisca que reiteradamente tem intercedido por mim e, dessa forma, me ajudado grandemente.

Aos meus pais Walter, Raimunda e Édila, por tudo, principalmente pelos ensinamentos, pelo incentivo e o apoio incondicional. Agradecimentos estendidos para toda a minha família e, principalmente, minha amada avó Dolores e minhas irmãs Núbia, Quésia e Evelyn pela paciência, amor e carinho nos momentos difíceis.

Aos grandes amigos Ivan Monteiro, Pablo Alan (pai do João Pedro), Marcelo Bellini e Carlos Magno (Cacá) pela amizade de longa data, apesar das distâncias e dos caminhos diferentes traçados por cada um.

E por fim, gostaria de agradecer a Deus, uma vez que tem me guardado e me abençoado de uma forma muito especial; sendo sua bondade comigo a fonte de todas as minhas vitórias.

---

*“Não devemos parar de explorar. E o fim de  
toda nossa exploração será chegar ao ponto  
de partida e ver o lugar pela primeira vez.”*

*T.S. Eliot*

---

## **SUMÁRIO**

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>ii</b>
<b>EPÍGRAFE</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>3</b>
<b>1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
1.1 - UM HISTÓRICO DOS DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MUNDO.....	3
1.2 - NECESSIDADE DE GERAÇÃO DE CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO .....	5
1.3 - A COSTA AMAZÔNICA: O PAPEL DO SENSORIAMENTO REMOTO NA OBSERVAÇÃO E MONITORAMENTO COSTEIRO.....	6
1.4 - O PAPEL DAS COMPANHIAS DE PETRÓLEO NA DEFESA SÓCIO-AMBIENTAL DA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	9
1.5 - OBJETIVOS .....	11
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>13</b>
<b>2 - ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>13</b>
2.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	13
2.1.2 - Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR) .....	15
2.2 - GEOLOGIA .....	17
2.3 - GEOMORFOLOGIA.....	17
2.3.1 - Região das Várzeas .....	18
2.3.2 - A Região de Terra Firme .....	19
2.4 - VEGETAÇÃO .....	19
2.5 - CLIMA.....	20
2.6 - DINÂMICA ESTUARINA .....	21
2.6.1 - Aspectos oceanográficos .....	22
2.6.2 - Estudo dos Ventos e Ondas na Baía de Guajará.....	23
2.6.3 - As Marés no Estuário Guajará .....	23
2.6.4 - Estudo das Correntes de Maré .....	24
2.6.5 - A Maré Salina.....	24
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>26</b>
<b>3- UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO NAS MICROONDAS PARA O MONITORAMENTO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA .....</b>	<b>26</b>
3.1 – IMPORTÂNCIA E UTILIZAÇÃO DE UM SAR .....	26
3.2 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE RADAR .....	28

---

3.3-PARÂMETROS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE RADAR .....	31
3.3.1 - Comprimento de Onda .....	31
3.3.2-Polarização .....	33
3.3.3-Ângulo de Incidência .....	35
3.3.4- Direção da Visada .....	36
3.4 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA SUPERFÍCIE.....	37
3.4.1-Constante Dielétrica e Umidade .....	37
3.4.2-Rugosidade da Superfície e Topografia .....	38
3.5-DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS .....	38
3.6 - RUÍDOS.....	41
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>42</b>
<b>4 - MAPEAMENTOS DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL (ISA) NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA .....</b>	<b>42</b>
4.1- UTILIZAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO .....	42
4.2- MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE DESENVOLVIDO PELA NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) .....	43
4.2.1- Tipos de informações presentes nos Mapas de Sensibilidade .....	43
4.2.2 - Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA) .....	45
4.2.2.1 - Grau Relativo de Exposição à Energia de Ondas e Marés.....	46
4.2.2.2 - Declividade da Costa .....	46
4.2.2.3 - Tipo de Substrato .....	47
4.2.3 - Aspectos biológicos.....	48
4.2.4 - Aspectos sócio-econômicos .....	48
4.3 - MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE UTILIZADO NO BRASIL .....	49
4.4- CARACTERIZAÇÃO DOS ECOSISTEMAS COSTEIROS TROPICais AMAZÔNICOS .....	50
4.4.1 - A dinâmica das marés.....	52
4.4.2 - Variáveis biológicas nas áreas inundáveis em função da dinâmica das marés.....	55
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>56</b>
<b>5- SENsoRES REMOTOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA O MAPEAMENTO DOS ISA .....</b>	<b>56</b>
5.1 - O SATÉLITE LANDSAT-7 ETM+ .....	56
5.2 - O SATÉLITE RADARSAT-1 .....	57
5.3 - A MISSÃO SRTM.....	59
5.4 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS .....	61
5.4.1 - Processamento dos dados de elevação SRTM .....	61
5.4.2 - Processamento digital das imagens LANDSAT-7 ETM+.....	62
5.4.2.1-Correção Atmosférica .....	62
5.4.2.2 - Análise Estatística da Imagem LANDSAT-7 ETM+ .....	63
5.4.2.3 - Correção Geométrica .....	64
5.4.3 - Processamento das imagens RADARSAT-1 Wide 1 .....	66

---

5.4.3.1 - Reescalonamento .....	66
5.4.3.2 - Ortoretificação .....	67
<b>5.4.4 - Fusão de imagens multisensores RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+ .....</b>	<b>69</b>
5.4.4.1 - Técnicas de Integração de Dados.....	69
5.4.4.2 - Análise por Componentes Principais (ACP).....	70
5.4.4.3 - Realce por Decorrelação .....	72
5.4.4.4 - Transformação IHS .....	73
5.4.4.5 - Ampliação Linear de Contraste.....	74
<b>5.4.5 - Calibração Radiométrica de Imagens RADARSAT-1 W1.....</b>	<b>74</b>
5.5 - ELABORAÇÃO DOS MAPAS .....	78
<b>5.5.1 - Mapeamento das unidades de paisagem .....</b>	<b>78</b>
<b>5.5.2 - Mapas de índices de sensibilidades.....</b>	<b>79</b>
<b>5.5.3 - Classificação automática dos produtos gerados .....</b>	<b>80</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>84</b>
<b>6- RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>84</b>
6.1-CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO PARA A ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA .....	84
6.2-AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DOS ISA NOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ .....	86
<b>6.2.1 - Imagens LANDSAT-7 ETM + .....</b>	<b>86</b>
<b>6.2.2 - Imagens RADARSAT-1 W1.....</b>	<b>93</b>
<b>6.2.3 - Fusão Radar/Óptico.....</b>	<b>110</b>
6.3 - RECONHECIMENTO DOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ.	115
<b>6.3.1 - Planalto Rebaixado da Amazônia (Região de Terra Firme) .....</b>	<b>118</b>
<b>6.3.2 - Planície Amazônica .....</b>	<b>120</b>
6.3.2.1 - Planície Aluvial.....	120
6.3.2.2 - Planície de maré .....	121
6.3.2.3 - Praias Estuarinas .....	121
6.3.2.4 - Canais Fluviais e Estuarinos .....	123
<b>6.3.3 - Sistemas Antropogênicos (Áreas Construídas) .....</b>	<b>124</b>
6.3.3.1 - Áreas Urbanas .....	124
6.3.3.2 - Lagos Artificiais.....	125
6.4-MAPEAMENTO DOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ .....	126
6.5 - GERAÇÃO DAS CARTAS DE ISA A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO.....	133
<b>6.5.1 - Estrutura Artificial, Muro de Arrimo - Índice 1B ( ISA 1B ) .....</b>	<b>137</b>
<b>6.5.2 - Escarpas e Falésias, Esculpidas nos Sedimentos do Grupo Barreiras - Índice 3 ( ISA 3 )....</b>	<b>138</b>
<b>6.5.3 - Praia de Areia Média a Grossa - Índice 4 (ISA 4).....</b>	<b>139</b>
<b>6.5.4 - Estruturas Artificiais Abrigadas - Índice 8B (ISA 8B).....</b>	<b>141</b>
<b>6.5.5 - Banco Lamoso Vegetado - Índice 9B (ISA 9B).....</b>	<b>142</b>
<b>6.5.6 - Manguezal - Índice 10 A (ISA 10A).....</b>	<b>143</b>
<b>6.5.7 - Várzea - Índice 10 B (ISA 10B).....</b>	<b>146</b>

---

<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>148</b>
<b>7- CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>148</b>
<b>7.1- CONCLUSÕES .....</b>	<b>148</b>
<b>7.2- RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>151</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>152</b>

---

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### **CAPÍTULO 1**

- Figura 1.1** - Porcentagens anuais de contribuições das fontes de óleo nos oceanos. FONTE: ESA (1998). ..... 4  
**Figura 1.2** - Zona costeira Amazônica, vista a partir de um modelo digital de elevação (SRTM - Shuttle Radar Topography Mission), mostrando em destaque a área em estudo (Belém). ..... 7

### **CAPÍTULO 2**

- Figura 2.1** - Localização da área de estudo (Imagem LANDSAT-7 ETM +, 5R 4G 3B), mostrando as principais cidades na região de Belém, destacando a localização do Terminal Petroquímico de Miramar. ..... 14  
**Figura 2.2** - Localização do Terminal Petroquímico de MIRAMAR. (Ortofoto CODEM, 1998). ..... 16  
**Figura 2.3** - Variação dos índices de precipitação para Região Metropolitana de Belém. (A) ano de 2001, correspondente à aquisição da imagem LANDSAT-7 ETM+ usada neste trabalho; (B) ano de 2003, correspondente à aquisição das imagens RADARSAT-1 Wide I. Fonte: INMET..... 21

### **CAPÍTULO 3**

- Figura 3.1**- Geometria de imageamento de um radar com visada lateral (SLAR- Side Looking airborne Radar), onde: ângulo de incidência (); ângulo de visada (); resolução espacial em azimute (); resolução espacial e em range (); altura de voo (h); tamanho físico da antena (); largura do pulso transmitido (); velocidade da luz (c); largura do feixe em azimute (). Adaptado (Trevett , 1986 apud Dutra et al.,2003). ..... 29  
**Figura 3.2** - Esquema mostrando os principais componentes e mecanismos de retroespelhamento, que influenciam na interação do pulso da onda eletromagnética com o dossel da floresta. 1) espalhamento no topo do dossel (banda X); 2) interação dentro do dossel, também chamado de espalhamento volumétrico (banda C); 3) interação da energia com a superfície do terreno (bandas L e P). Adaptado de Leckie & Ranson (1998 apud Kuplich, 2001).... 32  
**Figura 3.3** - Esquema mostrando o efeito de double bounce, onde o pulso de microondas encontra uma superfície lisa, ocorrendo assim, reflexão especular na água e em seguida, uma reflexão de canto nos troncos das árvores (Raney, 1998). ..... 33  
**Figura 3.4** - Tipo de distorções inerentes ao imageamento com radar: (a) encurtamento de rampa, que ocorre pelo efeito combinado entre a geometria de imageamento e a declividade do terreno, onde 1) é a distância em alcance inclinado (slant range) do sensor até o alvo e 2) é a distância real no terreno (ground range), onde a distância em alcance inclinado (1) é menor do que a distância real no terreno; (b) inversão de relevo, que ocorre quando o topo da montanha (B) é “visto” pelo radar de visada lateral antes da base (A); (c) sombreamento topográfico, gerado em função da geometria de imageamento em um radar de visada lateral, quando a parte oposta à vertente frontal ao feixe de microondas não é imageada. (Adaptado de RADARSAT International, 1997)..... 40

---

## CAPÍTULO 4

<b>Figura 4.1 - Fluxograma mostrando os tipos de informações presentes em mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 4.2 - Fluxograma mostrando as informações necessárias para a classificação da zona costeira quanto a seu índice de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 4.3 - Diferentes comportamentos geomorfológicos da zona costeira amazônica (Souza Filho, 2004). ....</b>	<b>52</b>

## CAPÍTULO 5

<b>Figura 5.1 - Fluxograma mostrando as etapas do processamento das imagens LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 5.2 - Fluxograma mostrando as principais etapas do processamento das imagens RADARSAT-1 W1.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura 5.3 - Fluxograma mostrando os principais passos na fusão RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+, utilizando a abordagem SPC-SAR (Paradella et al., 1999) .....</b>	<b>71</b>
<b>Figura 5.4 - Fluxograma mostrando as etapas para calibração radiométrica das imagens RADARSAT-1.....</b>	<b>77</b>

## CAPÍTULO 6

<b>Figura 6.1 – Bandas multiespectrais do LANDSAT-7 ETM+ que apresentam as maiores variâncias: A) Banda 4; B) Banda 5; C) Banda 7; D) Composição colorida resultante ( 4R5G7B). ....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 6.2 – Tríade de bandas multiespectrais do LANDSAT-7 ETM+ que apresentou o melhor OIF (Optimum Index Factor): A) banda 3; B) banda 5; C) banda 7; D) composição colorida resultante ( 5R7G3B).....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 6.3- Integração digital IHS de imagem LANDSAT-7 ETM+: A) banda pancromática com 15 m de resolução espacial; B) composição 5R4G3B com pixel reamostrado para 15 m; C) fusão pan/multi; D) terminal petroquímico de MIRAMAR (fotografia aérea oblíqua).....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 6.4 – Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente, mostrando principais direções de fluxo na Baía de Guajará, em condição de maré vazante: A) imagem adquirida em 5 de janeiro de 2003, maré baixa; B) imagem adquirida em 29 de janeiro de 2003, maré alta. ....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 6.5 – Margem direita do Rio Guamá (Campus da UFPA), onde ocorre um acelerado processo erosivo modificado por ação antrópica. ....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 6.6 – Imagem RADARSAT-1 WI, órbita descendente, mostrando a área urbana de Belém, realçando arruamentos perpendiculares à direção de visada. Dado adquirido em 29 de janeiro de 2003, maré alta. ....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 6.7 - Previsão de amplitude das marés: (A) em 5 de janeiro de 2003, maré vazando; (B) em 29 de janeiro de 2003, maré enchendo. FONTE: DHN (<a href="http://www.dhn.mar.mil.br/">http://www.dhn.mar.mil.br/</a>). ....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 6.8 - Precipitação pluvial em Belém: (A) em 3, 4 e 5 de janeiro de 2003; (B) em 27, 28 e 29 de janeiro de 2003. FONTE: 2º DISME-Belém/INMET.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 6.9 - Vegetação típica encontrada nas várzeas da região. ....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 6.10 - Comparação entre os valores médios de <math>\sigma^{\circ}</math> obtidos pela análise estatística das amostras de coeficiente de retroespalhamento nas imagens RADARSAT-1, adquiridas em condições ambientais distintas, para as principais unidades de paisagem identificadas na área em estudo.....</b>	<b>102</b>

---

<b>Figura 6.11 -</b> Perfil () sobre a Região de Várzea do Rio Guamá, mostrando comportamento similar de retroespalhamento para as duas imagens RADARSAT-1 W1 (5 e 29 de janeiro de 2003), com a imagem de 5 de janeiro apresentando valores de coeficiente de retroespalhamento ligeiramente maiores do que a imagem de 29 de janeiro, comportamento este que ocorre de maneira geral por toda a imagem.....	103
<b>Figura 6.12 -</b> Perfil (), de direção N-S, cortando as regiões de várzeas, áreas urbanas, Terra Firme, lagos artificiais (Lago Água Preta) e a várzea do Rio Guamá, apresentando picos de coeficiente de retroespalhamento para as áreas urbanas, intercaladas por regiões com valores homogêneos de retroespalhamento (Várzeas e Terra Firme) e por uma queda abrupta para os valores de retroespalhamento no lago artificial (Água Preta).....	104
<b>Figura 6.13 –</b> Imagens RADARSAT-1 W1: a) imagem de 5 de janeiro de 2003, em maré baixa, mostrando maior rugosidade superficial na Baía de Guajará, em função das maiores ondulações formadas na vazante; b) imagem 29 de janeiro, em maré alta, apresentando menor rugosidade superficial na água. ....	105
<b>Figura 6.13 (cont.) -</b> Perfil () sobre a Baía de Guajará, em direção a Belém, mostrando o comportamento do retroespalhamento na Região de Várzea (Ilha das Onças), da água com um pequeno decréscimo nos valores de retroespalhamento em relação à várzea (Baía de Guajará), e áreas urbanas, onde há um grande aumento no retroespalhamento (Belém). Observar a maior diferença no retroespalhamento sobre a Baía de Guajará devido à rugosidade da água.....	106
<b>Figura 6.14 -</b> Perfil () sobre a área urbana de Belém até a Várzea do Rio Guamá. Observar a diferença entre os padrões de retroespalhamento, com altos valores de coeficiente de retroespalhamento para a cidade de Belém (reflexão de canto nos prédios) e menores valores para a área vegetada da Várzea do Rio Guamá (espalhamento volumétrico no topo do dossel).....	107
<b>Figura 6.15 -</b> Principais parâmetros (valores máximo, médio e mínimo) obtidos pela análise estatística das amostras de coeficiente de retroespalhamento para as principais unidades de paisagem identificadas na área em estudo: (A) imagem RADARSAT-1 W1 (5 de janeiro de 2003); (B) imagem RADARSAT-1 W1 (29 de janeiro de 2003).....	109
<b>Figura 6.16 –</b> Técnicas de integração usadas: A) ACP nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, fusão ICP, 2CP, 3CP + SAR; B) fusão SAR+ triade IOF (3, 5, 7); C) realce por decorrelação na triade IOF, posterior fusão com SAR; D) SPC-SAR (Paradella et al., 1999).....	114
<b>Figura 6.17 -</b> Mapa de unidades de paisagem elaborado a partir da interpretação visual do produto integrado, pan/multi do LANDSAT-7 ETM+ (Gonçalves, 2003).....	117
<b>Figura 6.18 -</b> Imagem integrada SPC-SAR (Selective Principal Component - SAR) da Região Metropolitana de Belém, mostrando as principais unidades de paisagem da área estudada: A) várzea do Rio Guamá; B) Terra Firme; C) áreas urbanas.....	119
<b>Figura 6.19 –</b> Imagem integrada SAR/óptico, através da técnica SPC-SAR, mostrando uma notória distinção das praias estuarinas (seta branca).....	123
<b>Figura 6.20 -</b> Área Construída da Região Metropolitana de Belém, mostrando os lagos artificiais Água Preta (lago maior) e Bolonha. (produto híbrido SAR/óptico).....	126

---

<b>Figura 6.21 – Técnicas de classificação automáticas usadas: A) ISOSEG nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+; B) k-Médias na imagem SPC-SAR; C) MAXVER nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 do LANDSAT-7 ETM+; D) MAXVER na imagem SPC-SAR.....</b>	130
<b>Figura 6.22 – Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática não-supervisionada, que obteve o melhor índice Kappa, usando o algoritmo de classificação Isoseg (ISODATA), a partir das imagens LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7). .....</b>	131
<b>Figura 6.23 - Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática supervisionada, que obteve o melhor índice Kappa entre as imagens integradas (Imagem SPC-SAR), utilizando o algoritmo de classificação MAXVER.....</b>	132
<b>Figura 6.24 - Mapa de Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de óleo, para Baía de Guajará, fotointerpretado a partir de uma imagem híbrida LANDSAT-7 ETM+ (bandas multiespectrais e pancromática)...</b>	134
<b>Figura 6.25 - Mapa de Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de óleo, para Baía de Guajará, elaborado a partir de uma classificação supervisionada (MAXVER) da imagem SPC-SAR.....</b>	135
<b>Figura 6.26 - Estrutura Artificial, Muro de Arrimo da Companhia Docas do Pará - Índice 1B .....</b>	137
<b>Figura 6.27 – Falésia ao longo das praias estuarinas, Ilha de Cotijuba, formada a partir da ação das ondas, esculpida no pediplano neo-pleistocênico, sustentado por depósitos do Grupo Barreiras, marcando um contato brusco entre o pediplano e a planície aluvial. .....</b>	138
<b>Figura 6.28 - Praias Estuarinas na Ilha de Cotijuba, de areia média a grossa. ....</b>	140
<b>Figura 6.29 - Praias Estuarinas na Ilha de Mosqueiro, com alto uso recreacional. ....</b>	140
<b>Figura 6.30 - Estruturas Artificiais Abrigadas, formada por píeres e docas construídos com madeira e metal. ....</b>	142
<b>Figura 6.31 - Banco Lamoso Vegetado - Índice 9B (ISA 9B), mostrando substrato mole que dificulta o acesso, tornando a limpeza extremamente difícil. ....</b>	143
<b>Figura 6.32 - Manguezal, Índice 10 A, mostrando o contato entre a região de manguezal e a Terra Firme (ortofoto, CODEM). ....</b>	145
<b>Figura 6.33 - Manguezal, Índice 10 A, mostrando típica vegetação de mangue.....</b>	145
<b>Figura 6.34 - Imagem de alta resolução (ortofoto CODEM, 1998), mostrando a várzea baixa que comumente ocorre ao longo dos canais fluviais. Rio Guamá. ....</b>	147
<b>Figura 6.35 – Várzea, Índice 10 B, apresentando ampla superfície de inundação com rica comunidade biológica associada.....</b>	147

## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 5**

<b>Tabela 5.1-Bandas do sistema LANDSAT-7 ETM+ com suas respectivas faixas espectrais (Irish, 1998).....</b>	57
<b>Tabela 5.2 - Principais parâmetros do sistema RADARSAT-1 (Parashar et al., 1993).....</b>	58
<b>Tabela 5.3 - Modos de imageamento do sistema RADARSAT-1 e seus principais parâmetros. (RADARSAT Internacional, 1995). ....</b>	59

---

<b>Tabela 5.4 - Principais características dos sensores remotos utilizados.....</b>	<b>61</b>
<b>Tabela 5.5 – Coeficiente Kappa e os respectivos conceitos de desempenho da classificação (Cohen, 1960 apud Fonseca et al., 2000).....</b>	<b>83</b>

## CAPÍTULO 6

<b>Tabela 6.1 - Proposta de adaptação dos métodos NOAA (2002) e Petrobras (2002) para a zona costeira amazônica (Souza Filho et al., 2004).....</b>	<b>85</b>
<b>Tabela 6.2 - Estatística das seis bandas da imagem LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 6.3 - Matriz de covariância e variância na diagonal principal (em vermelho).....</b>	<b>88</b>
<b>Tabela 6.4 - Matriz de correlação das imagens LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>89</b>
<b>Tabela 6.5 - Cálculo do IOF (Optimum Index Factor) para as 6 bandas do LANDSAT-7 ETM+ (espectro refletido).....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 6.6 - Valores médios dos coeficientes de retroespelhamento (<math>\sigma^*</math>) calculados para as principais unidades de paisagem encontradas na área em estudo.....</b>	<b>110</b>
<b>Tabela 6.7 - Estatística das componentes principais para as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 7) do LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabela 6.8 - Matriz de autovetores das componentes principais para as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 7) do LANDSAT-7 ETM+, destacando a maior contribuição em <b>negrito</b>.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabela 6.9 - Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas (1, 2, 3) do LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>113</b>
<b>Tabela 6.10 - Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+.....</b>	<b>113</b>
<b>Tabela 6.11 – Compartimentação geomorfológica da área em estudo.....</b>	<b>116</b>
<b>Tabela 6.12 – Resultado do teste Kappa para a classificação automática das imagens LANDSAT-7 ETM+ e do produto híbrido SPC-SAR. (*) análise estatística gerada para as áreas de treinamento.....</b>	<b>127</b>
<b>Tabela 6.13 - Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (Isoseg) da imagem LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7), destacando as amostras que foram classificadas corretamente (diagonal principal em vermelho).....</b>	<b>128</b>
<b>Tabela 6.14 - Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (K-média) do produto híbrido gerado SAR/óptico (RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+).....</b>	<b>128</b>
<b>Tabela 6.15 - Matriz de confusão gerada para a classificação supervisionada (MAXVER) da imagem LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7).....</b>	<b>128</b>
<b>Tabela 6.16 - Matriz de confusão gerada para a classificação supervisionada (MAXVER) do produto híbrido gerado SAR/óptico (RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+).....</b>	<b>128</b>
<b>Tabela 6.17 – Classificação da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo para dos ambientes mapeados na área em estudo. Souza Filho et al. (2004) .....</b>	<b>136</b>

---

## ***LISTA DE SIGLAS E ABREVIASÕES***

- ARPEL - Asociacion Regional de Empresas de Petroleo y Gas Natural en Latinoamerica y el Caribe***
- ASI - Agenzia Spaziale Italiana (Agência Espacial Italiana)***
- CDA - Centro de Defesa Ambiental da Amazônia***
- CDP - Companhia Docas do Pará***
- CODEM - Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém***
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.***
- CSA - Canadian Space Agency***
- DEM - Digital Elevation Model***
- DLR - Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt (Agência Espacial Alemã)***
- EIA - Estudo de Impacto Ambiental.***
- EPA - Environmental Protection Agency***
- ESA - European Space Agency.***
- ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus.***
- GCP - Ground Control points***
- GEMS - Goodyear Mapping System***
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis***
- IFOV - Instantaneous Field of View***
- IMO - International Maritime Organization***
- INPH - Instituto de Pesquisas Hidroviárias***
- IPIECA - International Petroleum Industry Environmental Conservation Association***
- ISA - Índice de Sensibilidade Ambiental***
- JICA - Japan International Cooperation Agency***
- JPL - Jet Propulsion Laboratory***
- MDT - Modelo Digital de Terreno***
- MMA - Ministério do Meio Ambiente.***
- MSA - Mapa de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo***
- NASA - National Aeronautics and Space Administration***
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration.***
- OIF - Optimum Index factor***
- PDI - Processamento Digital de Imagens***
- PEGASO - Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional.***

---

**Petrobras** – Petróleo Brasileiro S.A.

**PIXEL** - Picture X Element

**RADAM** - Radar da Amazônia

**RADAR** - Radio Detection and Ranging

**RAR** - Real Aperture Radar

**RIMA** - Relatório de Impacto Ambiental

**RMS** - Root Mean Square

**RMSE** - Root mean square error.

**SAR** - Synthetic Aperture Radar

**SIG** - Sistema de Informação Geográfica

**SLAR** - Side Looking Airborne Radar

**SRTM** - Shuttle Radar Topography Mission

**UNEP** - United Nations Environments Programme

## **RESUMO**

Apesar do progresso da tecnologia de segurança operacional na exploração, produção e no transporte de petróleo, os riscos de acidentes permanecem e os danos decorrentes são uma ameaça às áreas costeiras em todo mundo. Os grandes acidentes de derramamento de óleo têm sido ecologicamente desastrosos, devastando de forma indiscriminada a vida silvestre em várias partes do globo.

Os recursos naturais na Baía de Guajará (Belém-PA, Amazônia) estão ameaçados por várias atividades humanas, dentre as quais se destaca a poluição por metais pesados e esgotos domésticos que são diariamente derramados na baía. Além disso, a localização do Terminal Petroquímico de Miramar responsável pelo armazenamento dos derivados de petróleo na região de Belém, representa um risco para potenciais derramamentos de óleo a partir de navios e balsas que cruzam a baía diariamente e dos tanques de armazenamento.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise dos índices de sensibilidade ambiental (ISA) dos ambientes costeiros ao derramamento de óleo, assim como fornecer um mapa de índices de sensibilidades da área. Desta forma, os ISA foram analisados para a região a partir dos métodos propostos pela NOAA (2002) e Petrobras (2002), a fim de se desenvolver uma nova abordagem sistêmica que considere as especificidades dos ecossistemas costeiros tropicais da Amazônia.

O método para geração dos mapas de sensibilidade inclui a análise integrada dos ambientes costeiros a partir do processamento digital de imagens de sensores remotos, neste caso, imagens RADARSAT-1 Wide-1 e LANDSAT-7 ETM+, do uso de um sistema de informação geográfica (SIG) e de levantamentos de campo sobre a geomorfologia, topografia, sedimentologia e dados sócio-econômicos. Tal abordagem permitiu uma análise acurada dos (ISA) a potenciais derramamentos de óleo, destacando-se a geração de uma base de dados ambiental georeferenciada.

Como resultados, foram reconhecidas sete unidades de paisagens e ordenadas de acordo com seus ISA, em: i) Muro de arrimo - ISA 1B; ii) Falésia - ISA 3; iii) Praia - ISA 4; iv) Estruturas Artificiais - ISA 8B; v) Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; vi) Manguezal - ISA 10A; vii) Várzea - ISA 10B.

A utilização das tecnologias de sensoriamento remoto e SIG, aliada a informações de campo, mostrou ser uma combinação poderosa para a identificação da geomorfologia da área e, consequentemente, útil na hierarquização dos diferentes ISA ao derramamento de óleo nos ambientes costeiros amazônicos, a fim de priorizar áreas a serem protegidas em caso de acidente.

**Palavras-chaves:** sensoriamento remoto, mapas de ISA, monitoramento ambiental, zona costeira amazônica, Baía de Guajará, Belém-PA.

## ***ABSTRACT***

In spite of the increasing performance of operational safety technology in exploration, production and transportation of petroleum, the risk of accidents is still present and the corresponding impacts are a threat for coastal zones throughout the world. The largest oil spills in the world have been ecologically devastating due to the destruction of wildlife.

Natural resources in the Guajará Bay (Belém-PA, Amazonian) are threatened by several human activities, such as industrial pollution by heavy metals and urban effluents that are daily spilled there. In addition, the location of the Miramar petrochemistry terminal in the vicinities of Belém constitutes a risk for potential oil spills. Ships and tankers that daily cross the bay also represent an environmental threat.

The aim of this work is to carry out an environmental sensitivity index (ESI) analysis of the Amazonian coast for oil spills, and to provide an environmental sensitivity index map for the region. With this objective in mind, the ESI was analysed for the region using the method proposed for NOAA (2002) and Petrobras (2002), in order to develop a new approach that consider the uniqueness of the coastal environment of the Amazonian Region.

The method used to develop an environmental sensitivity index map considers an integrated analysis of the coastal environment and includes digital image processing of remote sensing data, in this case, RADARSAT-1 Wide-1 and LANDSAT-7 ETM+ images, as well as the use of Geographic Information System (GIS) and field surveys focusing on geomorphology, topography, sedimentology and social-economics. This approach allowed an accurate analysis of ESI for potential oil spills, based on an environmental georeferenced data base.

As a result, seven landscape units were identified, ESI corresponding to the following values: i) solid man-made structure - ESI 1B; ii) cliff - ESI 3; iii) beach - ESI 4; iv) sheltered man-made structure - ESI 8B; v) tidal mudflat - ESI 9B; vi) mangrove - ESI 10A; vii) freshwater marsh - 10B.

The use of remote sensing technologies and GIS together with the field work, proved to be a powerful combination to assess the geomorphology in the study area and therefore, to establish environmental sensibility indexes for oil spills. These procedures were helpful to define priority areas to be protected in case of oil spills.

**Keywords:** remote sensing, ESI map, environmental monitoring, Amazonian coast, Guajará Bay, Belém-PA.

## CAPÍTULO 1

### 1- INTRODUÇÃO

#### 1.1 - UM HISTÓRICO DOS DERRAMAMENTOS DE ÓLEO NO MUNDO

O aumento na segurança operacional nas atividades de exploração, produção e transporte de petróleo e derivados, que vem sendo implementado nos últimos anos pela indústria, tem diminuído os riscos de acidentes, mas ainda assim, estes têm ocorrido, e são ocasionados tanto pelo derramamento accidental, como intencional, durante os procedimentos de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros. Os danos decorrentes são, ainda, uma grave ameaça à conservação ambiental das áreas costeiras em todo mundo.

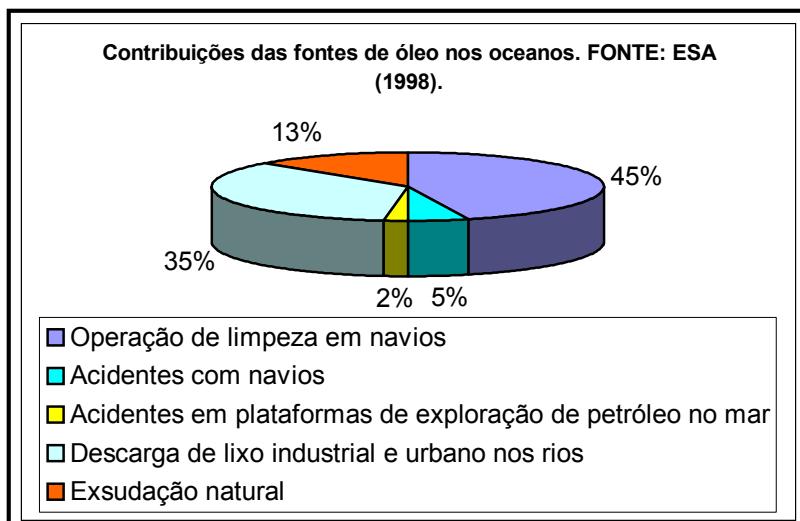
O impacto ambiental em função da introdução de poluentes no mar depende da inter-relação entre diversos fatores, tais como, volume e composição do material despejado, localização geográfica do derramamento, variáveis biológicas, oceanográficas, meteorológicas, entre outras. No caso de derramamentos de óleo, as propriedades físico-químicas do material possuem grande influência nos efeitos gerados (EPA, 1999). Assim, derramamentos em regiões de grande influência das correntes marítimas podem ser deslocados para mar aberto facilitando os processos de dispersão natural do óleo por intemperismo, enquanto que, em regiões onde esta influência é menor, como baías, canais, enseadas e estuários, estes processos são mais lentos, causando impactos e desastres ecológicos que podem durar vários anos.

Assim, o tamanho do derramamento não tem relação direta com o grau de dano causado aos ecossistemas envolvidos. Com isso, até mesmo pequenos derramamentos podem causar grandes danos a um meio ambiente ecologicamente sensível, onde exista pequena influência de correntes marítimas e, consequentemente, baixa exposição à energia das ondas e marés.

Estima-se que a quantidade de óleo derramado anualmente em todo o mundo ultrapasse 4,5 milhões de toneladas. Os maiores contribuintes para estes números são as operações de limpeza dos reservatórios dos navios petroleiros, onde o óleo é despejado ilegalmente no oceano, sendo assim responsável por aproximadamente 45% da poluição (ESA, 1998).

Apenas 5% do óleo contido no mar é atribuído diretamente a acidentes em plataformas e navios. Descargas de lixo urbano e industrial, as quais alcançam os oceanos pelos cursos dos rios, também estão entre os maiores fatores contribuintes para o aumento da poluição no mar

(European Space Agency - ESA, 1998). A **Figura 1.1** mostra as principais fontes de poluição por óleo nos oceanos.



**Figura 1.1** - Porcentagens anuais de contribuições das fontes de óleo nos oceanos. FONTE: ESA (1998).

A importância do monitoramento ambiental em áreas onde há exploração, produção e transporte de petróleo e derivados é de vital importância para conservação do meio ambiente, o que é medido pelos vários casos de derramamentos ocorridos no litoral brasileiro nos últimos anos, o que têm incentivado órgãos e entidades envolvidos nestes episódios a aperfeiçoarem cada vez mais os métodos, tanto preventivos como corretivos, para a minimização dos danos gerados por estas ocorrências. Dessa forma, a necessidade do monitoramento dessas áreas tem sido expressa pela legislação ambiental vigente (MMA, 2002; lei n.º 9.966 de 28 de abril de 2000), que exige para certificação ambiental e liberação das atividades relacionadas com a indústria do petróleo um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e um plano individual de emergência. Os mapas de índices de sensibilidade são componentes importantes do plano de emergência individual para as áreas de influência de um empreendimento petrolífero (MMA, 2002).

Um dos maiores derramamentos de óleo no mundo aconteceu em março de 1989, no Canal Prince Willian, no Alaska, onde uma ruptura no casco do navio Exxon Vandez acarretou no derramamento de aproximadamente 37 mil toneladas de óleo, causando impactos ambientais em todos os níveis nos ecossistemas envolvidos (EPA, 1999; Carvalho, 2003). Em 2002, o navio

Prestige, das Bahamas, afundou no dia 19 de novembro, a 250 quilômetros da região da Galícia, na costa da Espanha, transportando 10 mil toneladas de óleo combustível.

No Brasil, os maiores acidentes registrados envolveram os navios, Takimyia Maru, em 1974, com 6.000 toneladas vazadas, Brazilian Marina, em 1978, com também 6.000 toneladas, Marina, em 1985, com 2.500 toneladas de óleo derramados no canal de São Sebastião (SP), e Tarik Ibn Ziyad, na Baía de Guanabara (RJ), com 6.000 toneladas (Poffo<sup>1</sup>, *et al.*, 1997, *apud* Kampel & Amaral, 2001). Em 2000, mais de 1.300 m<sup>3</sup> de óleo combustível vazaram, quando da ruptura de um dos dutos de transferência da refinaria Duque de Caxias (REDUC), na Baía de Guanabara (Bentz & Miranda, 2001). Em 16 de julho de 2000, um oleoduto da Petrobras rompeu-se na refinaria Presidente Getúlio Vargas e foram derramados 3,785 milhões de litros de óleo cru no Rio Barigüe (Carvalho, 2003). Em 2001, a balsa “Miss Rondônia” afundou no Rio Pará, nas proximidades do Porto de Vila do Conde (PA), carregada com aproximadamente 1.900 toneladas de óleo do tipo A1 (Berredo *et al.*, 2001).

Os acidentes nas refinarias de Duque de Caxias e Presidente Getúlio Vargas, acima reportados, foram responsáveis por uma mudança de direcionamento na política de segurança e meio ambiente nas companhias de petróleo no Brasil, principalmente na Petrobras, em função das pesadas multas e indenizações aplicadas quando da ocasião destes derramamentos. Essa mudança tem elevado os investimentos em ações objetivando a redução de emissões, resíduos e efluentes, bem como, o aprimoramento das ferramentas de prevenção e controle. Tal postura tem aproximado, cada vez mais, o objetivo das companhias petrolíferas com os anseios da sociedade por ações socialmente e ambientalmente responsáveis.

## 1.2 - NECESSIDADE DE GERAÇÃO DE CARTAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO

Dentro destas perspectivas, os mapas de sensibilidade que vêm sendo utilizados desde a década de 70, quando pela primeira vez foram desenvolvidos para a Baía Lower Cook, Alaska (Michel *et al.*, 1978; Gundlach e Hayes, 1978), representam uma importante ferramenta técnico-gerencial para priorização dos ambientes a serem protegidos. Este método fornece as informações

---

<sup>1</sup> POFFO, I.R.; NAKASAKI, A.; AVVENTURATO, H.; MEYER, J.F.C.A.; CANTÃO, R.F. 1997. Estudo dos deslocamentos de manchas de óleo no canal de São Sebastião-SP, como instrumento para planejamento de operações emergenciais. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO SOBRE CIÊNCIAS DO MAR, 7, Santos. *Proceedings...* IOUSP/ALICMAR: pp. 306-307.

em formato de fácil leitura e compreensão, sendo útil para subsidiar tomadas de decisões sobre a determinação de prioridades de proteção dos ambientes de maior sensibilidade a derramamentos de óleo.

O Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) é uma hierarquização de sensibilidades relativas de vários ambientes costeiros, estuarinos e fluviais, considerando a interação do óleo com as comunidades biológicas e as características geomorfológicas e sedimentares dos referidos ambientes (Jensen *et al.*, 1993). De forma cartográfica, o mapeamento de diferentes ISA a derramamentos de óleo torna possível o planejamento de formas de combate aos acidentes, visando à mitigação dos danos gerados (Abdel-Kader *et al.*, 1998).

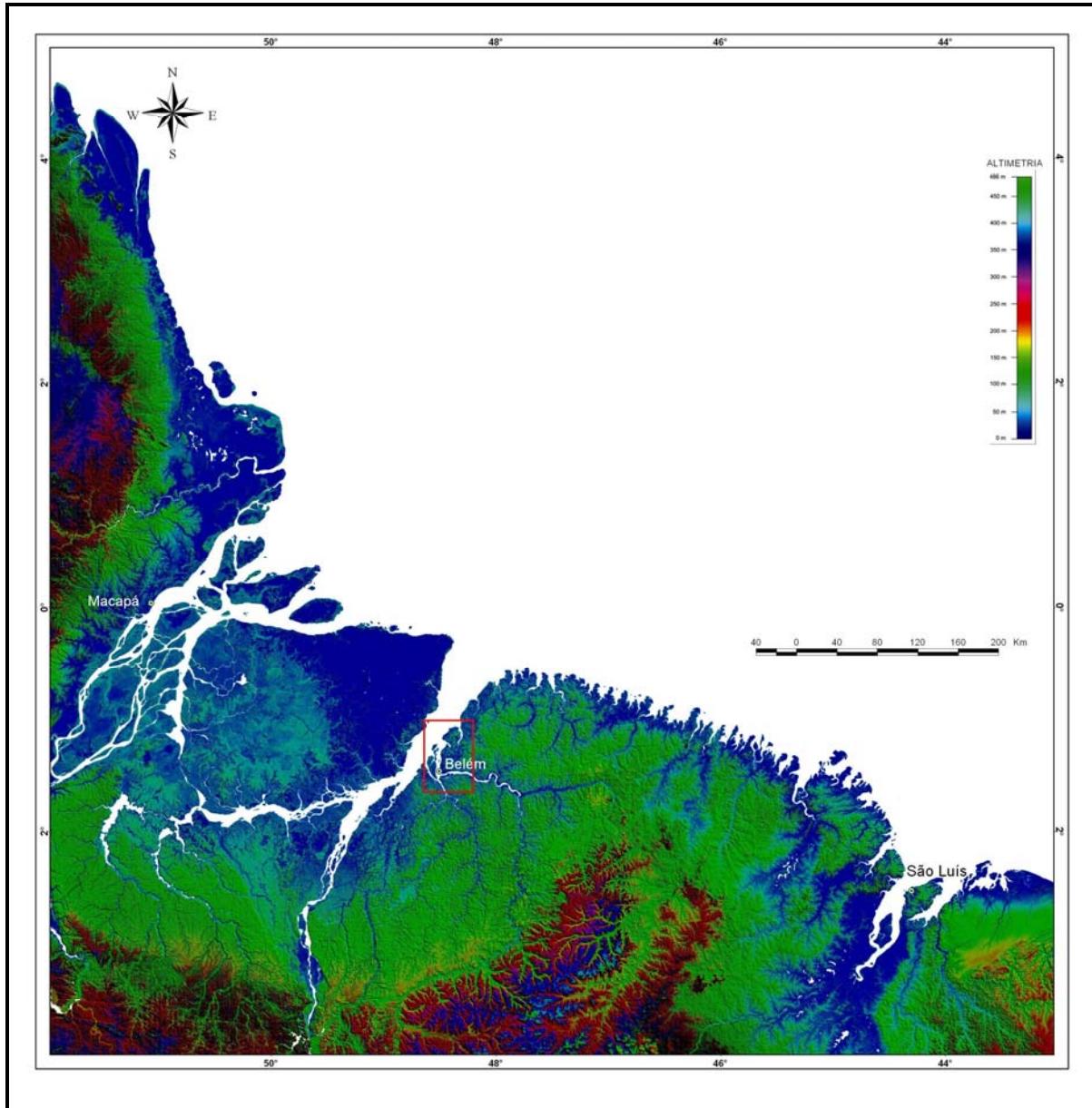
Mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo possibilitam a tomada de decisão mais abalizada por parte das diferentes partes envolvidas, em consonância com as características e processos ambientais dos ecossistemas envolvidos. Ao mesmo tempo, fornecem subsídios que possibilitam minimizar os impactos de um evento de derramamento de óleo, adquirindo informações básicas para o gerenciamento dos recursos naturais, e que possibilitarão ações de valoração e recuperação ambiental. Para definição dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de petróleo e derivados serão utilizados os métodos da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, 2002) e Petrobras (2002).

### 1.3 - A COSTA AMAZÔNICA: O PAPEL DO SENSORIAMENTO REMOTO NA OBSERVAÇÃO E MONITORAMENTO COSTEIRO

A utilização das tecnologias de sensoriamento remoto e de sistemas de informação geográfica (SIG) pode auxiliar grandemente na elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, principalmente em áreas de difícil acesso ou com base cartográfica desatualizada ou inexistente, o que comumente ocorre na Amazônia.

A área em estudo está situada na zona costeira da Amazônia brasileira, que constitui a maior e mais bem preservada região tropical úmida do planeta (**Figura 1.2**). Assim, a costa amazônica, localizada no norte do Brasil, abrange os estados do Amapá, Pará e Maranhão, onde um dos principais processos condicionantes da dinâmica ambiental é a energia das marés e descarga fluvial. Dentro disso, a região da Baía de Guajará é tipicamente uma região flúvio-estuarina, estando situada em um domínio transicional, dominado por mesomaré, com variação máxima de 3,8 m. Na costa amazônica, quando ocorre a ação das marés mais altas, as áreas

inundáveis, tais como, manguezais, pântanos e várzeas, alcançam aproximadamente 80 km de extensão.



**Figura 1.2** - Zona costeira Amazônica, vista a partir de um modelo digital de elevação (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*), mostrando em destaque a área em estudo (Belém).

A utilização de dados de sensores remotos orbitais, em função da rapidez, precisão e periodicidade de obtenção, permite a produção de mapas atualizados, e em escala adequada, com maior rapidez, acurácia e menor custo. Ademais, a visão sinóptica obtida com esses sensores

propicia o melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros tropicais amazônicos, bem como suas inter-relações (Souza Filho & Paradella, 2002). Ademais, para o monitoramento dos processos costeiros e o entendimento de suas rápidas variações, é necessária a obtenção de dados com elevada resolução temporal, ou seja, alta freqüência e repetitividade de aquisição. Tais dados de sensores remotos orbitais são uma excelente alternativa para essa finalidade (Vrieling & Van der Sanden, 2000).

Os modernos sensores remotos orbitais com altíssima resolução espacial, como a dos satélites Quickbird com 0.8m de resolução, Ikonos com 1.0 m, SPOT-5 com 2.5m e o LANDSAT-7 ETM+ com 15m no modo pancromático, são fontes de informações valiosas para o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. Além disso, sistemas multi e hiperespectrais (MODIS, ASTER, AVIRIS) permitem discriminar alvos com média a alta resolução espectral, possibilitando uma melhor discriminação e identificação da assinatura espectral. Dessa forma, o monitoramento das zonas costeiras pode ser executado com a utilização de dados de sensores remotos operacionais nas faixas óptica e infravermelha do espectro eletromagnético, bem como na região das microondas (Cracknell, 1999).

No entanto, nas regiões costeiras tropicais, notadamente na Amazônia, a permanente cobertura de nuvens é um obstáculo para a utilização de sensores que operam na faixa do espectro eletromagnético referente ao visível e infravermelho, abrindo um espaço que tem sido preenchido pela utilização de sensores remotos ativos (radares imageadores), que possuem fonte de energia própria e operam na faixa das microondas (RADARSAT-1, JERS-1, ERS-1, ERS-2).

Nos últimos 15 anos, os radares de abertura sintética (SAR) vêm sendo amplamente utilizados no monitoramento da zona costeira, principalmente em ambientes tropicais úmidos (Singhroy, 1996; Barbosa *et al.*, 1999; Kushwaha *et al.*, 2000; Souza Filho, 2000). A versatilidade do imageamento nas microondas é expressa entre outras coisas, pela capacidade de penetração em nuvens e chuvas (para comprimentos de onda maiores que 4 cm), condições climáticas que são comuns nos ambientes tropicais amazônicos. Além disso, possuem iluminação independente da fonte solar, possibilitando a obtenção de dados nas mais diversas condições climáticas (Vrieling & Van der Sanden, 2000). Estas características são especialmente importantes para regiões tropicais, onde os sensores ópticos sofrem grandes restrições devido à grande probabilidade de cobertura de nuvens (Dutra *et al.*, 2003).

Uma tendência atual dos estudos geomorfológicos envolvendo dados de sensores remotos,

é a extração de informações complementares de diferentes regiões do espectro eletromagnético, em detrimento da obtenção da informação de cada região em separado, valendo-se do sinergismo conseguido com a integração destes dados. Assim, aspectos complementares de diferentes faixas do espectro (microondas, infravermelho e visível) são integrados em uma imagem, gerando um produto híbrido com qualidade superior para extração de atributos para o mapeamento da zona costeira (Singhroy, 1996; Ramsey III *et al.*, 1998; Souza Filho & Paradella, 2002; Souza Filho & Paradella, 2003).

#### 1.4 - O PAPEL DAS COMPANHIAS DE PETRÓLEO NA DEFESA SÓCIO-AMBIENTAL DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

A indústria petrolífera no mundo desempenha importante papel no crescimento de um país, uma vez que os padrões de produção e consumo de energia estão diretamente relacionados à riqueza das sociedades, tendo uma relação direta ao grau de desenvolvimento industrial e tecnológico de uma nação. Durante o século XX, chamado de século do petróleo, houve uma intensa procura por combustíveis fósseis (carvão mineral e petróleo), acarretando em um desenvolvimento econômico e tecnológico sem precedentes na história da humanidade (Carlos, 2001).

A outra dimensão desse processo diz respeito aos efeitos ambientais, o que é expresso pelo aumento do efeito estufa, com o consequente estabelecimento de diversos tratados internacionais de controle ambiental e de emissão de gases na atmosfera (Rio 92, Protocolo de Kioto, Agenda 21), bem como pela poluição dos mares e oceanos (Carlos, 2001).

Modernamente a indústria petrolífera tem demonstrado maior consciência do seu papel frente ao desenvolvimento sustentável, buscando se adequar às rígidas leis ambientais vigentes. Dessa forma, o desenvolvimento econômico e o meio-ambiente têm se mostrado antagônicos, porém não excludentes, e o papel das tecnologias no monitoramento ambiental tem sido de grande importância, notadamente o sensoriamento remoto, dada a visão sinóptica e a alta repetitividade de aquisição de dados dos modernos sensores, bem como a capacidade de imageamento nas mais adversas condições atmosféricas, o que é extremamente útil durante situações emergências (Hess *et al.*, 1995).

Assim, a possibilidade de monitoramento sistemático de uma área, em uma escala temporal de pequeno e médio período, permite medir a evolução e o direcionamento de um

problema ambiental, e é também um pré-requisito para um melhor gerenciamento costeiro integrado (Vrieling & Van der Sanden, 2000).

A lei n.º 9.966 de 28 de abril de 2000, delega ao MMA (Ministério do Meio Ambiente) a responsabilidade pela identificação e direcionamento do mapeamento de áreas sensíveis, em regiões onde há atividades relacionadas com a indústria do petróleo, objetivando a gestão e o proteção dessas áreas sensíveis a derramamentos de óleo.

A resolução n.º293 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), de 12 de dezembro de 2001, dispõe e orienta sobre a elaboração de Planos de Emergência para incidentes de poluição por óleo, em portos, terminais, dutos, plataformas, em função da necessidade de serem estabelecidas estratégias de prevenção e gestão de impactos ambientais gerados por derramamentos, entendendo-se incidente como qualquer descarga de óleo, decorrente de ação intencional ou acidental que ocasiona dano ou risco ao meio ambiente ou à saúde humana. Ademais, dependendo da legislação ambiental vigente, eventos de poluição podem acarretar em elevadas multas e as indenizações pelos danos podem chegar a valores elevados.

A gestão de segurança e meio ambiente, aprimorando a prevenção e o controle de acidentes durante suas atividades, tem sido o grande desafio estratégico das grandes companhias de petróleo no mundo, buscando assim, adequar seus procedimentos às rígidas leis ambientais (<http://www.petrobras.com.br/>).

Dessa forma, as companhias de petróleo têm se antecipado nesse cenário e investido vultosas quantias na elaboração de programas voltados para gestão ambiental e segurança operacional. Assim, foi criado na Petrobras um grande programa ambiental e de segurança operacional, chamado Programa de Excelência em Gestão Ambiental e Segurança Operacional (PEGASO), que recebeu investimentos na ordem de R\$ 6,2 bilhões em quatro anos, segundo a Revista Petro & Química, edição 259/ abril 2004 ([www.petroequimica.com.br](http://www.petroequimica.com.br)).

Ademais, essa companhia vem firmando acordos com instituições acadêmicas, organizações não-governamentais, órgãos federais, estaduais e municipais. Esse tipo de relacionamento, empresa e sociedade organizada, é salutar para o desenvolvimento de ferramentas de gestão e monitoramento ambiental das zonas costeiras, principalmente na região amazônica, onde a dimensão e complexidade dos processos requerem a junção de esforços visando uma ação eficiente e integrada, buscando um melhor entendimento e proteção destes

ambientes. Esse tipo de ação pode ser vista através dos projetos Cognitus, PIATAM e PIATAM mar (Cunha *et al.*, 2004).

### 1.5 - OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a potencialidade das imagens RADARSAT-1 W1, como alternativa operacional para o mapeamento de áreas inundáveis em regiões estuarinas amazônicas, bem como a potencialidade da integração digital de dados multisensores, nas microondas (RADARSAT-1) e óptico (LANDSAT-7), objetivando o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo nos ambientes estuarinos amazônicos e, dessa forma, contribuir para o gerenciamento costeiro integrado dessa região, visando seu desenvolvimento sustentável.

Tal mapa possibilita a tomada de decisão mais abalizada por parte das diferentes partes envolvidas, em consonância com as características e processos ambientais dos ecossistemas envolvidos. Ao mesmo tempo, fornece subsídios que possibilitem minimizar os impactos em um evento de derramamento de óleo, adquirindo informações básicas para o gerenciamento dos recursos naturais, e que possibilitarão ações de valoração e recuperação ambiental. Para definição dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de petróleo e derivados serão utilizados os métodos da NOAA (2002) e Petrobras (2002).

Com esse intuito, foram determinados alguns objetivos específicos: i) caracterizar o cenário geomorfológico regional da região da Baía de Guajará; ii) reconhecer padrões da morfologia submersa dos canais fluviais, em baixas profundidades, a partir de dados de sensores remotos nas microondas em duas condições de maré, alta e baixa, o que é possível quando essas feições são refletidas na superfície da água, em função de sua rugosidade; iii) avaliar a efetividade das técnicas de realce e integração digital de imagens de sensores remotos, microondas e óptico, para a caracterização dos ambientes estuarinos da Baía de Guajará; iv) avaliar o comportamento das imagens RADARSAT-1 W1 (adquiridas em diferentes condições de maré, alta e baixa), em função dos valores de coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ , também denominado de sigma zero ou *sigma nought*), relacionados ao conteúdo de umidade, que é controlado pelo aumento do nível d'água dos rios e a precipitação, bem como a sua influência nos solos e vegetação e, consequentemente, mapear a influência e extensão das áreas inundáveis

(região de várzea), pela resposta do radar; v) gerar mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na zona costeira amazônica.

## CAPÍTULO 2

### 2 - ÁREA DE ESTUDO

#### 2.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A Baía de Guajará localiza-se (Lat. 01° 28'03'' S, Long. 48° 29'18'' W) numa região flúvio-estuarina, parte integrante de um sistema maior, o Golfão Marajoara, situado na foz do Rio Amazonas. O Estuário Guajá é caracterizado como um ambiente fluvial com influências marinhas, e forma-se na confluência dos rios Pará, Acará e Guamá, este último limita a área pelo sul, dando origem à Baía de Guajará, que ao norte confunde-se com a Baía de Marajó, no Rio Pará (**Figura 2.1**).

A área é composta de uma parte continental e uma região insular separadas por inúmeros rios, furos, igarapés e canais de maré. O clima na região é quente, com temperaturas médias em torno de 25- 26 °C, com umidade relativa do ar quase sempre superior a 80% e precipitação anual de aproximadamente de 2.300mm (DNMET, 1992). Nesta região, são encontradas as várzeas do estuário amazônico, apresentando topografia plana e baixa, sujeitas a inundações diárias pela variação das marés, que na região de Belém chega a 3.5 m (Lima<sup>1</sup>, 1956, *apud* Arima *et al.*, 1998).

Segundo Miranda *et al.* (2002), estuários são ambientes de transição entre o continente e o oceano, onde ocorre o encontro das águas dos rios com as águas do mar, e a consequente diluição da água salgada. De forma geral, as águas estuarinas são biologicamente mais produtivas que as águas do rio e do oceano adjacente, em função dos processos relacionados com a circulação hidrodinâmica, que aprisionam os elementos, aumentando a produtividade primária nesses ambientes.

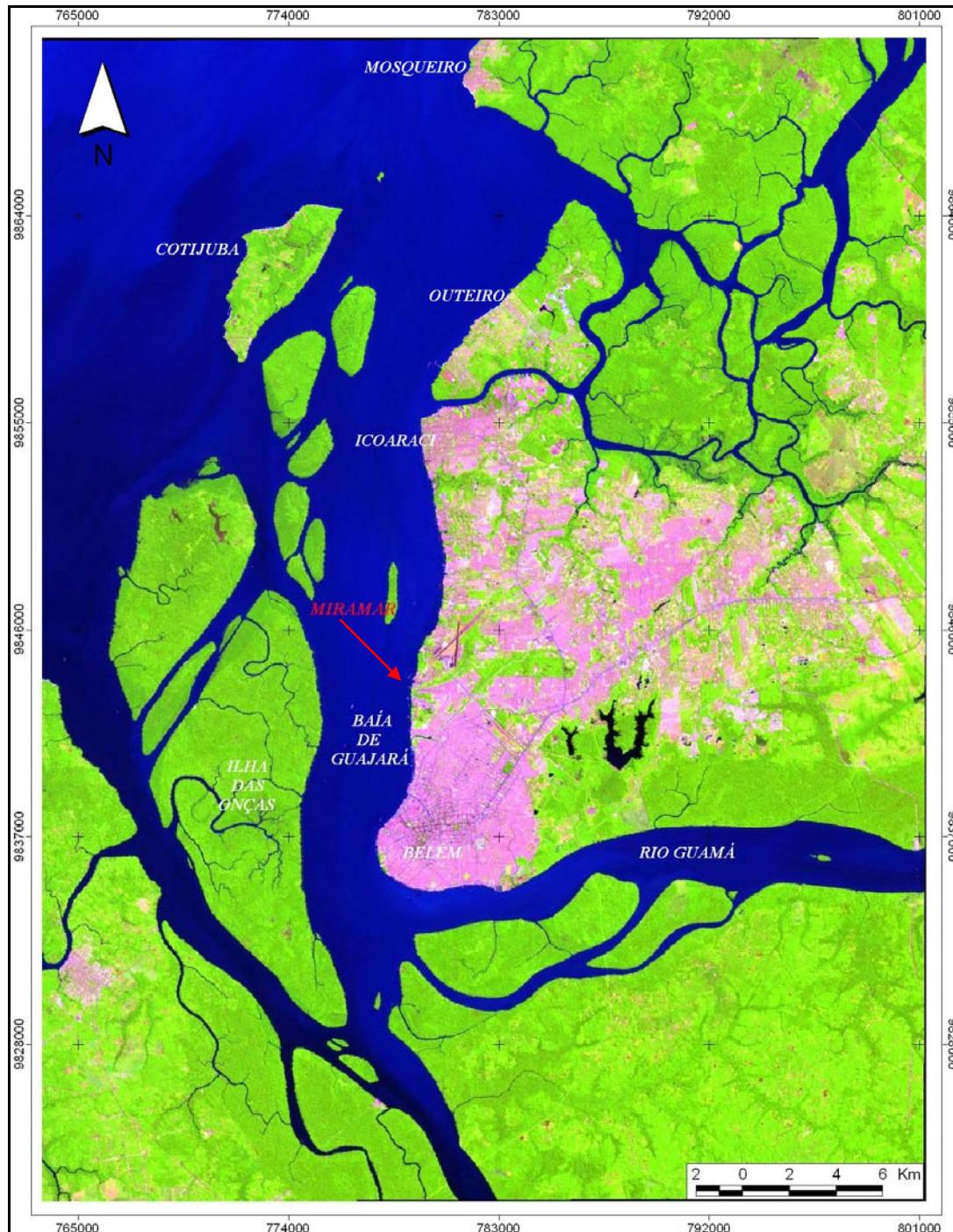
O termo zona estuarina foi usado pelo *Geophysics Study Committe*<sup>2</sup> (1977, *apud* Miranda *et al.*, 2002), abrangendo uma maior variedade de ambientes costeiros de transição, tais como baías, lagunas costeiras, canais, deltas, áreas inundadas pela maré e áreas costeiras entre marés.

---

<sup>1</sup> LIMA, R.R. 1956. *A agricultura nas várzeas do estuário do Amazonas*, Instituto agronômico do Norte, Belém. (Boletim Técnico 3).

<sup>2</sup> GEOPHYSICS STUDY COMMITTEE. 1977. *Overview and recommendations*, Estuaries, geophysics and the environment. Washington, National Academy of Sciences, 61p.

Os processos nestes ambientes são controlados principalmente pela interação entre a dinâmica das marés e descarga fluvial.



**Figura 2.1** - Localização da área de estudo (Imagem LANDSAT-7 ETM +, 5R 4G 3B), mostrando as principais cidades na região de Belém, destacando a localização do Terminal Petroquímico de Miramar.

Aproximadamente 60% das grandes cidades se desenvolveram em torno de estuários, e a introdução de poluentes nestes ambientes pode acarretar na sua contaminação, com efeitos nocivos para os recursos vivos e dificuldade para as atividades marinhas e pesca, com redução significativa de seus atrativos naturais (Miranda *et al.*, 2002).

Dessa forma, a Baía de Guajará está localizada em frente à parte noroeste da cidade de Belém e prolonga-se até próximo da ilha de Mosqueiro. Numerosas ilhas e canais compõem a margem esquerda da Baía, sobressaindo-se a Ilha das Onças, Jararaca, Mirim, Paquetá-Açu e Jutuba. Ao longo da margem direita, segue-se a cidade de Belém e, mais a norte, separadas pelos "furos" do Maguari e das Marinhas, as Ilhas do Outeiro e do Mosqueiro, respectivamente.

Na Baía de Guajará, concentram-se indústrias e importantes núcleos habitacionais da região metropolitana de Belém. Esta área é constituída por ambientes de elevada sensibilidade ao derramamento de óleo, representados por várzeas e rios, que são utilizados pela população local como fonte de subsistência alimentar e econômica, destacando-se o aproveitamento dos recursos hídricos pelo sistema de captação de água potável que abastece a cidade de Belém. Assim, a Baía de Guajará esteve submetida e continua envolvida em um processo, talvez lento, mas bastante antigo de degradação ambiental, que nas últimas décadas vem sendo acelerado em função da expansão urbana e das atividades industriais e portuárias.

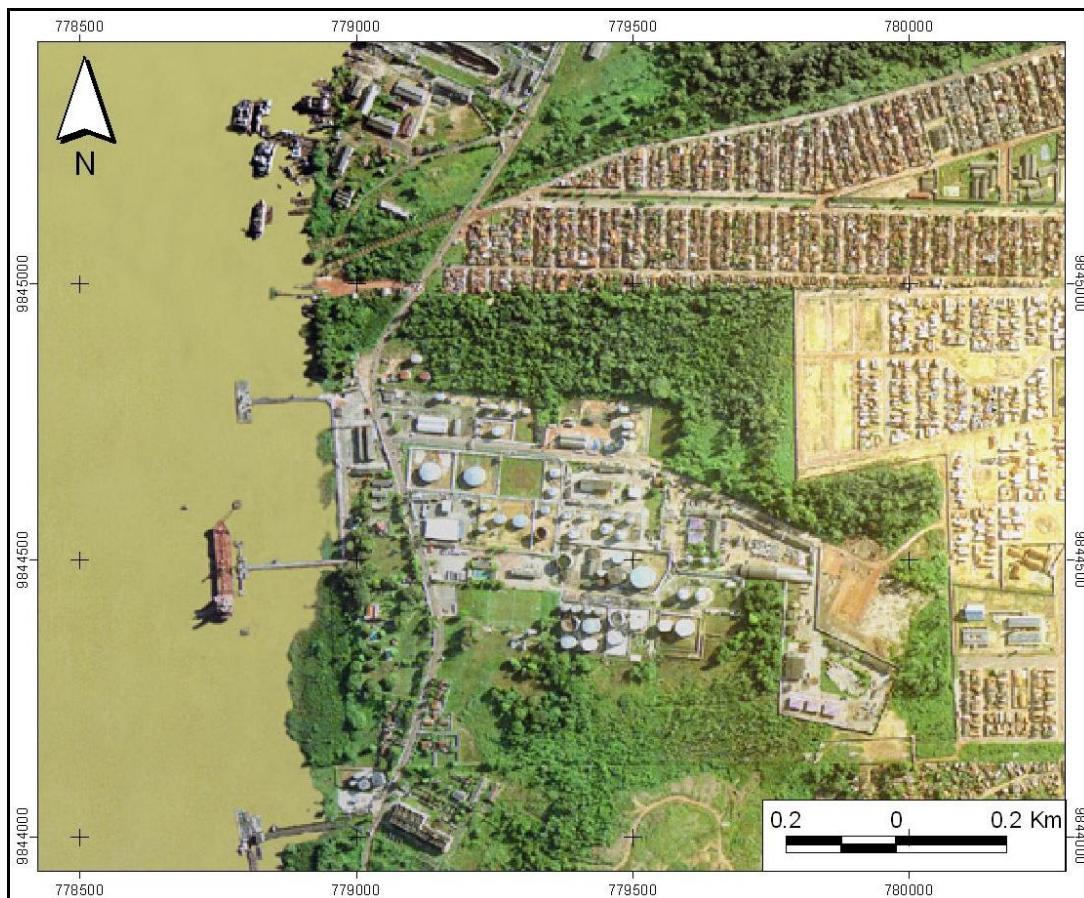
Assim, dentre as áreas com grande atividade de transporte de derivados de petróleo na Região Amazônica, destaca-se o Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR), situado na Baía de Guajará, que é fonte potencial para derramamentos de derivados de petróleo, portanto passivo de risco ambiental.

### **2.1.2 - Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (MIRAMAR)**

O terminal petroquímico Nicolau Bentes Gomes, conhecido como terminal de MIRAMAR, está localizado na margem direita da baía de Guajará, a uma distância de aproximadamente 5 km do Porto de Belém. O calado de seu porto é de 7,92m. (**Figura 2.2**).

São predominantemente transportados no Terminal, óleo diesel, GLP (gás de cozinha), querosene para avião, gasolina comum e mistura MF-380. O tráfego de embarcações em MIRAMAR, no ano de 2001, foi de 366 navios, movimentando 442.302 toneladas de produtos (informativo CDP, maio/2002). A maior parte destes produtos abastece a Região Metropolitana de Belém e parte do interior do Estado do Pará.

No Terminal, encontram-se as instalações das diversas companhias distribuidoras, com 92 tanques com capacidade para 206.847m<sup>3</sup> de produtos, sendo o movimento processado através de dutos.



**Figura 2.2 - Localização do Terminal Petroquímico de MIRAMAR. (Ortofoto CODEM, 1998).**

Os píeres possuem mecanismo de combate a incêndios e o Terminal conta, ainda, com veículos especializados nessa tarefa, além da estrutura montada pelas Companhias para a segurança de toda a região. Neste sentido, foi inaugurado em junho de 2002 o Centro de Defesa Ambiental da Amazônia (CDA), Base Belém, localizado no Terminal Petroquímico de Miramar, construído em parceria entre a Companhia Docas do Pará (CDP) e Petrobrás, e operado pela empresa Alpina Briggs.

## 2.2 – GEOLOGIA

Segundo Pinheiro (1987), a distribuição dos tipos texturais no leito da Baía de Guajará apresenta-se compatível com os padrões hidrodinâmicos verificados. Em locais com correntes moderadas, ocorrem areias finas a médias muitas vezes misturadas com silte e/ou argila. Nas bordas de algumas ilhas estuarinas, ocorrem areias com diâmetros médios podendo ultrapassar 0,25mm, enquanto que, nas margens baixas espraiadas, protegidas das correntes, distribuem-se sedimentos essencialmente pelíticos. Pode-se individualizar duas fácies principais: A Fácie Lamosa e a Fácie Arenosa. Portanto, os sedimentos Holocênicos que preenchem a calha estuarina são predominantemente arenosos, variando de selecionados a bem selecionados, por vezes siltosos. A distribuição destas Fácies texturais aparentemente oscila em função da periodicidade das marés.

Para a geologia das margens flúvio-estuarinas, assume-se uma coluna estratigráfica para a região de Belém e adjacências, onde a cerca de 100-120 m da superfície encontram-se sedimentos Oligo-Miocênicos atribuídos à Formação Pirabas. Sobrepostos, em profundidades entre 100-150m encontram-se sedimentos Terciários correlacionáveis ao Grupo Barreiras. Em seguida, já no Quaternário, estaria repousando uma Unidade atribuída ao Pleistoceno / Holoceno Médio-Inferior, que poderia ser correlacionada aos "Sedimentos Pós-Barreiras". Finalmente, no topo da seção, estariam os sedimentos recentes. Estas Unidades estratigráficas estariam estruturadas de modo interdigitado, não apresentando aparentemente grande continuidade lateral (Pará, 1995).

A alta energia hidráulica do estuário ocasiona não apenas mudanças na fisiografia regional, bem como no próprio relevo da calha estuarina, que está sujeito a modificações periódicas relativamente rápidas.

## 2.3 - GEOMORFOLOGIA

Segundo Pará (1995), há três regiões geomorfológicas na área estudada: a Região de Terra Firme, a Região da Várzea e a Região das Áreas Urbanas, em ordem decrescente de área.

A configuração atual da paisagem regional tem seus regimes condicionados ao fluxo e refluxo das marés e, por conseguinte, o processo de agradação e degradação da paisagem também tem grande relacionamento com esta energia marinha. A energia das marés é o principal elemento transportador da cobertura aluvionar que preenche a planície por inundação das margens, vindo a constituir a Região das Várzeas.

O quadro natural que compõem a paisagem regional, portanto, encontra-se representado pela Região de Terra Firme e Região das Várzeas, com características gerais que desempenharam um importante papel no processo de organização sócio-econômica da região, seja como produtoras de incontáveis bens de interesse econômico, seja como elementos que compõem as áreas de fronteira de ocupação.

### **2.3.1 - Região das Várzeas**

Nesta região, são denominadas as Várzeas do Rio Guamá e Várzeas do Estuário Guajarino, que se diferenciam tanto pelo posicionamento fisiográfico quanto pela florística e estágio evolutivo da cobertura vegetal no estuário. Há, ainda, os Manguezais, que diferem em muitos aspectos dos demais sistemas, sendo enquadrado na Região das Várzeas por estarem situados nas áreas inundáveis e, principalmente, por ocorrerem com distribuição espacial bastante restrita, dificultando um tratamento diferenciado para esse importante ecossistema (Pará, 1995).

A dinâmica da Região das Várzeas deve-se, em grande parte, às condições hidrodinâmicas do canal, as quais se relacionam diretamente com o comportamento das marés, sob cuja influência se processa a inundação periódica das margens dos cursos das águas que conformam a hidrografia regional.

No tocante aos Manguezais, caracterizam um ecossistema recente com alta produtividade biológica. Possuem vegetação típica com espécies adaptadas para se estabelecerem e sobreviverem em substrato periodicamente inundado por água salobra. Ocorrem em áreas de deposição recentes, de influência flúvio-marinha, com o fluxo e o refluxo das marés.

As inundações diárias, ocasionadas pela elevação da maré, pela água das chuvas ou por ambas, depositam uma sucessão de argilas ricas em matéria orgânica. Dessa forma, além dessas argilas que são comuns nos elementos de drenagem da área, existem as acumulações arenosas ao longo das praias, principalmente em Outeiro, Mosqueiro e Cotijuba, relacionadas ao desgaste das falésias, em função da ação de ondas. Essas areias apresentam granulometria média a grossa e são ricas em quartzo e minerais pesados (El-Robrini, 2001).

### 2.3.2 - A Região de Terra Firme

A região da terra firme corresponde às áreas de ocorrência do Pediplano Neo-Pleistocênico, representado na área pela unidade geomorfológica do Planalto Rebaixado da Amazônia. Esta unidade é esculpida em litologias plio-pleistocênicas do Grupo Barreiras, em geral lateritizadas, e em coberturas detriticas aluvio-coluviais neo-pleistocênicas (Pará, 1995).

Na quase totalidade, o pediplano mostra-se conservado e modelado em extensos tabuleiros, inumado por cobertura detritica pouco espessa, apresentando uma drenagem pouco desenvolvida, formada por vales de fundo chato controlados tectonicamente. Em outros locais, como nas proximidades da maioria dos drenos, o pediplano já denota um processo de retomada de erosão, responsável pela remoção da cobertura detritica (pedimentos), com a consequente exposição do Grupo Barreiras.

Essas exposições do Grupo Barreiras mostram um evidente controle topográfico sem caracterizar um controle altimétrico, aparecendo somente onde foi removida a cobertura detritica superposta ou nas restritas áreas dissecadas do pediplano.

A base da seqüência aflorante é constituída por um argilito branco, caulínico e de estrutura maciça. Este argilito, em decorrência da alteração laterítica, apresenta-se sob diversos aspectos. Em geral, adquire manchas avermelhadas ou amareladas de material ferruginoso, aparecendo em maior quantidade próximo ao topo da seqüência.

### 2.4 - VEGETAÇÃO

A vegetação das margens flúvio-estuarinas é condicionada aos fatores geomorfológicos, distinguindo-se, predominantemente, três tipos: 1) vegetação de várzea, típica de áreas inundáveis, sob controle periódico das marés; 2) vegetação de floresta densa associada aos terrenos mais elevados ditos de terra firme; 3) florestas secundárias, associadas às áreas desmatadas, ocupando uma apreciável distribuição na região (Pinheiro, 1987).

A vegetação de várzea domina cerca de 60% da área e está intimamente relacionada aos processos de colmatação natural provocada pelas inundações nos períodos de enchente, em consequência da elevada concentração de material sólido em suspensão das águas estuárias.

Outro importante aspecto a ser abordado diz respeito à Região das Várzeas onde a vegetação primária foi destruída. Na área investigada, este tipo de vegetação secundária encontra-se em amplo desenvolvimento, especialmente nas adjacências dos sítios urbanos.

## 2.5 - CLIMA

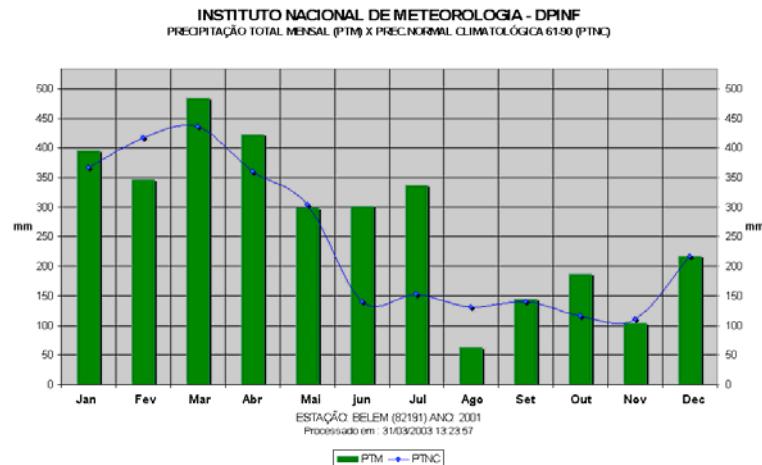
Na área metropolitana de Belém, o clima caracteriza-se por uma isotermia com amplitudes térmicas menores que 2°C, sendo estes valores calculados com base nas temperaturas médias dos meses mais quentes e mais frios (Penteado<sup>3</sup>, 1968, *apud* Pinheiro, 1987). Desta forma, nas horas de maior insolação (turno vespertino), podem-se registrar temperaturas acima de 30°C, enquanto que, pela madrugada, estas comumente baixam para 23- 24°C.

Quanto às condições atmosféricas, não existe uma repartição muito uniforme das chuvas durante o ano, com uma sensível diminuição mensal das precipitações a partir do mês de Março, geralmente atingindo índices mínimos por volta de Agosto. As **Figuras 2.3 A e 2.3 B** mostram os índices de precipitação, durante os anos de 2001 e 2003 respectivamente, períodos de aquisição dos dados de sensores remotos usados nesta Dissertação.

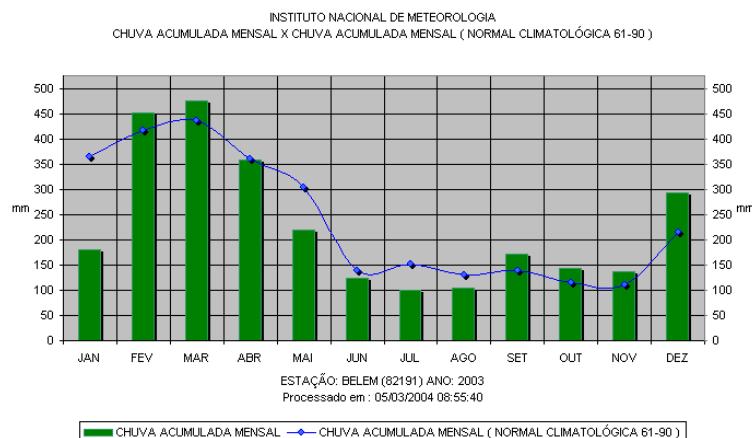
O regime das chuvas exerce uma grande influência sobre os rios da região, interferindo particularmente na Baía de Guajará. Dados obtidos da vazão do Rio Guamá mostraram que os valores de vazão oscilaram consideravelmente, com os máximos ocorrendo nos meses de Março, Abril e Maio, coincidindo com o período do final da estação chuvosa na região. O contraste decorrente dos diferentes níveis de chuva, relativo aos períodos "chuvosos" e "menos chuvosos", propicia modificações sazonais das condições fisico-químicas das águas estuarinas, valores médios de pH, concentração de O<sub>2</sub>, concentração do material em suspensão e da condutividade elétrica.

---

<sup>3</sup> PENTEADO, A.R. 1968. *Belém do Pará, Estudo da geografia urbana*, Universidade de São Paulo (Fac. de filosofia, Ciencias e Letras), 183 p. (Coleção Amazônia, Série José Verissímo).



(A)



(B)

**Figura 2.3** - Variação dos índices de precipitação para Região Metropolitana de Belém. (A) ano de 2001, correspondente à aquisição da imagem LANDSAT-7 ETM+ usada neste trabalho; (B) ano de 2003, correspondente à aquisição das imagens RADARSAT-1 Wide 1. Fonte: INMET.

## 2.6 - DINÂMICA ESTUARINA

Segundo Pritchard (1967), a circulação, os processos de mistura e estratificação de salinidade no estuário dependem de sua geometria, da descarga de água doce, maré, salinidade, circulação da região oceânica adjacente e do vento atuando remota ou diretamente. A interação

dessas propriedades e processos produz a distribuição de salinidade, que é característica de cada estuário (Officer<sup>4</sup>, 1983, *apud*, Miranda *et al.*, 2002).

Kjerfve<sup>5</sup> (1987, *apud* Miranda *et al.*, 2002) considerou os fatores climáticos, a sedimentação recente e as forças dinâmicas como os principais agentes responsáveis pela formação dos estuários, bem como por sua diversidade geomorfológica e fisiográfica, dividindo o estuário em: Zona de Maré de Rio – parte fluvial com salinidade muito baixa; Zona de Mistura – onde há a mistura da água doce continental com a água salgada do mar; Zona Costeira – que se estende até a frente da pluma estuarina (região de máxima influência fluvial).

Os limites entre as diferentes zonas são dinâmicos e apresentam variação espacial e temporal em diferentes escalas, podendo ser, de um ciclo de maré, sazonal, anual e de longo período, e controlados pela inter-relação de diferentes forças, tais como, descarga fluvial, altura da maré, vento e circulação na região costeira adjacente (Miranda *et al.*, 2002).

Sena & Mesquita (2004) têm desenvolvido um projeto de modelagem hidrodinâmica da Baía de Guajará usando o método de elementos finitos, a partir de cartas náuticas da DHN (batimetria) e de dados correntométricos obtidos por Pinheiro (1987). Ademais, a próxima etapa do projeto incluirá a fase de calibração e validação do modelo gerado com dados medidos em campo, tais como: variação de maré; correntes, batimetria e velocidade de ventos. Essa pesquisa é importante, pois contribui para o conhecimento da hidrodinâmica na Baía, sendo útil para subsidiar estudos sobre a dinâmica de transporte de poluentes e de sedimentos.

### 2.6.1 - Aspectos oceanográficos

Estudos batimétricos para o estuário revelaram a presença de três zonas morfológicas distintas quanto a suas feições principais: Alto Fundo da Baía, Zona do Canal Principal e Barra do Guajará-Açu (Pinheiro, 1987).

O alto fundo da Baía pode ser definido a partir de profundidades menores que 10m, que se distribuem contornando toda a borda leste da Baía de Guajará, abrangendo uma área limitada a um raio de cerca de 2-3 km distante da cidade de Belém e adentrando no Rio Guamá,

---

<sup>4</sup> OFFICER, C.B. 1983. Physics of estuarine circulation. In: KETCHUM, B.H. *estuaries and enclosed seas*. Amsterdam, Elsevier, 26:15-41. (Ecosystems of the world).

<sup>5</sup> KJERFVE, B. 1987. Estuarine geomorphology and Physical Oceanography. In: DAY JR., J.W.; HALL, C.H.A.; KEMP, W.M.; YAÑEZ-ARANCIBA, A. *Estuarine ecology*. New York, Wiley, pp. 47-78.

apresentando também bancos e canais não muito profundos, dispostos subparalelamente entre si e em relação às margens. Três bancos principais destacam-se nesta zona (Pinheiro, 1987).

A Zona do Canal Principal caracteriza-se pela presença do denominado Canal da Ilha das Onças, que representa a principal feição desta zona da Baía de Guajará. Este canal, com média de 1 km de largura e profundidade na faixa de 10 a 17m, constitui-se, claramente, na continuação do talvegue do Rio Guamá que acompanha sua margem esquerda, deflexionando a partir de sua foz para a direita e estendendo-se por todo o litoral oriental da Ilha das Onças.

A Barra do Guajará-Açu é definida por um extenso baixio, com cotas inferiores a 5m de profundidade e mais de 6 km de comprimento.

### **2.6.2 - Estudo dos Ventos e Ondas na Baía de Guajará**

Dados obtidos em Belém indicam dois conjuntos principais de ventos predominantes na área. Estes conjuntos mantêm direção variando entre N-NE e ENE-ESE, respectivamente e velocidades médias mensais sempre em torno de 2 a 4 nós (Pinheiro, 1987).

Estes sistemas de ventos, ao atingirem a superfície da água na Baía de Guajará, são responsáveis pela formação de ondas, com características que vão depender da velocidade, intensidade, tempo de duração e direção dos mesmos em relação à geografia da Baía. São importantes na formação das ondas a direção dos fluxos de marés, a profundidade das águas sobre a qual o vento atua e as condições meteorológicas ocasionais e sazonais (Pinheiro, 1987).

### **2.6.3 - As Marés no Estuário Guajará**

A velocidade da onda de maré, segundo informação da Companhia Docas do Pará, varia de local para local, precisando de 3h 40m para percorrer o trecho de Salinópolis, no litoral do Estado do Pará, ao extremo sul do cais do Porto de Belém, traduzindo-se numa velocidade de cerca de 1,30 a 1,71 m/s (Pinheiro, 1987).

No estuário Guajará, onde o atrito de fundo produz uma acentuada assimetria nas curvas de marés, a subida do nível da água leva cerca de 5 horas, em contraste com a descida que dura em média 7 horas, notadamente nas marés de sizígia (Pinheiro, 1987).

#### **2.6.4 - Estudo das Correntes de Maré**

Dados correntométricos da PORTOBRAS/INPH (1980) foram analisados por Pinheiro (1987), com o objetivo de fornecer subsídios para o estudo do transporte de material sólido em suspensão na Baía do Guajará e de sedimentação na área do Porto. Tais dados foram obtidos tanto em marés de sizígia quanto de quadratura.

Dessa forma, as velocidades de correntes máximas médias na Baía de Guajará ocorrem nas marés de sizígia, durante a enchente. Já a velocidade máxima média mais baixa está associada às marés de quadratura, durante a vazante. As velocidades máximas absolutas ocorrem nas marés de sizígia, sendo que no período observado as máximas ocorrem durante a vazante (1,74m/s) e durante as enchedores (2,10m/s) (Pinheiro, 1987).

Sobre as correntes no Rio Guamá, elas alcançaram valores máximos absolutos nas enchedores, principalmente nas marés de sizígia, onde podem atingir até 1,89m/s. Nas vazantes, as velocidades máximas de correntes atingem entre 1,5m/s e 1,72m/s. As médias das velocidades máximas estão entre 1,04m/s e 1,60m/s, sendo sempre maiores nas enchedores que nas vazantes.

Segundo Pinheiro (1987), a análise do comportamento das correntes de marés, bem como de suas características em marés de sizígia e de quadratura e de suas variações em função das suas distribuições no ambiente estuarino, para os canais de enchente e vazante da Baía de Guajará e Rio Guamá, mostrou que as correntes de maré nos canais de enchente ocorrem irregularmente, enquanto que no canal de vazante (mais profundo) as velocidades decrescem, progressivamente, num curto espaço de tempo, após alcançar valores máximos. No canal de enchente (mais raso), o atrito com o fundo é mais pronunciado que no canal de vazante, onde as profundidades são maiores.

No Rio Guamá, as marés estão sujeitas à influência fluvial, com predomínio de correntes de vazante, principalmente durante as marés de sizígia. Nas enchedores em quadratura, quando o volume das águas de marés é reduzido, o fluxo fluvial parece ser responsável pelas oscilações sofridas pelas velocidades de correntes.

#### **2.6.5 - A Maré Salina**

A maré salina é a invasão da água marinha, salgada, no estuário em direção oposta ao fluxo fluvial. A ordem de grandeza e o mecanismo dessa invasão são fatores que definem o tipo

de estuário e refletem diretamente o padrão de circulação do mesmo (Schubel & Pritchard<sup>6</sup> 1972, *apud* Pinheiro, 1987), sendo responsável pelos principais processos físico-químicos, biológicos e oceanográficos nos estuários.

Para Ottmann<sup>7</sup> (1968, *apud* Pinheiro, 1987), os principais fatores que interagem na penetração da maré salina são as oscilações das marés, a morfologia do estuário, a vazão de água doce fluvial, a evaporação e a precipitação pluviométrica na bacia estuarina.

O mecanismo de entrada da maré salina na Baía de Guajará se dá no período entre o final da vazante e início da enchente, quando as águas provenientes dos Rios Guamá e Guajará-Açu, com valores de salinidade relativamente baixos (0,04-0,12%), ocupam todo o canal de vazante pela margem esquerda do estuário. Por outro lado, no canal de enchente, registram-se valores de salinidade variando entre 0,15-0,42%, indicando nitidamente a entrada das águas mais condutivas salobras e não fluviais. Destaca-se que os valores mais elevados de salinidade ocorrem próximos do fundo, indicando a penetração da maré salina sob a forma de cunha que adentra no canal de enchente.

Os períodos "chuvosos" e "menos chuvosos" propiciam variações sazonais no regime dos rios que compõem o estuário, sobressaindo-se àquelas decorrentes da intrusão salina. No período "chuvisco" (dezembro a abril/maio), as altas descargas fluviais impedem por completo a penetração das águas salobras, enquanto que, nos meses correspondentes à "estiagem" (julho a novembro), a maré salina penetra de modo decisivo, mesmo nas porções mais internas do estuário, notadamente durante a preamar das marés de sizígia. Nestas condições, a salinidade pode alcançar valores da ordem de cerca de 0,5 % em frente à cidade de Belém. Nas marés de quadratura, mesmo no período de baixa vazão dos rios, a penetração salina é menos efetiva (Pinheiro, 1987).

---

<sup>6</sup> SCHUBEL, J.R. & PRITCHARD, D.W. 1972. the Estuarine environment, Part 2. *Journal of Geology*, 20(4):179-188.

<sup>7</sup> OTTMANN, F .1968. L'étude des problèmes estuariens. *Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamiques*, 4: 329-353.

## CAPÍTULO 3

### 3- UTILIZAÇÃO DE SENSORIAMENTO REMOTO NAS MICROONDAS PARA O MONITORAMENTO DA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos inerentes ao imageamento com radar de abertura sintética (SAR), objetivando um melhor entendimento dos parâmetros que controlam a geometria de imageamento nesse tipo de sistema, como também a interação das microondas com a superfície terrestre, uma vez que as imagens SAR são de grande importância neste trabalho, dada sua contribuição para o monitoramento ambiental de zonas costeiras, notadamente a região costeira tropical úmida amazônica. Ademais, essa discussão poderá contribuir para a disseminação de conhecimento sobre o uso dessa tecnologia para o monitoramento ambiental na Amazônia e, consequentemente, para a elaboração de futuros trabalhos.

Em virtude da ampla utilização dos sistemas ópticos em diversas áreas do conhecimento, não é necessário fazer uma revisão do assunto. Ademais, outras informações podem ser encontradas em: Chavez Jr. *et al.* (1982); Chavez JR. & Kwarteng (1989); Jensen *et al.* (1993); Jensen (1996); Irish (1998); Cracknell (1999); Kampel & Amaral (2001).

Assim, apesar de várias vantagens, os sistemas que operam nas microondas também possuem limitações, tais como grandes distorções geométricas (encurtamento, inversão de relevo e sombreamento), ou ainda um tipo de ruído inerente ao imageamento com radar, que é denominado *speckle*. Dessa forma, para o melhor entendimento desses fenômenos e de suas implicações na extração de informações nas imagens de radar, se faz necessária a revisão a seguir.

#### 3.1 – IMPORTÂNCIA E UTILIZAÇÃO DE UM SAR

Radar é um sistema de sensoriamento remoto ativo, ou seja, possui fonte própria de energia. O termo RADAR vem da expressão inglesa **Radio Detection and Ranging**, usada para designar um sistema capaz de detectar alvos, indicando posição e distância, através da emissão de pulsos de energia na faixa das microondas e da captação do sinal de retorno, ou eco (Vrieling & Van der Sanden, 2000). Assim, este termo tem sido muito usado para classificar os sistemas de

sensoriamento remoto ativos que operam na faixa das microondas, com comprimentos de ondas variando entre 1 cm até 1m (Raney, 1998).

Um radar clássico se baseia na transmissão e recepção de pulsos de energia, na faixa das microondas, sendo medida a intensidade do sinal que retorna até o sensor (Raney, 1998). A base do imageamento com radar é relativamente simples, onde uma plataforma (avião ou satélite) emite uma sucessão de pulsos de microondas, regularmente espaçados e de curta duração. Esse pulso atinge o terreno (*near range*) e varre a superfície em direção oposta ao sensor (*far range*). Na medida em que o pulso varre o terreno, parte da energia é espalhada na direção do sensor (retroespalhada), retornando à antena, onde o sistema correlaciona parâmetros do pulso emitido e recebido, enquanto a outra parte da energia espalhada em direção oposta ao sensor é perdida (Paradella & Bignelli, 1996).

Um dos aspectos importantes do uso de imagens de radar reside no fato de que estas possuem informações que complementam muitas das características das imagens adquiridas em outras porções do espectro eletromagnético, por exemplo, óptico e infravermelho. Além disso, os sistemas de radar têm uma grande vantagem em relação aos sistemas ópticos, que é a possibilidade de imageamento em condições atmosféricas adversas, o que estende o potencial de imageamento dos sensores ópticos, principalmente nas regiões costeiras tropicais amazônicas, uma vez que as microondas podem penetrar em nuvens e chuvas, apresentando assim, um alto grau de transparência atmosférica para comprimentos de ondas maiores que 4 cm (Ramsey III *et al.*, 1998; Souza Filho & Paradella, 2002; Dutra *et al.*, 2003).

Um sistema de imageamento com radar fornece informações sobre geometria do terreno e sobre as propriedades elétricas dos alvos, o que atribui ao radar elevada sensibilidade, para medir variações na macro-topografia (relevo), micro-topografia (rugosidade superficial), e características dielétricas dos alvos, estas relacionadas com o conteúdo de umidade (Lewis *et al.*, 1998). Já os sistemas ópticos usam a energia solar refletida para fornecer informações sobre as características físico-químicas dos alvos, onde a interação energia-matéria ocorre em escala microscópica (Paradella & Bignelli, 1996; Paradella *et al.*, 2000). Dessa forma, o ideal seria o uso das duas informações, no espectro das microondas e óptico, através da fusão de dados, maximizando, assim, a extração de informações pela obtenção do sinergismo do produto híbrido resultante (Singhroy, 1996; Ramsey III *et al.*, 1998; Andrade, 1999; Souza Filho, 2000; Souza Filho & Paradella 2002).

Os radares têm se mostrado uma ferramenta valiosa na obtenção de informações geológicas e de vegetação. O primeiro mapeamento regional usando radar de abertura sintética (SAR) no Brasil foi feito no início da década de 70 no âmbito do projeto RADAM, que adquiriu imagens da Amazônia Legal, usando um sistema chamado *Goodyear Mapping System* (GEMS 1000), que operou na banda X e polarização HH. As imagens adquiridas neste projeto foram extensivamente usadas como ferramenta operacional para mapeamento regional na Amazônia (Souza Filho & Paradella, 2003).

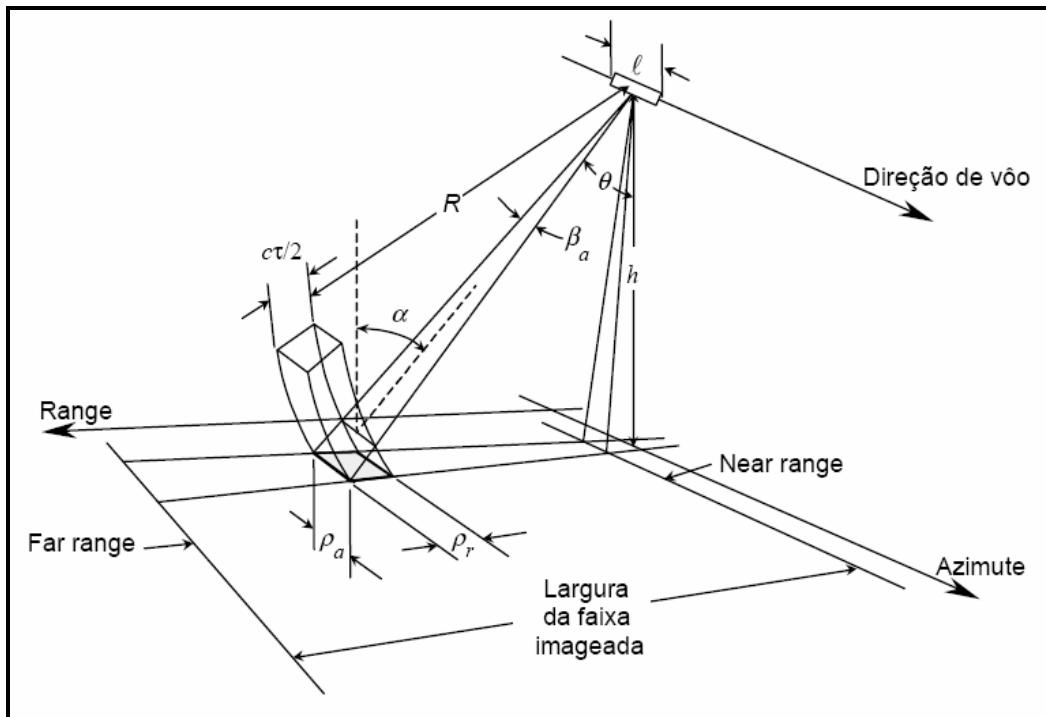
O uso de sistemas que operam na faixa das microondas é favorecido em geologia, devido ao maior realce da topografia e das variações na morfologia em superfície, em função da alta sensibilidade do radar à rugosidade superficial do terreno ou vegetação, bem como pela possibilidade de medir as propriedades dielétricas dos materiais (conteúdo de umidade). Outro fator importante é a aquisição de imagens com geometria de imageamento controlada, ou seja, direção de visada, ângulo de incidência e polarização (Paradella & Bignelli, 1996; Paradella *et al.*, 2000; Grunsky, 2002). Com isso, imagens SAR têm sido usadas para mapeamento geológico, geologia estrutural aplicada para pesquisa de depósitos minerais e trapas de petróleo, como também para estudos de risco geológico, tais como áreas de erosão costeira, deslizamento de encostas e áreas sismogênicas (Singhroy, 1992).

Assim, as informações supracitadas conferem ao sensoriamento remoto nas microondas relevante importância para aplicações onde há necessidade de aquisição de dados confiáveis e com alta repetitividade, tais como o monitoramento ambiental e risco de erosão em zonas costeiras, principalmente naquelas onde há intensa cobertura de nuvens, como na zona costeira tropical amazônica. Ademais, apesar do grande leque de aplicações do sensoriamento remoto nas microondas em regiões tropicais úmidas, para um bom resultado é necessário que o usuário tenha conhecimentos dos fundamentos do imageamento com radar, processamento digital de imagens, informações de campo confiáveis, e ainda, conhecimentos sobre a aplicação envolvida (Souza Filho *et al.*, 2005).

### 3.2 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE RADAR

Os sistemas de microondas são classificados em dois grupos: sensores imageadores e não imageadores. Assim, os sensores imageadores compreendem os sistemas de antena rotatória e os de visada lateral (SLAR- *Side Looking airborne Radar*), podendo este último ser um sistema de

radar de abertura real (RAR- *Real Aperture Radar*) ou um sistema de abertura sintética (SAR- *Synthetic Aperture Radar*) (Lewis *et al.*, 1998). A geometria de imageamento de um radar de visada lateral pode ser vista na **Figura 3.1**.



**Figura 3.1-** Geometria de imageamento de um radar com visada lateral (SLAR- *Side Looking airborne Radar*), onde: ângulo de incidência ( $\alpha$ ); ângulo de visada ( $\theta$ ); resolução espacial em azimute ( $\rho_a$ ); resolução espacial e em range ( $\rho_r$ ); altura de vôo ( $h$ ); tamanho físico da antena ( $\ell$ ); largura do pulso transmitido ( $\tau$ ); velocidade da luz ( $c$ ); largura do feixe em azimute ( $\beta_a$ ).  
Adaptado (Trevett<sup>1</sup>, 1986 *apud* Dutra *et al.*, 2003).

Os modernos sistemas SAR usam o efeito Doppler, baseado no deslocamento da plataforma ao longo de sua trajetória (direção em azimute), para simular uma antena virtual com comprimento muitas vezes maior do que seu tamanho real, daí o termo radar de abertura sintética. A vantagem do sistema SAR é que ele possibilita uma melhoria na resolução em azimute, sem a necessidade de aumento físico do tamanho da antena, uma vez que, nos sistemas RAR, a largura do feixe de microondas em azimute é inversamente proporcional ao comprimento da antena e diretamente proporcional ao comprimento de onda do pulso usado. Dessa forma, a resolução

<sup>1</sup> TREVETT, J.W. 1986. *Imaging radar for resources surveys*. New York, Chapman and Hall, 313 p.

azimutal é maior para menores comprimentos de ondas, o que pode ser um empecilho para algumas aplicações, pois, com a diminuição do comprimento de onda do feixe utilizado, diminui também a capacidade de penetração do pulso de microondas (Raney, 1998).

O conceito de resolução espacial para o radar deve ser considerado segundo as direções em range e azimute. O fator que controla a resolução em range é a duração e largura do pulso emitido, já a resolução em azimute é controlada pela largura do feixe imageado, sendo função do tamanho ou da abertura da antena, determinando qual a menor distância que dois objetos podem estar separados, ao longo da linha de movimentação da plataforma, para que sejam identificados pelo radar. Assim, para que dois alvos sejam distinguidos na direção azimutal é necessário que a distância mínima entre eles seja maior que a largura do feixe de iluminação do radar (Lewis *et al.*, 1998).

O entendimento das interações entre as microondas e os alvos imageados na superfície terrestre perpassa pelo entendimento do pressuposto de que o espalhamento do pulso de microondas ocorre quando o feixe atravessa de um meio para outro, com diferentes constantes dielétricas entre os meios, sendo que, quanto maior for essa diferença maior será o espalhamento. Assim, a constante dielétrica de um material é um indicador da dificuldade de propagação da onda eletromagnética no meio, em comparação com o vácuo (Paradella & Bignelli, 1996). Os parâmetros que influenciam no retroespalhamento de um pulso de microondas (*backscattering*) estão relacionados às propriedades do sistema sensor e às propriedades dos alvos e de suas interações (Rosenqvist, 1997; Lewis *et al.*, 1998; Paradella *et al.*, 2000; Formaggio *et al.*, 2001).

Considerando dois meios com diferentes constantes dielétricas, a onda eletromagnética interagirá com os alvos e se a superfície incidente for perfeitamente plana (superfície especular), a onda será re-emitida em direção oposta ao sensor e nenhum sinal será registrado. De outra forma, se a superfície for rugosa, parte da energia é re-emitida em várias direções, ocasionando um espalhamento difuso e aumentando a quantidade de eco captado pelo sensor (Lewis *et al.*, 1998). Vale ressaltar que as interações acima apresentadas estão relacionadas com o conceito de rugosidade superficial, que é controlada pelo comprimento de onda e pelo ângulo de incidência do sistema de radar usado, podendo uma mesma superfície aparecer lisa ou rugosa em função desses dois parâmetros.

No imageamento com radar, a quantidade de energia espalhada na direção do sensor (retroespalhada) está relacionada a um parâmetro conhecido como seção transversal de

retroespalhamento do radar, que é a razão entre a energia recebida pelo sensor e a energia que o sensor receberia se a superfície espalhadora tivesse comportamento isotrópico (Rosenqvist, 1997; Raney, 1998). Para alvos maiores que a largura do feixe incidente, é necessário conhecer o comportamento do retroespalhamento em função de uma unidade de área, definindo o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ), sendo este um parâmetro relacionado com as propriedades do alvo (Raney, 1998).

A intensidade do coeficiente de retroespalhamento é função de dois tipos de parâmetros: 1) parâmetros relacionados com o sistema imageador radar (comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência e direção de visada do sensor); 2) parâmetros relacionados com os alvos (constante dielétrica, topografia e rugosidade superficial) (Rosenqvist, 1997; Raney, 1998).

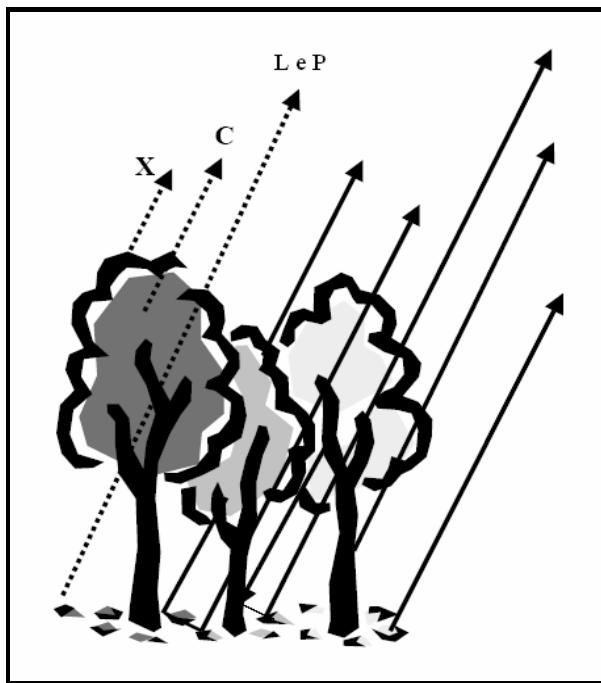
### 3.3-PARÂMETROS OPERACIONAIS DOS SISTEMAS DE RADAR

#### 3.3.1 - Comprimento de Onda

O espalhamento das ondas eletromagnéticas na superfície do terreno depende, entre outras coisas, do comprimento de onda usado pelo sistema radar (Rosenqvist, 1997). Para áreas com vegetação, a interação entre o pulso de microondas e a superfície pode ser explicada através de quatro modelos de retroespalhamento: 1) espalhamento no topo do dossel 2) interação dentro do dossel, também chamado de espalhamento volumétrico 3) interação da energia com a superfície do terreno 4) interação conjugada dentro do dossel e em superfície, também chamada de reflexão de canto (*double bounce*). Assim, a penetração no dossel é determinada pelas características da vegetação (densidade e conteúdo de umidade) e pelas características do sensor (comprimento de onda e ângulo de incidência) (Paradella *et al.*, 2000). O comprimento de onda a ser usado em determinado estudo vai depender, então, das condições superficiais dos alvos, bem como do tipo de interação pretendida (**Figura 3.2**).

O tipo de interação da onda eletromagnética com a superfície do dossel está intimamente relacionado com o comprimento de onda utilizado e o tamanho dos difusores (folhas, ramos, caules e troncos). Exemplificando, para comprimentos de ondas menores, como a banda X (3 cm), a interação é com o topo do dossel da floresta, em função da similaridade entre as dimensões do comprimento de onda e dos difusores. Já para a banda C (6 cm), há maior penetração no dossel, ocorrendo espalhamento no topo e espalhamento volumétrico até o nível dos galhos, enquanto que a banda L (23 cm), pode penetrar no dossel até atingir a superfície do terreno,

ocasionando um outro tipo de interação, que pode produzir o efeito de *double bounce* principalmente na presença de água sob o dossel (Paradella & Bignelli, 1996).

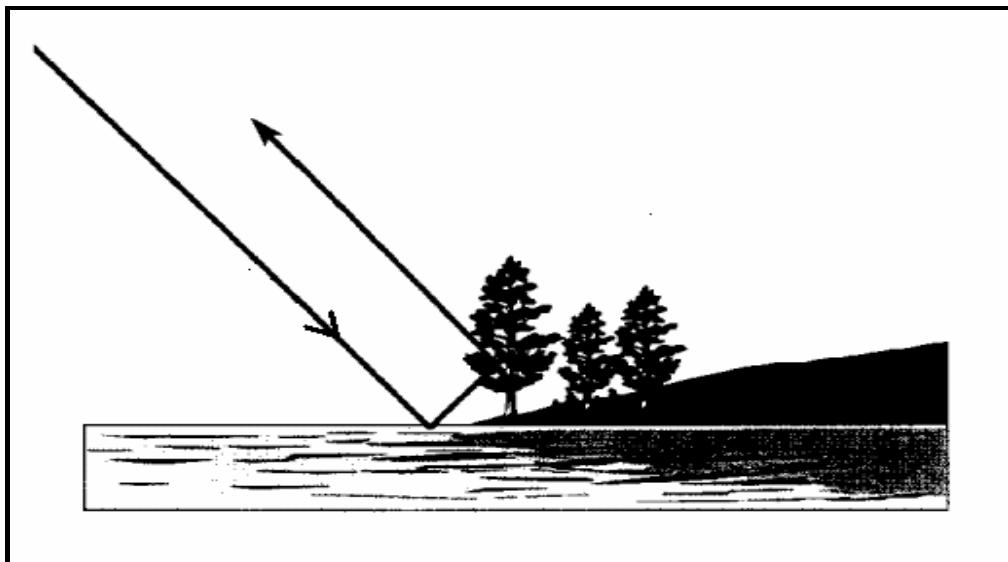


**Figura 3.2** - Esquema mostrando os principais componentes e mecanismos de retroespalhamento, que influenciam na interação do pulso da onda eletromagnética com o dossel da floresta. 1) espalhamento no topo do dossel (banda X); 2) interação dentro do dossel, também chamado de espalhamento volumétrico (banda C); 3) interação da energia com a superfície do terreno (bandas L e P). Adaptado de Leckie & Ranson<sup>2</sup> (1998 *apud* Kuplich, 2001).

Dessa forma, o efeito de *double bounce* (**Figura 3.3**) tem sido usado para mapear áreas vegetadas inundáveis na região amazônica, uma vez que, este mecanismo de retroespalhamento possibilita uma alta resposta, acarretando na imagem gerada em pixels com níveis de cinza altos (alto brilho), o que é facilmente diferenciado das regiões adjacentes. (Hess *et al.*, 1995; Proisy *et al.*, 2000; Souza Filho, 2000; Souza Filho & Paradella, 2002; Beisl *et al.*, 2003). É importante ainda considerar que esses modelos são ideais e que na natureza há uma série de fatores agindo conjuntamente, os quais controlam a interação do pulso de microondas com os alvos. Sendo

<sup>2</sup> LECKIE, D.G. & RANSON, K.J. 1998. Forestry applications using imaging radar. Principles and Applications of Imaging Radar. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Jonh Willey & Sons, pp. 435-509.

assim, é condição imprescindível que haja uma confirmação em campo dos dados de sensores remotos, como também o monitoramento das condições ambientais vigentes quando da aquisição das imagens.



**Figura 3.3** - Esquema mostrando o efeito de *double bounce*, onde o pulso de microondas encontra uma superfície lisa, ocorrendo assim, reflexão especular na água e em seguida, uma reflexão de canto nos troncos das árvores (Raney, 1998).

Assim, florestas de mangue e áreas de vegetação alagada, como as regiões de várzeas amazônicas, apresentam uma forte assinatura nas microondas, apresentando grande quantidade de energia retroespelhada. Dessa forma, quando o feixe de microondas se propaga dentro da estrutura florestal até a superfície sob o dossel, há um aumento nos valores de coeficientes de retroespelhamentos observados, em função do mecanismo de *double bounce*, que ocorre em função dos múltiplos espelhamentos entre a superfície da água e os componentes da floresta (Proisy *et al.*, 2000). É importante considerarmos ainda, que este mecanismo de espelhamento depende fortemente dos parâmetros do SAR utilizado, da magnitude da atenuação da energia de microondas no dossel florestal (informação espalhada na direção oposta ao sensor) e ainda do tipo de vegetação.

### 3.3.2-Polarização

A polarização é um fator importante na aquisição de imagens SAR, podendo melhorar a discriminação dos diferentes objetos na superfície. A polarização da onda eletromagnética é definida como a direção de vibração do vetor campo elétrico, podendo ser horizontal ou vertical.

Assim, os radares são construídos de forma a emitir e receber a radiação em polarizações específicas, que pode ser paralela (HH, VV) ou cruzada (HV, VH), a primeira letra se refere à emissão e a segunda à recepção (Paradella & Bignelli, 1996; Raney, 1998; Lewis *et al.*, 1998; Hugenholtz & Van Der Sanden, 2001).

Segundo Paradella e Bignelli (1996), o retroespalhamento é mais intenso quando os alvos estão orientados na mesma direção da polarização da onda incidente, assim, em geologia, a polarização HH apresenta melhor desempenho, pois a configuração da maioria dos materiais superficiais, principalmente rochas, é dominada por elementos horizontais (estratos, acamamentos, lineamentos e outras estruturas planares). Um exemplo notável do realce de feições pelo uso de múltiplas polarizações é visto em estudos geobotânicos, onde imagens adquiridas com polarização cruzada realçam melhor a vegetação, o que é causado pelo fenômeno da depolarização, em função de múltiplos espalhamentos, principalmente no interior e no topo do dossel, espalhamento volumétrico e superficial (Paradella & Bignelli, 1996).

Proisy *et al.* (2000), usando dados polarimétricos AIRSAR NASA/JPL (adquiridos concomitantemente nas bandas P, L e C), obtidos sobre uma variedade de florestas de mangues na Guiana Francesa e com ângulo de incidência médio de 35 °, corroboraram estudos anteriores mostrando que a banda P (0.44 GHz) fornece a melhor assinatura polarimétrica dos manguezais e distinguindo três estágios de crescimento, em função do seu mecanismo de retroespalhamento dominante da interação radar-floresta (*double bounce*), fornecendo dessa forma, a assinatura polarimétrica do radar para os manguezais. Mostraram também que o coeficiente de retroespalhamento dos manguezais é maior para sistemas de SAR operando com polarização paralela (HH e VV), favorecendo o mecanismo de *double bounce*.

Hugenholtz & Van Der Sanden (2001) fizeram estudos utilizando um SAR polarimétrico, banda C aerotransportado (CV-580), para mapeamento geomorfológico de uma zona costeira intermaré (Baía de Fundy), no Canadá, mostrando que há significativa melhora na identificação e discriminação dos alvos com a utilização de sistemas operando em várias configurações de polarização.

Dessa forma, os futuros radares polarimétricos orbitais, com quatro opções de polarização (quad-pol, medindo intensidade e fase) e previsão de lançamento nos próximos dois anos (RADARSAT-2 e ALOS/PALSAR), apontam na direção futura do sensoriamento remoto com radar, uma vez que essa é uma tecnologia de vanguarda, com amplas possibilidades de

desenvolvimento e aplicação nas mais diversas áreas do conhecimento. Ademais, estudos usando este tipo de sensor remoto podem apresentar grandes vantagens para o mapeamento das zonas costeiras amazônicas, obtendo, a partir de múltiplas polarizações, diferentes informações relacionadas com a interação do pulso de microondas com os alvos.

Ademais, essa nova geração de SAR terá imagens em alta resolução espacial (3m, modo *ultrafine* RADARSAT-2) e maior resolução temporal e possibilidade para gerar pares estéreos (com visadas para leste e oeste, na mesma passagem), bem como todas as possibilidades de combinações de polarizações (quad-pol) e polarimétrico (informação referente à intensidade e fase das microondas, permitindo a identificação dos alvos pela sua assinatura radiométrica, criando modelos mais precisos de retroespalhamento) (Morena *et al.*, 2004). Essas inovações possibilitarão um aumento na quantidade de informações disponibilizadas pelos novos sistemas SAR, aumentando na mesma medida suas aplicações (Singhroy & Molch, 2004).

Além desses sensores, o SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) dispõe de um moderno sistema de sensoriamento remoto aerotransportado, englobando um sensor hiperespectral e um sistema SAR polarimétrico com altíssima resolução espacial e multifreqüência, apresentando diversas possibilidades de configuração de imageamento, podendo destacar um modo chamado de quad-pol L+X (bandas L e X, com polarização HH para a banda X e quatro possibilidades de polarização para banda L) (Nascimento & Silva, 2003).

### **3.3.3-Ângulo de Incidência**

O ângulo de incidência é medido no terreno, sendo definido como o ângulo entre o feixe de radar e a linha perpendicular à superfície, sendo que para superfícies planas o ângulo de incidência é o complemento do ângulo de depressão, que é medido no sensor, e corresponde ao ângulo entre o traço do plano horizontal de movimentação da plataforma e o feixe de radar. A variação do ângulo de incidência de aquisição de imagens pode melhorar a caracterização de alvos (Paradella & Bignelli, 1996; Lewis *et al.*, 1998). O controle da iluminação do feixe de radar é uma das principais vantagens deste sistema, o que pode melhorar a eficiência na identificação e interpretação de estruturas geológicas, unidades litológicas, formas e tipo de relevo (Singhroy & Saint-Jean, 1999). De forma geral, para superfícies lisas, há um decréscimo no retroespalhamento com o aumento do ângulo de incidência, para superfícies rugosas, esse decréscimo é menos pronunciado (Lewis *et al.*, 1998).

O aumento do ângulo de incidência permite o aumento do campo de visada, e uma maior área de imageamento. De maneira geral, ângulos de incidência próximo ao nadir são melhores para a discriminação de diferenças de rugosidade em terrenos planos, enquanto que, para terrenos montanhosos, as feições são melhor realçadas com o uso de elevados ângulos de incidência (Singhroy & Saint-Jean, 1999). Uma exceção a essa regra geral ocorre em áreas planas florestadas, onde há regiões desmatadas, sendo que estas áreas são melhor discriminadas com grandes ângulos de incidência, uma vez que, o contraste entre áreas lisas (desmatadas) e rugosas (vegetação) é mais acentuado (Singhroy & Saint-Jean, 1999).

Grandes ângulos de incidência permitem menor penetração no dossel, enquanto que ângulos de incidência pequenos minimizam o efeito dos difusores no topo do dossel, permitindo maior penetração, maximizando assim, o retorno da contribuição da superfície (Raney, 1998). Este tipo de informação é importante quando se trabalha na região amazônica, dada a ampla distribuição da cobertura vegetal nessa região. Desse modo, dependendo do tipo de informação que se quer obter, a escolha apropriada do ângulo de incidência é condição importante para se alcançar um bom resultado.

Segundo Barbosa *et al.*, (1999), maiores ângulos de incidência são mais apropriados para delinear o limite terra-água, facilitando assim, o mapeamento da geomorfologia costeira, bem como auxiliando no mapeamento mais acurado dos processos de erosão.

### **3.3.4- Direção da Visada**

A direção de visada é o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de radar, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma. É possível variar a direção da visada, ou seja, variar a direcionamento do feixe de microondas (Paradella & Bignelli, 1996; Lewis *et al.*, 1998).

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, de outra forma, feições alinhadas  $\pm 20^\circ$  com a iluminação do radar podem ser invisíveis ao sensor (Singhroy & Saint-Jean, 1999; Formaggio *et al.*, 2001; Paradella *et al.*, 2001; Grunsky, 2002).

Assim, fica patente que o entendimento da influência da geometria de imageamento de um SAR na interação do feixe de microondas com os alvos representa, em função da maior ou menor quantidade de retroespalhamento, fator decisivo na escolha da melhor configuração de

imageamento, bem como na obtenção de um bom resultado para delineação de estruturas geológicas, materiais superficiais, unidades litológicas e formas de relevo (Singhroy & Saint-Jean, 1999).

### 3.4 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA SUPERFÍCIE

As características dos alvos influenciam grandemente na intensidade do sinal recebido pelo radar, principalmente a constante dielétrica, rugosidade superficial (micro-relevo) e a orientação das feições no terreno, havendo uma atuação interdependente destes fatores com os parâmetros relacionados com sistema radar. Assim, os parâmetros intrínsecos aos alvos serão abordados na síntese abaixo.

#### 3.4.1-Constante Dielétrica e Umidade

A constante dielétrica é uma medida das características elétricas dos materiais na superfície, influenciando diretamente na quantidade de energia retroespelhada pelo alvo, bem como indicando a refletividade e condutividade desses materiais (Lewis *et al.*, 1998; Paradella *et al.*, 2000). A constante dielétrica de rochas, solos e vegetação aumenta diretamente com o teor de umidade, aumentando consequentemente, seu retroespelhamento, o que ocorre porque a água possui alta constante dielétrica, tornando mais difícil a propagação da onda eletromagnética no meio, aumentando a refletividade desse material (Lewis *et al.*, 1998; Paradella & Bignelli, 1996).

Assim, como o coeficiente de retroespelhamento é uma medida quantitativa da intensidade de energia que retorna ao radar, quando a umidade de um material aumenta, o seu retroespelhamento também aumenta e, consequentemente, o brilho da imagem (tons de cinza mais claros). Esse efeito, por exemplo, pode ser causado pelas chuvas, o que acarreta em menor penetração da energia eletromagnética emitida pelo radar na superfície úmida, por conseguinte, aumentando seu retroespelhamento (Chaves, 2002). Para a região amazônica, onde ocorre amplamente distribuída a floresta tropical úmida, esse parâmetro dos alvos é de elevada relevância. A grande umidade na região pode ser influenciada pelas águas das chuvas, ou ainda pela dinâmica das marés e a sazonalidade dos rios, principalmente nas regiões suscetíveis às inundações. Assim, este parâmetro ambiental deve ser observado para não induzir conclusões equivocadas.

### 3.4.2-Rugosidade da Superfície e Topografia

A rugosidade superficial (micro-topografia) é dada pela textura de objetos na superfície, como folhas e galhos das árvores em escala centimétrica. Já o relevo (macro-topografia) inclui morros, vales, em escala métrica (Lewis *et al.*, 1998; Paradella *et al.*, 2000). Essa propriedade é um importante parâmetro que influencia na resposta do radar.

Segundo Paradella e Bignelli (1996), o efeito da rugosidade superficial varia em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e do ângulo de incidência ( $\theta$ ); a rugosidade do alvo será menor para os maiores comprimentos de ondas, ou seja, para as bandas L e P, uma vez que, objetos podem ser detectados como micro-topografia nestas bandas, enquanto que nas bandas X e C, como macro-topografia. Áreas mais rugosas espalham mais energia em direção ao sensor (reflexão difusa), em relação a aquelas superfícies mais lisas (reflexão especular), (Lewis *et al.*, 1998).

No caso em que as dimensões das irregularidades superficiais são comparáveis ao comprimento de onda do sinal do radar, tem-se a ocorrência do chamado espalhamento Rayleigh (Soler, 2000). Pela medição das microvariações do relevo; expressas pelo erro quadrático médio ou RMSE (*root mean square error*), relacionadas ao comprimento de onda e ao ângulo de incidência do radar via critério de Peake & Oliver<sup>3</sup>, é possível estimar a rugosidade superficial e determinar se uma superfície é lisa, intermediária ou rugosa para um dado SAR (Morais *et al.*, 2002).

## 3.5-DISTORÇÕES GEOMÉTRICAS

A geometria de imageamento dos radares de visada lateral causa distorções geométricas, o que os diferencia dos sistemas ópticos com visada no nadir. Isso acontece porque o radar mede distâncias, sendo esta a fonte das distorções geométricas. Dessa forma, as imagens ópticas são adquiridas com varredura linha a linha e ortogonal à movimentação do sensor, com visada vertical e resolução espacial sendo função da resolução angular (IFOV- *Instantaneous Field of View*) e altitude do satélite, apresentando distorção geométrica do nadir para as bordas (Lewis *et al.*, 1998). Já no sistema SAR, em função da visada lateral, o pulso de energia é emitido na direção em *range*, perpendicular à movimentação da plataforma (Paradella & Bignelli, 1996; Raney, 1998). Assim, para a imagem óptica, um pequeno deslocamento, por exemplo, do topo de

---

<sup>3</sup> PEAKE, W.M. & OLIVER, T.L. 1971. The response of terrestrial surfaces at microwave frequencies. Columbus, Ohio, p: 2440-2447. (Technical Report).

uma montanha ocorre em sentido oposto ao sensor (paralaxe). Para o radar, o deslocamento das feições topográficas ocorre no sentido do sensor, sendo mais pronunciado que no imageamento óptico (Paradella & Bignelli, 1996; Lewis *et al.*, 1998).

Um tipo de distorção geométrica comum em imagens de radar é chamado de encurtamento de rampa (*foreshortening*), que ocorre quando a área imageada possui declividade acentuada, com as encostas voltadas para o radar aparecendo mais curtas (**Figura 3.4a**). Isto ocorre quando a área imageada apresenta encostas menos íngremes do que uma linha perpendicular ao pulso incidente, resultando na imagem em uma feição linear (Lewis *et al.*, 1998).

A inversão de relevo (*layover*) é um tipo comum de distorção geométrica observada em imagens de radar, que ocorre quando o topo de uma montanha íngreme é imageada antes da base, ocasionando no deslocamento do topo dos alvos em direção ao sensor, havendo uma sobreposição de pixels e um brilho anormal nesta parte da imagem, sendo representado com um efeito serrilhado. Este tipo de distorção ocorre quando a declividade do terreno é mais acentuada que uma linha perpendicular ao pulso incidente (**Figura 3.4b**), (Lewis *et al.*, 1998). Esse tipo de distorção não acontece em áreas planas, como na região amazônica.

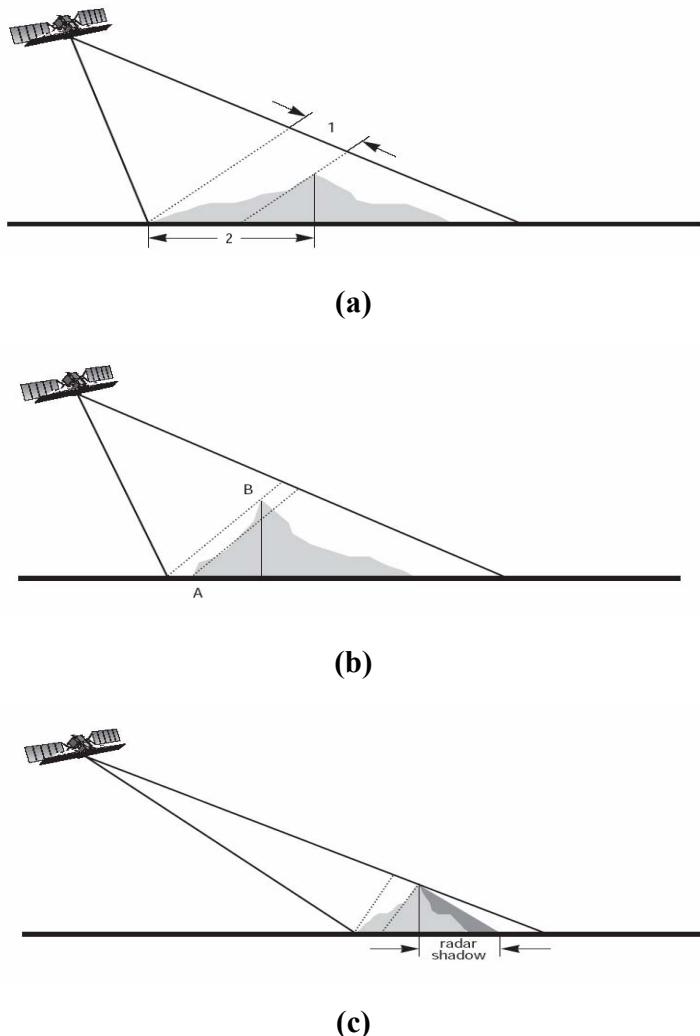
A iluminação oblíqua do radar de visada lateral produz sinais de retorno de alta intensidade ou de alto brilho em encostas voltadas para o sensor, de maneira inversa, encostas opostas à iluminação da antena formam sombras escuras, pois a energia dos pulsos transmitidos não alcança essas áreas (Lewis *et al.*, 1998).

Assim, o ângulo de incidência e a declividade do terreno controlam a intensidade e o tamanho do sombreamento (*shadowing*), pois, na região do alcance próximo (*near range*), o ângulo de incidência é menor, como também é menor o efeito do sombreamento, de forma contrária, no alcance distante (*far range*) é maior o efeito do sombreamento, conforme a **Figura 3.4c** (Lewis *et al.*, 1998).

É importante considerar ainda que, para a região costeira amazônica, estes tipos de distorções geométricas não são importantes, uma vez que essa região apresenta majoritariamente baixo relevo.

Outro tipo de distorção é devido ao fato de que as imagens de radar são obtidas em um plano inclinado de visada (*slant range*) e somente depois projetadas na superfície do terreno (*ground range*), ocasionando uma compressão de *pixels* no alcance próximo (*near range*), em

relação ao alcance distante (*far range*). Essa distorção geométrica é denominada de distorção em alcance inclinado (Lewis *et al.*, 1998).



**Figura 3.4** - Tipo de distorções inerentes ao imageamento com radar: **(a)** encurtamento de rampa, que ocorre pelo efeito combinado entre a geometria de imageamento e a declividade do terreno, onde 1) é a distância em alcance inclinado (*slant range*) do sensor até o alvo e 2) é a distância real no terreno (*ground range*), onde a distância em alcance inclinado (1) é menor do que a distância real no terreno; **(b)** inversão de relevo, que ocorre quando o topo da montanha (B) é “visto” pelo radar de visada lateral antes da base (A); **(c)** sombreamento topográfico, gerado em função da geometria de imageamento em um radar de visada lateral, quando a parte oposta à vertente frontal ao feixe de microondas não é imageada. (Adaptado de RADARSAT International, 1997).

### 3.6 - RUÍDOS

O ruído *speckle* é inerente ao imageamento com radar, dando uma aparência de textura granular às imagens. Este tipo de artefato é formado em função da natureza coerente do pulso emitido pelo sensor e diminui a capacidade de extração de informações de interesse, pois diminui a relação sinal/ruído (Vrieling & Van Der Sanden, 2000).

Dentro de uma célula de resolução, há vários pequenos refletores (objetos), onde todos contribuem para o retroespalhamento do pulso de microondas incidente, ocasionando dessa forma, o *speckle*. Assim, ondas incidentes em fase acarretam em interferência construtiva, aumentando artificialmente o valor digital do pixel, ocasionando maior brilho, entretanto, as ondas incidentes fora de fase ocasionam uma interferência destrutiva, aparecendo como pixels escuros. Essa configuração resulta em uma textura granular (tipo sal e pimenta), formada por *pixels* claros e escuros dispostos aleatoriamente (Paradella & Bignelli, 1996, Raney, 1998).

Há duas técnicas para redução do *speckle*: o processamento multi-visadas e a filtragem espacial. No primeiro caso, existe uma relação entre o número de visadas e a perda de resolução azimutal, pois quanto maior o número de visadas, maior será a degradação da resolução azimutal. Já na segunda técnica, a relação existente é entre o aumento da razão sinal ruído e a perda de resolução (Raney, 1998).

Assim, a redução do *speckle* é imprescindível para análise de imagens de radar, pois esse tipo de ruído dificulta sobremaneira o reconhecimento de similaridades tonais e texturais entre áreas adjacentes, o que pode tornar menos preciso o processo de classificação de imagens, quer seja visual ou automática (Vrieling & Van der Sanden, 2000).

## **CAPÍTULO 4**

### **4 - MAPEAMENTOS DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL (ISA) NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA**

Neste capítulo, serão abordados os principais conceitos sobre o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, assim como os métodos criados pela NOAA (2002) e Petrobras (2002), sendo este último uma adaptação do método NOAA para o litoral brasileiro. Ademais, será apresentada uma adaptação destes métodos para a zona costeira amazônica.

#### **4.1- UTILIZAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE AMBIENTAL A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO**

Os Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo constituem um componente essencial e fonte de informação primária para o planejamento de contingência e avaliação de danos em casos de derramamento de óleo. Estes mapas representam uma ferramenta fundamental para as ações de resposta a vazamentos de óleo, na medida em que, ao identificar aqueles ambientes com prioridade de preservação, permitem o direcionamento dos recursos disponíveis e a mobilização mais eficiente das equipes de proteção e limpeza (Petrobras, 2002).

Os planos de contingência e resposta a derramamentos de óleo constituem o emprego principal dos mapas de sensibilidade ambiental, no entanto, outros usos têm sido encontrados por países que elaboraram mapas de sensibilidade ambiental, tais como planejamento e gerenciamento costeiro, planejamento de turismo, recreação e definição de áreas protegidas. Esse produto pode ser um componente valioso de um estudo de impacto ambiental auxiliando, assim, na definição de locais de instalação de empreendimentos para a indústria do petróleo, ou seja, reforça os instrumentos políticos e administrativos de ordenamento territorial (NOAA, 2002).

As indicações de sensibilidades relativas são importantes, mas não se deve esquecer de considerar que cada situação de emergência é única, e que fatores como sazonalidade, diferentes tipos de óleo, com diferentes características (toxicidade e tempo de permanência no ambiente) e diferentes condições oceanográficas são específicos para cada tipo de ambiente e para cada evento poluidor (EPA, 1999; MMA, 2002).

## 4.2- MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE DESENVOLVIDO PELA NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA)

Os Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (MSA) têm sido utilizados para a elaboração de planos de contingência e resposta a derramamentos de óleo desde 1979, quando os primeiros MSA foram empregados para guiar atividades de resposta a um vazamento de petróleo ocorrido no Golfo do México (NOAA, 2002).

Os primeiros mapas de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo eram baseados somente nas características geomorfológicas dos ambientes impactáveis, relacionando-as com o tempo de permanência do óleo na ausência de esforços de limpeza.

O método desenvolvido pela NOAA é mundialmente empregado na elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo, utilizando índices que variam de 1 a 10, sendo que a sensibilidade é maior quanto maior o índice. Este método considera principalmente as características geomorfológicas da área, pois estas condicionam a densidade e o tipo de comunidade biológica existente, sendo imprescindível para determinar o tempo de permanência e o grau de impacto pelo óleo derramado (ARPEL, 1997).

Aspectos como recursos biológicos e socioeconômicos sensíveis também são informados no método desenvolvido pela NOAA (2002), apesar de não transparecerem à primeira vista, o que por vezes leva a críticas quanto à simplificação do método. Mas, é na simplicidade e clareza da representação cartográfica das sensibilidades relativas que está a chave para elaboração de uma estratégia, eficaz e rápida, de como agir em caso de um derramamento de óleo (IMO & IPIECA, 1994).

### 4.2.1- Tipos de informações presentes nos Mapas de Sensibilidade

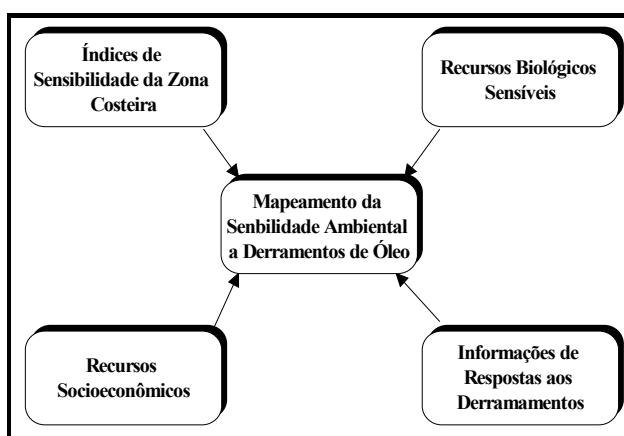
A classificação dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo é função das características geomorfológicas dos ambientes, considerando o grau de exposição à energia de ondas e marés, declividade do litoral e tipo do substrato e, ainda, facilidades para limpeza e remoção das áreas impactadas pelo óleo. Esta classificação é baseada em um entendimento completo do ambiente, incluindo as relações entre os processos físicos e o substrato, que produzem tipos específicos de ambientes e permitem prever padrões de comportamento e transporte do óleo derramado (NOAA, 2002).

No entanto, a geomorfologia não esgota a caracterização da sensibilidade ambiental ao óleo. É necessário considerar, ainda, as diversas atividades antrópicas desenvolvidas nesses ambientes. Assim, a presença de recursos biológicos e de recursos costeiros com importância sócio-econômica potencializa a sensibilidade de segmentos específicos da zona costeira.

O conhecimento prévio das características oceanográficas e climatológicas dos sistemas hídricos, tais como a distribuição das massas d'água, regimes de ventos, correntes, ondas e marés, propriedades físico-químicas da água e suas variações sazonais, possibilita prever o comportamento da mancha de óleo e seus mecanismos de dispersão, o que pode ser feito utilizando técnicas de modelagem numérica hidrodinâmica (Noernberg & Lana, 2002).

A produtividade e sensibilidade biológica dos ambientes costeiros devem ser consideradas na classificação da sensibilidade ambiental, sendo que a geomorfologia condiciona o tipo e a densidade das comunidades biológicas presentes na área. Assim, é importante considerar que prioridades de proteção e as propriedades físicas e biológicas do ambiente podem mudar sazonalmente, relacionadas com a dinâmica ambiental atuante na área (EPA, 1999).

Os mapas de ISA que hoje são adotados pela maioria das empresas e órgãos envolvidos com a problemática contêm basicamente três tipos de informações: 1) Classificação da Costa; 2) Recursos Biológicos; 3) Recursos Sócio-econômicos, (**Figura 4.1**). Dessa forma, nesta Dissertação serão tratadas principalmente as informações relacionadas com a classificação da linha de costa, responsável pela definição dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.



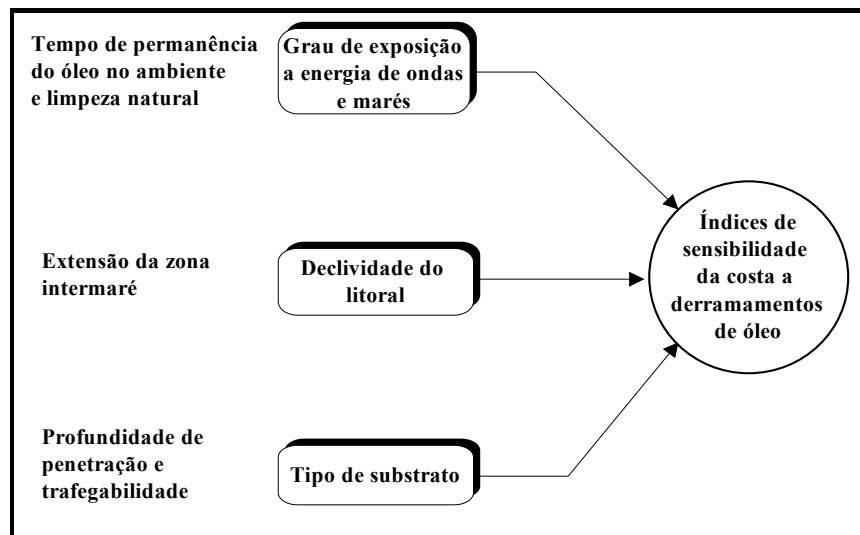
**Figura 4.1** - Fluxograma mostrando os tipos de informações presentes em mapas de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

#### 4.2.2 - Índice de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (ISA)

Durante eventos de derramamento de óleo, muitos ambientes costeiros estão em risco, pois grandes áreas podem ser diretamente impactadas. O destino do óleo e os efeitos da poluição variam amplamente, condicionados pelo geomorfologia do tipo de costa e pelos processos meteo-oceanográficos atuantes. Assim, para cada tipo de costa há um método de limpeza específico, que respeita as peculiaridades do ambiente, evitando que, durante os esforços de limpeza os danos ambientais sejam aumentados (EPA, 1999).

O conceito de mapeamento de ambientes costeiros e a sua classificação em função de uma escala de sensibilidades relativas foram criados em 1976 para Baía Lower Cook (Michel *et al.*, 1978). Desde então, o sistema de classificação tem sido refinado e expandido para diferentes tipos de costa (NOAA, 2002).

A classificação dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo é controlada pelos fatores mostrados na **Figura 4.2**, que são inerentes a cada tipo de ambiente costeiro.



**Figura 4.2** - Fluxograma mostrando as informações necessárias para a classificação da zona costeira quanto a seu índice de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

Os fatores expostos acima são considerados para a classificação dos ISA para os diferentes tipos de costa, sendo discutidos abaixo.

#### 4.2.2.1 - Grau Relativo de Exposição à Energia de Ondas e Marés

O tipo de comunidade biológica da zona de intermaré tem relação direta com o grau relativo de exposição à energia de ondas e marés. Rickets *et al.* (1968, *apud* NOAA, 2002) classificaram os ambientes costeiros da Califórnia como expostos e abrigados, diferenciando-os entre ambientes sujeitos à grandes impactos por grandes ondas e ambientes costeiros abrigados por feições de proteção. Os estudos geomorfológicos realizados após os derramamentos de óleo de Metula, em 1974, no Chile (50 mil toneladas), de Urquiola, em 1976, na Espanha (100 mil toneladas) e de Amoco Cadiz, em 1978, nas costas da Inglaterra e França (223 mil toneladas) indicaram que o nível do impacto do derramamento está intimamente relacionado com o grau relativo de exposição dos ambientes atingidos (Gundlach & Hayes, 1978; Michel *et al.*, 1978).

O grau de exposição relativo dos ambientes costeiros à energia de ondas e marés determina sua capacidade de recuperação natural, bem como guarda uma relação estreita com o tipo de comunidade biológica presente. Assim, regiões com alto grau de energia de ondas e marés apresentam comunidades diferentes daquelas encontradas em áreas com baixo grau de energia, pois a biota associada está aclimatada à pressão ambiental atuante (ARPEL, 1997).

A energia de marés é uma importante consideração na determinação do impacto ocasionado pelos derramamentos de óleo nos ambientes costeiros, pois fortes correntes de maré podem remover o óleo ou, de outra forma, enterrar o óleo a partir do retrabalhamento sedimentar.

Ambientes de alta energia possuem menor tempo de permanência do óleo, com remoção natural ocorrendo entre alguns dias até semanas. Para ambientes de baixa energia, a remoção natural é lenta, ocorrendo dentro de anos; para os de média energia, o óleo derramado será removido quando o próximo evento de alta energia acontecer, podendo demorar dias ou até meses após o derramamento, considerando que nenhuma ação de mitigação seja tomada (ARPEL, 1997).

#### 4.2.2.2 - Declividade da Costa

A declividade do litoral é uma medida da inclinação da zona intermaré, podendo ser caracterizada como íngreme (maior que 30°), moderada (entre 30 e 5°), ou plana (menor que 5°). A importância disso se dá principalmente pelo efeito de reflexão e quebra das ondas, visto que áreas intermarés íngremes estão usualmente sujeitas a abruptas quebras de ondas ou, até mesmo reflexão, processos estes que aumentam a limpeza natural do ambiente. Áreas planas intermarés

favorecem a dissipação da energia das ondas, tendo o agravante de que, nestas áreas, há um número maior de comunidades biológicas, em função, da menor energia relativa do ambiente e da área maior para o desenvolvimento das comunidades biológicas (MMA, 2002).

A amplitude da maré (juntamente com a declividade do perfil topográfico) determina a largura da zona intermarés, ou seja, a superfície mais sujeita a ser coberta por óleo no caso de um derramamento (ARPEL, 1997).

#### 4.2.2.3 - Tipo de Substrato

Os tipos de substrato, para fins de mapeamento dos ISA, são classificados como: 1) Rochoso (impermeáveis e permeáveis); 2) Sedimentar (divididos em função de sua granulometria); 3) Estruturas artificiais (aqueles construídas pelo homem para contenção de processos erosivos) (NOAA, 2002).

A diferença entre os tipos de substratos é importante para se inferir o potencial para penetração e/ou enterramento do óleo. Penetração e enterramento são mecanismos que aumentam a persistência do óleo no ambiente, ocasionando impactos ambientais de longo período e tornando o processo de limpeza mais difícil (MMA, 2002).

A penetração ocorre quando o óleo aprisionado afunda em sedimentos permeáveis; a profundidade de penetração é controlada pelo tamanho e grau de seleção dos grãos do substrato. Dessa forma, é esperada uma penetração maior para sedimentos grossos e bem selecionados. Praias de areia são diferenciadas em função do tamanho dos grãos (fina, média, grossa), apresentando diferentes taxas de permeabilidade e consequente profundidade potencial de penetração do óleo, enquanto que o substrato lamoso tem menor permeabilidade e tende a ser saturado em água, com pequena profundidade de penetração de óleo. Contudo, a presença de fauna bioturbadora no substrato pode fornecer um mecanismo para facilitar a penetração do óleo (MMA, 2002).

Já o soterramento ocorre quando os sedimentos são depositados sobre a camada de óleo, pela ação das ondas e marés. A taxa de soterramento varia amplamente, em função do ciclo das marés. Um soterramento mais rápido ocorre usualmente em praias de areia grossa, pela alta mobilidade do substrato (ARPEL, 1997).

O tipo de substrato deve também ser pensado quanto à facilidade para movimentação das equipes de resposta e utilização de máquinas durante os esforços de limpeza. Em geral, em

litorais com baixa trafegabilidade, a equipe de limpeza terá dificuldade para usar equipamentos e máquinas de resposta aos derramamentos, ou ainda poderá causar dano adicional ao ambiente com os esforços de limpeza.

Assim, praias de areia com granulação fina são tipicamente compactadas e duras, com pouca chance de soterramento do óleo no substrato. Já praias de granulometria grossa são menos compactadas, possuindo alta permeabilidade, o que cria dificuldades para movimentação e facilita o trapeamento do óleo encalhado no substrato. Nas praias de cascalho, que são menos trafegáveis ainda, os veículos tendem a forçar o óleo para dentro do substrato (Petrobras, 2002).

Ambientes alagados possuem substratos lamosos e com baixa trafegabilidade, impossibilitando o uso de máquinas e equipamentos, principalmente em função da dificuldade de acesso. A fauna e a flora são frágeis nesses ambientes, sendo que os esforços de limpeza podem afetar as plantas e os animais em tocas (Petrobras, 2002).

#### **4.2.3 - Aspectos biológicos**

Várias espécies biológicas, sejam marinhas, costeiras ou residentes em habitats submarinos, podem estar em risco em caso de um derramamento de óleo. Para a classificação dos ISA, é importante considerar a distribuição e a fase da vida dos organismos presentes na área (Petrobras, 2002).

A produtividade biológica dos ambientes costeiros é um componente importante na classificação dos ISA. Habitats vegetados alagados, tais como pântanos e mangues, têm elevado índice de sensibilidade, em função do impacto potencial de longo período, resultante da exposição direta ao óleo, da frágil e rica comunidade biológica e do dano adicional associado com atividades de limpeza nesses ambientes. A recuperação dos recursos impactados pode levar décadas nesses ambientes mais produtivos, em função de um desequilíbrio ecológico na cadeia alimentar, dada a grande importância destas áreas como pontos de alimentação de peixes e aves (IPIECA, 1991).

#### **4.2.4 - Aspectos sócio-econômicos**

A preocupação principal é de minimizar impactos nas atividades de importância econômica, social e de subsistência das populações que habitam a zona costeira, incluindo aí aspectos comerciais e culturais.

As regiões costeiras e ribeirinhas são utilizadas para assentamento populacional, turismo, extração de recursos, dentre outras atividades, sendo freqüentemente sensíveis aos impactos do óleo derramado (Petrobras, 2002).

Nesse contexto, as áreas costeiras têm chamado a atenção dos governos, uma vez que constituem uma região privilegiada para o uso de diferentes estratégias de planejamento ambiental e administração sustentável da terra e áreas de uso. Dessa forma, nos últimos 30 anos tem ocorrido uma evolução nas estratégias de gerenciamento costeiro, objetivando uma avaliação integrada do problema, considerando três fatores; 1) ambiental (tipo, frequência, magnitude e distribuição no espaço); 2) econômico (uso apropriado dos recursos e proteção); 3) humano (atividades sócio-econômicas e uso da terra) (Szlagsztein, 2003).

#### 4.3 - MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE UTILIZADO NO BRASIL

Segundo a tendência mundial, a responsabilidade para elaboração de mapas de sensibilidade é dos órgãos governamentais. Atualmente, entidades internacionais como a IMO (*International Maritime Organization*) e UNEP (*United Nations Environments Programme*) têm estimulado os governos na elaboração desses mapas, bem como a cooperação entre governos e companhias de petróleo (Petrobras, 2002).

Dessa forma, este tópico é baseado no “Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo no Sistema Petrobras: Ambientes Costeiros e Estuarinos”, que orienta a elaboração de mapas de sensibilidade na Petrobras, assim como dá uma indicação da preocupação dessa empresa na área de segurança e meio-ambiente. Assim, foi usado o manual da Petrobras, por tratar-se da maior empresa atuante no Brasil nos setores de exploração, produção e transporte de petróleo e derivados. Ademais, esse documento está em conformidade com o manual do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2002), que é o órgão oficial responsável pela identificação e direcionamento do mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo em áreas ambientalmente sensíveis (Lei n.º 9.966, de 28 de abril de 2000).

Para a Petrobras (2002), áreas sensíveis são aquelas com os maiores riscos biológicos e sócio-econômicos. Nessas áreas, a aplicação correta das medidas de resposta resulta em significativa redução da contaminação, mitigando os impactos ambientais. Assim, os mapas de

ISA auxiliam no melhor direcionamento dos recursos disponíveis de resposta, tornando a utilização dos recursos de limpeza mais eficazes.

O manual Petrobras é baseado em uma adaptação do método criado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), considerando as especificidades do litoral brasileiro. A adoção desse índice se deve à aceitação e utilização em todo mundo do método citado.

A padronização dos métodos de atuação utilizados em derramamentos de óleo é necessária, principalmente para empresas que atuam em muitos países ou em países com amplo território, como o Brasil, em função das facilidades e da agilidade que as equipes responsáveis pelos planos de contingência e resposta encontram para elaboração, comparação e atualização dos diferentes Mapas de Sensibilidade Ambiental (NOAA, 2002).

#### 4.4- CARACTERIZAÇÃO DOS ECOSSISTEMAS COSTEIROS TROPICAIS AMAZÔNICOS

A costa amazônica, no norte do Brasil, abrange os Estados do Amapá, Pará e Maranhão, onde entre os principais processos que condicionam a dinâmica ambiental estão a dinâmica das marés e a descarga fluvial. Essa região é tipicamente estuarina, situada em um domínio transicional, onde ocorrem grandes variações de amplitude de maré, de 4 até 8 m, podendo alcançar 12 m na ilha de Maracá, no Estado do Amapá (Souza Filho *et al.*, 2004). Quando ocorrem as marés mais altas, as áreas inundáveis, tais como, manguezais, pantânos de água doce e salgada, têm sua extensão ampliada na costa amazônica para aproximadamente 30 km, enquanto que os estuários podem alcançar até 80 km de extensão, criando uma das mais extensas áreas de manguezal do mundo, que corresponde em área a cerca de 50 % dos manguezais do Brasil. Tais características peculiares, formam um dos mais fantásticos ambientes de sedimentação recente do mundo, em função da escala dos processos envolvidos e de sua riqueza natural.

Os estuários se formaram em regiões de transição entre o mar e as terras continentais, em razão de variações do nível do mar, que podem ser de natureza eustática (variações do volume de água dos oceanos), isostática (ajustes do nível da crosta terrestre) ou tectônica (Miranda *et al.*, 2002).

Em função dessa variação eustática, há cerca de 15.000-16.000 anos A.P., a linha de costa estava localizada nas proximidades da borda da plataforma continental. Assim, os sedimentos pleistocênicos depositados durante a fase transgressiva anterior foram retrabalhados por um

período de tempo relativamente curto, transportados em suspensão pela drenagem e depositados no talude continental.

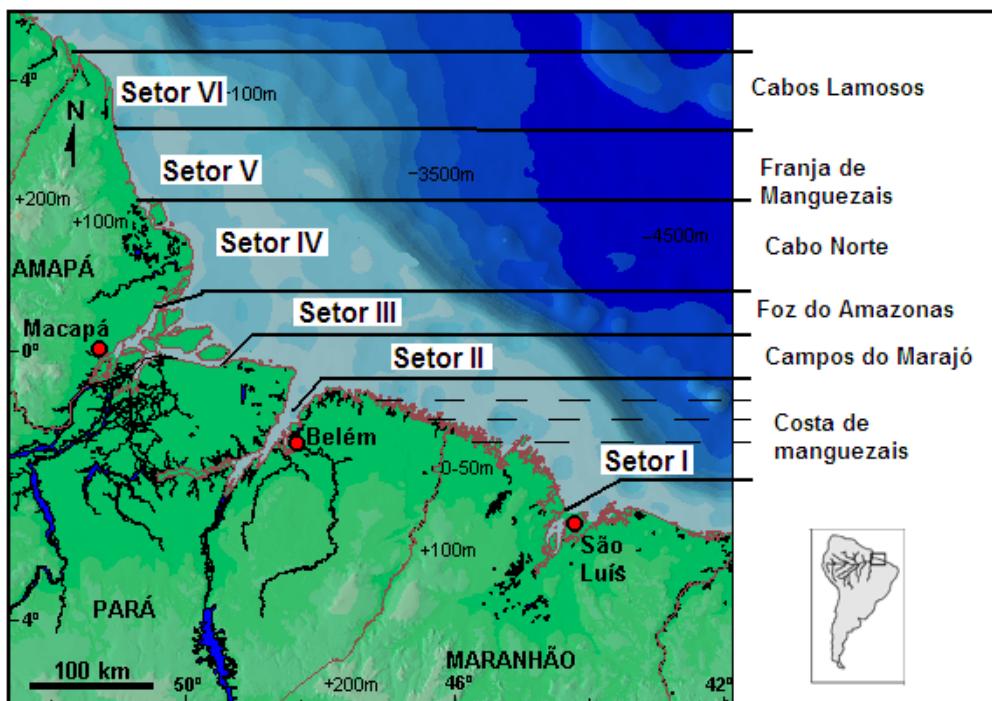
Alterações climáticas globais acarretaram o aquecimento da Terra e o progressivo degelo das calotas glaciais, elevando lentamente o nível do mar, com uma taxa média de um metro por século. Tal fenômeno resultou na última transgressão marinha, denominada de Transgressão Flandriana, que teve início há cerca de 15.000-16.000 anos A.P., ocasionando rápida ascensão do nível do mar, interrompida por estabilizações de curta duração correspondentes aos níveis atuais de -110 e -60m (Kowsmann<sup>1</sup> *et al.*, 1977, *apud*, Miranda *et al.*, 2002). Ao final desse processo transgressivo, entre 7.000-2.000 anos A.P, quando o mar atingiu aproximadamente o nível atual, as planícies costeiras e os vales dos rios foram gradativamente inundados, dando origem aos estuários, enseadas, baías e lagunas costeiras.

De acordo com Villwock (1994), Muehe (1998) e Souza Filho (2004), a costa equatorial da América do Sul pode ser caracterizada pelo seu relevo baixo (0 a 80 m), ampla planície costeira (com até 70 km de largura) e extensa plataforma continental adjacente (até 330 km de largura), recortada por vários estuários.

A partir de informações tectônicas, fisiográficas, sedimentológicas e oceanográficas, Souza Filho (2004) reconheceu seis compartimentos geomorfológicos ao longo da zona costeira amazônica; i) Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia; ii) Campos do Marajó; iii) Foz do Amazonas; iv) Cabo Norte; v) Manguezais em Franja do Amapá e; vi) Cabos Lamosos (Figura 4.3).

---

<sup>1</sup> KOWSMANN, R.O.; COSTA, M.P.A.; VICALVI, M.A.; COUTINHO, M.G.N.; GÂMBOA, L.A.P. 1977. *Modelo de sedimentação holocênica na plataforma continental sul brasileira*. Rio de Janeiro, p. 8-26. (Projeto REMAC).



**Figura 4.3** - Diferentes compartimentos geomorfológicos da zona costeira amazônica (Souza Filho, 2004).

Definida por Souza Filho (2004), a Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia estende-se da Ponta de Tubarão, Baía de São José (MA), até o Rio Pará (Baía de Marajó - PA), perfazendo cerca de 650 km de litoral em linha reta. Está sujeita a um regime de macromarés semidiurnas com variações de ~ 4 m em Belém até ~7,5 m na Baía de São Marcos (DHN, 2004). A velocidade de corrente de marés vazantes atinge até 1,43 m/s no sentido de SE para NW e as correntes de marés enchéntes apresentam velocidade de 1,13 m/s no sentido de NW para SE na costa nordeste do Pará, podendo atingir até 4 m/s na Baía de São Marcos no Maranhão (DHN, 2004). Estes fatores são os responsáveis em grande parte pelo transporte de sedimentos, assim como pela orientação dos canais estuarinos. Tais condições hidrodinâmicas influenciam consideravelmente a sedimentação e a dinâmica das áreas costeiras.

#### 4.4.1 - A dinâmica das marés

A maré astronômica é o principal processo na geração de flutuações turbulentas, correntes e mistura nos estuários. O fenômeno da maré é gerado pelas forças de atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol, associadas à aceleração centrípeta da Terra. Com isso, as

grandes massas de água se movimentam no sentido vertical (marés) e horizontal (corrente de maré).

As características hidrodinâmicas dos estuários são controladas principalmente pelas marés. A propagação desses eventos uma ou duas vezes por dia constitui o ciclo de maré e o intervalo de tempo desses ciclos, aproximadamente iguais a 12.4 e 25 horas, respectivamente, é o período semidiurno ou diurno da maré (Miranda *et al.*, 2002).

Segundo Davies (1964), de acordo com a máxima altura (HMAX), as marés se classificam em: 1) Micromaré ( $HMAX < 2m$ ); 2) Mesomaré ( $2 < HMAX < 4m$ ); 3) Macromaré ( $4 < HMAX < 6m$ ); e 4) Hipermaré ( $HMAX > 6m$ ).

A altura da maré tem relação direta com a extensão das áreas inundadas e com o desenvolvimento de condições propícias para o aparecimento de vegetação do tipo mangue e pantânos. Controla também, o tamanho da zona intermaré e, consequentemente, a extensão da área que potencialmente poderá ser atingida no caso de um derramamento de óleo, sendo este parâmetro de fundamental importância para a classificação dos índices de sensibilidade dos ambientes costeiros. Assim, áreas localizadas nas maiores elevações são cobertas na maré alta durante um curto intervalo de tempo e, por isso, recebem menos sedimentos e nutrientes do que as áreas mais baixas, sendo biologicamente menos produtivas (French<sup>2</sup>, 1997, *apud* Miranda *et al.*, 2002).

Além das flutuações semidiurnas e diurnas que são dominantes, a maré tem componentes de longo período, quinzenal, mensal e anual. Os componentes quinzenais são controlados pelas fases da Lua; assim, quando as forças de atração do sistema Lua-Sol se somam duas vezes em cada lunação (intervalo de tempo entre duas conjunções ou oposições da Lua), acontece a Lua Cheia e a Lua Nova, produzindo marés de sizígia com preamarés muito altas e baixa-mares muito baixas. De modo oposto, as forças de atração do sistema Sol-Lua se opõem duas vezes em cada lunação, por ocasião do quarto crescente e quarto minguante da Lua, produzindo marés de quadratura com preamarés mais baixas e baixa-mares mais altas (Pinheiro, 1987).

As oscilações com periodicidade sazonal fazem com que, no outono e na primavera, a maré de sizígia alcance valor máximo, enquanto o mínimo ocorre no inverno e no verão (Miranda *et al.*, 2002).

---

<sup>2</sup> FRENCH, P.W. 1997. *Coastal and estuarine management*. London, Routledge. 251 p. (Environmental management series).

Dessa forma, vislumbrando os cenários hipotéticos de mapeamento de ISA para a Amazônia e imaginando, num futuro não muito distante, a vanguarda das técnicas de monitoramento ambiental, com alta repetitividade de obtenção dos dados de sensores remotos e medidas meteo-oceanográficas, acompanhadas da checagem em campo simultaneamente à obtenção dos dados de sensores remotos, Souza Filho *et al.*, (2004) sugeriram cenários ideais de mapeamento dos ISA a derramamentos de óleo, considerando a interação da dinâmica das marés com o ciclo dos rios da Amazônia. Os cenários de maré são representados pelas 16 composições abaixo:

01. Equinócio-Sizígia-baixamar: março-abril e setembro-outubro
02. Equinócio-Sizígia-enchente: março-abril e setembro-outubro
03. Equinócio-Sizígia-preamar: março-abril e setembro-outubro
04. Equinócio-Sizígia-vazante: março-abril e setembro-outubro
05. Equinócio-Quadratura-baixamar: março-abril e setembro-outubro
06. Equinócio-Quadratura-enchente: março-abril e setembro-outubro
07. Equinócio-Quadratura-preamar: março-abril e setembro-outubro
08. Equinócio-Quadratura-vazante: março-abril e setembro-outubro
09. Solstício-Sizígia-baixamar: junho-julho e dezembro-janeiro
10. Solstício-Sizígia-enchente: junho-julho e dezembro-janeiro
11. Solstício-Sizígia-preamar: junho-julho e dezembro-janeiro
12. Solstício-Sizígia-vazante: junho-julho e dezembro-janeiro
13. Solstício-Quadratura-baixamar: junho-julho e dezembro-janeiro
14. Solstício-Quadratura-enchente: junho-julho e dezembro-janeiro
15. Solstício-Quadratura-preamar: junho-julho e dezembro-janeiro
16. Solstício-Quadratura-vazante: junho-julho e dezembro-janeiro

Por outro lado, os cenários decorrentes dos ciclos de descarga hídrica dos rios da Amazônia são representados por quatro condições de nível de água, conforme descrito nos itens abaixo.

- A) março-abril (enchente)
- B) maio-junho (máximo-cheia)
- C) agosto-setembro (vazante)
- D) novembro-dezembro (mínimo-seca)

Esses cenários demonstram, em parte, a grande complexidade dos processos ambientais atuantes na Costa Amazônica, assim como um direcionamento para o futuro do monitoramento ambiental nessas áreas, onde cada evento poluidor poderá contar com uma série de dados obtidos em tempo real, que proporcionarão a elaboração de um mapa de sensibilidade ambiental para cada evento, resultando na elaboração de planos de contingenciamentos mais eficientes.

#### **4.4.2 - Variáveis biológicas nas áreas inundáveis em função da dinâmica das marés**

As áreas inundáveis recebem periodicamente o aporte lateral das águas dos rios, da precipitação pluviométrica ou de lençóis freáticos (Piedade, 2000). Na Amazônia, o regime das águas é a principal força reguladora dos processos biológicos, químicos e físicos atuantes nas áreas inundáveis, sendo que estes são condicionados pela interação de diversos fatores sazonais agindo diferentemente, em função da posição geográfica, com uma maior ou menor influência das marés.

A dinâmica da troca lateral entre as áreas inundáveis e o canal do rio, e a consequente reciclagem de nutrientes dentro da planície de inundação, tem impacto direto na biota das áreas inundáveis, elevando a produtividade dessas áreas. A dinâmica desses ambientes evita a permanente estagnação, promovendo a rápida reciclagem de matéria orgânica e nutrientes (Piedade, 2000).

A diversidade de organismos e os processos atuantes nas áreas inundáveis tendem a aumentar a importância desses ambientes, como fonte ou como exportadores de vida para áreas vizinhas, evidenciando a importância da sua manutenção. O conhecimento da potencialidade natural das áreas inundáveis e a identificação de formas de manejo sustentável viáveis são aspectos importantes para manutenção e sobrevivência das populações ribeirinhas.

## CAPÍTULO 5

### 5- SENSORES REMOTOS E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA O MAPEAMENTO DOS ISA

Neste capítulo, será feita uma descrição das principais características dos sensores remotos usados nesta Dissertação. Em seguida, serão abordadas as técnicas de processamento digital de imagens nas microondas (RADARSAT-1) e na faixa óptica do espectro eletromagnético (LANDSAT-7 ETM+), como também as principais técnicas de integração digital e classificações utilizadas.

#### 5.1 - O SATÉLITE LANDSAT-7 ETM+

O LANDSAT-7 ETM+ é o mais recente satélite da família LANDSAT, financiado pelo Governo Norte Americano. Este satélite foi lançado em abril de 1999, possuindo um sensor denominado ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), com vida útil de aproximadamente cinco anos. Este sistema operava em oito bandas espectrais, fornecendo imagens na faixa do visível (bandas 1, 2, 3), infravermelho refletido (bandas 5, 7) e uma banda no infravermelho termal (6L e 6H, alto e baixo ganho, respectivamente). Além disso, a grande vantagem do LANDSAT-7 ETM+ em relação ao seu antecessor, LANDSAT-5 TM, é a adição de uma banda pancromática com 15 m de resolução espacial (banda 8), como também melhorias nas características geométrica e radiométrica (Irish, 1998).

A resolução espacial deste sensor é de 30 m, com exceção da banda 6 que tem resolução de 60 m operando na faixa do termal, e da banda 8 pancromática que opera na faixa que vai de 0.52 até 0.9  $\mu\text{m}$ , com resolução de 15 m. A área de imageamento no terreno do LANDSAT-7 ETM+ é de 185 x 185 km, possuindo órbita polar heliosíncrona, operando numa altitude de aproximadamente 705 km, com inclinação orbital de 98º e resolução temporal de 16 dias (Irish, 1998). Na **Tabela 5.1** abaixo, segue uma descrição das principais características das imagens LANDSAT-7 ETM+.

<i><b>Bandas</b></i>	<i><b>Faixa Espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b></i>
1	0,45-0,52 (azul)
2	0,52-0,60 (verde)
3	0,63-0,69 (vermelho)
4	0,76-0,90 (infravermelho próximo)
5	1,55-1,75 (infravermelho médio)
6	10,40-12,50 (infravermelho termal)
7	2,08-2,35 (infravermelho médio)
8	0,52-0,90 (pancromática)

**Tabela 5.1**-Bandas do sistema LANDSAT-7 ETM+ com suas respectivas faixas espectrais (Irish, 1998).

## 5.2 - O SATÉLITE RADARSAT-1

O Sistema RADARSAT-1 foi desenvolvido pela Agência Espacial Canadense (CSA), em cooperação com a Agência Espacial Americana (NASA), tendo sido lançado em novembro de 1995. Foi o primeiro satélite, com sensor nas microondas, concebido com uma visão comercial de operação e distribuição (RADARSAT International, 1995). Possui órbita quase polar, com inclinação de 98.6°, heliosíncrona, operando a uma altura de 798 km, com período orbital de aproximadamente 100 minutos e com um ciclo orbital completo em 24 dias, ou seja, a revisita de uma mesma órbita em torno da Terra ocorre a cada 24 dias. O RADARSAT-1 pode adquirir imagens tanto em órbita ascendente, com visada para leste, como em órbita descendente, com visada para oeste (RADARSAT International, 1995).

O Satélite RADASAT-1 é um sistema ativo, equipado com um avançado Radar de Abertura Sintética (SAR), que opera na região das microondas, banda C (freqüência de 5.3 GHz ou comprimento de onda de 5,6 cm), o que o habilita a operar em condições climáticas adversas, ou mesmo durante a noite. Ademais, este sistema possui polarização HH, ou seja, transmite o pulso de energia eletromagnética com o vetor do campo elétrico vibrando na horizontal, perpendicular à propagação do pulso, e recebe o sinal de retorno vibrando também na horizontal (RADARSAT International, 1997). A **Tabela 5.2** mostra os principais parâmetros do sistema RADARSAT-1.

O RADARSAT-1 foi desenhado com sete opções de imageamento, apresentando características de operação bastante peculiares, podendo obter dados com resolução espacial variando de 10 a 100 metros, abrangendo uma faixa de varredura variando de 50 km x 50 km a 500 km x 500 km, com correspondentes variações de ângulo de incidência (10° a 59°), (Parashar

*et al.*, 1993). Dessa feita, a combinação entre os diferentes parâmetros do sistema RADARSAT-1 possibilita um grande número de configurações de imageamento, resultando em 35 possibilidades diferentes; é essa flexibilidade de obtenção de dados que diferencia o RADARSAT-1 dos demais sistemas SAR anteriores (Paradella *et al.*, 2000). Assim, para maximizar a extração de informações das imagens RADARSAT-1 em determinada aplicação, é necessário avaliar várias combinações de modos de imageamento para determinar a opção apropriada (Singhroy & Saint-Jean, 1999). A **Tabela 5.3** mostra os modos de imageamento do RADARSAT-1 e dá uma idéia das diferentes possibilidades de aquisição de dados deste sensor.

<b>SAR Radarsat-1</b>	<b>Especificações</b>
Freqüência	5,3 GHz
Comprimento de Onda	5,6 cm (Banda C)
Polarização	HH
Ângulo de Incidência	10°- 60°
Resolução em Range	8 -100 m
Resolução em Azimute	8 -100 m
Resolução Nominal Temporal	24 dias
Swath	50-500 km
Órbita	sol-síncrona, quasi-polar, circular
Inclinação	98.6°
Altitude	798 km
Tamanho da Antena	15 x 1,5m
Modos de Operação	Standard, Wide, Fine, ScanSAR, Extended

**Tabela 5.2** - Principais parâmetros do sistema RADARSAT-1 (Parashar *et al.*, 1993).

As imagens RADARSAT-1 têm sido usadas em diversas aplicações na indústria do petróleo, principalmente para a detecção e monitoramento de manchas de óleo no mar, de origem natural (exsudações) e antropogênicas (Miranda *et al.*, 2004). Além disso, são também utilizadas em mapeamento geológico (estrutural, geomorfológico, zonas sismogênicas, avaliação de dinâmica costeira), em estudos relacionados com monitoramento ambiental de florestas, estudos de áreas agrícolas, mapeamento de áreas inundáveis, mapeamento de uso da terra e monitoramento de calotas de gelo (RADARSAT International, 1997).

Apesar de várias vantagens, os sistemas que operam nas microondas também possuem limitações, tais como, grandes distorções geométricas (encurtamento, inversão de relevo e sombreamento), ou ainda um tipo de ruído inerente ao imageamento com radar, que é denominado de *speckle*.

<b>Modos</b>	<b>Ângulo</b>	<b>Faixa Imageada</b>	<b>Resolução Nominal</b>	<b>Nº Looks</b>
	<i>Incidência (°)</i>	(km)	(m)	
Fine	37-48	50	10	1
Standard	20-49	100	30	4
Wide	20-45	150	30	4
ScanSAR Narrow	20-46	300	50	2
ScanSAR Wide	20-49	500	100	4
Extended High	49-59	75	25	4
Extended Low	10-23	170	35	7

**Tabela 5.3** - Modos de imageamento do sistema RADARSAT-1 e seus principais parâmetros. (RADARSAT Internacional, 1995).

### 5.3 - A MISSÃO SRTM

Em 11 de fevereiro de 2000, o ônibus espacial *Space Shuttle Endeavour* foi lançado para uma missão de imageamento ininterrupto da superfície terrestre, durante 11 dias, operando a 233 km de altitude com um moderno sistema SAR interferométrico (InSAR), que permitiu a confecção de um DEM (*Digital Elevation Model*), em escala global, da superfície terrestre, cobrindo aproximadamente 80% da Terra, entre 60° N e 57° S de latitude (Helm *et al.*, 2002). Essa missão foi chamada de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), sendo a primeira a fornecer, com relativa exatidão, dados de elevação em escala global, executando esse levantamento em uma única passagem (*single-pass*) a partir do espaço. Antes disso, somente dados obtidos com passagens distintas (*repeat-pass*) foram obtidos pela ERS-1 e ERS-2 (*European Remote Sensing Satellite*), (Rabus *et al.*, 2003).

A interferometria SAR utiliza um par de imagens em formato complexo, com informações de amplitude e fase, para gerar um produto chamado de imagem interferométrica, onde a fase de cada pixel na imagem gerada é formada pela diferença de fase entre os *pixels* das imagens originais. Assim, a fase de cada pixel na imagem interferométrica tem relação com a

elevação do terreno, o que possibilita a geração de um modelo digital de elevação, MDE (Fernandes & Fernandes, 1998; Toutin & Gray, 2000; Rabus *et al.*, 2003; Dutra *et al.*, 2003).

O sistema InSAR do SRTM operou com dois pares de antenas em banda X e banda C. Os dados obtidos com banda X possuem resolução de 1 arc sec ( $\sim 30m$ ) e cobrem uma área de 58 milhões de  $km^2$  da superfície terrestre, enquanto que aqueles obtidos com banda C possuem resolução de 3 arc sec ( $\sim 90m$ ), cobrindo uma área de 119 milhões de  $km^2$ . Os dados adquiridos em banda C foram processados pela Agência Espacial Americana (*NASA/JPL-Jet Propulsion Laboratory*), enquanto que, os dados obtidos com banda X foram processados conjuntamente pela Agência Espacial Alemã (*DLR-German Aerospace Center*) e Agência Espacial Italiana (*ASI-Italian Space Agency*) (Rabus *et al.*, 2003).

Após o processamento, os dados do sistema InSAR foram disponibilizados na forma de DEM (*Digital Elevation Model*), com coordenadas geográficas e datum vertical e horizontal WGS-84, com resolução espacial horizontal de 30 m e 90 m (tamanho do pixel), para banda X e C, respectivamente. A acurácia do DEM SRTM é de  $\pm 16m$  e  $\pm 6m$ , acurácia vertical absoluta e acurácia vertical relativa, respectivamente (Rabus *et al.*, 2003). Estes dados podem ser obtidos gratuitamente via internet no endereço: <http://srtm.usgs.gov/>.

Os dados SRTM podem ser úteis para regiões onde não há levantamento altimétrico sistemático, áreas estas onde os mapas topográficos, quando existem, são limitados e inexatos. Para regiões de difícil acesso, tais como áreas montanhosas, desertos e florestas tropicais, com baixa e inadequada cobertura de dados altimétricos, principalmente em função das dificuldades de acesso, esses dados podem ser usados com sucesso. Outro problema que os dados SRTM podem resolver diz respeito à falta de padronização na geração dos levantamentos topográficos, o que impossibilita trabalhos em escala regional, o que não ocorre com o DEM do SRTM.

O DEM interferométrico permite ortorretificar vários tipos de imagens SAR, bem como fornece uma visão instantânea da superfície terrestre durante os 11 dias em que o ônibus espacial *Space Shuttle Endeavour* esteve em órbita (Rabus *et al.*, 2003).

## 5.4 - PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O método empregado neste trabalho foi desenvolvido em duas etapas. Primeiramente foi realizado o processamento digital das imagens ópticas e de microondas, aplicadas técnicas de integração digital de dados multisensores e avaliado o sinergismo radar/óptico, bem como gerado e avaliado o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) das imagens RADARSAT-1 W1. Na segunda etapa do trabalho, foram elaborados os mapas de unidades de paisagem e o mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo.

Dessa forma, para o processamento digital das imagens de sensores remotos, foi utilizado o programa PCI Geomatics V. 9.1 (PCI Geomatics, 2004), enquanto que o programa empregado para geração dos mapas e manipulação espacial de dados foi o ArcView GIS 3.3 (ESRI, 2001).

Assim, na **Tabela 5.4** abaixo, segue uma descrição dos principais parâmetros dos sistemas sensores e imagens usadas nesse trabalho.

<i>Plataforma</i>	<i>Sensor</i>	<i>Data de aquisição</i>	<i>Angulo de incidência (°)</i>	<i>Resolução espacial (m)</i>	<i>Tamanho pixel</i>	<i>Swath (Km)</i>	<i>Condição de maré</i>
RADARSAT-1	Wide 1	5 Jan. 2003	20-31	33x27	12,5	165	Baixa
RADARSAT-1	Wide 1	29 Jan. 2003	20-31	33x27	12,5	165	Alta
LANDSAT – 7	ETM+	3 Out. 2001	Nadir	30	30	185	Alta
Ortofotografia (SRTM)	Visível	1998	Nadir	3,6	3,6	--	--
	InSAR	Fev. 2000	off-nadir	90	90	111	--

**Tabela 5.4** - Principais características dos sensores remotos utilizados.

Assim, um problema encontrado neste trabalho foi a falta de imagens ópticas (LANDSAT) disponíveis para a área estudada sem cobertura de nuvens durante o período de aquisição das imagens RADARSAT-1.

### 5.4.1 - Processamento dos dados de elevação SRTM

Os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foram obtidos através da internet (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>), em formato “.hgt”, e manipulados nos programas *Global Mapper V 5.1* e *PCI* (*PCI Geomatics*, 2004). Num primeiro momento, os dados SRTM foram exportados para o *PCI*. O principal problema encontrado para utilização desses dados no processo de ortorectificação, foram falhas de informação (representadas por cotas negativas da ordem de –

8000000 m), principalmente sobre a água, retiradas usando o módulo IIIBIT do X-pace no programa PCI, que atribuiu valores iguais a zero para todas as áreas que não estavam sob uma máscara (bitmap).

#### **5.4.2 - Processamento digital das imagens LANDSAT-7 ETM+**

##### **5.4.2.1-Correção Atmosférica**

Os constituintes atmosféricos (gases e aerossóis) afetam a resposta dos alvos que são registrados por sensores remotos; essa interferência pode ser por absorção atmosférica, que subtrai valores de brilho (níveis de cinza) na imagem, ou ainda por espalhamento que adiciona valores de brilho a imagem (Song<sup>1</sup> *et al.*, 2001, *apud* Machado *et al.*, 2003).

O efeito da atmosfera mais pronunciado é o espalhamento, sendo que este é mais intenso para comprimentos de ondas menores (região do visível), decrescendo à medida que o comprimento de onda aumenta (região do infravermelho). Isso ocorre porque partículas atmosféricas possuem tamanhos similares ao comprimento de onda da radiação eletromagnética na região do visível; dessa forma, para comprimentos de ondas maiores, a atmosfera é relativamente menos espalhadora (Fonseca *et al.*, 2000).

A correção do efeito atmosférico em dados de sensores remotos pode ser feita usando modelos que simulam as propriedades ópticas da atmosfera, por exemplo, o modelo 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*) (Vermote<sup>2</sup> *et al.*, 1997, *apud* Silva & Valeriano, 2003). Pode-se também implementar essa correção pela identificação de alvos na imagem que tenham valores de reflectância conhecidos, onde é possível inferir a contribuição aditiva da atmosfera na radiância dos alvos, método que é chamado de subtração do pixel escuro (Chavez Jr., 1988).

O método da subtração do pixel escuro é baseado no fato de que a interferência atmosférica é aditiva, ou seja, há um aumento na radiância durante a trajetória da radiação eletromagnética entre a superfície terrestre e o sensor, em função do espalhamento atmosférico (Chaves, 2002). Para se eliminar esse efeito, são utilizadas regiões de sombras intensas ou lagos

---

<sup>1</sup> SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K.C.; LENNE, M. P.; MACOMBE, S.A. 2001. Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects?. *Remote Sensing of Environment*, 75 (2):230-244.

<sup>2</sup> VERMOTE, E.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M. E MORCETTE, J. J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 675-686.

de água profunda e limpa para calcular empiricamente a intensidade do espalhamento atmosférico nas diferentes bandas do LANDSAT-7 ETM+. Nessas regiões, teoricamente deveria inexistir (no caso de sombras) ou ser absorvida (no caso da água) toda radiação incidente, aparecendo com níveis de cinza iguais a zero. Assim, valores diferentes de zero são atribuídos ao espalhamento.

Para se eliminar o efeito atmosférico foram examinados os níveis de cinza referentes a diferentes corpos de água (Água Preta e Bolonha) presentes nas imagens. Assim, os valores médios resultantes da análise dos níveis digitais em cada banda foram subtraídos, usando a função ARI (*Arithmetic Operations*) disponível no módulo *ImageWorks* do programa EASIPACE, V. 9.1 (*PCI Geomatics*, 2004).

#### 5.4.2.2 - Análise Estatística da Imagem LANDSAT-7 ETM+

As imagens LANDSAT-7 ETM+ utilizadas nessa Dissertação cobrem a porção do visível (bandas 1, 2 e 3), infravermelho próximo (banda 4) e infravermelho médio (bandas 5 e 7) do espectro eletromagnético. Para escolha da melhor tríade de bandas espectrais para uma composição colorida, obtendo um conjunto de dados com a menor correlação e máxima variância, foi usado o OIF (*Optimum Index factor*) elaborado por Chavez Jr. *et al.* (1982).

Assim, o OIF é baseado na variância<sup>3</sup> e correlação entre diferentes bandas, sendo calculado pelo somatório dos desvios padrões<sup>4</sup> de três bandas, dividido pelo módulo do somatório dos coeficientes de correlação entre essas três bandas (**equação 5.1**). O coeficiente de correlação (**equação 5.2**) mede a similaridade entre dois conjuntos de dados numéricos sobre uma escala absoluta de [-1,1], sendo calculado pela divisão da covariância<sup>5</sup> entre duas bandas, pela raiz quadrada do produto dos desvios padrões dessas mesmas bandas (Fonseca *et al.*, 2000). Assim, A combinação com o maior OIF selecionada para a composição colorida conterá a maior quantidade de informação não correlacionada (Chavez Jr. *et al.*, 1982).

---

<sup>3</sup> Variância é uma medida da variação dos níveis de cinza de uma imagem em relação à média, dando idéia do contraste na imagem, representado pelo quadrado do desvio padrão.

<sup>4</sup> Desvio Padrão é uma medida do grau de dispersão de dados numéricos em torno de um valor médio.

<sup>5</sup> Covariância é uma grandeza que relaciona duas variâncias específicas, descrevendo o grau de correlação entre duas bandas, ou seja, dá idéia da quantidade de informação que é comum a duas bandas.

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 Desv.Padrão_i}{\sum_{j=1}^3 |Coefic.Correl.|_j} \quad (\text{equação 5.1})$$

$$Coefic.Correl(x, y) = \frac{Covariância(x, y)}{\sqrt{Variância(x) \times Variância(y)}} \quad (\text{equação 5.2})$$

Dessa forma, foi realizada a análise dos valores digitais das imagens LANDSAT-7 ETM+ e o cálculo do IOF para selecionar a melhor tríade de bandas para uma composição colorida. Os valores estatísticos da imagem foram obtidos através do algoritmo PCA (*Principal Component Analysis*) do módulo X-PACE do programa PCI, que gera um relatório com os principais parâmetros estatísticos que são usados no cálculo do IOF (*PCI Geomatics*, 2004).

#### 5.4.2.3 - Correção Geométrica

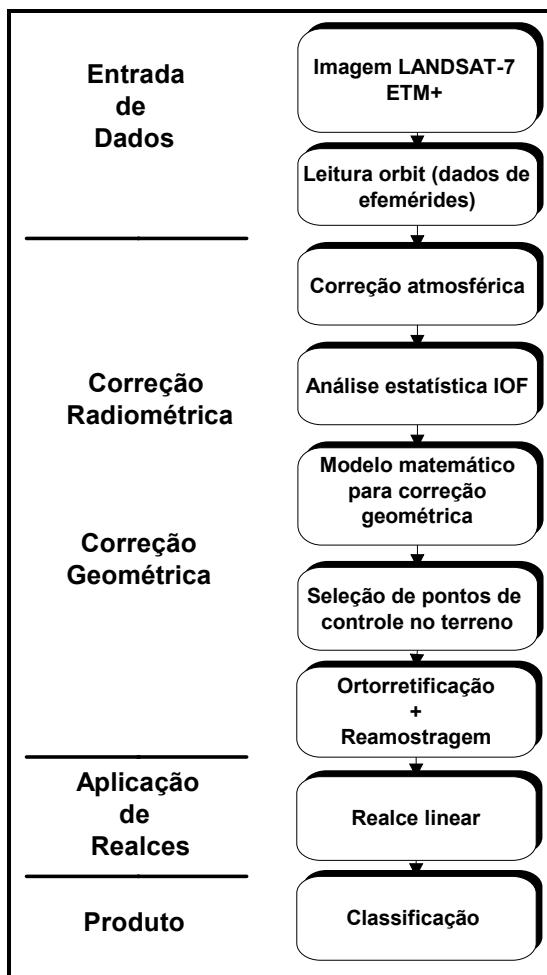
As imagens geradas por sensores remotos possuem vários tipos de distorções geométricas que podem ser causadas por fatores relacionados com a curvatura da Terra, geometria de imageamento, relevo ou variações de posicionamento durante o processo de aquisição dos dados (Toutin, 1995). O objetivo da correção geométrica é minimizar essas distorções e georeferenciar as imagens utilizando uma projeção cartográfica adequada, assegurando a correspondência de que um ponto na imagem seja realmente a representação do mesmo ponto no terreno, conferindo ao produto precisão cartográfica (Madrucci, 1999). Assim, dois aspectos que justificam amplamente a realização da correção geométrica, estão relacionados com estudos multitemporais e com a integração digital de dados multisensores, onde a exatidão da correção geométrica é imprescindível para um bom resultado.

Os métodos mais comuns de correção geométrica são baseados em modelos matemáticos polinomiais e paramétricos. Os métodos de correção geométrica que utilizam modelos polinomiais são obsoletos e freqüentemente usados sem alcançar a exatidão esperada, uma vez que corrigem as distorções apenas nas proximidades dos GCPs (*Ground Control Points*) e não consideram a elevação do terreno e as distorções introduzidas durante a aquisição da imagem, o que limita sua utilização para áreas pequenas e planas, (Toutin, 1995).

Já o modelo paramétrico, também chamado de ortorretificação, utiliza além de GCPs, um modelo digital de elevação. Esse modelo reflete a realidade física da geometria de imageamento, corrigindo as distorções introduzidas pela movimentação da plataforma (posição e velocidade), distorções relativas ao sensor (ângulo de orientação, campo de visada instantâneo e tempo de detecção do sinal), distorções relativas à Terra (geóide-elipsóide) e distorções relativas à projeção cartográfica (plano elipsóide-cartográfico) (Toutin, 1995).

Segundo Toutin (1995), o método de ortorretificação é integrado e unificado, uma vez que pode ser usado em dados obtidos por diversos tipos de sensores (orbital ou aerotransportado), operando nas microondas ou no espectro óptico, possibilitando que somente um sistema de correção de imagens seja usado para diferentes tipos de sensores e plataformas, com diferentes resoluções, desde que utilize um modelo matemático de acordo com o sensor que gerou a imagem.

O método usado para corrigir os dados LANDSAT-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1 nessa Dissertação foi a ortorretificação, uma vez que pode ser aplicado a imagens ópticas, com acurácia de 1/3 de *pixel*, e a imagens SAR, com acurácia em torno de 1 *pixel* (Toutin, 1995). Para isso, foi usado o programa PCI OESI (*OrthoEngine Satellite Edition*), (*PCI Geomatics, 2004*). O processo de ortorretificação assegura a padronização dos dados no campo e no espaço, permitindo sua manipulação e comparação de dados, pixel-a-pixel (Souza Filho, 2000). Uma vez que os procedimentos adotados durante a correção geométrica da imagem LANDSAT-7 ETM+ são iguais aos utilizados para a correção das imagens RADARSAT-1 W1, estes serão abordados no tópico 5.4.3.2. A **Figura 5.1** mostra o fluxo de processamento para as imagens LANDSAT-7 ETM+.



**Figura 5.1** - Fluxograma mostrando as etapas do processamento das imagens LANDSAT-7 ETM+.

#### 5.4.3 - Processamento das imagens RADARSAT-1 Wide 1

##### 5.4.3.1 - Reescalonamento

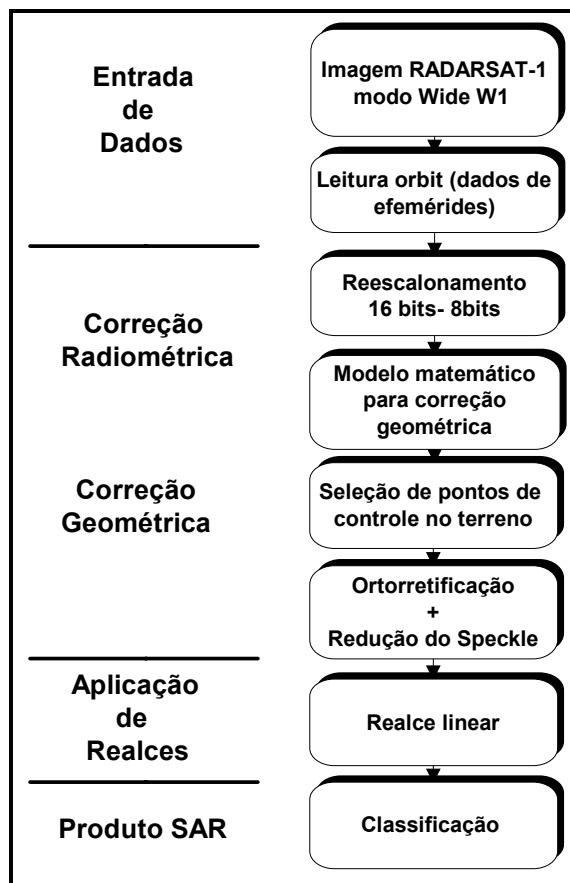
Antes do processo de ortorretificação das imagens RADARSAT-1 W1, estas foram reescalonadas de 16 bits para 8 bits, ou seja, de um intervalo dinâmico de 0 a 65.635 níveis digitais para um de 0 a 255 níveis digitais. Isso foi feito, como uma forma de maximizar a capacidade computacional de processamento, à medida que o olho humano distingue apenas algumas dezenas de tons de cinza, não é necessário se trabalhar com as imagens em 16 bits para análise visual. A conversão foi realizada usando a função SCALE do PCI (*PCI Geomatics, 2004*).

#### 5.4.3.2 - Ortorretificação

De maneira geral, os passos para ortorretificação tanto das imagens LANDSAT-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1 possuem duas etapas. A primeira consiste no cálculo do modelo matemático a ser empregado, a partir dos dados da órbita e altitude da plataforma durante a aquisição das imagens, bem como na coleta de pontos de controle no terreno (GCP), com a máxima exatidão. Esse primeiro passo está diretamente relacionado com o grau de acurácia obtido com a ortorretificação. A última etapa, inclui a realização da ortorretificação propriamente dita, usando para isso um DEM (*Digital Elevation Model*).

Assim, os dados de efemérides, tanto para as imagens ópticas quanto para as imagens de radar, estão disponíveis no cabeçalho (*header*) dos dados, e incluem informações sobre o sensor e sua órbita. Para leitura do cabeçalho da imagem RADARSAT-1 W1, foi usada a função CDSAR disponível no programa PCI; já para a imagem LANDSAT-7 ETM+, foi usada a função CDLAND para leitura do cabeçalho e extração das informações referentes à órbita do satélite.

Em seguida, foi criado um projeto no programa PCI OESI, informado o tipo de dado a ser ortorretificado e definido o modelo matemático utilizado nesse processo. Nesse caso, foi usado o *Satellite Orbital Modelling* disponível no OESI, que é um modelo genérico que pode ser empregado para vários tipos de sensores orbitais, ou seja, tanto para as imagens LANDSAT-7 ETM+ como para as imagens RADARSAT-1 W1. A projeção cartográfica adotada foi a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), com elipsóide WGS 84 e *Datum South American 1969* (SAD-69). **Figura 5.2** mostra os principais passos executados durante o processamento das imagens RADARSAT-1.



**Figura 5.2** - Fluxograma mostrando as principais etapas do processamento das imagens RADARSAT-1 W1.

O passo seguinte no processo de ortorretificação é a coleta de pontos de controle, sendo que o modelo necessita de no mínimo 4 pontos para as imagens ópticas e 7 pontos para as imagens de radar. No entanto, é necessário que esses pontos sejam obtidos com exatidão para se alcançar uma boa acurácia no processo de correção geométrica das imagens (PCI Geomatics, 2004). Para um melhor resultado, é necessário que os pontos de controle sejam bem distribuídos por toda imagem. Foram coletados 15 pontos de controle, tanto nas imagens LANDSAT-7 ETM+ quanto nas imagens RADARSAT-1 W1.

Após a modelagem matemática, que foi realizada considerando-se os parâmetros da órbita, os dados de altitude extraídos de um DEM, sendo aqui usado o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), bem como os pontos de controle no terreno (GCP's), foi possível analisar os erros RMS (*Root Mean Square*). Assim, para que fosse mantido um balanço entre as integridades radiométricas e geométricas das imagens RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+

na integração desses dados, foi selecionado um tamanho comum de *pixel* de 30 m tanto para as imagens ópticas como para as de microondas (Souza Filho, 2000).

A quantidade de distorção nas imagens de satélite tem relação direta com a elevação do terreno (Andrade, 1999). Por isso, um DEM é de fundamental importância no procedimento de ortoortretificação, na medida em que fornece a informação de elevação em cada ponto da imagem. No presente trabalho, foi usado o SRTM para testar a potencialidade destes dados como uma ferramenta operacional no processo de ortoortretificação de imagens de satélite, o que é importante principalmente para regiões desprovidas de dados altimétricos, o que comumente acontece na Região Amazônica, onde grande parte dos dados altimétricos, quando existem, estão em escalas inapropriadas.

O procedimento final é a ortoortretificação propriamente dita, usando o modelo matemático calculado e o DEM (SRTM), sendo que, no programa PCI OESI, concomitantemente à ortoortretificação, é possível aplicar um filtro redutor de *speckle* durante o processo de reamostragem, evitando assim o uso de múltiplos processos de reamostragem na imagem (*PCI Geomatics*, 2004).

#### **5.4.4 - Fusão de imagens multisensores RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+**

##### **5.4.4.1 - Técnicas de Integração de Dados**

O objetivo da integração digital de dados de sensores remotos é maximizar a extração de informações, utilizando para isso, o sinergismo obtido com a fusão de dados de sensores que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético, procurando melhorar a identificação das feições na cena. Assim, enquanto um SAR fornece informações sobre a geometria do terreno (macro e micro-topografia) e suas propriedades elétricas (principalmente grau de umidade), sensores ópticos fornecem informações das propriedades físico-químicas dos alvos (Lewis *et al.*, 1998; Paradella *et al.*, 2000).

A fusão de imagens LANDSAT com imagens de radar na banda C é útil em áreas com topografia moderada e onde a cobertura superficial é uma mistura de solos expostos e vegetação. A integração de imagens LANDSAT-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1 favorece a distinção dos materiais em superfície quando há uma relação entre estes com o tipo e a densidade da vegetação, usando para isso as relações geobotânicas existentes (Singhroy, 1992).

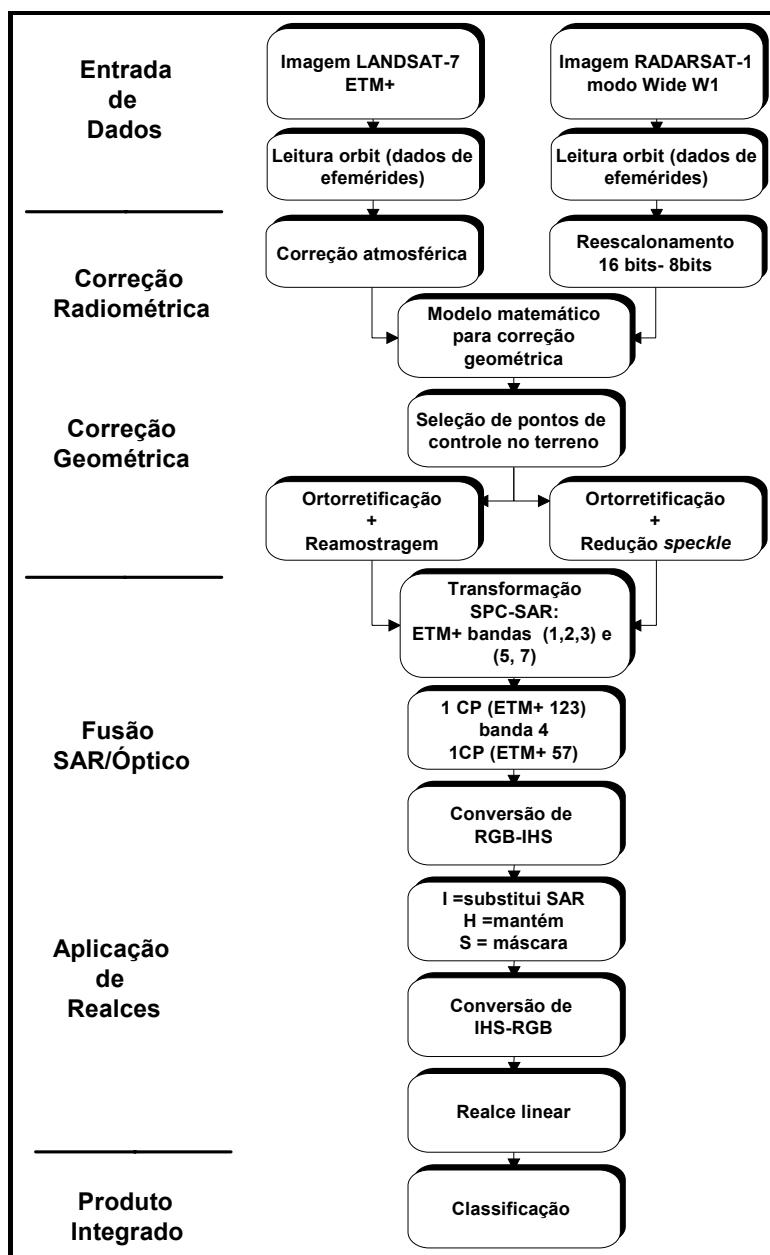
O sinergismo de uma imagem híbrida gerada pela fusão entre dados de SAR e ópticos permite melhorar a detecção e mapeamento das principais feições dos ambientes costeiros, notadamente em ambientes tropicais úmidos.

As principais técnicas para integração digital de imagens de sensores SAR e óptico são: a) Combinação de Bandas (Composição RGB); b) Combinações Aritméticas (multiplicação, divisão adição e subtração); c) Transformações Estatísticas (análise por componentes principais); d) Transformação no Espaço de Cores (transformação IHS); e) Transformações Espaciais (decomposição Wavelet) (Harris *et al.*, 1994; Paradella *et al.*, 2001). A técnica que tem apresentado melhor desempenho em geologia é a transformação IHS (Paradella *et al.*, 2001). Neste trabalho, foi usada a técnica de transformação IHS para integrar as imagens RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+, tal como descrito na **Figura 5.3**.

#### 5.4.4.2 - Análise por Componentes Principais (ACP)

A técnica de análise por componentes principais tem sido usada para eliminar a redundância de informação contida nas bandas refletidas do LANDSAT, bem como para realçar feições espectrais sutis, que são exclusivas de cada banda espectral (Almeida Filho, 2002). Essa técnica pode ser explicada considerando que algumas bandas apresentam grande quantidade de informação com alta correlação, o que indica que na superfície terrestre existem materiais com respostas espectrais semelhantes (Jensen, 1996; Picchiotti *et al.*, 1997; Chaves, 2002).

Duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em uma banda é, possível deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente na outra imagem (Madrucci, 1999). A análise por componentes principais é baseada em transformações matemáticas que geram novas bandas (componentes principais) não correlacionadas entre si, que são resultantes de combinações lineares das bandas originais, onde a contribuição de cada banda para uma determinada componente principal (CP) é função dos autovetores correspondentes. Já os autovalores representam a variância das componentes principais (Fonseca *et al.*, 2000).



**Figura 5.3** - Fluxograma mostrando os principais passos na fusão RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+, utilizando a abordagem SPC-SAR (Paradella *et al.*, 1999)

Dessa forma, a soma das variâncias em todas as componentes é igual ao total da variância nas imagens originais. A primeira componente principal (1 CP) terá a informação que é comum a todas as bandas (albedo), apresentando maior variação de brilho e informação, e as CP de ordem mais baixa vão conter relativamente menos informação. O uso dessa técnica reduz a

dimensionalidade dos dados, obtendo maior variância num menor volume de dados, aumentando a capacidade de processamento (Picchiotti *et al.*, 1997; Grunsky, 2002).

Uma variação da técnica ACP, chamada de *Selective Principal Component Analysis*, foi proposta por Chavez<sup>6</sup> Jr. *et al.* (1984, *apud* Paradella *et al.*, 2001) e reformulada por Chavez JR. & Kwarteng (1989). Uma nova abordagem chamada de SPC-SAR, criada por Paradella *et al.* (1999) e testada por Souza Filho & Paradella (2002) para estudos geomorfológicos na zona costeira amazônica visando a integração entre dados de radar e ópticos, tem permitido a obtenção de excelentes resultados, maximizando a quantidade de informação no produto resultante.

Na abordagem SPC-SAR, primeiramente é executada uma análise por componentes principais seletivos, que usa grupos de bandas altamente correlacionadas, representando a mesma faixa do espectro eletromagnético (visível e infravermelho médio), como dados de entrada em uma Análise por Componentes Principais (ACP) (Paradella *et al.*, 1999). Dessa forma, as imagens são agrupadas objetivando mapear a maioria das informações (variância) na primeira componente, em função da elevada correlação entre as bandas usadas. Os subconjuntos de bandas usados como dados de entrada na ACP foram, ETM+ 1, 2, 3 (grupo 1) e ETM+ 5, 7 (grupo 2), usando o módulo PCA (*Principal Component Analysis*) disponível no X-PACE (*PCI Geomatics*, 2004). Foram assim gerados a 1CP (1, 2, 3) e a 1CP (5, 7), que detêm a máxima variância do visível e infravermelho médio. Em seguida, as primeiras componentes principais do grupo 1 e grupo 2 foram associadas com a banda 4 do ETM+ na transformação do espaço de cores RGB-IHS, buscando modelar um amplo espectro de respostas dos alvos na superfície terrestre (Paradella *et al.*, 2001). Ademais, o restante do procedimento segue com a integração SAR/Óptico via transformação IHS padrão, podendo ser usada uma imagem sintética com valores digitais constantes (nesse trabalho 40, 60, 80) para substituir o componente S durante a reversão IHS-RGB. A **Figura 5.3** sintetiza este procedimento utilizado na fusão.

#### 5.4.4.3 - Realce por Decorrelação

O realce por decorrelação é uma técnica também baseada na rotação espectral, produzindo imagens não correlacionadas, tal como a ACP, porém minimizando problemas de perda das características espectrais originais dos alvos, restituindo as relações das cores originais visando

---

<sup>6</sup> CHAVEZ JR., J.P.; GUPTILL, S.C.; BOWELL, J.A. 1984. Image Processing Techniques for Thematic Mapper Data. In: ASP CONFERENCE, Washington. *Proceedings...* pp. 728-752.

uma melhor interpretação. Assim, essa técnica promove uma rotação dos eixos do elipsóide, igual à executada na ACP, bem como, uma equalização da variância seguida da rotação inversa do elipsóide, possibilitando que as imagens resultantes tenham cores similares às das imagens originais (Harris *et al.*, 1994).

Após essa transformação, as imagens retornam aos eixos originais (rotação inversa), sem perder o realce obtido na decorrelação, resultando numa imagem com maior contraste espectral e maior variação de cores, mantendo preservada a relação do comportamento espectral dos alvos da imagem inicial, o que não é mantido na ACP (Chaves, 2002). O módulo DECORR (*Image Decorrelate*) do programa X-PACE foi usado para efetuar este procedimento em várias tríades de bandas.

Segundo Paradella *et al.* (2001), em uma composição colorida, áreas de alta correlação espectral nas imagens irão aparecer em graduações de cinza, em função da similaridade dos valores digitais nas três bandas utilizadas, o que acarreta na projeção dessas áreas no eixo de acromaticidade do cubo RGB e no alinhamento deste com o eixo de intensidade do cone IHS. Por isso, é recomendada a aplicação de um realce por decorrelação nos canais originais, antes da transformação RGB-IHS nos procedimentos para integração SAR/óptico, o que vai proporcionar uma maior graduação de cores no produto final. Caso contrário, áreas com alta correlação não apareceriam no produto integrado.

#### 5.4.4.4 - Transformação IHS

As cores no espaço IHS são representadas através de três parâmetros independentes, chamados de intensidade (intensity), matiz (hue) e saturação (saturation). O sistema IHS descreve a formação das cores de uma forma mais próxima àquela pela qual o sistema visual humano (SVH) as percebe, interpretando uma cor específica como a combinação destes três parâmetros. A intensidade, matiz e saturação descrevem respectivamente as sensações subjetivas de brilho, cor e pureza da cor (Fonseca *et al.*, 2000).

Harris *et al.* (1994) testaram quatro técnicas de integração digital de dados, concluindo que a transformação IHS apresenta melhor desempenho e flexibilidade porque produz um amplo intervalo de cores, preserva as informações espetrais e espaciais das imagens originais, como também possibilita o controle dos componentes individualmente (intensidade, matiz e saturação).

A transformação IHS tem sido usada com sucesso como uma técnica de integração digital de dados de sensores remotos (Souza Filho, 2000; Paradella *et al.*, 2001; Chaves, 2002). Assim, foram escolhidas algumas composições coloridas, por análise visual e estatística OIF, com subsequente transformação RGB-IHS e cálculo dos componentes I (intensity), H (hue) e S (saturation) a partir de três bandas originais, realizado no módulo IHS disponível no programa X-PACE (*PCI geomatics*, 2004). Em seguida, a transformação inversa do espaço de cores IHS para o RGB foi executada no módulo RGB, substituindo o componente I (intensidade) pela imagem RADARSAT-1 W1, mantendo o componente H constante. No componente S, foram testadas várias máscaras sintéticas com valores digitais constantes de 40, 60 e 80, o que permite uma mistura proporcional da matiz e da intensidade (Paradella *et al.*, 2001).

#### 5.4.4.5 - Ampliação Linear de Contraste

A maioria dos sensores opera em 8 bits ou 16 bits, podendo representar a informação em um intervalo de até 65.536 níveis de cinza. No entanto, não há grande variação de valores de níveis digitais em imagens de satélite, o que é função das características espectrais da cena, o que implica em pouca variação do brilho da imagem e baixo contraste (Fonseca *et al.*, 2000).

Uma maneira de melhorar o contraste da imagem é aumentar a abrangência do seu intervalo dinâmico, o que pode ser feito empiricamente pela manipulação do seu histograma, com a ampliação dos valores de níveis de cinza representativos da cena para o intervalo total da escala de níveis de cinza (Jensen, 1996).

Para as imagens LANDSAT-7 ETM+ e RADARSAT-1 W1, foram usados realces lineares por manipulação de histograma, empregando o módulo *ImageWorks* do PCI. Os realces foram então aplicados nas diferentes bandas através da função LUT disponível no programa X-pace.

As bandas foram realçadas a partir de uma ampliação linear de contraste, onde seus histogramas foram modificados interativamente. A manipulação do contraste de uma imagem tem como objetivo melhorar a sua qualidade visual, para facilitar a tarefa de extração de informação georeferenciada e de interpretação de seu conteúdo.

#### 5.4.5 - Calibração Radiométrica de Imagens RADARSAT-1 W1

O coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^*$ ) representa a quantidade de energia espalhada pelo alvo em direção à antena do sistema SAR (retroespalhada), em relação à quantidade de energia

do pulso de microondas que foi emitida pelo sensor. A quantidade de retroespalhamento é influenciada pelas propriedades físicas dos alvos, tais como rugosidade superficial e conteúdo de umidade, e pelas características do sensor, tais como comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência e direção de visada (Rosenqvist, 1997; Raney, 1998; Lewis *et al.*, 1998).

A intensidade de energia retroespelhada pelo alvo e medida por um sistema SAR tem relação direta com um parâmetro conhecido como seção transversal de retroespalhamento do radar. Este representa a razão entre a energia recebida pelo sensor (eco) e a energia que este receberia, caso a superfície espalhadora fosse isotrópica (Raney, 1998). Dessa forma, o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^0$ ) é o comportamento do retroespalhamento do radar por unidade de área, sendo normalmente expresso em decibéis (dB) (Rosenqvist, 1997).

Quando os dados RADARSAT-1 são gravados para distribuição em 16 bits, a imagem é reescalonada para que se possa aproveitar da melhor forma possível o intervalo dinâmico de informação disponível. Este processo de reescalonamento pode variar para cada cena, o que dificulta a comparação de informações entre cenas diferentes, impossibilitando, identificar assinaturas radiométricas e temporais. A calibração radiométrica e a análise das medidas de retroespalhamento são necessárias, portanto, para a comparação entre imagens de datas e passagens distintas (Rosenqvist, 1997; Formaggio *et al.*, 2001; Chaves, 2002).

Com esse intuito, as imagens digitais RADARSAT-1 podem ser convertidas para imagem brilho do radar (*radar brightness* ou *beta nought* -  $\beta^0$ ), quando é gerado um produto com o brilho do radar uniformizado, não considerando a magnitude da alteração (quantidade), mas apenas sua qualidade. Tal procedimento possibilita a comparação qualitativa entre duas imagens obtidas em datas diferentes. Já a conversão para a imagem coeficiente de retroespalhamento (*normalized radar cross section* ou *sigma nought* -  $\sigma^0$ ) executa uma correção nos dados considerando a variação de iluminação transversal à direção de vôo da plataforma (direção em *range*), que resulta no decréscimo da intensidade de retorno do sinal em função do aumento do ângulo de incidência. Além disso, quanto ao *scaling* e o *gain offset* aplicados pelo distribuidor das imagens durante a fase de pré-processamento e reescalonamento para 16 bits. Dessa forma, a conversão para uma imagem calibrada requer a reversão dos procedimentos iniciais durante o pré-processamento (Srivastana & Shepherd, 2000).

Os valores de *scaling* e *gain offset* são encontrados no cabeçalho da imagem; com eles é possível calcular os valores de brilho da imagem (*radar brightness* -  $\beta^0$ ), através da **equação 5.3**.

Além disso, os valores de coeficiente de retroespalhamento são calculados pela **equação 5.4**, corrigindo os valores de brilho encontrados pela **equação 5.3**, considerando a variação do ângulo de incidência  $I(r)$ .

$$\beta^\circ(r) = 10 \times \log_{10} [\{DN^2 + A_0\} / A(r)] \quad (\text{equação 5.3})$$

$$\sigma^\circ(r) = \beta^\circ(r) + 10 \times \log_{10} \{\sin(I(r))\} \quad (\text{equação 5.4})$$

**Onde:**  $\beta^\circ(r)$ =brilho;

$\sigma^\circ(r)$ =coeficiente de retroespalhamento;

$r$ = é o número da coluna da imagem (distância em range);

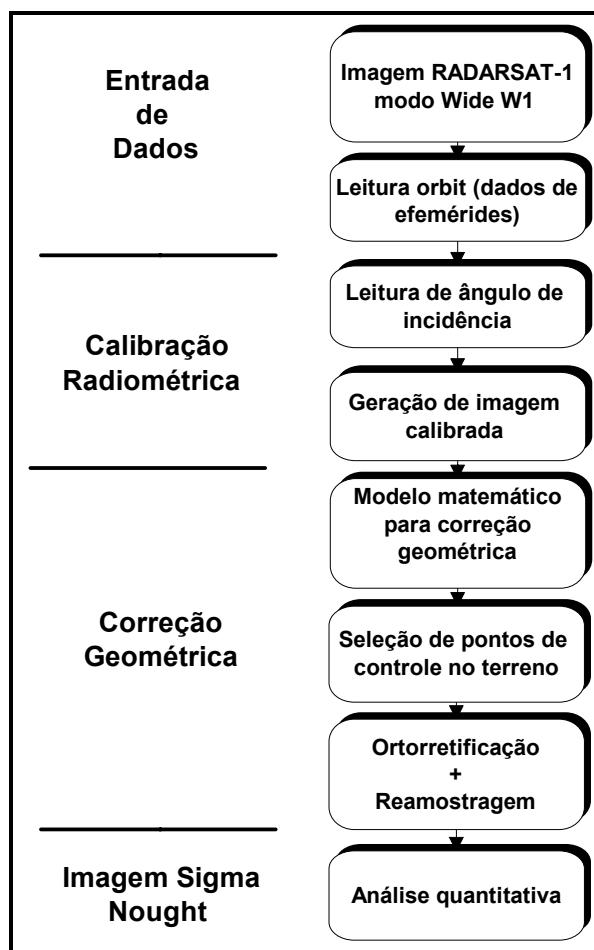
$DN$ = é o valor numérico do pixel;

$A_0$ =scaling;

$A(r)$  = gain offset;

$I(r)$  = ângulo de incidência (variando em função da distância em range).

Para gerar os produtos  $\sigma^\circ$  referentes às imagens RADARSAT-1 Wide 1 (órbita descendente) usadas neste trabalho, foi usado o programa PCI (*PCI Geomatics*, 2004). O primeiro passo consistiu na leitura dos dados de efemérides do satélite RADARSAT-1, que estão disponíveis no cabeçalho (*header*) das imagens, tal como descrito no item 5.4.3.2 (ortorretificação). Em seguida, a função SARINCD foi usada para gerar uma tabela com os ângulos de incidência para cada coluna da imagem (direção em *range*), que será usada pelo programa SARSIGM durante a conversão para o produto  $\sigma^\circ$ . Por fim, a função SARSIGM gerou um canal de saída com os dados calibrados radiométricamente, ou seja, imagem coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma^\circ$ ), em 32 bits (real). Em seguida, as imagens calibradas radiométricamente foram ortorretificadas conforme descrito no item 5.4.3.2. Nesse procedimento, não foi usado filtro adaptativo para redução de *speckle*, uma vez que a filtragem poderia degradar a informação radiométrica calibrada. Assim, foi aplicada durante o processo de ortorretificação uma reamostragem por vizinho mais próximo, que minimiza a perda de informação e mantém a integridade radiométrica da imagem. Estes procedimentos são apresentados na **Figura 5.4**.



**Figura 5.4** - Fluxograma mostrando as etapas para calibração radiométrica das imagens RADARSAT-1.

O objetivo da calibração radiométrica nas imagens SAR foi efetuar uma análise quantitativa do retroespalhamento inferindo, assim, os mecanismos de interação de determinados alvos com o pulso do radar, identificando-se sua assinatura radiométrica. Assim, isso permitirá medir quantitativamente o comportamento dos alvos, sendo de grande importância para muitos estudos, destacando-se a determinação de umidade do solo, detecção de mudanças em florestas e modelagem de vários estágios de produção agrícola.

Com esse intuito, foram obtidas para a Região de Terra Firme, 7050 amostras (*pixels*) de coeficiente de retroespalhamento, bem como 6034 para a Planície Aluvial, 6185 para os Canais Fluviais, 6734 para a Planície de Maré, 6928 para Áreas Urbanas e 803 amostras para os Lagos Artificiais. Essa amostragem aleatória objetiva dar representatividade estatística aos valores de coeficientes de retroespalhamento para uma determinada população específica (unidade de

paisagem), o que possibilita inferir o mecanismo de retroespalhamento dominante, como também o processo de interação microonda-alvo e suas inter-relações.

## 5.5 - ELABORAÇÃO DOS MAPAS

### 5.5.1 - Mapeamento das unidades de paisagem

A abordagem adotada neste trabalho está relacionada às análises ambientais em geomorfologia (Ross, 1998). Esta análise visa entender, além da dinâmica natural do meio físico, quais são as relações das sociedades humanas em um determinado território com o meio natural em que vivem. O procedimento metodológico-operacional, conhecido na literatura como “*Land Systems*”, foi empregado para gerar o produto temático analítico-sintético, a partir de técnicas de processamento digital de imagens de satélite, seguido de interpretação visual e automática.

Ross (1996) definiu seis táxons para cartografia e análise geomorfológica, embasado no conceito de morfoestrutura e morfoescultura criado por Gerasimov<sup>7</sup> (1980, *apud* Ross, 1996), que considera os processos de geração das formas de relevo (endógeno e exógeno), bem como, a escala das formas geradas (pequenas, médias e grandes), definindo macro-unidades paisagísticas. Assim, o primeiro táxon (Unidades Morfoestruturais) diz respeito à maior extensão em área, tendo relação com processos de ordem estrutural. O segundo táxon (Unidades Morfoesculturais) diz respeito aos processos de modelagem do relevo. Já o terceiro táxon (Unidades Morfológicas) representa os padrões de formas semelhantes, quanto ao tamanho de cada forma e o aspecto fisionômico.

O terceiro táxon se adequa no conceito de Unidades de Paisagem, conceito este que deriva da ecologia de paisagem, que é uma ciência interdisciplinar que lida com a interação entre a sociedade humana e seu espaço de vida, natural e construído, visando a compreensão global da paisagem e o ordenamento territorial (Naveh & Lieberman<sup>8</sup>, 1994 *apud* Metzger, 2001). Assim, o termo Unidade de Paisagem faz referência a um espaço de terreno (unidades de recobrimento e uso do território, ecossistemas e tipos de vegetação) com características geomorfológicas e de modificação humana semelhantes, que são o resultado da ação de diferentes fatores, tais como;

---

<sup>7</sup> GERASIMOV, J. 1980. *Problemas metodológicos de la ecologizacion de la ciencia contemporanea, La sociedad y el medio natural*, Moscou, editora progresso, p. 57-74.

<sup>8</sup> NAVEH, Z. & LIEBERMAN, A. 1994. *Landscape ecology: theory and application*. New York, Springer-Verlag.

processos geológicos e geomorfológicos; evolução climática; dinâmica biológica e a ação antrópica (Martinelli & Pedrotti, 2001).

Assim, os produtos gerados a partir do “*Land Systems*” tomaram como referencial, padrões de paisagem ou unidades de paisagem que, individualizadas e cartografadas, constituíram o suporte básico para a pesquisa. Tal abordagem permite procurar informações referentes ao meio ambiente e à sociedade, que estão representadas em cada uma das manchas ou unidades previamente identificadas (Ross, 1998). A vantagem dessa abordagem está na geração de um único produto cartográfico, seccionado em várias unidades de paisagem, as quais concentram, além das características de relevo, informações sobre solo, geologia, vegetação, uso da terra e sócio-economia, que são apresentadas de forma integrada e sintética. Ressalta-se que, embora a rugosidade topográfica ou o fator relevo tenham sido tomados como variáveis de maior significância, a análise desenvolveu-se dentro de uma concepção sistêmica.

Nos produtos gerados a partir do processamento digital de imagens de sensores remotos, foram identificadas e delimitadas diferentes unidades de paisagem, através da manipulação das informações espetrais, texturais e espaciais, presentes nos produtos gerados. As características da paisagem determinadas a partir das imagens foram corroboradas pelos levantamentos de campo.

### **5.5.2 - Mapas de índices de sensibilidades**

Os mapas de sensibilidade dos ambientes costeiros foram baseados nas noções de sensibilidade e fatores de risco (Dutrieux *et al.*, 2000). Este mapa tem como objetivo representar as reações do ambiente flúvio/estuarino natural aos efeitos causados por possíveis derramamentos de óleo. Os índices de sensibilidade ambiental dependem das características intrínsecas dos ambientes, variando de acordo com suas especificidades. Por outro lado, os fatores de risco dependem basicamente do tipo de ocupação humana na zona costeira, variando de acordo com a atividade desenvolvida.

Para o desenvolvimento dos mapas de índices de sensibilidade a derramamentos de óleo, é necessária a elaboração de mapas de unidades de paisagem, pois estes descrevem o ambiente no que diz respeito a seus componentes naturais (parâmetros físicos associados a fatores geradores de risco) e a seus componentes antropogênicos (parâmetros sócio-econômicos relacionados às atividades geradoras de risco). Desta forma, os índices de sensibilidade ambiental e os fatores de

risco ao derramamento de óleo devem ser trabalhados para a região, levando-se em conta a interação do meio natural com o homem, a fim de que se possa estabelecer um índice de sensibilidade ambiental que deve ser adaptado dos métodos NOAA (2002) e Petrobras (2002).

O método para elaboração do mapa de índice de sensibilidade foi baseado na proposta metodológica de Jensen *et al.* (1993), que utiliza a integração de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas.

Assim, foi produzido um mapa de índice de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo, a partir do mapa de unidades de paisagem gerado pela interpretação das imagens. Com essa finalidade, as imagens dos sensores remotos foram interpretadas e diferentes polígonos, representando diferentes ambientes, foram identificados e corroborados pelos trabalhos de campo.

### **5.5.3 - Classificação automática dos produtos gerados**

O objetivo da aplicação de técnicas de classificação automática é substituir a subjetividade da interpretação visual de imagens por técnicas automáticas de identificação, que maximizam a extração de informações, de forma mais rápida e precisa. Isso é feito pela aplicação de regras de decisão, que são baseadas nos parâmetros estatísticos das imagens usadas. O objetivo do processo de classificação é agrupar todos os pixels de uma imagem digital em várias classes ou temas (PCI Geomatics, 2004).

A classificação automática de imagens de sensores remotos é dividida em técnicas supervisionadas e não-supervisionadas. A diferença básica entre essas duas técnicas diz respeito à quantidade de informação prévia que o analista possui sobre a área em estudo, uma vez que, na técnica não-supervisionada, o computador classifica a imagem utilizando um algoritmo, baseado no agrupamento de pixels que apresentam respostas espectrais semelhantes no espaço de atributos das bandas utilizadas (Jensen, 1996).

Já na classificação supervisionada, o usuário define áreas de treinamento em função de seu conhecimento prévio sobre a região em estudo, que são representativas das principais unidades de paisagem e que servirão para modelar a assinatura espectral dos diferentes usos e coberturas do solo. Este procedimento gera parâmetros estatísticos que vão servir como critério de decisão para determinar a que tema determinado pixel pertence (Fonseca *et al.*, 2000).

Nesse trabalho, foram usadas técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada, tanto para as imagens LANDSAT-7 ETM+ como para o produto híbrido gerado (SPC-SAR), objetivando avaliar a confiabilidade das técnicas de classificação de imagens de sensores remotos para área em estudo, considerando a facilidade e a rapidez de geração de mapas de unidades de paisagem e de seus respectivos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo.

O procedimento para classificação das imagens digitais de sensores remotos usado nesta Dissertação foi executado em três etapas, começando com a delimitação do número de classes de interesse (várzea, terra firme, água e áreas urbanas) para a classificação não-supervisionada e supervisionada. Em seguida, foram delimitados polígonos das áreas de treinamento representativos das classes determinadas anteriormente (somente para classificação supervisionada). Por último, foram aplicados métodos de comparação, em outras palavras, uma avaliação da exatidão do mapeamento. Assim, o produto resultante da classificação será uma imagem temática, onde cada pixel representará uma classe de mapeamento.

Para a realização das técnicas e procedimentos de classificação descritos acima, foi utilizado o módulo *ImageWorks* e *Focus* do programa PCI Geomatica (*PCI Geomatics*, 2004). A técnica de classificação automática não-supervisionada Isoseg (ISODATA) foi aplicada nas bandas espectrais 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+, enquanto que, no produto híbrido gerado, imagem SPC-SAR, foi utilizado o classificador K- médias (*K-means*).

Além disso, tanto as imagens LANDSAT-7 ETM+ quanto a imagem híbrida gerada, foram submetidas a uma classificação supervisionada usando o algoritmo de Máxima Verossimilhança- MAXVER (*Maximum Likelihood*).

É importante ressaltar que para a escolha do algoritmo de classificação aplicado em cada imagem, foi feita a análise visual dos produtos gerados por cada classificador disponível no programa PCI, para cada conjunto de dados, e escolhido o melhor resultado.

Após esse primeiro passo, a classificação propriamente dita, foi feita uma etapa de pós-classificação, cujos procedimentos são comuns tanto para a classificação supervisionada como para a não-supervisionada. Na etapa de pós-classificação, são usadas ferramentas de edição na imagem classificada, tornando-a visualmente mais adequada para o usuário final. Assim, foram realizadas uma edição e agregação de classes, tentando resolver possíveis confusões e erros de

classificação; por último, foi aplicado um filtro de moda com janela 3x3, com intuito de homogeneizar as classes geradas.

O processo de classificação automática está sujeito a erros, devido à qualidade dos dados usados e dos métodos empregados. Por isso, se faz necessário realizar um procedimento para avaliação da acurácia do mapeamento, o que permite quantificar os erros, valorizando a qualidade da classificação e justificando a confiabilidade e praticidade do método (Jensen, 1996).

Erros de mapeamento são gerados pela superposição, no espaço de atributos, de duas ou mais classes espectrais ou, ainda, pela seleção inadequada de áreas de treinamento, quando o analista tem um conhecimento incompleto sobre os tipos de cobertura presentes na área estudada. Dessa forma, pixels pertencentes a uma classe são classificados erroneamente ou permanecem desconhecidos (Melo, 2002).

Segundo Jensen (1996), muitos analistas fazem a avaliação dos erros de mapeamento baseados somente na estatística das áreas usadas para treinar o algoritmo de classificação. No entanto, áreas de treinamento não são distribuídas aleatoriamente na imagem, e sim orientadas pelo conhecimento prévio do analista, indicando onde determinada unidade de paisagem ocorre. Portanto, a avaliação da acurácia do mapeamento pela análise estatística das áreas de treinamento geralmente acarreta em valores mais altos de exatidão de mapeamento, em relação ao restante do mapa temático. Assim, o ideal é usar pixels de referência distribuídos aleatoriamente sobre a área em estudo (Arzandeh & Wang, 2002). Este método é o disponível no programa PCI (PCI Geomatics, 2004).

Para isso, 100 pontos de referência foram distribuídos estocasticamente sobre a área estudada e comparados com a verdade terrestre, com o auxílio da experiência do analista e, quando necessário, de um mapa de referência fotointerpretado por Gonçalves (2003). Ademais, foram calculadas as matrizes de confusão, que mostram o percentual de pixels mapeados de forma correta, e foi usado o índice *Kappa*, utilizado na avaliação da concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático gerado pela classificação (Congalton, 1991). Dessa forma, o valor da estatística *Kappa* é um indicativo do desempenho da classificação gerada (**Tabela 5.5**).

<i><b>Coeficiente Kappa</b></i>	<i><b>Desempenho da classificação</b></i>
< 0	Péssimo
0 < K ≤ 0,2	Mau
0,2 < K ≤ 0,4	Razoável
0,4 < K ≤ 0,6	Bom
0,6 < K ≤ 0,8	Muito Bom
0,8 < K ≤ 1,0	Excelente

**Tabela 5.5** – Coeficiente *Kappa* e os respectivos conceitos de desempenho da classificação (Cohen<sup>9</sup>, 1960 *apud* Fonseca *et al.*, 2000).

Além disso, o índice de exatidão geral é um parâmetro estatístico simples, derivado da matriz de confusão, que é dado pela divisão da quantidade total de amostras usadas para se calcular a matriz de confusão pela soma dos valores da diagonal principal dessa matriz (Jensen, 1996).

Por fim, os erros de comissão e omissão foram aferidos. Os erros de comissão ocorrem quando um pixel é classificado como sendo de uma classe A quando na verdade pertence a uma classe B; de forma contrária, os erros de omissão ocorrem quando um pixel pertencente à classe A é classificado como pertencente a uma outra classe qualquer (Jensen, 1996).

<sup>9</sup> COHEN, J. 1960. A coefficient of agreement for nominal scales. *Education and Psychology Measures*, 20(1): 37-46.

## CAPÍTULO 6

### 6- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados obtidos neste trabalho, abrangendo uma avaliação da efetividade da tecnologia de sensoriamento remoto e das técnicas de processamento digital de imagens para o mapeamento das unidades de paisagem e, consequentemente, dos seus índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA). Será discutida, ainda, uma adaptação dos métodos de classificação dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo para a zona costeira amazônica.

#### 6.1-CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO PARA A ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA

A escala de ISA classifica os ambientes da zona costeira em função de sua sensibilidade relativa a derramamentos de óleo, considerando processos naturais, físicos e biológicos. Essa escala foi construída com base na experiência de vários derramamentos ocorridos no passado, assim como em trabalhos de campo em cada tipo de ambiente. Desta forma, a classificação é baseada em um entendimento completo do ambiente, incluindo as relações entre os processos físicos e o substrato, que produzem tipos específicos de ambientes e permitem prever padrões de comportamento e transporte do óleo derramado (MMA, 2002).

Os métodos empregados no mapeamento da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo no mundo, tais como ARPEL (*Asociacion Regional de Empresas de Petroleo y Gas Natural en Latinoamerica y el Caribe*), Petrobras e IPIECA têm como base o método desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Ademais, a complexidade e peculiaridades da Amazônia, considerando-se a dinâmica dos processos ambientais envolvidos (sedimentares, geomorfológicos, oceanográficos e biológicos), bem como a fragilidade e a importância desse rico ecossistema, requer a utilização de uma abordagem específica para região, que considere suas especificidades.

Desta forma, Souza Filho *et al.* (2004) propuseram uma classificação de ISA para a zona costeira amazônica, que foi modificada da proposta criada pela NOAA (2002) e Petrobras (2002), conforme descrito na **Tabela 6.1**. Ademais, Gonçalves (2003) e Gonçalves & Souza Filho (2004)

usaram essa adaptação para classificar os ambientes da região flúvio-estuarina da Baía de Guajará (Belém-PA), adaptação essa, que foi adotada neste trabalho.

<i>ISA</i>	<i>Ambientes costeiros amazônicos</i>
<b>1A</b>	Costas rochosas expostas
<b>1B</b>	Estruturas sólidas expostas construídas pelo homem
<b>1C</b>	Falésias rochosas expostas com talus na base
<b>2</b>	Escarpas expostas e declives íngremes em argila
<b>3A</b>	Praias com granulometria fina a média
<b>3B</b>	Escarpas expostas com declives íngremes em areia
<b>4</b>	Praias e planícies de marés arenosas com granulometria grossa
<b>5</b>	Praias e bancos de cascalhos com areia
<b>6</b>	Enrocamentos.
<b>7</b>	Planícies de marés expostas
<b>8A</b>	Escarpas protegidas em leitos rochosos e sedimentos – Paleofalésias
<b>8B</b>	Estruturas sólidas protegidas construídas pelo homem
<b>8C</b>	Enrocamentos protegidos
<b>8D</b>	Costas com turfa
<b>9A</b>	Planícies de maré lamosas protegidas
<b>9B</b>	Bancos e planícies de marés lamosas vegetados.
<b>9C</b>	Campos herbáceos hipersalinos (hypersalt marsh)
<b>10A</b>	Campos herbáceos salinos e salobros (Salt and brackish water marshes)
<b>10B</b>	Campos herbáceos doces e vegetação aquática (Freshwater marshes, aquatic vegetation).
<b>10C</b>	Manguezais de intermaré
<b>10D</b>	Manguezais de supramaré

**Tabela 6.1** - Proposta de adaptação dos métodos NOAA (2002) e Petrobras (2002) para a zona costeira amazônica (Souza Filho *et al.*, 2004).

A discussão dos métodos NOAA (2002) e Petrobras (2002) para a zona costeira amazônica justifica a elaboração desta dissertação, em função do ineditismo e importância dessa abordagem para o gerenciamento integrado da região, tanto para a indústria do petróleo como para os agentes responsáveis pela administração dessas áreas, e pela elaboração de políticas públicas, visando o desenvolvimento econômico e social da região. Assim, o conhecimento empírico dos processos atuantes nas zonas estuarinas amazônicas é importante para gerenciar a tomada de decisão sobre sua melhor utilização e para a manutenção destes ambientes como um recurso natural e produtivo, dentro de uma abordagem de desenvolvimento sustentável.

Ademais, a alta energia hidráulica das regiões estuarinas amazônicas ocasiona não somente mudanças na fisiografia regional, como também no próprio traçado da calha dos inúmeros rios da região, que estão sujeitos a modificações periódicas relativamente rápidas, em função da dinâmica da descarga fluvial e da energia das marés.

A configuração atual da paisagem regional é fortemente condicionada pelo regime das marés, onde o fluxo e refluxo das marés salinas, aliados à energia da descarga fluvial na região costeira amazônica, proporcionam os processo de agradação e degradação da paisagem. E é a interação entre esses dois processos que forma as regiões das várzeas amazônicas, amplamente distribuídas na região, pelo transporte de sedimentos (cobertura aluvionar) que se depositam na planície de maré, quando há inundação das margens (Pinheiro, 1987).

Sendo assim, as áreas inundáveis ao longo dos cursos fluviais têm grande importância para manutenção e conservação dos ambientes flúvio-estuarinos, além de apresentar alta sensibilidade a derramamentos de óleo. Dessa maneira, serão descritos abaixo os principais processos que condicionam a dinâmica desses ambientes, que devem ser considerados quando da análise dos seus respectivos ISA.

## 6.2-AVALIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA O MAPEAMENTO DOS ISA NOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ

### 6.2.1 - Imagens LANDSAT-7 ETM +

A correção do efeito atmosférico, aplicada nas imagens LANDSAT-7 ETM+ pelo método da subtração do pixel escuro aumentou o contraste das cenas, removendo valores adicionais de níveis de cinza ocasionados principalmente pelo efeito do espalhamento atmosférico. Esse

procedimento melhora a qualidade visual e radiométrica das imagens, aumentando o desempenho das técnicas de classificação.

A análise estatística das imagens, baseada nos valores de média e desvio padrão das bandas analisadas (1, 2, 3, 4, 5, 7), como também nas matrizes de covariância e de correlação entre bandas, permitiu o cálculo do OIF (*Optimum Index factor*) para selecionar a melhor tríade para uma composição colorida. Tal composição abrange, a maior quantidade de informação (variância) e minimiza a correlação entre as bandas. Assim, para cena em questão, os maiores devios padrões e variâncias foram encontrados para as bandas 5,4,7, nesta ordem. Os parâmetros estatísticos das imagens usadas são mostrados nas **Tabelas 6.2 e 6.3** abaixo.

<b>Bandas</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>
1	14,3980	9,1281
2	15,9926	10,7803
3	22,2816	18,5674
4	50,1882	33,7787
5	44,9587	34,8213
7	22,5457	22,2714

**Tabela 6.2** - Estatística das seis bandas da imagem LANDSAT-7 ETM+.

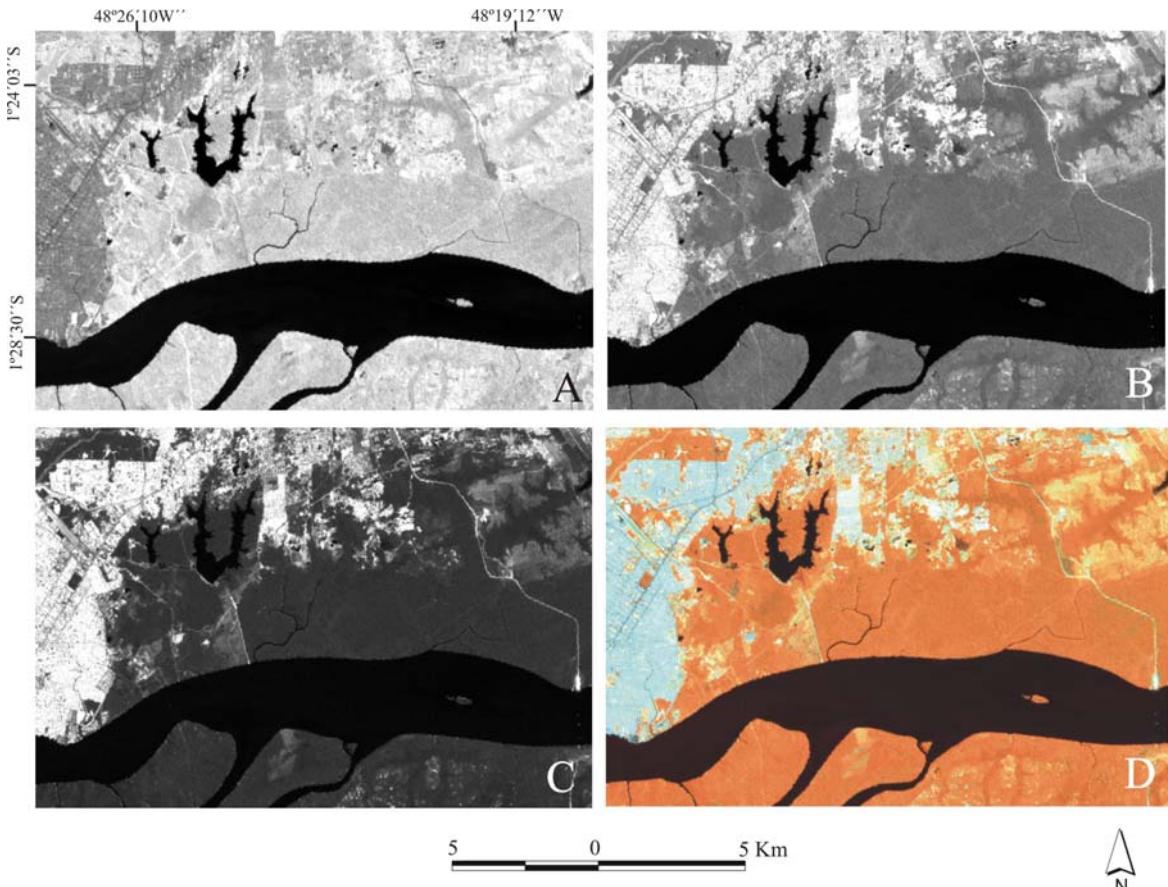
A diagonal da matriz de covariância, em vermelho (**Tabela 6.3**), representa a variância de cada banda; os valores vizinhos na tabela correspondem à covariância entre duas bandas específicas. Observa-se que a maior variância é dada pela banda 5, seguida de perto pelas bandas 4 e 7, o que indica que elas apresentam maiores variações de níveis de cinza e, portanto, melhor capacidade de discriminação entre os alvos presentes na cena. Essas altas variâncias podem ser explicadas pelas altas respostas da vegetação (banda 4) e solos expostos (bandas 5 e 7) na região do infravermelho próximo e médio, respectivamente. A **Figura 6.1** mostra as bandas (4, 5, 7) e a composição colorida resultante. Ademais, a banda 4 apresenta excelente contraste entre solos e corpos de água, mostrando-se bastante útil para o mapeamento de corpos de água na região da Baía de Guajará, como também possui alta resposta da vegetação.

A banda 5, por sua vez, permite observar diferenças do teor de umidade na vegetação, podendo ser usada para detectar possível estresse hídrico. Essa banda torna possível traçar excelentes informações sobre a umidade do solo e vegetação. O interprete deve observar, no entanto, as condições ambientais, principalmente precipitação, durante os dias anteriores à aquisição da imagem, para não incorrer em erros. Finalmente, a banda 7 apresenta excelente

contraste entre as regiões urbanas e vegetadas, bem como entre vegetação com diferentes teores de umidade.

Bandas	<i>Matriz de Covariância</i>						
	1	2	3	4	5	7	
1	<b>83,32</b>						
2	94,93	<b>116,22</b>					
3	162,19	195,82	<b>344,75</b>				
4	-186,09	-216,43	-395,38	<b>1141,00</b>			
5	-31,51	-37,65	-72,99	931,04	<b>1212,53</b>		
7	57,28	64,07	111,40	357,75	698,32	<b>496,01</b>	

**Tabela 6.3** - Matriz de covariância e variância na diagonal principal (em vermelho).



**Figura 6.1** – Bandas multiespectrais do LANDSAT-7 ETM+ que apresentam as maiores variâncias: A) Banda 4; B) Banda 5; C) Banda 7; D) Composição colorida resultante (4R5G7B).

Foi observado que os maiores valores de correlação foram obtidos, como se era de esperar, para aquelas bandas referentes à mesma faixa do espectro eletromagnético, sendo que essa redundância de informação é uma característica das imagens multiespectrais (Almeida Filho, 2002). Nesse caso, as bandas referentes às faixas espectrais do visível (bandas 1, 2, 3) e infravermelho médio (bandas 5 e 7), respectivamente, apresentaram índice de correlação maior que 0,9, o que pode ser explicado pelo fato de haver sobreposição entre as faixas espectrais contíguas de imageamento. Os valores de correlação entre bandas podem ser vistos na **Tabela 6.4**.

Bandas	<i><b>Matriz de Correlação</b></i>					
	1	2	3	4	5	7
1	1,0000	-	-	-	-	-
2	0,9647	1,0000	-	-	-	-
3	0,9570	0,9783	1,0000	-	-	-
4	0,6035	0,5943	0,6304	1,0000	-	-
5	0,0991	0,1003	0,1129	0,7916	1,0000	-
7	0,2818	0,2669	0,2694	0,4755	0,9005	1,0000

**Tabela 6.4** - Matriz de correlação das imagens LANDSAT-7 ETM+.

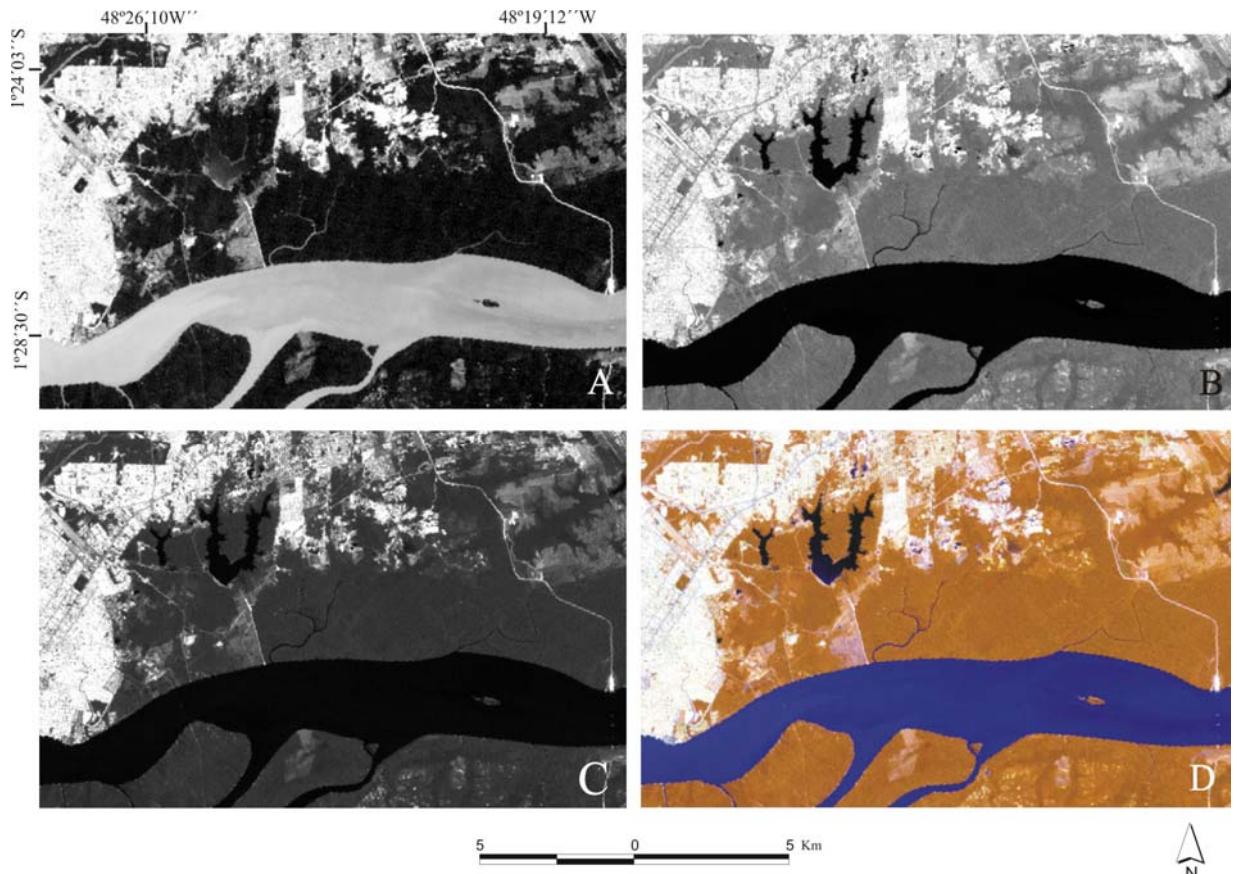
De outra forma, as menores correlações foram encontradas relativamente à banda 5, o que pode ser explicado, como já foi dito anteriormente, pela alta resposta dos solos expostos nessa região do espectro. Com efeito, a banda 5 possui a maior variância entre as bandas analisadas.

Além disso, através do cálculo OIF, foram selecionadas as bandas 3, 5, 7 como a melhor tríade para uma composição colorida, seguida de perto pela combinação 345 (**Tabela 6.5**). Assim, a tríade 357 segundo os critérios do OIF, é a que apresenta a maior quantidade de informação e menor taxa de redundância entre as bandas para área em estudo.

<b>Combinação</b>	<b><math>\Sigma</math> Desvio Padrão</b>	<b><math>\Sigma  Coef. Correl.  </math></b>	<b>OIF</b>
357	75,660	1,283	58,980
345	87,167	1,535	56,790
347	74,618	1,375	54,255
235	64,169	1,192	53,856
257	67,873	1,268	53,540
135	62,517	1,169	53,479
245	79,380	1,486	53,412
145	77,728	1,494	52,020
157	66,221	1,281	51,678
247	66,830	1,337	49,997
147	65,178	1,361	47,897
125	53,687	1,164	46,119
457	90,871	2,168	41,923
237	51,619	1,515	34,081
137	49,967	1,508	33,130
234	63,126	2,203	28,655
134	61,474	2,191	28,059
127	42,180	1,513	27,871
124	53,687	2,163	24,826
123	38,476	2,900	13,268

**Tabela 6.5** - Cálculo do IOF (*Optimum Index Factor*) para as 6 bandas do LANDSAT-7 ETM+ (espectro refletido).

A tríade 357 escolhida pelo valor do IOF, é o melhor conjunto de dados para uma composição colorida, considerando critérios estatísticos. A composição 5R7G3B gerada é mostrada na **Figura 6.2**, apresentando informações sobre corpos de água e sedimentos em suspensão em tons de azul, com menor quantidade de sedimentos em tons de azul escuro. Variações no teor de umidade na vegetação aparecem em tons de marrom, onde o marrom mais escuro representa a Região de Várzeas, amplamente distribuída na área de estudo, e o marrom mais claro a Região de Terra Firme. De maneira similar, as áreas construídas são apresentadas em coloração branca amarelada, o que mostra uma alta resposta espectral desses alvos para todas as três bandas usadas na composição selecionada.

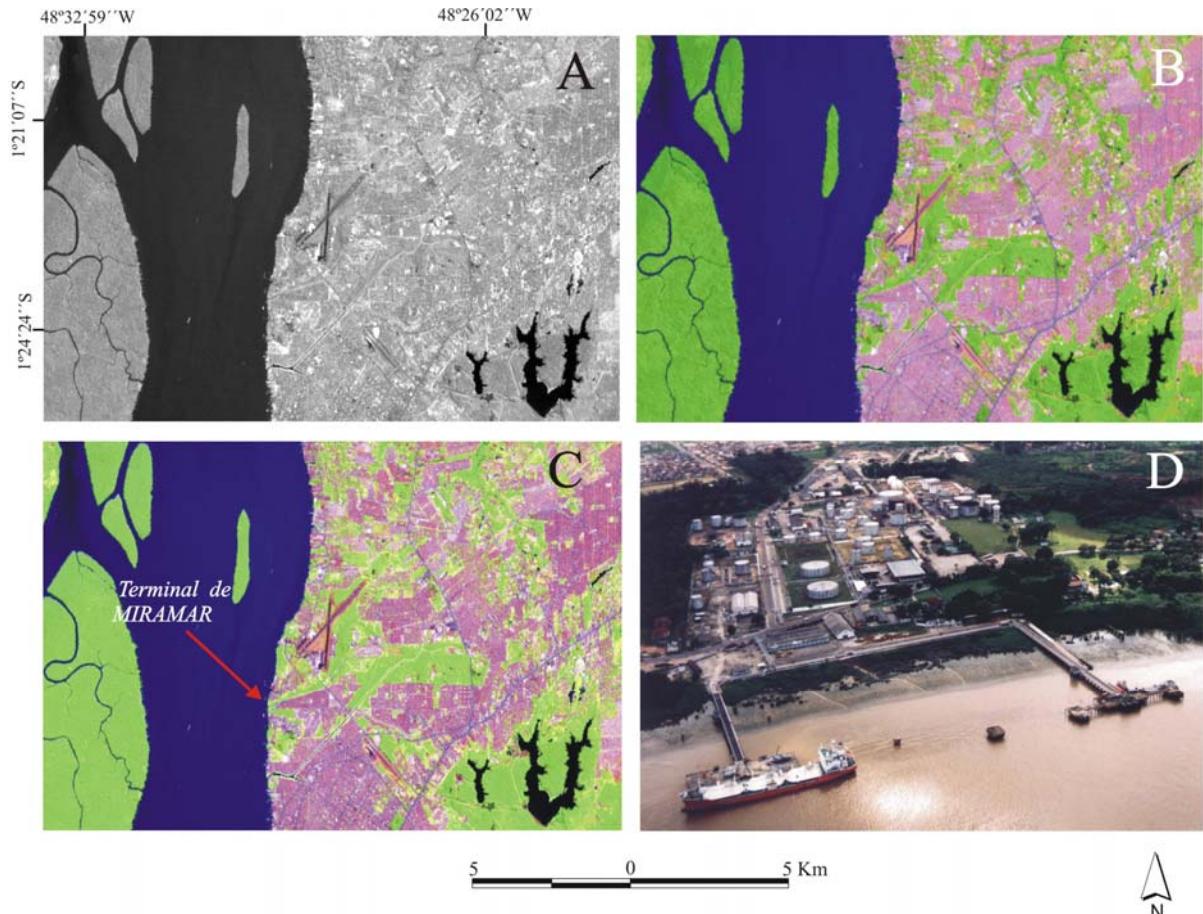


**Figura 6.2** – Tríade de bandas multiespectrais do LANDSAT-7 ETM+ que apresentou o melhor OIF (*Optimum Index Factor*): A) banda 3; B) banda 5; C) banda 7; D) composição colorida resultante (5R7G3B).

O processo de correção geométrica das imagens de sensores remotos usado nesta Dissertação, tanto para as imagens LANDSAT-7 ETM+ ou RADARSAT-1 W1, foi a ortorectificação, que possibilitou, com a coleta de 15 pontos de controle no terreno (GCP's), obter um erro RMS (*Root Mean Square*) para as imagens LANDSAT-7 ETM+ da ordem de 0,5 pixel, em relação aos GCP's.

Além disso, uma outra abordagem usada neste trabalho foi a integração da banda pancromática (15 m de resolução) com as bandas multiespectrais (30 m de resolução) do LANDSAT-7, via transformação IHS. Esse procedimento de fusão visou combinar em uma única imagem, a melhor resolução espacial da banda pancromática (15 m) com a maior informação espectral das bandas multiespectrais obtendo, assim, o realce das feições espetrais de interesse com uma melhor discriminação dos padrões texturais e da estrutura urbana. A **Figura 6.3** mostra

as bandas usadas no procedimento de integração pan/multi e a produto híbrido gerado, com valor agregado.



**Figura 6.3-** Integração digital IHS de imagem LANDSAT-7 ETM+: A) banda pancromática com 15 m de resolução espacial; B) composição 5R4G3B com pixel reamostrado para 15 m; C) fusão pan/multi; D) terminal petroquímico de MIRAMAR (fotografia aérea oblíqua).

Ademais, a análise das imagens LANDSAT-7 ETM+ mostra uma ampla gama de informação espectral, função da energia eletromagnética refletida pelos alvos superficiais (interação físico-química), informação esta que é traduzida num componente cromático, o que permitiu uma clara distinção do conteúdo de umidade na vegetação e solos expostos, notadamente na interface Várzea-Terra Firme. No entanto, esta é uma imagem relativamente lisa, não apresentando informação textural relacionada à rugosidade superficial da vegetação (estrutura do dossel), impossibilitando a distinção de diferentes estágios de crescimento ou diferentes espécies.

### 6.2.2 - Imagens RADARSAT-1 W1

O procedimento para correção geométrica das imagens de sensores remotos utilizado nesta Dissertação, como já foi dito antes, foi a ortorretificação, que possibilitou, com a coleta de 15 pontos de controle (GCP's), alcançar um erro RMS (*Root Mean Square*) para as imagens RADARSAT-1 W1 na ordem de 0,9 pixel, em relação aos GCP's.

O filtro redutor de *speckle* que alcançou o melhor resultado nas imagens RADARSAT-1 W1 foi o filtro adaptativo do tipo *Enhanced Frost*, com janela 3x3 (*Kernel Size*). Assim, é preciso considerar que não há regra para a escolha de filtros para redução de *speckle* em imagens de radar. Em cada situação, vários filtros devem ser testados para se identificar qual deles apresenta o melhor resultado para aquela imagem particular, preservando as características texturais da imagem original e as feições de bordas, ou seja, minimizando a perda de informação (Silva, 2002). Os realces aplicados nas imagens RADARSAT-1 W1 permitiram aumentar o contraste entre as principais feições dos ambientes flúvio-estuarinos estudados.

Portanto, na imagem RADARSAT-1 Wide 1 de 5 de janeiro de 2003, obtida em condição de maré vazante, foi possível traçar linhas de fluxo, de forma aproximada, para inferir a influência das correntes de marés na região flúvio-estuarina da Baía de Guajará, e ainda distinguir os canais fluviais e estuarinos (**Figura 6.4**). De outra forma, na imagem RADARSAT-1 W1 de 29 de janeiro de 2003, adquirida em condição de maré enchente (condição aproximada de estofo de maré) não foi possível a caracterização das correntes de maré, dado que, neste produto, é menor a rugosidade superficial da água. Essa investigação permitiu traçar um esboço do comportamento da entrada das marés na Baía de Guajará, o que pode ser útil para subsidiar uma primeira aproximação do mecanismo de dispersão de poluentes na Baía. Além disso, um melhor entendimento dos processos hidrodinâmicos atuantes, o que é de extrema valia para o estudo das modificações na dinâmica da Baía, o que tem levado a um acentuado processo erosivo, tal como, será reportado abaixo.



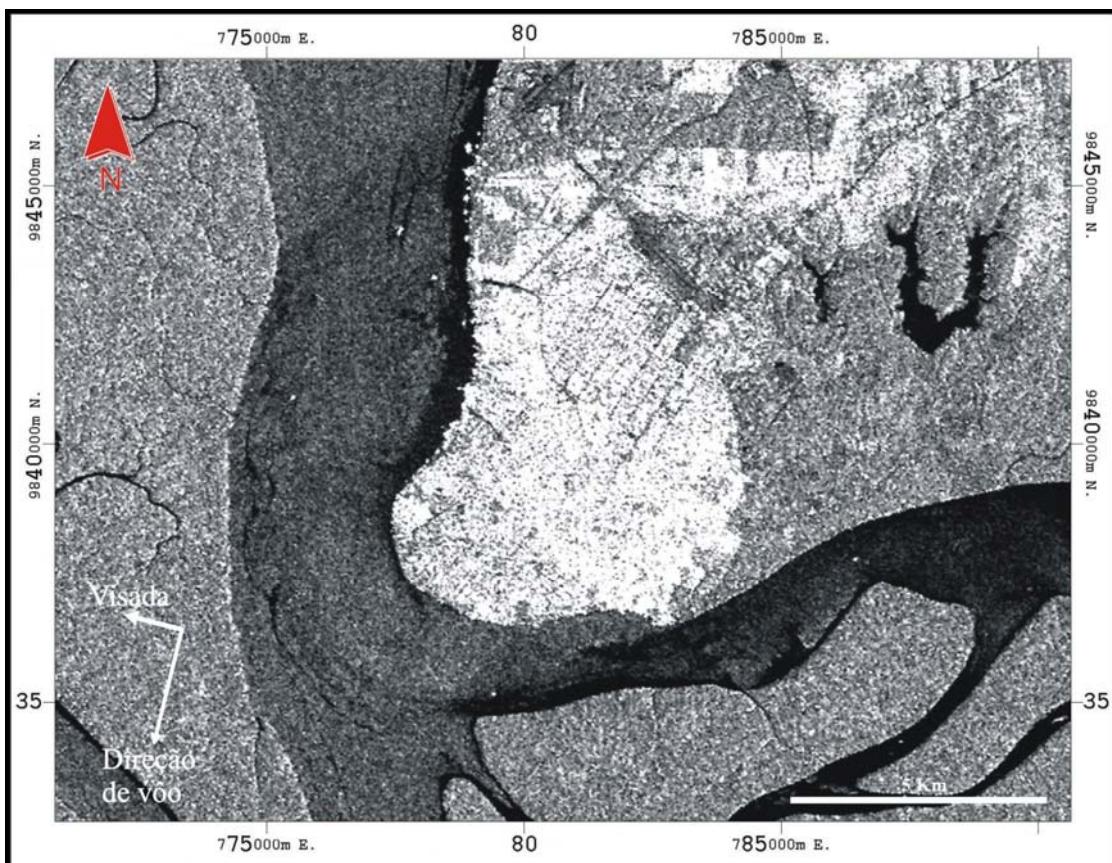
**Figura 6.4** – Imagens RADARSAT-1 Wide-1 órbita descendente, mostrando principais direções de fluxo na Baía de Guará, em condição de maré vazante: A) imagem adquirida em 5 de janeiro de 2003, maré baixa; B) imagem adquirida em 29 de janeiro de 2003, maré alta.

Outra importante consideração, diz respeito à ação modificadora de ordem antrópica que, ao longo dos anos, tem alterado os processos naturais na hidrodinâmica da Baía de Guajará. Mais recentemente, essa ação tem acarretado em um aumento dessa energia e tem levado a um significativo aumento nas taxas de erosão, notadamente na margem direita do Rio Guamá, onde está instalado o campus universitário da Universidade Federal do Pará. Diversas estruturas de contenção têm sido ali construídas ao longo do tempo (**Figura 6.5**). Dados de sensores remotos, tanto no espectro óptico quanto nas microondas, têm sido usados para monitorar processos de erosão costeira (Singhroy, 1996; Picchiotti *et al.*, 1997).



**Figura 6.5** – Margem direita do Rio Guamá (Campus da UFPA), onde ocorre um acelerado processo erosivo modificado por ação antrópica.

Além disso, nas imagens RADARSAT-1 Wide 1, órbita descendente, foi possível individualizar claramente os arruamentos orientados de maneira aproximadamente perpendicular (NE-SW) à direção de visada do sensor (282°), enquanto que a distinção dos arruamentos dispostos na direção NW-SE é atenuada nas imagens SAR (**Figura 6.6**). Tal observação corrobora o fato reportado na literatura, de que feições dispostas aproximadamente perpendiculares à direção de visada do sensor são realçadas (Singhroy & Saint-Jean, 1999; Formaggio *et al.*, 2001; Paradella *et al.*, 2001; Grunsky, 2002). Dessa maneira, imagens RADARSAT-1 W1 são de grande valia para o mapeamento e atualização de áreas de expansão urbana, uma vez que os arruamentos aparecem como feições lineares em tons de cinza escuro, em função do mecanismo de retroespalhamento especular, contrastando fortemente com as edificações, que aparecem como feições retangulares em tons de cinza claro, em função do mecanismo de *double bounce* caracterizando, assim, ruas e quarteirões.



**Figura 6.6** – Imagem RADARSAT-1 W1, órbita descendente, mostrando a área urbana de Belém, realçando arruamentos perpendiculares à direção de visada. Dado adquirido em 29 de janeiro de 2003, maré alta.

De maneira geral, as imagens RADARSAT-1 W1 foram visualmente interpretadas usando parâmetros chaves de foto-interpretação, tais como tom, textura, padrão, contexto, forma, tamanho e drenagem. Com isso, foi possível mapear os ambientes costeiros, com o auxílio de ortofotos digitais obtidas durante um levantamento aerofotogramétrico (CODEM, resolução 3,3 m) e de fotografias digitalizadas tomadas em um sobrevôo sobre a região metropolitana de Belém, e ainda pelo conhecimento pretérito da área estudada. Estes dados auxiliares serviram como verdade terrestre.

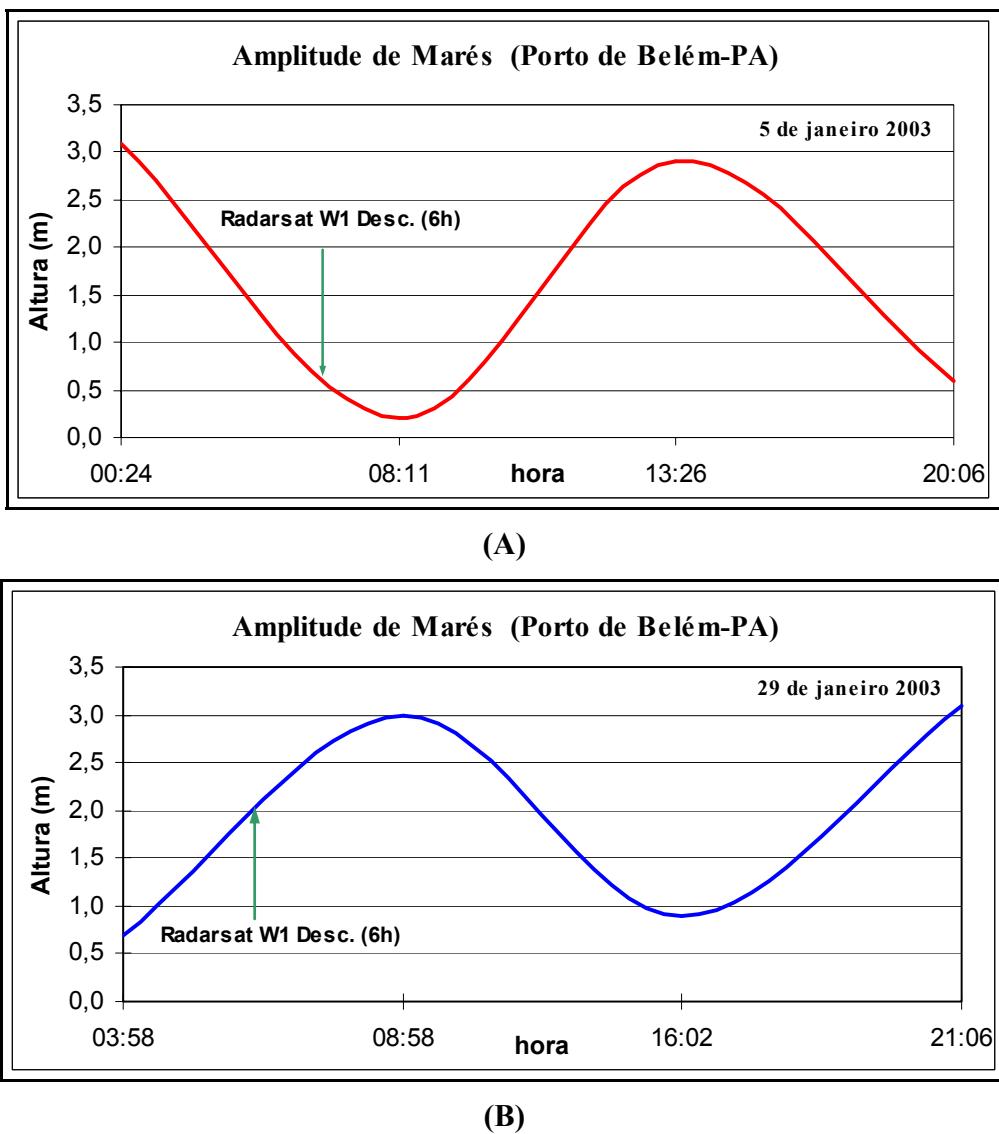
Feições geomorfológicas com ampla expressão na área, tais como planície de maré, planície fluvial e a região de Terra Firme, não puderam ser diferenciadas pela interpretação visual das imagens RADARSAT-1 W1, em função da similaridade dos padrões texturais entre esses ambientes, conferindo a essas regiões pouca variação tonal (nível de cinza) e poucos padrões

espaciais similares. Assim, buscando uma análise quantitativa dessas feições e a identificação dos mecanismos de retroespalhamento, foi efetuada a calibração radiométrica das imagens RADARSAT-1 W1.

É importante considerar que a energia de microondas retroespalhada pela superfície terrestre, medida por um sistema SAR, fornece informações a respeito das propriedades geométricas (macro e micro topografia) e dielétricas dos alvos (conteúdo de umidade). Variações nestas propriedades permitiram mapear as diversas feições que ocorrem na área em estudo.

Ademais, o coeficiente de retroespalhamento é uma medida quantitativa da intensidade de energia que retorna ao radar, dado que quando a umidade de um material aumenta o seu retroespalhamento também aumenta e, consequentemente, o brilho da imagem (tons de cinza mais claros). Esse efeito pode ser causado pelas chuvas, o que acarreta em menor penetração da energia eletromagnética, emitida pelo radar, na superfície úmida e aumentando, por conseguinte, seu retroespalhamento (Chaves, 2002). Para Amazônia, onde ocorre amplamente distribuída a floresta tropical úmida, esse parâmetro dos alvos é de elevada relevância, pois a umidade é influenciada pelas águas das chuvas, que afetam a região como um todo, ou ainda pela dinâmica das marés e pela sazonalidade dos rios, principalmente nas áreas suscetíveis as inundações (várzeas). Assim, estes parâmetros ambientais foram observados no período da aquisição das imagens, para não induzir a interpretações e conclusões equivocadas.

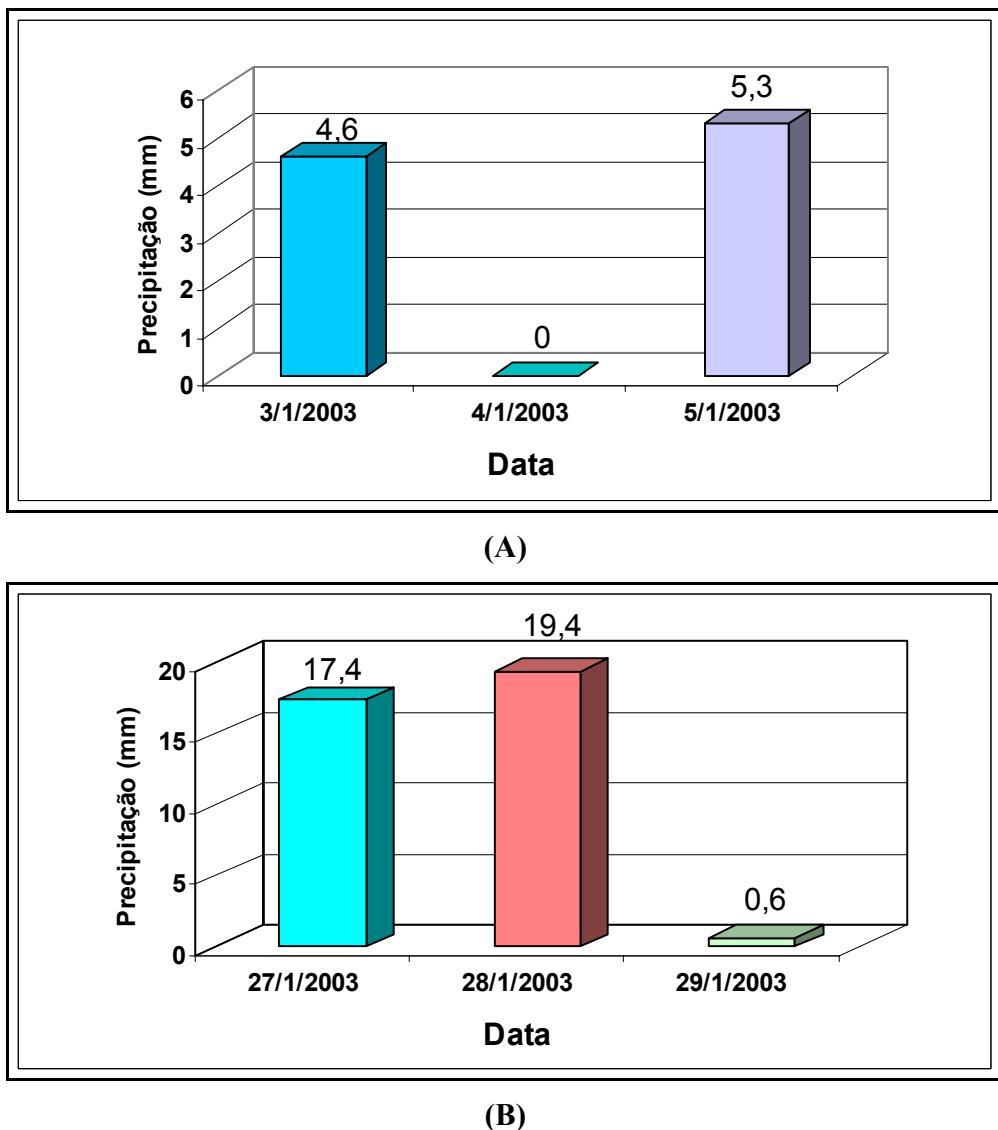
Dessa forma, a amplitude das marés, no dia e horário da aquisição das imagens RADARSAT-1 W1, era de aproximadamente 0,5 m para imagem de 5 de janeiro de 2003, em maré vazante, e aproximadamente 2,0 m para imagem adquirida em 29 de janeiro do mesmo ano, em condição de maré enchente, como pode ser visualizado na **Figura 6.7**. É importante considerar que as informações de marés aqui apresentadas são previsões geradas pelo DHN (Departamento Nacional de Hidrografia e Navegação), e não informações reais aferidas em campo.



**Figura 6.7** - Previsão de amplitude das marés: (A) em 5 de janeiro de 2003, maré vazando; (B) em 29 de janeiro de 2003, maré enchendo. FONTE: DHN (<http://www.dhn.mar.mil.br/>).

A precipitação pluvial na região de Belém, nos dois dias anteriores à aquisição das imagens RADARSAT-1 W1, é mostrada na **Figura 6.8**. Dessa forma, dia 5 de janeiro de 2003, houve 5,3 mm de precipitação, enquanto que no dia 29 de janeiro do mesmo ano, houve somente 0,6 mm de precipitação. É importante considerar que a precipitação relativa a um dia qualquer, refere-se à média das taxas de precipitação da tarde e noite do dia anterior, mais a taxa na manhã da data em questão, segundo informações do Segundo Distrito de Meteorologia de Belém. Assim, como exemplo, a precipitação do dia 5 de janeiro, diz respeito aos valores medidos durante à

tarde e noite do dia 4 de janeiro, mais o valor medido na manhã do dia 5 de janeiro (às 9 horas). Esse controle é importante, uma vez que as imagens RADARSAT-1, órbita descendente, são adquiridas sempre às 6 horas da manhã (hora local).



**Figura 6.8** - Precipitação pluvial em Belém: (A) em 3, 4 e 5 de janeiro de 2003; (B) em 27, 28 e 29 de janeiro de 2003. FONTE: 2º DISME-Belém/INMET.

Os parâmetros ambientais aqui apresentados são relevantes para o entendimento da interação entre o pulso de microondas e os alvos na superfície terrestre, na medida em que representam as condições ambientais durante a aquisição das imagens utilizadas. Este conhecimento permite fazer inferências e constatações a respeito da influência do conteúdo de

umidade na resposta do radar, quer seja por influência das chuvas ou das marés, sendo essas duas características importantes no condicionamento das feições presentes nas imagens RADARSAT-1 W1 da área estudada.

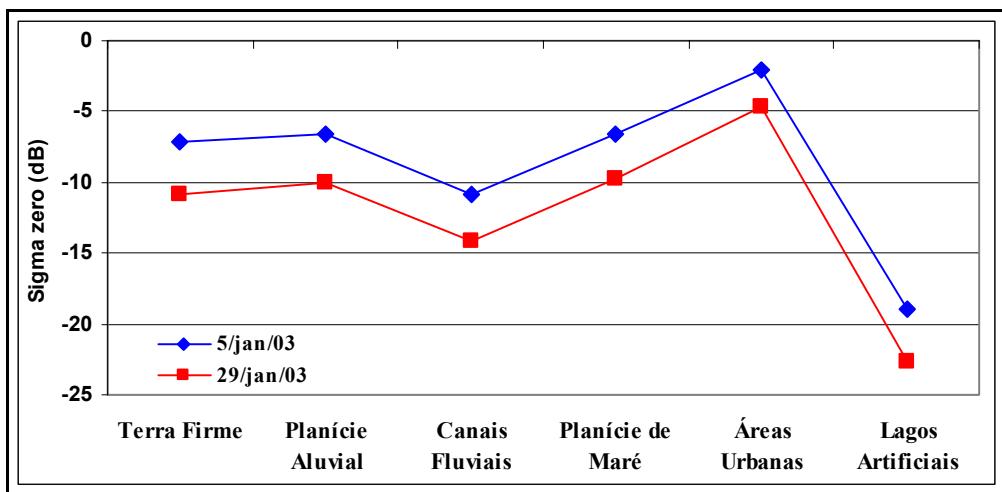
Com as informações de amplitude de marés, do nível de precipitação e das amostras de coeficiente de retroespalhamento obtidas nas imagens, é possível dizer que é desprezível a influência da maré para a área em estudo na resposta do RADARSAT-1 W1. De fato, na imagem obtida em condição de maré enchente (29 de janeiro de 2003) e com amplitude de maré em torno de 2m, onde teoricamente, deveria haver um aumento do conteúdo de umidade nas regiões topograficamente mais baixas, em função da elevação da maré e da inundação dessas áreas, possui de maneira geral, valores menores de coeficiente de retroespalhamento médio, se comparada com aquela adquirida em maré vazante (5 de janeiro de 2003), com amplitude de maré aproximada de 0,5 m.

Assim, a disposição dos elementos naturais na região investigada em conjunto com a configuração do sistema RADARSAT-1, não possibilitaram a diferenciação da Terra Firme das áreas de várzea pelo mecanismo de *double bounce*, o que tem permitido o mapeamento desse tipo de ambiente em vários trabalhos citados na literatura (Hess *et al.*, 1995; Souza Filho, 2000; Souza Filho & Paradella, 2002; Beisl *et al.*, 2003). Este fato pode ser atribuído à similaridade dos mecanismos de retroespalhamento atuantes, ou ainda ao arranjo da cobertura vegetal na região, constituída por floresta densa e de médio porte, não permitindo a penetração do feixe de microondas no dossel, ocorrendo uma interação apenas com o topo, em função da configuração do sistema SAR usado (banda C) (**Figura 6.9**). Segundo a mesma linha de raciocínio, pode ser que, apesar da condição de maré alta, sua amplitude não foi suficiente para inundar as regiões de várzeas e os manguezais, que são alagados somente durante as marés de sizígia equinociais.



**Figura 6.9** - Vegetação típica encontrada nas várzeas da região.

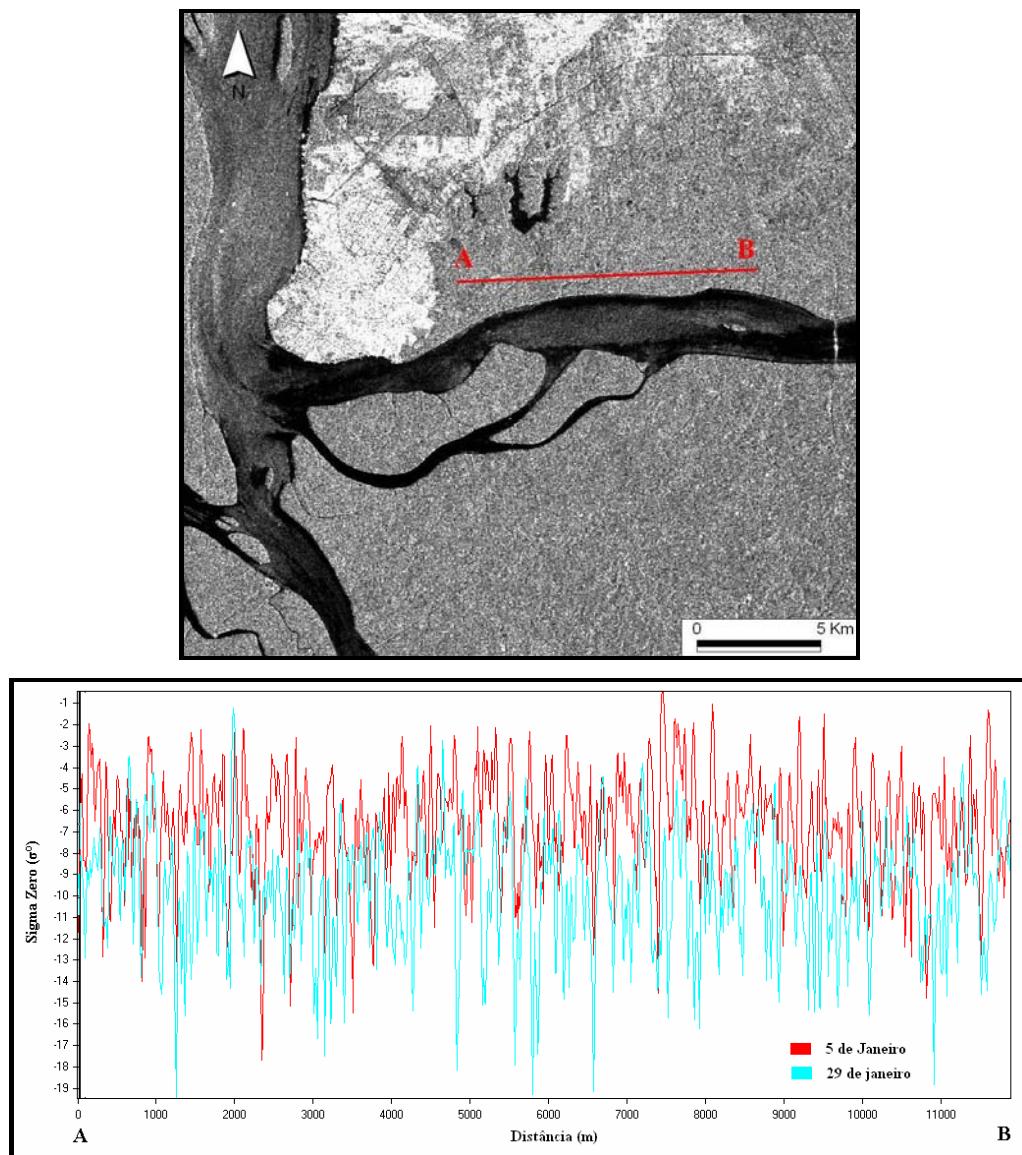
Por outro lado, é clara a influência da precipitação pluvial no aumento da umidade na área em questão e, consequentemente, na resposta do RADARSAT-1 W1. As amostras de  $\sigma^0$  obtidas na imagem de 5 de janeiro de 2003, onde a precipitação foi da ordem de 5,3 mm, possuem de maneira geral, maiores valores de coeficiente de retroespalhamento do que aqueles obtidos na imagem de 29 de janeiro, quando a precipitação foi de 0.6 mm. Este comportamento, visualizado na **Figura 6.10**, ocorre porque a precipitação pluvial afeta toda a área de uma forma geral, agindo de forma direta no topo do dossel florestal, que é o principal nível de interação da energia de microondas com a vegetação.



**Figura 6.10** - Comparação entre os valores médios de  $\sigma^{\circ}$  obtidos pela análise estatística das amostras de coeficiente de retroespalhamento nas imagens RADARSAT-1, adquiridas em condições ambientais distintas, para as principais unidades de paisagem identificadas na área em estudo.

Na área em estudo, ocorrem amplamente distribuídas as regiões de várzea (planície aluvial), que se caracterizam por seu posicionamento fisiográfico ao longo dos canais fluviais, constituindo áreas diariamente inundadas durante a elevação das marés, ação das chuvas ou por ambas, ou ainda alagadas periodicamente, quando coincide a maré alta com altos índices pluviométricos. Manguezais são característicos na região, sendo distribuídos ao longo dos canais estuarinos, constituindo áreas diariamente influenciadas tanto pela descarga fluvial quanto pela ação das marés salinas que fluem estuário adentro. Isto é, ocorrem em área de influência flúvio-marinha, com fluxo e refluxo das correntes de marés, sendo a salinidade um fator determinante no seu desenvolvimento.

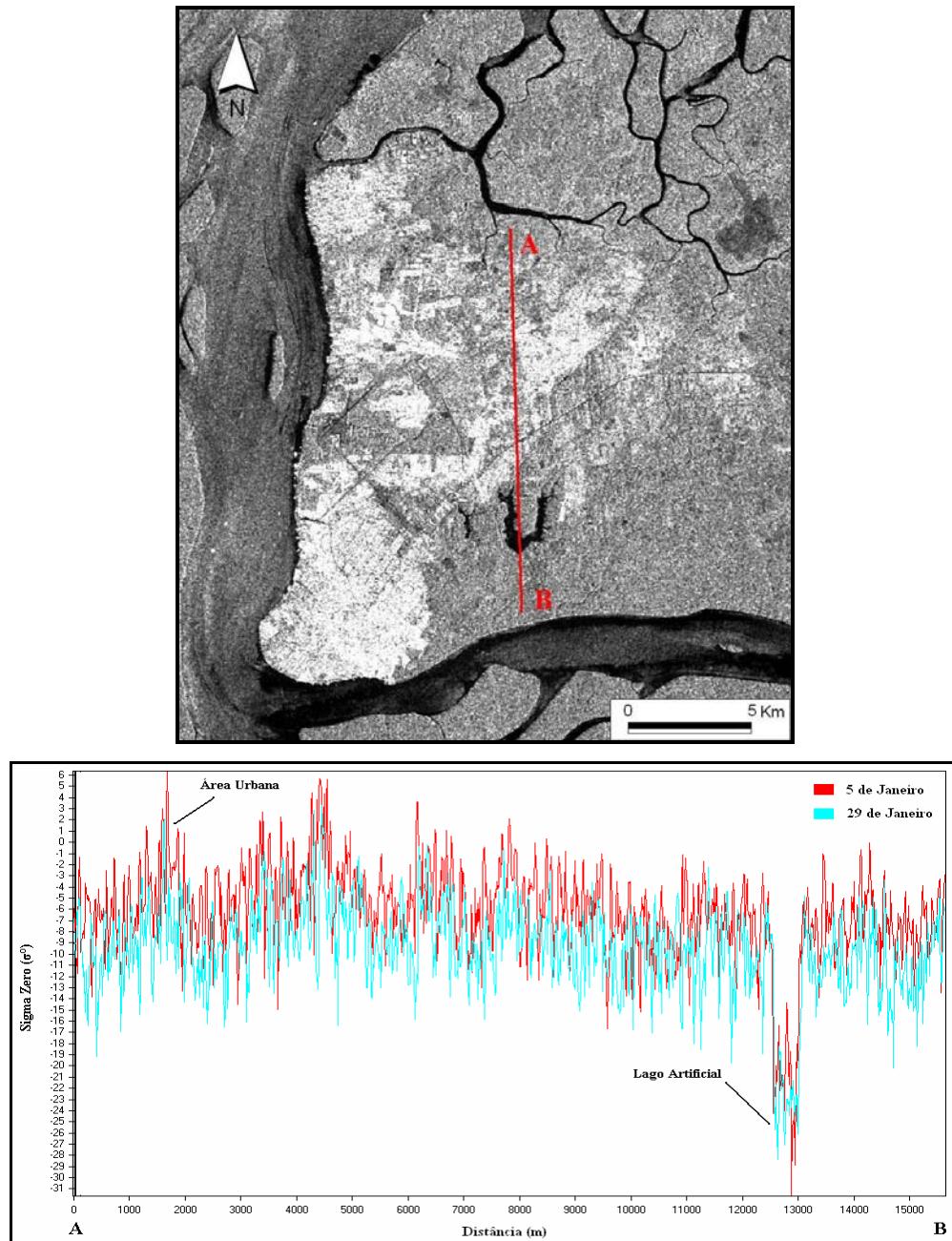
A **Figura 6.11** ilustra um perfil do comportamento do retroespalhamento sobre a Região de Várzea do Rio Guamá, mostrando um mesmo padrão geral de resposta do radar. Há uma pequena diferença, que delimita valores ligeiramente maiores de coeficiente de retroespalhamento para imagem de 5 de janeiro de 2003, obtida em um período com maior intensidade de chuvas e menor amplitude de maré. Essa diferença é pequena porque as variações ambientais nas imagens de 5 e 29 de janeiro não são acentuadas, em razão do pequeno intervalo de tempo entre as datas de aquisição.



**Figura 6.11** - Perfil ( $\overline{AB}$ ) sobre a Região de Várzea do Rio Guamá, mostrando comportamento similar de retroespalhamento para as duas imagens RADARSAT-1 W1 (5 e 29 de janeiro de 2003), com a imagem de 5 de janeiro apresentando valores de coeficiente de retroespalhamento ligeiramente maiores do que a imagem de 29 de janeiro, comportamento este que ocorre de maneira geral por toda a imagem

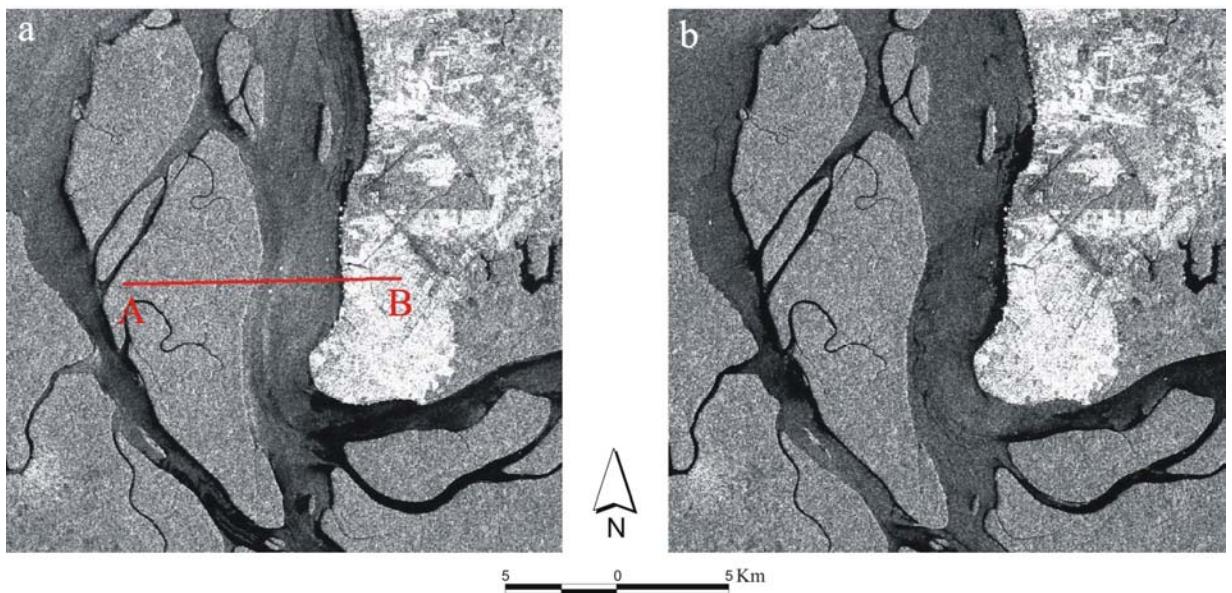
De outra forma, os corpos d'água foram bem discriminados, em função do baixo valor de coeficiente de retroespalhamento médio, apresentando uma distinta assinatura radiométrica se comparados com as demais áreas. São notáveis os lagos artificiais abrigados da influência da

energia das marés, com valores de  $\sigma^{\circ}$  médio de  $-18,9$  e  $-22,6$  dB, para as imagens de 5 e 29 de janeiro, respectivamente (**Figura 6.12**).

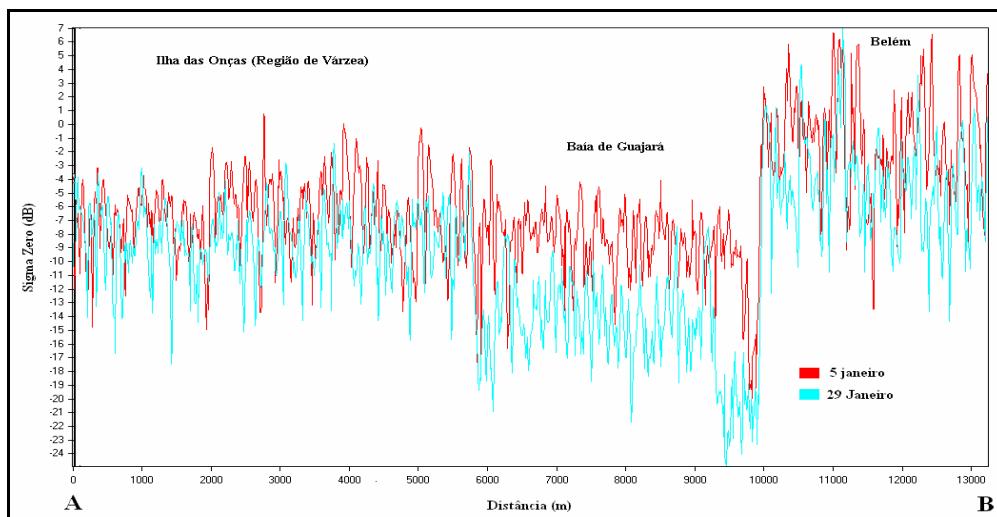


**Figura 6.12** - Perfil ( $\overline{AB}$ ), de direção N-S, cortando as regiões de várzeas, áreas urbanas, Terra Firme, lagos artificiais (Lago Água Preta) e a várzea do Rio Guamá, apresentando picos de coeficiente de retroespalhamento para as áreas urbanas, intercaladas por regiões com valores homogêneos de retroespalhamento (Várzeas e Terra Firme) e por uma queda abrupta para os valores de retroespalhamento no lago artificial (Água Preta).

Já para a Baía de Guajará, o baixo retorno do sinal é função da pequena rugosidade superficial da água, criando um mecanismo de espalhamento quasi-especular, principalmente na imagem de 29 de janeiro, em condição de maré enchente, onde as condições hidrodinâmicas eram de calmaria, aproximando-se da condição de estofo de maré. O efeito de espalhamento quasi-especular é diminuído na imagem de 5 de janeiro, em condição de maré vazante, onde a maior energia hidráulica na Baía de Guajará gera ondulações formadas pela ação da energia das marés, corrente fluvial e pelos ventos atuantes na região. Tal efeito aumenta a rugosidade superficial na Baía e, consequentemente, os valores de retroespalhamento médio para essa data, o que pode ser facilmente visualizado pelo perfil na **Figura 6.13**. Portanto, na Baía de Guajará, diferentemente da várzea e das áreas urbanas em Belém, há uma maior diferença no comportamento do retroespalhamento entre as imagens de 5 e 29 de janeiro. As grandes diferenças observadas entre os valores de retroespalhamento para a Ilha das Onças, Baía de Guajará e as áreas urbanas de Belém dizem respeito aos distintos mecanismos de retroespalhamento atuantes.

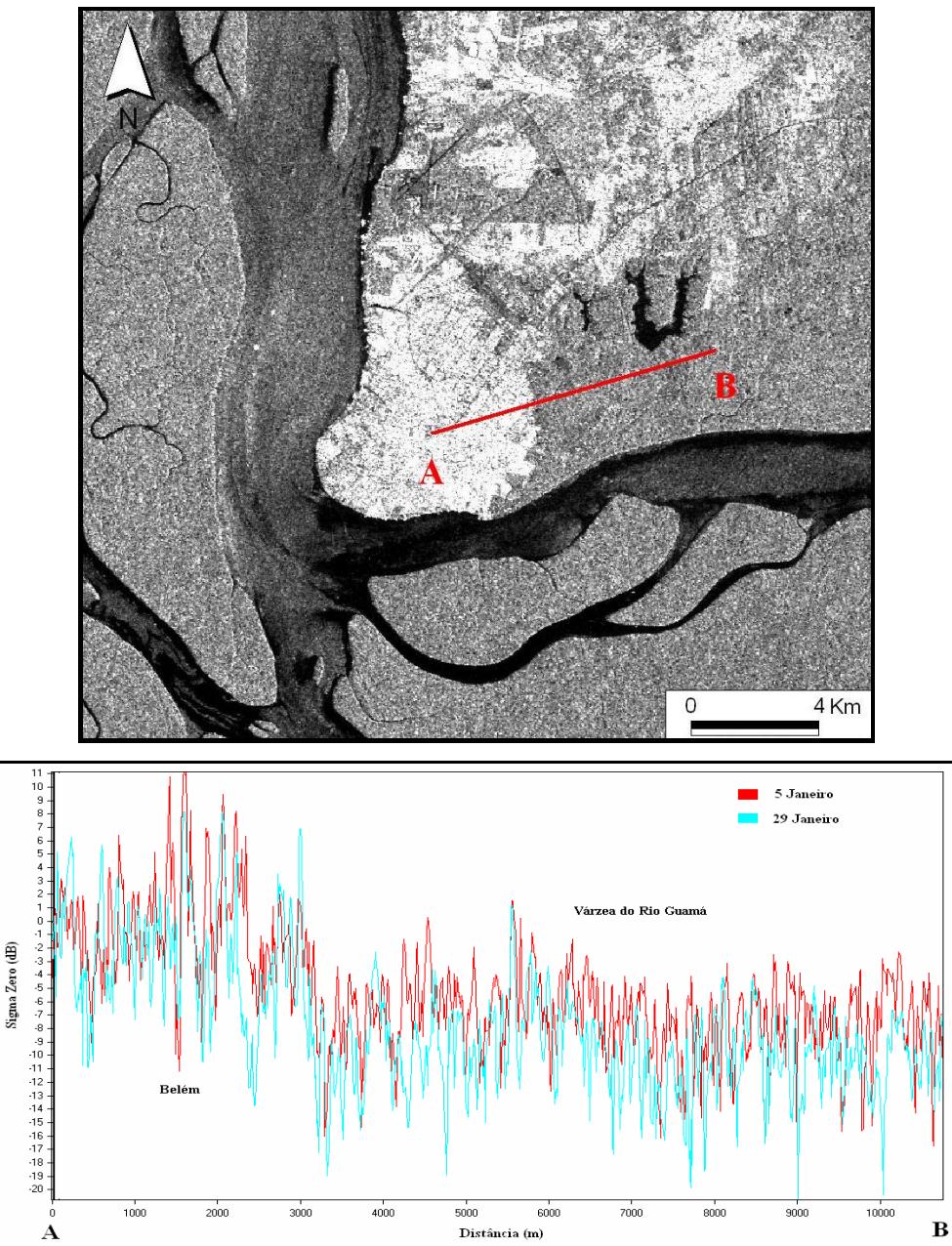


**Figura 6.13** – Imagens RADARSAT-1 W1: a) imagem de 5 de janeiro de 2003, em maré baixa, mostrando maior rugosidade superficial na Baía de Guajará, em função das maiores ondulações formadas na vazante; b) imagem 29 de janeiro, em maré alta, apresentando menor rugosidade superficial na água.



**Figura 6.13 (cont.)** - Perfil ( $\overline{AB}$ ) sobre a Baía de Guajará, em direção a Belém, mostrando o comportamento do retroespalhamento na Região de Várzea (Ilha das Onças), da água com um pequeno decréscimo nos valores de retroespalhamento em relação à várzea (Baía de Guajará), e áreas urbanas, onde há um grande aumento no retroespalhamento (Belém). Observar a maior diferença no retroespalhamento sobre a Baía de Guajará devido à rugosidade da água.

Uma unidade de paisagem bem discriminada por seus valores de  $\sigma^0$  foram as áreas urbanas, que diferentemente dos corpos de água, apresentaram altos valores médios de coeficiente de retroespalhamento, em torno de -2,0 e -4,7 dB, para as imagens de 5 e 29 de janeiro de 2003, respectivamente. Essa diferença entre os valores de  $\sigma^0$  segue a tendência geral, com maior valor de coeficiente de retroespalhamento médio para a imagem de 5 de janeiro, provavelmente em função do nível maior de precipitação nesta data e, consequentemente, do aumento do conteúdo de umidade. Os altos valores de  $\sigma^0$  nas áreas urbanas dizem respeito a um complexo mecanismo de reflexão atuante, onde o efeito de *double bounce*, também chamado de reflexão de canto, acarreta um alto retorno do pulso de microondas (retroespalhamento), que resulta em alto brilho nas imagens (valores de nível de cinza elevados). Este efeito pode ser visualizado no perfil da **Figura 6.14**.

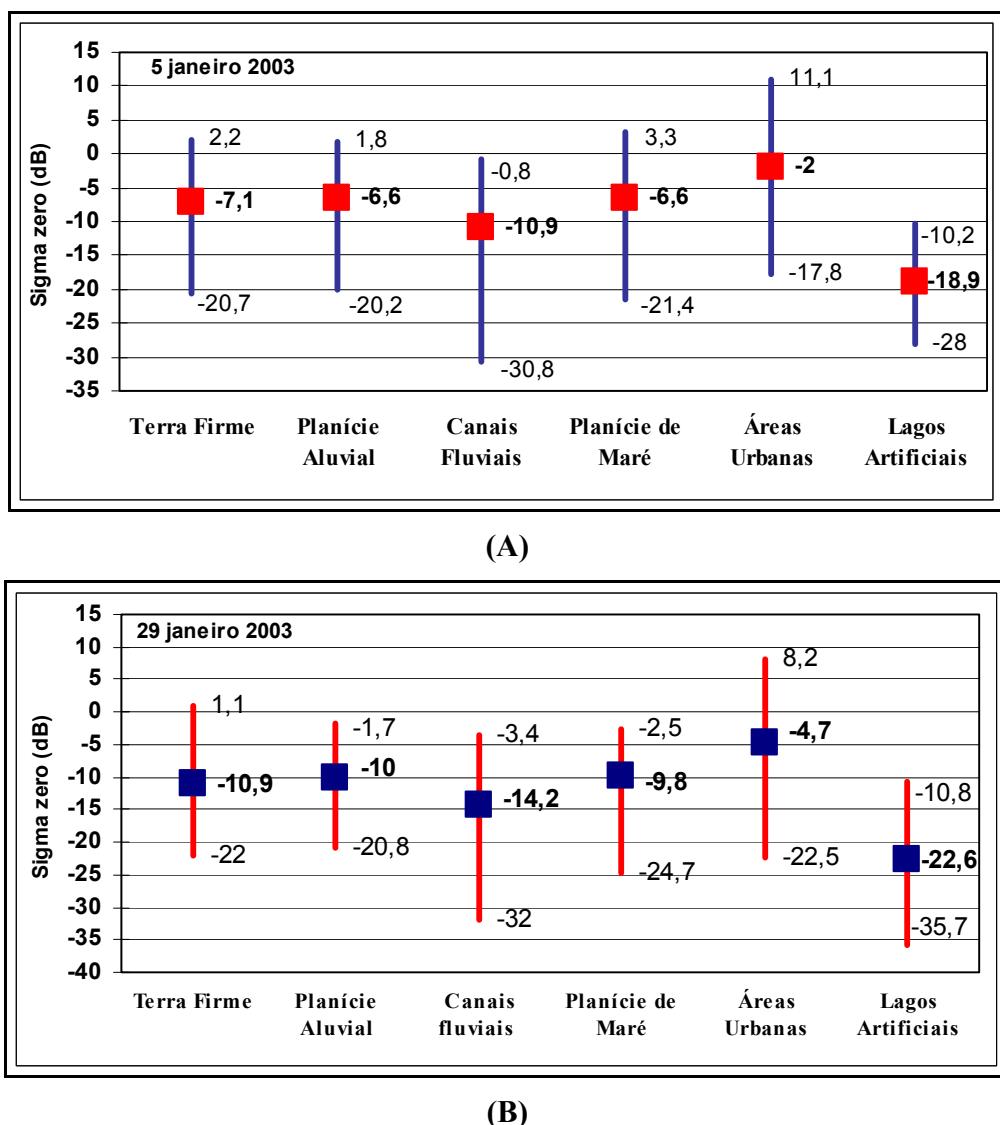


**Figura 6.14** - Perfil ( $\overline{AB}$ ) sobre a área urbana de Belém até a Várzea do Rio Guamá. Observar a diferença entre os padrões de retroespalhamento, com altos valores de coeficiente de retroespalhamento para a cidade de Belém (reflexão de canto nos prédios) e menores valores para a área vegetada da Várzea do Rio Guamá (espalhamento volumétrico no topo do dossel).

A análise dos coeficientes de retroespalhamento (**Figura 6.15**) indica que, para as imagens RADARSAT-1 W1 adquiridas em 5 e 29 de janeiro em diferentes condições ambientais (maré e precipitação), há grande dificuldade de mapeamento para determinadas unidades de paisagem, em função da grande sobreposição entre os valores estatísticos. Isso ocorre com o coeficiente de retroespalhamento para as Regiões de Várzea (valor médio de -6,6 dB), Planície de Maré (valor médio de -6,6 dB) e Terra Firme (valor médio de -7,1 dB), na imagem de 5 de janeiro de 2003 (**Tabela 6.6**). Esse efeito impossibilita, ou dificulta sobremaneira, a identificação e o mapeamento destes ambientes usando somente as imagens RADARSAT-1 W1. No entanto, foi possível mapear com boa acurácia nas imagens citadas os corpos de água e as áreas urbanas, onde foram observados valores médios de coeficiente de retroespalhamento para os Canais Fluviais (-10,9 dB), Áreas Urbanas (-2,0 dB) e Lagos Artificiais (-18,9), valores estes obtidos da imagem de 5 de janeiro de 2003 (**Figura 6.15 A**).

Para a imagem de 29 de janeiro de 2003, foram encontrados valores de coeficiente de retroespalhamento similares para as Regiões de Várzea (valor médio de -10,0 dB), Planície de Maré (valor médio de -9,8 dB) e Terra Firme (valor médio de -10,9). Diferentemente, foram observados valores médios de coeficiente de retroespalhamento para os Canais Fluviais (-14,2 dB), Áreas Urbanas (-4,7 dB) e Lagos Artificiais (-22,6) (**Figura 6.15 B**).

Todavia, é de grande relevância a aplicação de técnicas de integração de dados, uma vez que fica comprometida a identificação e o mapeamento de algumas unidades de paisagem, utilizando as imagens RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+ separadamente, como visto anteriormente. Assim, a fusão de dados visa obter um produto com valor agregado para identificação e extração de feições e atributos, integrando informações de diferentes porções do espectro eletromagnético, o que pode facilitar grandemente a interpretação.



**Figura 6.15** - Principais parâmetros (valores máximo, médio e mínimo) obtidos pela análise estatística das amostras de coeficiente de retroespalhamento para as principais unidades de paisagem identificadas na área em estudo: (A) imagem RADARSAT-1 W1 (5 de janeiro de 2003); (B) imagem RADARSAT-1 W1 (29 de janeiro de 2003).

<i>Compartimentação da Paisagem</i>	<i>Amostras de <math>\sigma^{\circ}</math> (Radarsat-1 W1)</i>	
	<i>5 Jan. 2003</i>	<i>29 Jan. 2003</i>
Terra Firme	<b>-7,1 dB</b>	<b>-10,9 dB</b>
Planície aluvial (Várzea)	<b>-6,6 dB</b>	<b>-10,0 dB</b>
Planície de maré	<b>-6,6 dB</b>	<b>-9,8 dB</b>
Canais fluviais e estuarinos	<b>-10,9 dB</b>	<b>-14,2 dB</b>
Áreas urbanas	<b>-2,0 dB</b>	<b>-4,7 dB</b>
Lagos artificiais	<b>-18,9 dB</b>	<b>-22,6 dB</b>

**Tabela 6.6** - Valores médios dos coeficientes de retroespelhamento ( $\sigma^{\circ}$ ) calculados para as principais unidades de paisagem encontradas na área em estudo.

### 6.2.3 - Fusão Radar/Óptico

O objetivo da integração digital de dados de sensores remotos é maximizar a extração de informações, utilizando para isso o sinergismo adquirido pela fusão de dados correspondentes a diferentes faixas do espectro eletromagnético (e.g. SAR/óptico). Tal procedimento permite uma melhora na identificação e mapeamento dos ambientes costeiros e feições estudadas (Harris *et al.*, 1994). Dessa forma, no produto híbrido gerado, enquanto o SAR (RADARSAT-1 W1) fornece informações sobre a geometria do terreno (macro e micro-topografia) e suas propriedades elétricas (conteúdo de umidade) realçando, assim, as características geométricas e texturais, os sensores ópticos (LANDSAT-7 ETM+) fornecem atributos espetrais, relacionados com informações das propriedades físico-químicas dos alvos. A integração desses dados, portanto, é uma efetiva técnica de realce para a identificação e o mapeamento da geomorfologia e do uso da terra (Singhroy, 1996).

Neste trabalho, quatro diferentes abordagens para integração de dados multisensores foram avaliadas, usando duas técnicas diferentes de realce para as imagens LANDSAT-7 ETM+ (ACP - análise por componentes principais e realce por decorrelação). Assim, as abordagens testadas foram: 1) ACP para as seis bandas ETM+ do espectro refletido (1, 2, 3, 4, 5, 7) e posterior fusão das três primeiras componentes principais com o SAR; 2) fusão do SAR com a tríade selecionada pelo IOF; 3) realce por decorrelação da tríade selecionada pelo IOF, seguida da fusão com SAR; 4) SPC-SAR (Paradella *et al.*, 1999), onde as primeiras componentes principais

das bandas (ETM+ - 1, 2, 3) e bandas (ETM+ - 5 e 7) são usadas como dados de entrada conjuntamente com a banda 4 numa transformação do espaço de cores RGB-IHS, com a subsequente substituição do componente I pela imagem RADARSAT-1 W1 realçada, durante a transformação inversa IHS-RGB (**Figura 5.3**).

Nas **Tabelas 6.7 e 6.8**, são mostrados os parâmetros estatísticos dos autovetores e autovalores das componentes principais gerados a partir da matriz de covariância calculada para as seis bandas do espectro refletido do LANDSAT-7 ETM+ (1, 2, 3, 4, 5, 7). Dessa forma, a primeira componente principal (1CP) retém 71,46% da variância das seis bandas refletidas do LANDSAT-7 ETM+, a segunda componente principal (2 CP) apresenta 26,46 % da variância total e a terceira componente principal (3 CP) possui 1,55% da variância. Estas três primeiras componentes principais agregam 99,47% da variância total. Com isso, as informações das seis bandas multiespectrais podem ser comprimidas dentro das três primeiras componentes principais, abrangendo todo o espectro coberto pelo sensor ETM+ (visível, infravermelho próximo e médio) (Jensen, 1996).

<b>CP</b>	<b>Autovalor</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>Variância (%)</b>	<b>Cumulativo (%)</b>
1	2390,8389	48,8962	71,46	71,46
2	885,1882	29,7521	26,46	97,92
3	51,7444	7,1934	1,55	99,47
4	10,1635	3,1880	0,30	99,77
5	5,4250	2,3292	0,16	99,93
6	2,3505	1,5331	0,07	100

**Tabela 6.7** - Estatística das componentes principais para as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 7) do LANDSAT-7 ETM+.

<b>Matriz de Autovetores</b>						
	1 CP	2 CP	3 CP	4 CP	5 CP	6 CP
Bandas						
1	-0,06116	-0,27884	0,24609	0,26698	-0,74242	0,48527
2	-0,07253	-0,32775	0,40899	-0,00059	-0,26292	<b>-0,80680</b>
3	-0,13437	-0,57380	0,48581	-0,18700	0,52900	0,31919
4	0,62794	0,40730	0,59918	0,25616	0,11491	0,04420
5	0,67747	-0,31021	-0,20546	-0,59990	-0,20475	0,02813
7	0,34593	-0,47272	-0,36732	0,68429	0,21148	-0,09469

**Tabela 6.8** - Matriz de autovetores das componentes principais para as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 7) do LANDSAT-7 ETM+, destacando a maior contribuição em **negrito**.

A contribuição de cada banda para uma determinada componente principal (CP) é função dos autovetores correspondentes. Já os autovalores representam a variância das componentes principais (Fonseca *et al.*, 2000). O exame da magnitude e sinal dos autovetores gerados é importante para compreender como cada banda contribui para a variância das CP. Assim, uma alta reflectância é expressa por valores positivos de autovetores; de maneira inversa, baixa reflectância é expressa por valores negativos de autovetores (Picchiotti *et al.*, 1997).

Dessa forma, pela análise da matriz de autovetores (**Tabela 6.8**), é possível concluir que a 1 CP é dominada pela contribuição da banda 5 (0,67747), banda 4 (0,62794) e banda 7 (0,34593), respectivamente. Isso sugere que os altos valores de autovetores para essas bandas têm relação com a resposta espectral dos solos expostos/áreas urbanas e vegetação, refletindo seus respectivos conteúdos de umidade (banda 5 e 7), para região do infravermelho próximo e médio, e ainda com a resposta da vegetação (banda 4), na região do infravermelho próximo. A 1 CP mostra claramente uma distinção entre a maior colaboração das bandas do infravermelho, em detrimento da menor colaboração das bandas do visível, de forma que estes dois conjuntos de dados estão inversamente associados.

A 2 CP é dominada pela contribuição da banda 3 (-0,57380), banda 7 (-0,47272) e banda 4 (0,40730). Tal resultado sugere uma forte influência das respostas espetrais da quantidade de sedimentos em suspensão na Baía de Guajará, áreas urbanas e vegetação. Ademais, a resposta espectral dos sedimentos em suspensão é fortemente influenciada pela natureza e tamanho das partículas em suspensão e por sua distribuição espacial, variações sazonais, condições climáticas (Picchiotti *et al.*, 1997). A 3 CP é dominada pelas contribuições das bandas 4, 3 e 2. A técnica ACP mostrou-se excelente para o realce de feições espetrais, como também para reduzir a dimensionalidade dos dados, uma vez que nas três primeiras componentes principais, as maiores contribuições (autovetores) estão relacionadas com as bandas ETM+ que possuem informações sobre as principais feições ambientais encontradas na área em estudo, a saber: áreas urbanas, vegetação e água.

Uma vez que as três primeiras componentes principais retêm 99,47% da variância, estas foram usadas para integração com a imagem RADARSAT-1 W1, via transformação IHS.

As **Tabelas 6.9, 6.10** mostram os parâmetros estatísticos dos autovetores e autovalores calculados para cada conjunto de bandas ETM+, grupo (123) e grupo (5 e 7), que foram usados como dados de entrada numa transformação por Componentes Principais, visando a integração

SAR/óptico, abordagem esta chamada de SPC-SAR (*Selective Principal Component-SAR*). Dessa forma, o uso de pequenos grupos de bandas altamente correlacionadas como dados de entrada para uma ACP permite que as informações comuns em todas as imagens sejam mapeadas dentro da 1CP (Picchiotti *et al.*, 1997).

	<b>1 CP</b>	<b>2 CP</b>	<b>3 CP</b>
Bandas			
1	-0,38560	0,77957	-0,49353
2	-0,46130	0,30036	0,83486
3	-0,79907	-0,54959	-0,24380
Variância	98,37%	1,09%	0,53%

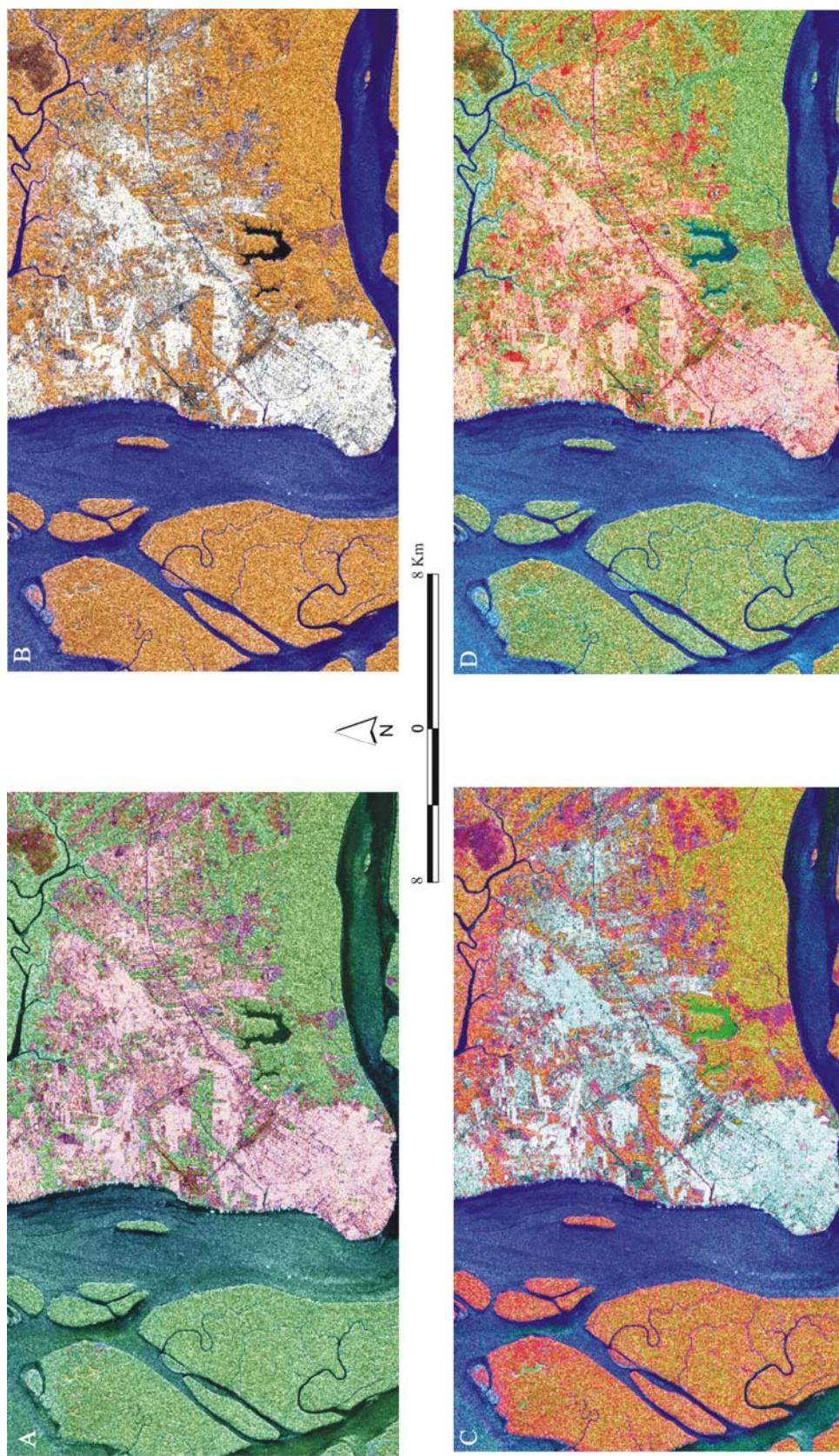
**Tabela 6.9** - Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas (1, 2, 3) do LANDSAT-7 ETM+.

	<b>1 CP</b>	<b>2 CP</b>
Bandas		
5	-0,85112	0,52498
7	-0,52498	-0,85112
Variância	95,81%	4,19%

**Tabela 6.10** - Matriz de autovetores e variância das componentes principais para as bandas 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+.

Assim, quando existem imagens ópticas disponíveis, a integração SAR/óptico é de grande valor para o mapeamento dos ambientes naturais costeiros e do uso da terra, em função do sinergismo obtido com o produto gerado. As imagens LANDSAT-7 ETM+ forneceram excelentes informações sobre as unidades de paisagem na área em estudo; no entanto, imagens ópticas nem sempre estão disponíveis, em função da constante e intensa cobertura de nuvens na região amazônica. Quando isso ocorre, o SAR apresenta uma alternativa viável, podendo ser usado para monitorar mudanças ambientais e atualizar informações de uso da terra nas zonas costeiras tropicais amazônicas (Singhroy, 1996).

Os produtos híbridos gerados pela fusão de dados SAR/ETM+ foram avaliados visualmente, considerando padrões de cores e texturais. Assim, o melhor desempenho do produto integrado é função direta do aumento da interpretabilidade dos ambientes e feições costeiras amazônicas, considerando a maximização da variação do componente cromático e textural (**Figura 6.16**).



**Figura 6.16 – Técnicas de integração usadas: A) ACP nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, fusão 1CP, 2CP, 3CP + SAR; B) fusão SAR+ triade IOF (3, 5, 7); C) realce por decorrelação na triade IOF, posterior fusão com SAR; D) SPC-SAR (Paradella *et al.*, 1999).**

A fusão do SAR com a tríade seccionada pelo IOF (**Figura 6.16 B**) não apresentou bons resultados para interpretação, uma vez que não possibilitou a discriminação dos diferentes ambientes flúvio-estuarinos da Baía de Guajará, principalmente as planícies fluvial e estuarina, bem como, a Região de Terra Firme. A interpretabilidade e detecção de padrões no produto gerado são baixas, o que tem relação direta com a pequena variação do seu conteúdo cromático. Este produto fornece principalmente informações referentes ao SAR, macro e microtopografia, mostrando um padrão de cores homogêneo.

De forma contrária, quando a tríade selecionada pelo IOF foi submetida a um realce por decorrelação e em seguida integrada com a imagem SAR (**Figura 6.16 C**), o produto resultante mostrou melhor variação no conteúdo cromático, mas apresentando certa confusão entre as unidades de paisagem, não gerando, assim, bons padrões distintivos, o que dificulta a interpretação e extração de informações.

Portanto, o produto integrado SPC-SAR mostrou excelente resultado para o mapeamento da região flúvio-estuarina da Baía de Guajará, conferindo maior variação aos padrões de cores e texturas facilitando, assim, a interpretabilidade destes ambientes. Ademais, as informações cromáticas e texturais obtidas neste produto têm relação com diferenças na topografia (elevação), conteúdo de umidade dos solos e vegetação, controle geobotânico (estrutura da vegetação), bem como o arranjo e disposição dos elementos superficiais. Dessa forma, este foi o produto que agregou maior valor para o reconhecimento e interpretação dos ambientes (**Figura 6.16 D**).

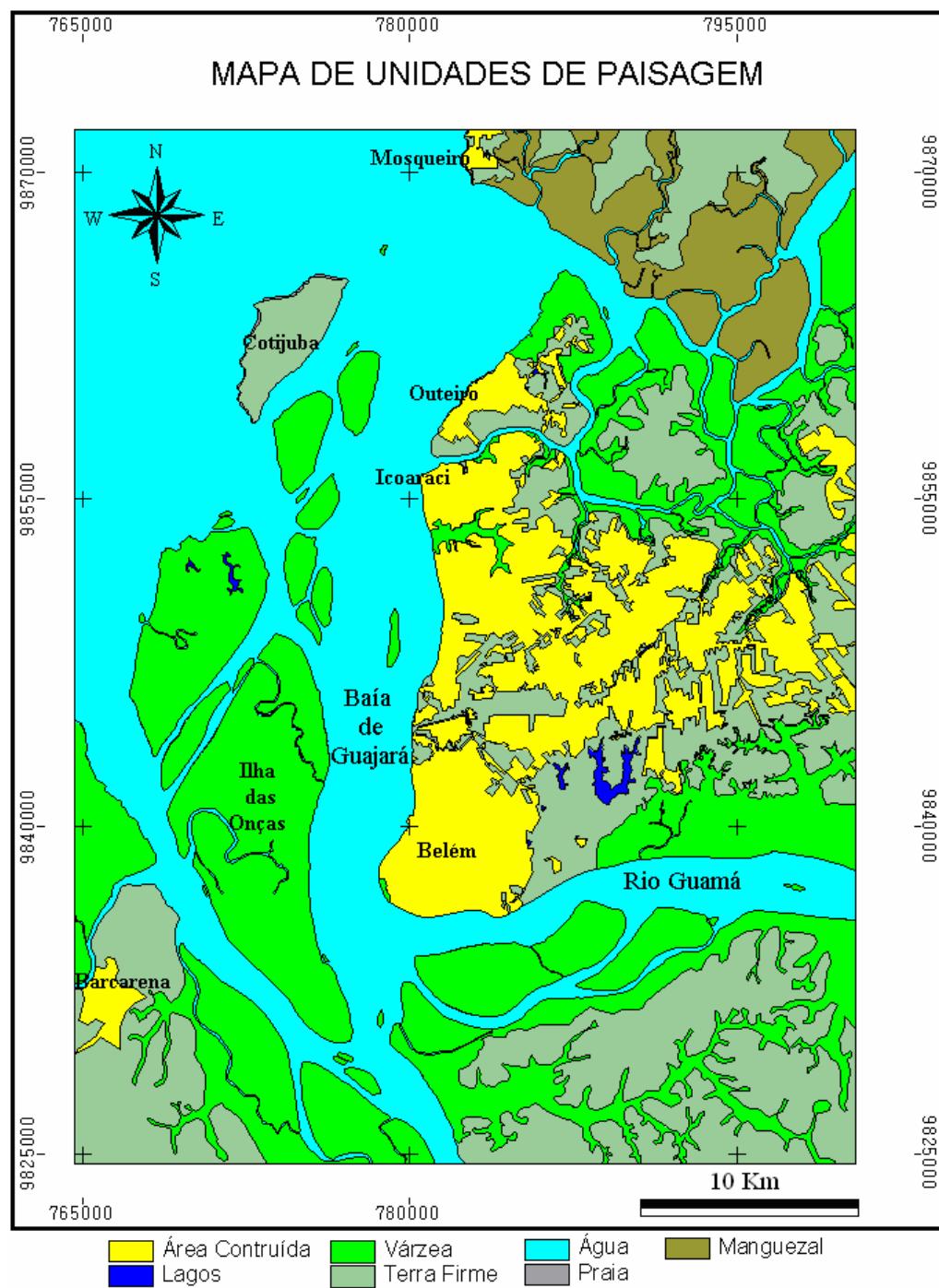
### 6.3 - RECONHECIMENTO DOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ

A interpretação dos ambientes e feições da Baía de Guajará, em função de parâmetros chaves de foto-interpretação (padrões de cores, texturas e contexto), foi realizada pela análise do produto híbrido (SAR/ETM+), gerado usando a técnica SPC-SAR, além das imagens RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+ individualmente. Assim, foi possível identificar e mapear os diferentes ambientes flúvio-estuarinos da Baía de Guajará, auxiliado por ortofotos digitais obtidas por um levantamento aerofotogramétrico na região metropolitana de Belém (CODEM, resolução 3,3m), por fotografias áreas oblíquas tomadas em um sobrevôo e, ainda, pelo conhecimento pretérito da área em estudo.

A região da Baía de Guajará representa um complexo sistema hidrodinâmico, onde fatores naturais e induzidos pelo homem interagem grandemente na configuração atual da paisagem. Dessa forma, o estudo da área a partir dos dados obtidos permitiu o aperfeiçoamento da compartimentação e definição das diferentes unidades de paisagem. Dentro deste contexto, três unidades morfoesculturais e sete unidades morfológicas (unidades de paisagem) foram reconhecidas, a partir da abordagem proposta por Ross (1996), que estabelece táxons para classificação geomorfológica (**Tabela 6.11**). A **Figura 6.17** mostra o mapa das unidades de paisagem da área em estudo, interpretado a partir de uma imagem híbrida (fusão da banda pancromática com as bandas multiespectrais do LANDSAT-7 ETM+, apresentada na **Figura 6.3**), conforme descrições a seguir.

<i>Morfoesculturas</i>	<i>Unidades Morfológicas</i> ( <i>Unidades de Paisagem</i> )
<b>Planalto Rebaixado da Amazônia</b>	Terra Firme (Pediplano)
<b>Planície Amazônica</b>	Planície aluvial (Várzea)
	Planície de maré
	Praias estuarinas
	Canais fluviais e estuarinos
<b>Sistemas Antropogênicos</b>	Áreas urbanas Lagos artificiais

**Tabela 6.11** – Compartimentação geomorfológica da área em estudo.



**Figura 6.17** - Mapa de unidades de paisagem elaborado a partir da interpretação visual do produto integrado, pan/multi do LANDSAT-7 ETM+ (Gonçalves, 2003).

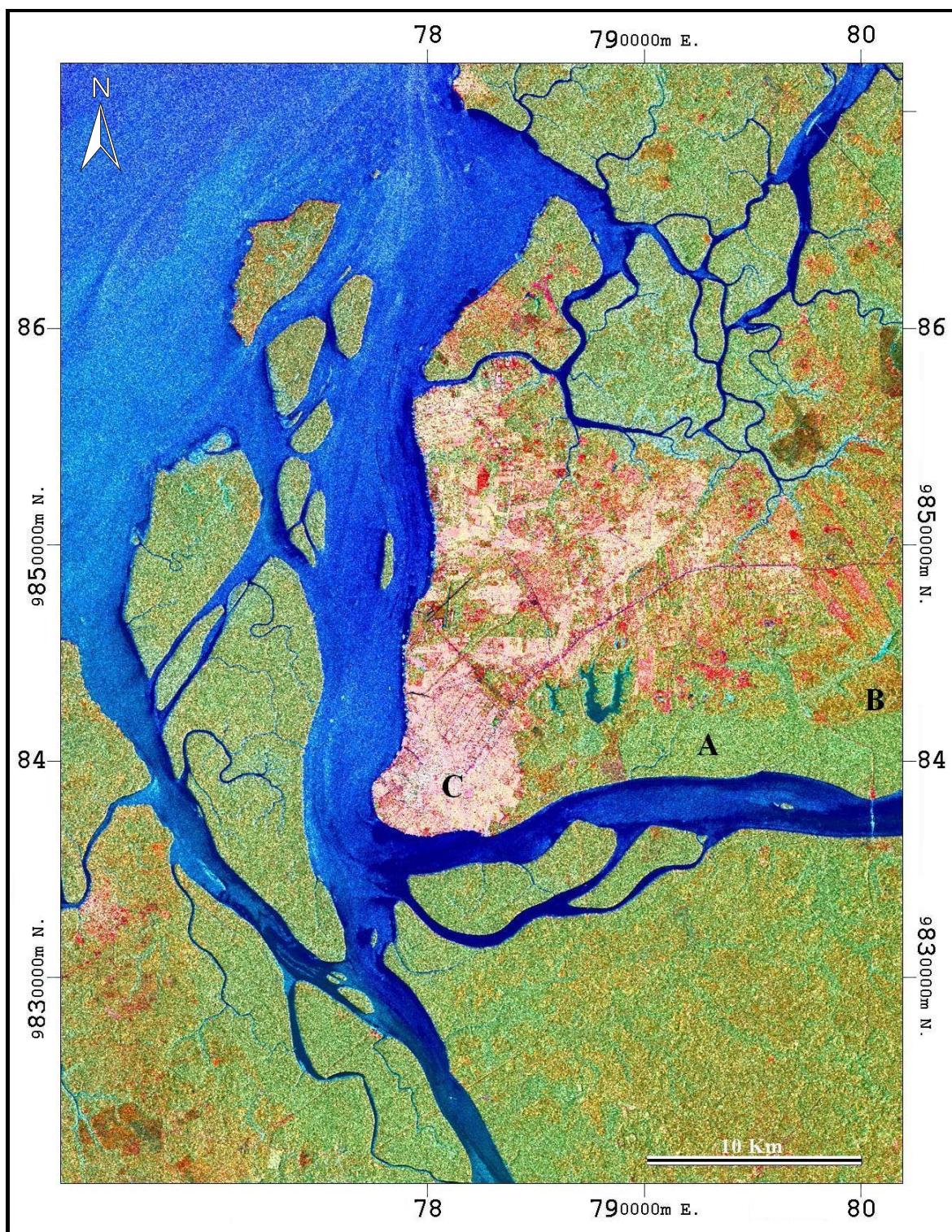
### 6.3.1 - Planalto Rebaixado da Amazônia (Região de Terra Firme)

No produto híbrido SPC-SAR a Região de Terra Firme aparece em coloração marrom esverdeada. A distinção entre esta unidade e a Região de Várzea é bem caracterizada na região de Belém e redondezas, onde há uma grande área de expansão urbana contrastante. Ao contrário, na parte sul do Rio Guamá, onde a vegetação característica de Terra Firme ainda se encontra em estado conservado, há confusão na definição da interface entre Várzea e Terra Firme. É de extrema importância considerar, nesse caso, que o componente cromático na imagem híbrida advém da relação geobotânica entre a Várzea e a Terra Firme, dado que não há solos expostos nessa região (**Figura 6.18**).

A imagem LANDSAT-7 ETM+ (5R7G3B, obtida pelo IOF, **Figura 6.2**) fornece excelente distinção entre as regiões de Terra Firme e Várzea, principalmente em função da banda 5, que permite observar diferenças do teor de umidade na vegetação e solos. Por outro lado, a banda 7 fornece excelente contraste entre as regiões urbanas e vegetadas.

As imagens RADARSAT-1 W1 não apresentaram bons resultados para a diferenciação e mapeamento das Regiões de Terra Firme, bem como para a delimitação da interface Terra Firme/várzea. Isso ocorre em função do mecanismo similar de retroespalhamento nessas duas áreas, a saber, espalhamento superficial e em menor quantidade volumétrico, que resulta em padrões homogêneos de textura e tons de cinza, como explicado na seção 6.2.2.

O Pediplano está amplamente distribuído por toda a região de interflúvio - Terra Firme, tendo sido desenvolvido durante o Neo-Pleistoceno (Pará, 1995). Este se encontra modelado em tabuleiros ocupados por cobertura detritica pleistocênica, com uma fácie essencialmente arenosa e outra areno-argilosa, de caráter aluvio-coluvial e em parte fluvial, esculpido em litologias do Grupo Barreiras (Rossetti *et al.*, 1989). Sobre ele desenvolve-se um latossolo amarelo, recoberto por Floresta Ombrófila Densa, capoeira, pastagens e agriculturas de subsistência. Assim, o limite desta unidade de paisagem se dá de forma brusca com a planície aluvial e as praias estuarinas, delineado por falésias ativas e inativas; pode também ocorrer de forma transicional, quando em contato com o relevo colinoso.



**Figura 6.18** Imagem integrada SPC-SAR (*Selective Principal Component - SAR*) da Região Metropolitana de Belém, mostrando as principais unidades de paisagem da área estudada: A) várzea do Rio Guamá; B) Terra Firme; C) áreas urbanas.

### 6.3.2 - Planície Amazônica

Constitui uma área plana e ramificada, que se estende ao longo dos canais fluviais principais, distributários e estuarinos. Apresenta as maiores áreas nas regiões de ilhas aluvionares, quando o rio vem a constituir uma série de cursos de água menores como “igarapés”, “furos” e “paranás”. A Planície Amazônica é formada por planícies aluviais, associadas aos domínios fluviais dos cursos dos rios, e por planícies estuarinas, desenvolvidas na foz dos rios, quando estes são fortemente influenciados pelas águas do mar.

#### 6.3.2.1 - Planície Aluvial

No produto integrado SPC-SAR, a Planície Aluvial aparece em coloração esverdeada. A distinção entre esta e a Região de Terra Firme é bem característica, na região de Belém e redondezas, onde há uma grande área de expansão urbana. Ao contrário, na parte sul do Rio Guamá, há grande confusão entre a interface Várzea e Terra Firme (**Figura 6.18**).

Esta unidade é caracterizada por seu posicionamento fisiográfico ao longo dos canais fluviais, constituindo áreas diariamente inundadas durante a elevação das marés, ação das chuvas ou por ambas (várzea baixa). Pode ainda ser inundada periodicamente, quando coincide o nível de maré alta e altos índices pluviométricos (várzea alta). Nota-se que, em função do grau de desenvolvimento da planície aluvionar, há o predomínio de uma ou de outra, sendo a várzea alta mais desenvolvida que a várzea baixa. O nível mais baixo ocorre, normalmente, um pouco mais afastado das margens dos cursos fluviais, de quem é separado pela várzea alta (diques marginais), formando uma rampa aluvial inclinada em direção à terra firme (Pará, 1995). Devido ao nível de investigação adotado, não foi possível individualizar a várzea alta e a várzea baixa na escala de mapeamento proposto.

Na área em estudo, esta unidade está amplamente distribuída, sendo representada principalmente pelas várzeas dos rios Moju, Acará e Guamá. As várzeas constituem terrenos baixos, com altitudes entre 0 e 5 metros, com até 4 km de largura, como no caso da várzea do rio Guamá. São constituídas por aluviões recentes formados por argila com ou sem matéria orgânica, silte, areia e cascalho, com desenvolvimento de gleissolos álicos, recobertos na maior parte por Floresta Ombrófila Aluvial. Esta cobertura florestal ombrófila densa pode ser representada por sub-formações com dossel uniforme, representadas por floresta de grande porte na várzea alta e

de médio porte na várzea baixa, enquanto sub-formações com dossel emergente ocorrem principalmente na várzea baixa (Pará, 1995).

#### 6.3.2.2 - Planície de maré

A distinção entre a Planície Estuarina e a Planície Fluvial não é possível de ser efetuada com base em dados de sensores remotos, uma vez que nas imagens RADARSAT-1 W1, os mecanismos semelhantes de retroespalhamento, característicos destes ambientes, dificultam grandemente sua diferenciação, considerando que o nível de interação energia-alvo se dá em relação à superfície do dossel. O mesmo ocorre com referência às imagens LANDSAT-7 ETM+, em função da resposta espectral similar, característica de condições ambientais semelhantes determinando, assim, relações geobotânicas também similares. Dessa forma, estas unidades de paisagem foram diferenciadas em função do seu posicionamento fisiográfico ao longo dos canais fluviais (Planície Fluvial) e canais estuarinos (Planície Estuarina), empregando para isso dados auxiliares e o conhecimento pretérito da área em estudo.

A Planície de Maré constitui áreas diariamente influenciadas tanto pela descarga fluvial, quanto pela ação das marés salinas que fluem estuário adentro, isto é, ocorrem em área de influência flúvio-marinha, com fluxo e refluxo das correntes de marés. A salinidade é o fator determinante no desenvolvimento de manguezais.

Esta planície constitui terrenos baixos (0 a 5 m de altitude), com largura não superior a 500 m, ocorrendo sempre associada à vegetação de várzea (mangues). Os depósitos da planície estuarina formam manguezais, que representam áreas de acumulação em planícies de maré, cujos sedimentos são constituídos por depósitos aluviais lamosos (argila e silte) ricos em matéria orgânica, com desenvolvimento de gleissolos álicos. Os depósitos encontram-se colonizados, principalmente por *Avicenia sp.* e *Ryzophora sp.* de grande porte (~ 20m de altura).

#### 6.3.2.3 - Praias Estuarinas

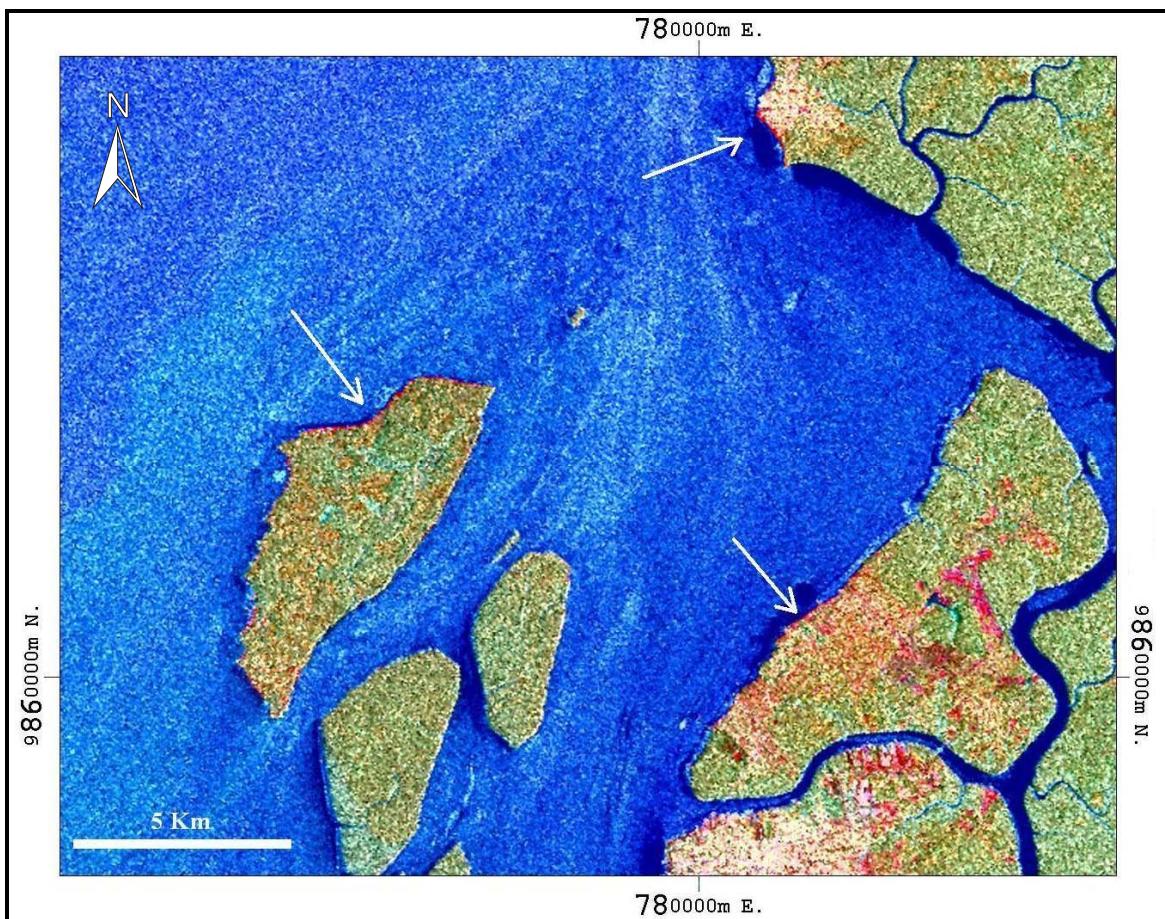
No produto híbrido SPC-SAR gerado, são claramente diferenciadas as praias estuarinas em tons de vermelho, mostrando um excelente exemplo do sinergismo obtido com a fusão das imagens RADARSAT-1 W1, onde as praias não aparecem claramente, com imagens LANDSAT-7 ETM+, onde as praias são bem diferenciadas. Assim, o produto SPC-SAR fornece uma imagem

com padrões bem distintivos de cor e textura, apresentando valor agregado para a máxima extração de informações (**Figura 6.19**).

Na combinação ETM+ 357 (IOF), é possível identificar as praias estuarinas, principalmente pela contribuição da banda 3, que apresenta bom contraste entre as praias, água e vegetação adjacente. Já para as imagens RADARSAT-1 W1, não foi possível distinguir as praias estuarinas, em função do baixo contraste.

Ao longo das margens dos canais flúvio-estuarinos, observam-se depósitos arenosos que, sob ação de ondas, vêm a formar praias estuarinas, muito bem conhecidas na região, como as praias das Ilhas de Outeiro, Cotijuba e Mosqueiro.

Estas praias possuem granulometria variando de areia média a grossa e composição quartzosa. Tais diferenças são reflexo de variações à exposição do vento, ondas e correntes de marés, assim como das características dos materiais erodidos das formações litorâneas, da topografia, da vegetação e das atividades humanas (El Robrini, 2001). São praias comumente curtas e estreitas, constituídas por sedimentos médios a grossos, com extensão variando de alguns metros a vários quilômetros, e são compostas pelos materiais das formações litorâneas erodidas formando, assim, as falésias. Em muitas praias da Ilha de Mosqueiro, afloram, durante a baixa mar, sedimentos do Grupo Barreiras, assim como sedimentos Pós-Barreiras.



**Figura 6.19** – Imagem integrada SAR/óptico, através da técnica SPC-SAR, mostrando uma notória distinção das praias estuarinas (seta branca).

#### 6.3.2.4 - Canais Fluviais e Estuarinos

Nas imagens RADARSAT-1 W1, o mecanismo de retroespalhamento atuante na Baía de Guajará proporciona baixo retorno do sinal em função da pequena rugosidade superficial da água, criando um mecanismo de espalhamento quasi-especular. A delimitação dos canais fluviais e estuarinos é feita em função dos diferentes mecanismos de retroespalhamento atuantes na água e na terra. De maneira geral, a imagem LANDSAT-7 ETM+ apresenta excelente contraste entre a interface água/terra, especialmente para as bandas do infravermelho próximo e médio.

A leste da ilha do Marajó, o rio Pará é definido como um canal flúvio-estuarino, conhecido como braço direito do rio Amazonas (Pinheiro, 1987). Seu principal afluente à direita é o rio Tocantins, seguido dos rios Acará e Guamá, além dos rios Arari e Camará, que constituem os afluentes da margem esquerda. A partir da confluência dos rios Acará e Guamá, se apresenta a

Baía de Guajará, que se prolonga até as imediações da Ilha do Mosqueiro, onde interage com a baía de Marajó.

A calha fluvial do rio Guamá apresenta pouco mais de 1900 m de largura e profundidades variando de 1 m na margem direita a 17 m na margem esquerda, onde se localiza o canal do mesmo. Pode-se detectar, a partir de um perfil de fundo, o suave mergulho da margem esquerda para a direita, sendo possível observar ainda bancos arenosos alongados paralelamente à direção do canal, onde devem ocorrer as maiores velocidades de corrente. Pode-se afirmar também que a margem direita se apresenta fortemente inclinada, indicativa de atividade erosiva intensa (Pinheiro, 1987).

### **6.3.3 - Sistemas Antropogênicos (Áreas Construídas)**

Os sistemas antropogênicos constituem uma unidade de paisagem cuja evolução está intimamente associada à ocupação humana, que ao longo do tempo tem alterado as características naturais do relevo. Em um trabalho realizado pela JICA (*Japan International Cooperation Agency*), foi adotada a terminologia Sistemas Antropogênicos, caracterizando as seguintes feições: zonas urbanas consolidadas representadas por sítios urbanos propriamente ditos; zonas urbanas em formação ou de expansão urbana, caracterizada por padrões de ocupação expansivos, em geral na periferia dos núcleos urbanos; áreas especiais, ligadas a propriedades públicas ou privadas de grandes dimensões, reservadas com finalidades estabelecidas e dificilmente modificadas em curto prazo (Pará, 1995).

Neste trabalho, trataremos as áreas urbanas como uma única unidade, assim como os ambientes alterados pela ação do homem, como os mananciais de captação de águas do Utinga, que vêm a constituir lagos artificiais (Lagos Água Preta e Bolonha).

#### **6.3.3.1 - Áreas Urbanas**

Nas imagens RADARSAT-1 W1 os altos valores de níveis de cinza nas áreas urbanas e a textura fortemente rugosa dizem respeito a um complexo mecanismo de reflexão atuante, onde o efeito de *double bounce*, também chamado de reflexão de canto, causa um alto valor de retorno do pulso de microondas, com consequente alto brilho.

Para o produto híbrido SPC-SAR gerado, as informações texturais das imagens RADARSAT-1 W1 são agregadas às informações cromáticas relacionadas com as imagens

LANDSAT- 7 ETM+, mostrando uma excelente distinção entre as áreas urbanas e de expansão adjacentes, fornecendo uma imagem com padrões bem distintos de cor e textura (**Figura 6.20**).

Esta unidade abrange a Região Metropolitana de Belém, onde a ocupação humana substituiu o quadro natural por edificações e arruamentos. Assim, as áreas urbanas tiveram como eixo de desenvolvimento inicial as áreas de interflúvio, no caso de Belém, o interflúvio Guamá-Guajará, eixo este que apresenta condições ideais para o crescimento de um sítio urbano.

Ademais, um grave problema na Região Metropolitana de Belém é a ocupação desenfreada das áreas de baixadas (planícies de inundação dos rios) pela população de baixa renda, um problema ambiental decorrente do processo de expansão sócio-econômica nessa região. Assim, essa parte da população vem sendo empurrada para áreas inadequadas a esta forma de uso, como as planícies estuarina e fluvial.

#### 6.3.3.2 - Lagos Artificiais

Nas imagens RADARSAT-1 W1, tal como acontece com os canais fluviais e estuarinos, os lagos artificiais (Água Preta e Bolonha) são muito bem discriminados em função do mecanismo de espalhamento espelcular neles atuante, em contraste com os mecanismos de espalhamentos das áreas adjacentes, principalmente superficial e volumétrico. Tal diferença também ocorre nas imagens LANDSAT-7 ETM+ e no produto SPC-SAR.

Essas feições são representadas pelos lagos Bolonha e Água Preta, utilizados na captação de água para o abastecimento da Cidade de Belém e adjacências, constituindo a cabeceira de cursos fluviais represados por barragens (**Figura 6.20**).



**Figura 6.20** - Área Construída da Região Metropolitana de Belém, mostrando os lagos artificiais Água Preta (lago maior) e Bolonha. (produto híbrido SAR/óptico).

#### 6.4-MAPEAMENTO DOS AMBIENTES FLÚVIO-ESTUARINOS DA BAÍA DE GUAJARÁ

As técnicas de classificação automática (supervisionada e não-supervisionada), utilizadas nesta Dissertação para as imagens LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7) e no produto gerado pela fusão SPC-SAR, foram avaliadas quanto à sua exatidão segundo o índice *Kappa* (**Tabela 6.12**).

<i>Classificação</i>	<i>Índice Kappa</i>	<i>Desempenho da classificação</i>
LANDSAT-7 (Isoseg)	0,816	Excelente
Produto SPC-SAR (K-média)	0,602	Muito Bom
LANDSAT-7 (MAXVER)	0,774	Muito Bom
Produto SPC-SAR (MAXVER)	0,729	Muito Bom
LANDSAT-7 (MAXVER) *	0,960	Excelente
Produto SPC-SAR (MAXVER) *	0,953	Excelente

**Tabela 6.12** – Resultado do teste *Kappa* para a classificação automática das imagens LANDSAT-7 ETM+ e do produto híbrido SPC-SAR. (\*) análise estatística gerada para as áreas de treinamento.

A avaliação dos erros de classificação baseada somente na análise estatística das áreas de treinamento apresentou altos valores de exatidão do mapeamento (0,960 para o LANDSAT-7 ETM+ usando MAXVER), se comparada com aquela realizada pela distribuição estocástica de pixels de referência na área em estudo (0,774 para o LANDSAT-7 ETM+ usando MAXVER). Tal efeito ocorre porque a distribuição daqueles pixels é orientada pelo conhecimento prévio do analista (verdade terrestre) e concentrada somente na região das áreas de treinamento (Jensen, 1996). Dessa forma, o método de amostragem aleatória é o mais apropriado para avaliar a acurácia dos mapeamentos gerados, pois representa globalmente as unidades de paisagem presentes na área.

A análise estatística através dos cálculos da matriz de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral aponta bons desempenhos para as técnicas de classificação utilizadas, permitindo medir a boa acurácia dos mapeamentos automáticos realizados, corroborando também a rapidez e confiabilidade desses procedimentos. O mapeamento das unidades de paisagem na área, que é a base para a confecção de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo (ISA) pode, portanto, ser efetuado em um pequeno intervalo de tempo, dada a automação eficaz dos procedimentos.

As matrizes de confusão, estatística *Kappa* e índice de exatidão geral referentes às classificações automáticas utilizadas neste trabalho são mostradas nas **Tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16**. A matriz de confusão é usada para avaliar o resultado da classificação, mostrando quantitativamente os pixels classificados de forma correta, a partir da comparação da verdade terrestre (dados de referência) com a classificação produzida.

<i>Dado de Referência</i>						
<b>Classificado</b>	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	$\sum$ linha	<b>Comissão(%)</b>
Várzea	36	4	2	0	42	14.3
Terra Firme	4	16	3	0	23	30.0
Área Urbana	0	0	9	0	9	0
Água	0	0	0	26	26	0
$\sum$ Coluna	40	20	14	26	100	
<i>Omissão(%)</i>	10.0	20.0	35.7	0		

*Índice Kappa = 0.816**Exatidão geral = 87/100 = 87%*

**Tabela 6.13** - Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (Isoseg) da imagem LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7), destacando as amostras que foram classificadas corretamente (**diagonal principal em vermelho**).

<i>Dado de Referência</i>						
<b>Classificado</b>	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	$\sum$ Linha	<b>Comissão</b>
Várzea	30	7	4	0	41	26.8
Terra Firme	8	13	7	0	28	53.6
Área Urbana	1	0	3	0	4	25.0
Água	1	0	0	26	27	3.7
$\sum$ Coluna	40	20	14	26	100	
<i>Omissão</i>	25.0	35.0	78.6	0		

*Índice Kappa = 0.602**Exatidão geral = 72/100 = 72%*

**Tabela 6.14** - Matriz de confusão gerada para a classificação não supervisionada (K-média) do produto híbrido gerado SAR/óptico (RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+).

<i>Dado de Referência</i>						
<b>Classificado</b>	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	$\sum$ Linha	<b>Comissão</b>
Várzea	36	6	1	0	43	16.3
Terra Firme	3	14	3	0	20	30.0
Área Urbana	1	0	10	2	13	23.0
Água	0	0	0	24	24	0
$\sum$ Coluna	40	20	14	26	100	
<i>Omissão</i>	10.0	30.0	28.6	7.7		

*Índice Kappa = 0.774**Exatidão geral = 84/100 = 84%*

**Tabela 6.15** - Matriz de confusão gerada para a classificação supervisionada (MAXVER) da imagem LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7).

<i>Dado de Referência</i>						
<b>Classificado</b>	Várzea	Terra Firme	Área Urbana	Água	$\sum$ Linha	<b>Comissão</b>
Várzea	35	6	3	0	44	20.4
Terra Firme	4	12	3	0	19	36.8
Área Urbana	0	2	8	0	10	20.0
Água	1	0	0	26	26	0
$\sum$ Coluna	40	20	14	26	100	
<i>Omissão</i>	12.5	40.0	42.8	0		

*Índice Kappa = 0.729**Exatidão geral = 81/100 = 81%*

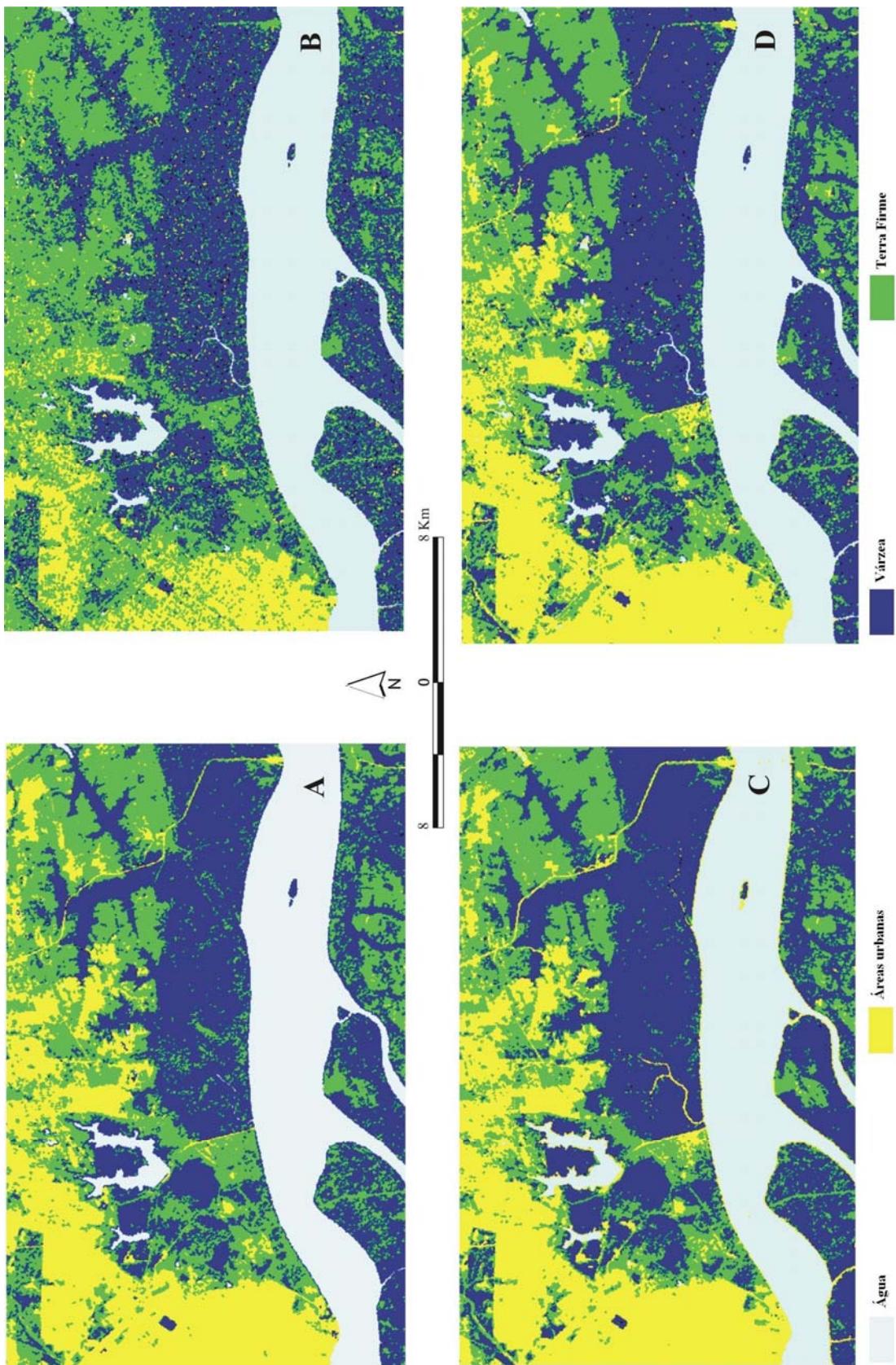
**Tabela 6.16** - Matriz de confusão gerada para a classificação supervisionada (MAXVER) do produto híbrido gerado SAR/óptico (RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+).

Para a matriz de confusão da **Tabela 6.13**, os componentes da diagonal principal representam os pixels que foram classificados de forma correta (em vermelho). Por exemplo, para a classe várzea no mapa temático classificado, foram corretamente classificados 36 pixels; no entanto, 4 pixels classificados como várzea, quando observados os dados de referência, pertencem à classe terra firme e dois pixels classificados como várzea, pertencem à classe áreas urbanas. Portanto, dos 42 pixels da classe várzea, 36 pixels (85 %) foram bem classificados, enquanto que 6 pixels foram mal classificados (14 %). Este erro de classificação é chamado de erro de inclusão ou comissão, dado que se incluem pixels em uma classe quando na realidade pertencem a outra classe.

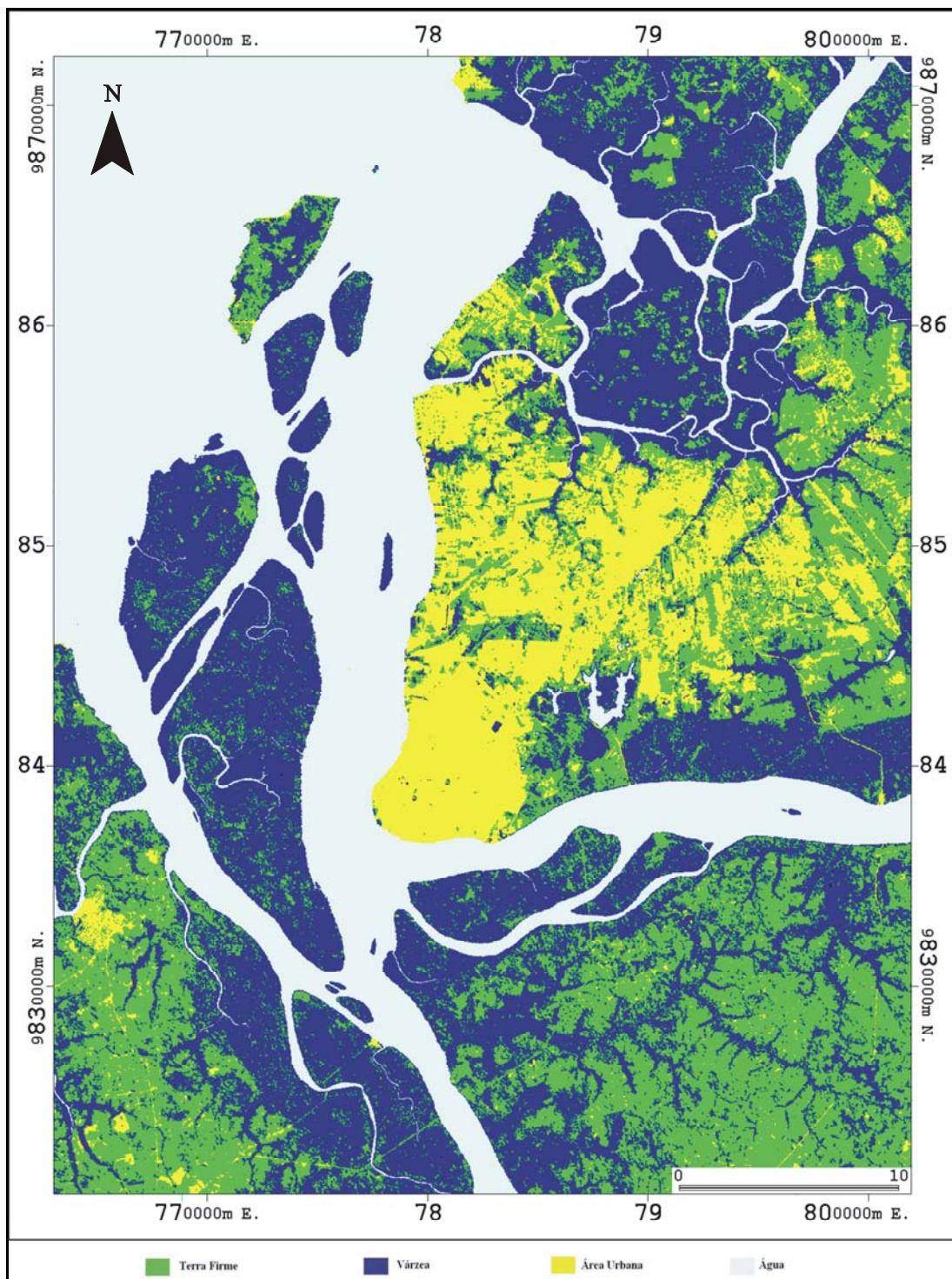
Dentre os 14 pixels da classe área urbana, 9 foram classificados corretamente (64 %), 2 foram classificados como várzea (14%) e 3 foram classificados como terra firme (21 %). Esse erro de classificação é chamado de erro de omissão, pois pixels pertencentes à classe área urbana foram atribuídos a outras classes (**Tabela 6.13**).

Considerações similares podem ser traçadas para as outras matrizes de confusão abaixo, referentes aos outros mapas classificados (**Tabelas 6.14, 6.15 e 6.16**).

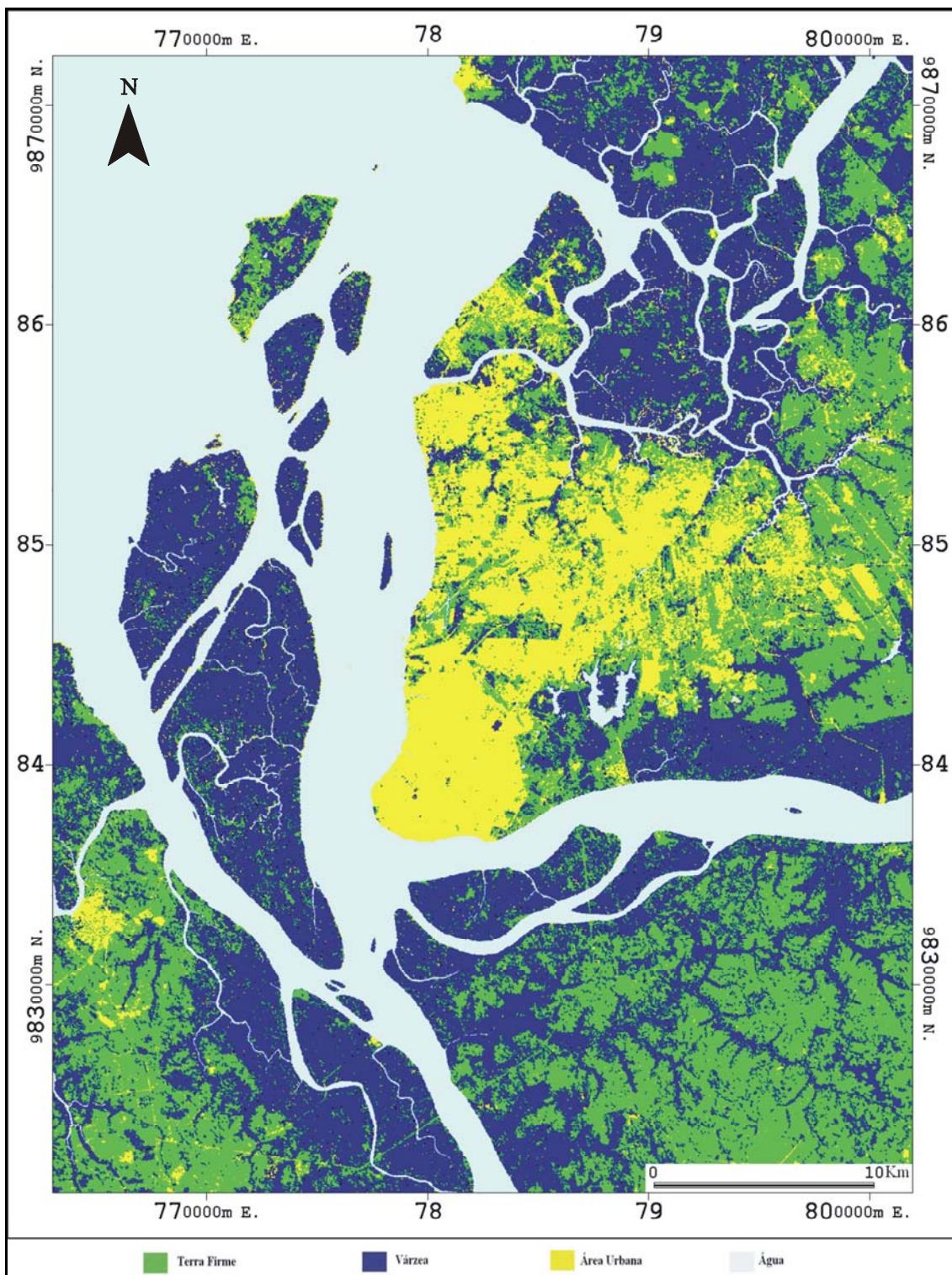
Portanto, as técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada usadas, tanto para a imagem LANDSAT-7 ETM+ como para o produto híbrido gerado (SAR/ótico), são de grande valia, considerando a acurácia e rapidez do mapeamento das unidades de paisagem (**Figura 6.21**). Dessa forma, o mapa de unidades de paisagem classificados automaticamente, que apresentou o melhor índice *Kappa* geral (**Figura 6.22**), e o melhor índice *Kappa* para o produto integrado (**Figura 6.23**), podem ser comparados com o mapa de unidades de paisagem interpretado visualmente por Gonçalves (2003), na **Figura 6.17**.



**Figura 6.21 – Técnicas de classificação automática usadas: A) ISOSEG nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 do LANDSAT-7 ETM+; B) k-Médias na imagem SPC- SAR; C) MAXVER nas bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7 do LANDSAT-7 ETM+; D ) MAXVER na imagem SPC-SAR.**



**Figura 6.22** – Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática não-supervisionada, que obteve o melhor índice *Kappa*, usando o algoritmo de classificação Isoseg (ISODATA), a partir das imagens LANDSAT-7 ETM+ (bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7).



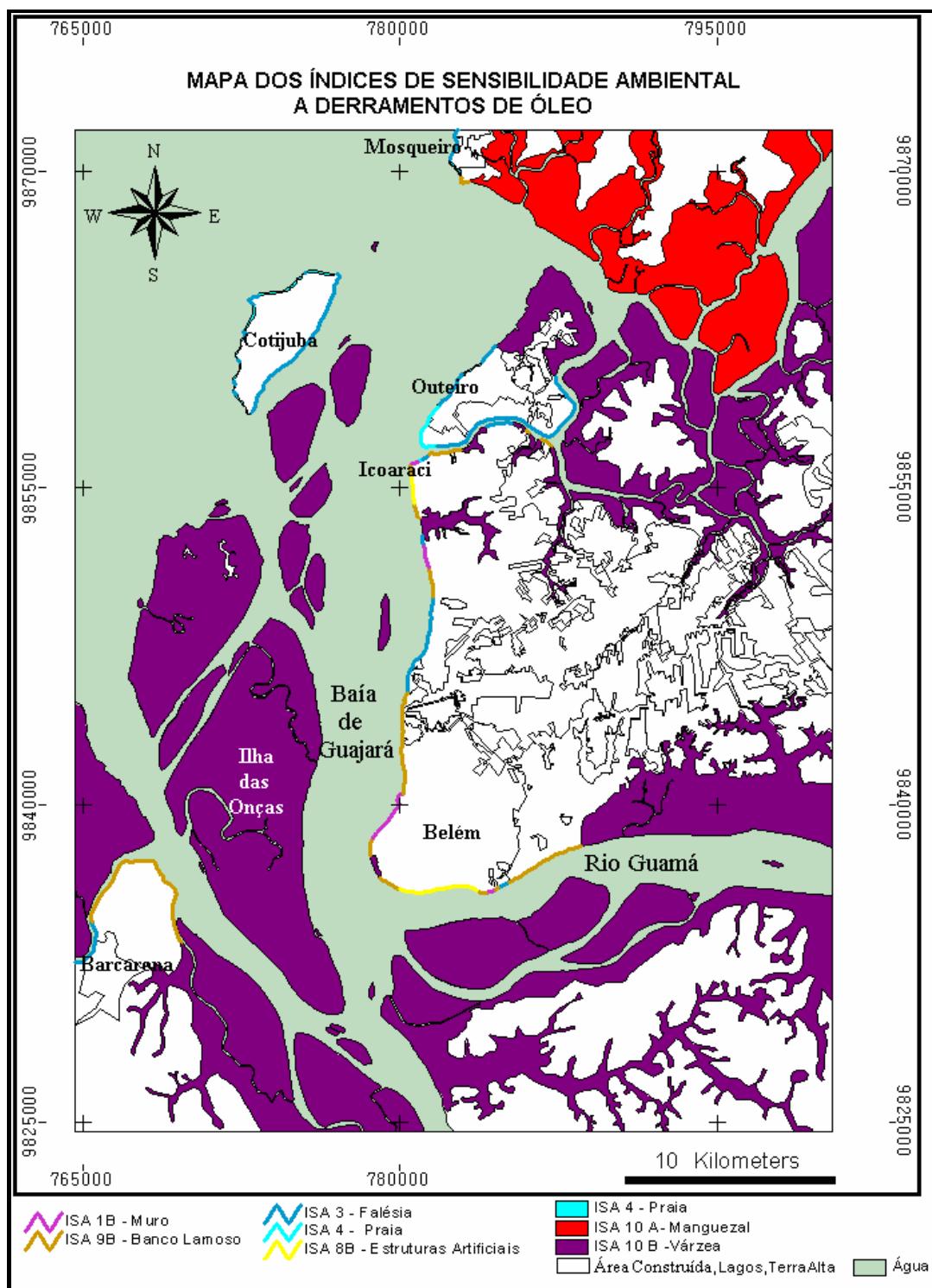
**Figura 6.23** - Mapa de Unidades de Paisagem gerado pela classificação automática supervisionada, que obteve o melhor índice *Kappa* entre as imagens integradas (Imagem SPC-SAR), utilizando o algoritmo de classificação MAXVER.

Os resultados acima apresentados mostram que a rotina de classificação automática realizada nesta Dissertação é importante, uma vez que permite a geração de mapas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo em um pequeno intervalo de tempo, podendo servir como um mapa preliminar em situações emergenciais, quando não houver outros disponíveis, reduzindo custos e o tempo de elaboração. Isso é importante na região amazônica, onde praticamente inexistem bases planimétricas em escala adequada havendo, assim, necessidade de técnicas que possibilitem a geração de mapas preliminares com acurácia e rapidez.

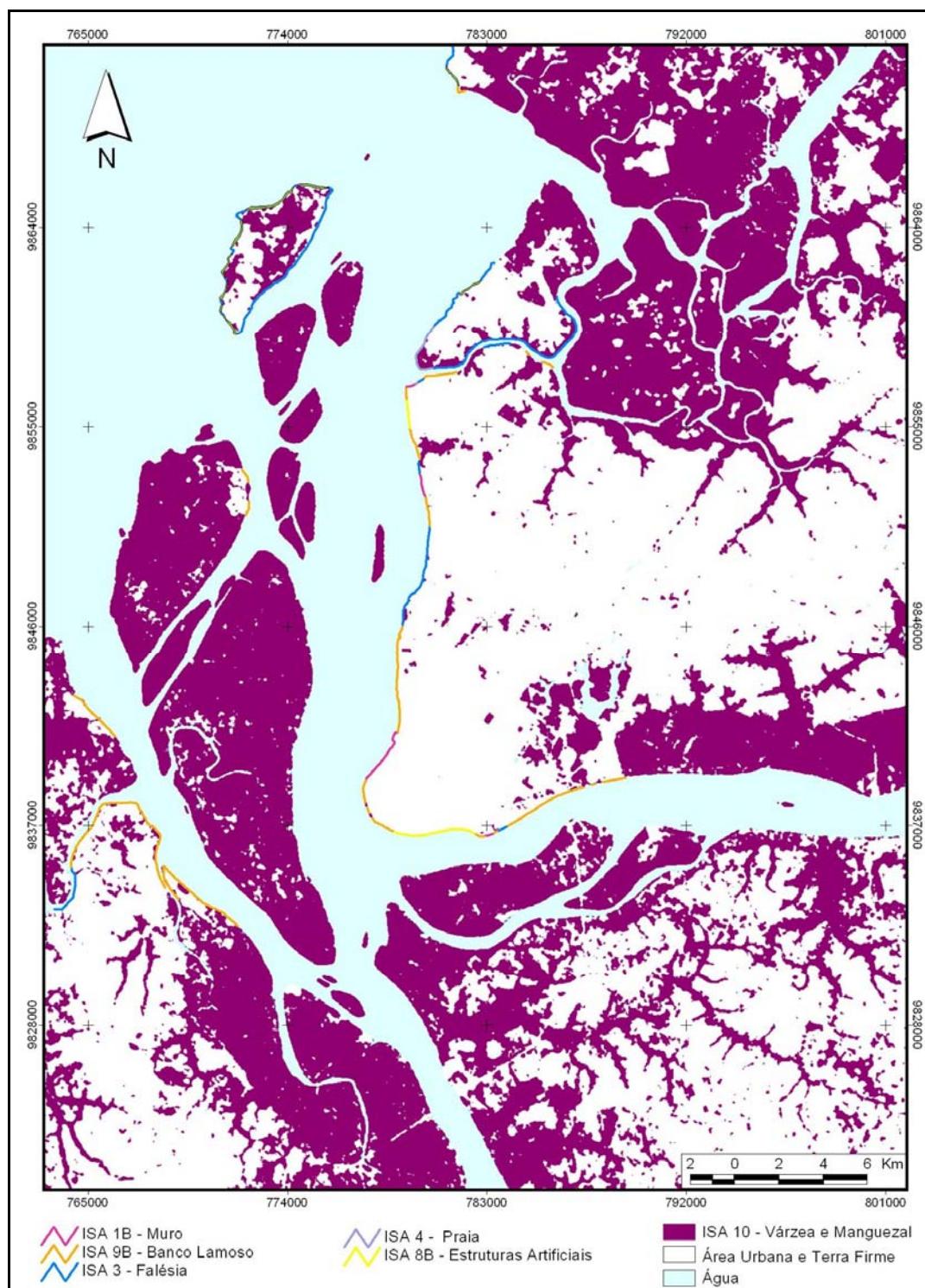
## 6.5 - GERAÇÃO DAS CARTAS DE ISA A DERRAMAMENTOS DE ÓLEO

A partir da interpretação dos produtos gerados pelo processamento digital de imagens, em conjunto com informações de campo, foram identificados sete índices de sensibilidade ambiental (ISA) a derramamentos de óleo na área estudada. Desta forma, os ISA foram analisados para a região a partir do método proposto pela NOAA (2002) e Petrobras (2002). Para tanto, verificou-se a necessidade de adaptação desses métodos para região costeira amazônica, considerando que os ambientes e feições da área possuem especificidades e peculiaridades inerentes aos complexos ecossistemas costeiros tropicais amazônicos não discutidos pela NOAA. Dessa forma, foi adotada nesta Dissertação a proposta de Souza Filho *et al.* (2004).

Assim, os ambientes foram ordenados de acordo com sua sensibilidade a derramamentos de óleo, em: i) Muro de arrimo - ISA 1B; ii) Falésia - ISA 3; iii) Praia - ISA 4; iv) Estruturas Artificiais - ISA 8B; v) Banco Lamoso Vegetado - ISA 9B; vi) Manguezal - ISA 10A; vii) Várzea - ISA 10B. Na **Tabela 6.17**, é possível observar a descrição resumida de cada ambiente com seus respectivos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. A **Figura 6.24** ilustra os diferentes índices de sensibilidade ambiental cartografados a partir da análise do mapa de unidades de paisagem (**Figura 6.17**), confeccionado a partir de uma imagem híbrida LANDSAT-7 ETM+ (pan/multi). A **Figura 6.25** mostra o mapa de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo elaborado a partir do mapa de unidades de paisagem (**Figura 6.23**) gerado pela classificação automática supervisão nada da imagem híbrida SPC-SAR.



**Figura 6.24** - Mapa de Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de óleo, para Baía de Guajará, fotointerpretado a partir de uma imagem híbrida LANDSAT-7 ETM+ (bandas multiespectrais e pancromática).



**Figura 6.25** - Mapa de Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de óleo, para Baía de Guajará, elaborado a partir de uma classificação supervisionada (MAXVER) da imagem SPC-SAR.

<i>Índices</i>	<i>Classificação para o Estuário Guajarino</i>
<b>1B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muro de Arrimo (paredões artificiais).</li> <li>▪ Paredão impermeável, estrutura artificial lisa exposta com declividade alta a média.</li> <li>▪ São constituídos por metal, concreto e madeira.</li> </ul>
<b>3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Formam escarpas e falésias íngremes expostas (Grupo Barreiras).</li> <li>▪ Substratos semipermeáveis com pequena penetração do óleo.</li> <li>▪ Reflexão média das ondas e marés, com sedimentos sujeitos a remobilização freqüente por ação das ondas e marés.</li> </ul>
<b>4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Praias de areia média a grossa, abrigada.</li> <li>▪ Substratos com baixa declividade e moderadamente permeáveis.</li> <li>▪ Região de uso recreacional.</li> </ul>
<b>8B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estruturas Artificiais, que incluem, píeres e docas construídas com materiais impermeáveis como concreto e madeira. Localizam-se em áreas densamente povoadas.</li> <li>▪ Enrocamentos e outras estruturas artificiais não lisas abrigadas.</li> </ul>
<b>9B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Banco lamoso Vegetado.</li> <li>▪ Barras de rio vegetadas.</li> <li>▪ Possui substrato sub-horizontal lamoso (declividade menor que 3 graus).</li> </ul>
<b>10A</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Manguezal (mangues frontais e mangues de estuários)</li> <li>▪ Zona salobra ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio (mangue).</li> <li>▪ Formado em planícies de maré</li> <li>▪ Região com grande diversidade biológica.</li> </ul>
<b>10B</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Região de Várzea</li> <li>▪ Terraços alagadiços formados nas margens dos rios.</li> <li>▪ Formado em planícies aluviais ou estuarinas.</li> </ul>

**Tabela 6.17** – Classificação da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo para dos ambientes mapeados na área em estudo. Souza Filho *et al.* (2004) .

### 6.5.1 - Estrutura Artificial, Muro de Arrimo - Índice 1B ( ISA 1B )

#### DESCRIÇÃO:

- ✓ Paredão impermeável, estrutura artificial lisa exposta, de declividade alta a média (**Figura 6.26**).
- ✓ São constituídas por metal, concreto e madeira.
- ✓ Servem para proteger áreas residenciais de lazer e industriais da ação de ondas e marés. Assim, estão expostas freqüentemente a ondas de até um metro de altura e/ou a fortes correntes de maré, possuindo uma tendência refletiva.

#### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ Não há penetração de óleo; com baixo tempo de permanência do óleo.

#### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ A remoção tende a ocorrer rapidamente de modo natural.



**Figura 6.26** - Estrutura Artificial, Muro de Arrimo da Companhia Docas do Pará - Índice 1B ( ISA 1B ).

### 6.5.2 - Escarpas e Falésias, Esculpidas nos Sedimentos do Grupo Barreiras - Índice 3 ( ISA 3 )

#### DESCRICAÇÃO:

- ✓ Substratos semipermeáveis com pequena penetração de petróleo.
- ✓ Formam escarpas ao longo dos cursos fluviais e falésias ao longo das praias estuarinas a partir da ação das ondas (Grupo Barreiras), **Figura 6.27**.
- ✓ Reflexão média das ondas e marés, com sedimentos bem selecionados e geralmente compactos, sujeitos a remobilização freqüente por ação das ondas e marés.
- ✓ No caso de escarpas íngremes expostas do Grupo Barreiras, a ação das correntes de maré e ondas, durante os períodos de maré alta, atingem a base da falésia, erodindo sua porção inferior, enquanto as porções superiores são desgastadas pela água da chuva e outras descargas que se infiltram no terreno. Como resultado desta ação conjugada, a escarpa é erodida e recua.



**Figura 6.27** – Falésia ao longo das praias estuarinas, Ilha de Cotijuba, formada a partir da ação das ondas, esculpida no pediplano neo-pleistocênico, sustentado por depósitos do Grupo Barreiras, marcando um contato brusco entre o pediplano e a planície aluvial.

#### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ Penetração do óleo geralmente menor que 10 cm; mínima possibilidade de soterramento do óleo devido à lenta mobilidade da massa sedimentar. Tal possibilidade existe, porém, em praias expostas, após a fase erosiva das tempestades.

#### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ Geralmente a limpeza é necessária, sendo comumente possível o tráfego de veículos, respeitando o ciclo de marés e as eventuais restrições ambientais locais. No caso dos sedimentos Grupo Barreiras, o óleo pode entranhar no material desmoronado, acumulado na base da escarpa, tornando a limpeza necessária na faixa da preamar.

### 6.5.3 - Praia de Areia Média a Grossa - Índice 4 (ISA 4)

#### DESCRIÇÃO:

- ✓ Substratos de média permeabilidade e moderada penetração e potencial soterramento de petróleo.
- ✓ Praia de areia média a grossa, abrigada (**Figuras 6.28 e 6.29**).
- ✓ Declividade da face praial entre 3 e 10 graus e substratos moderadamente permeáveis, com mobilidade sedimentar relativamente elevada, podendo haver soterramento parcial do óleo.
- ✓ Região de uso recreacional (atividades socioeconômicas), que incluem áreas de praias e de pesca. Estas atividades que caracterizam os usos dos recursos costeiros e marinhos são freqüentemente sensíveis aos impactos por derramamentos de óleo.

#### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ Penetração do óleo até cerca de 25 cm de profundidade, com mobilidade do sedimento e tendência ao soterramento.
- ✓ Possibilidade de ocorrência de seqüência de estratos com e sem contaminação, exigindo o manuseio de grande volume de sedimentos; os impactos sobre as comunidades bióticas intermarés podem ser severos.

#### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ A limpeza difícil é agravada pela tendência do equipamento misturar ainda mais o óleo com o sedimento. O tráfego de veículos pode não ser possível. Pode ainda haver a transposição da praia por ondas em situações de maré de sizígia, com potencial contaminação da retaguarda do cordão litorâneo.



**Figura 6.28** - Praias Estuarinas na Ilha de Cotijuba, de areia média a grossa.



**Figura 6.29** - Praias Estuarinas na Ilha de Mosqueiro, com alto uso recreacional.

#### **6.5.4 - Estruturas Artificiais Abrigadas - Índice 8B (ISA 8B)**

##### **DESCRIÇÃO:**

- ✓ Substratos impermeáveis a moderadamente permeáveis, abrigados ( **Figura 6.30**).
- ✓ Estas estruturas incluem píeres, docas, construídos com materiais impermeáveis como concreto e madeira. Localizam-se em áreas densamente povoadas.
- ✓ Enrocamentos e outras estruturas artificiais não lisas abrigadas.
- ✓ Sujeitas à ação das ondas e marés de sizígia, as estruturas artificiais variam de vertical lisa a encosta rugosa com vários graus de permeabilidade, com declividade geralmente íngreme (maior que 15 graus), usualmente com densa cobertura de algas, gramíneas e outros organismos.

##### **COMPORTAMENTO DO ÓLEO:**

- ✓ O óleo tende a recobrir a superfície afetada, persistindo por longo tempo em caso de derramamento durante condições de maré de sizígia equinocial, devido à inexistência de hidrodinamismo capaz de efetuar sua remoção. O mapeamento deve distinguir entre substratos lisos impermeáveis ao óleo e substratos recobertos por blocos, irregularidades. O impacto na biota pode ser alto devido à exposição tóxica (óleos leves ou frações dispersas) ou asfixia (óleos pesados).

##### **AÇÕES DE RESPOSTA:**

- ✓ Limpeza freqüentemente necessária, tanto por razões estéticas, quanto pela baixa remoção natural.



**Figura 6.30** - Estruturas Artificiais Abrigadas, formada por píeres e docas construídos com madeira e metal.

#### 6.5.5 - Banco Lamoso Vegetado - Índice 9B (ISA 9B)

##### DESCRIÇÃO:

- ✓ Substratos semipermeáveis, planos e abrigados (**Figura 6.31**).
- ✓ Terraço de baixa-mar lamoso abrigado.
- ✓ Deltas e barras de rio vegetados.
- ✓ Abrigado da ação das ondas e marés, possui substrato sub-horizontal lamoso (declividade menor que 3 graus), com sedimentos saturados em água e com baixa permeabilidade, a não ser pela presença de orifícios feitos por animais; largura variando de poucos metros a extensões da ordem de quilômetros. Sedimentos moles de baixíssima trafegabilidade.

##### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ A penetração de óleo é limitada pelos sedimentos saturados em água; o óleo é geralmente transportado até a linha de maré alta, podendo ocorrer penetração junto à linha de preamar. O impacto na biota pode ser alto devido à exposição tóxica (óleos leves ou frações dispersas) ou asfixia (óleos pesados).

### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ A remoção natural ocorre de forma extremamente lenta; o substrato mole e a dificuldade de acesso tornam a limpeza quase impossível. Assim, qualquer esforço nesse sentido tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas. No caso da existência de grande quantidade de recursos biológicos, a limpeza é impraticável, pois ações de resposta podem agravar o dano.



**Figura 6.31** - Banco Lamoso Vegetado - Índice 9B (ISA 9B), mostrando substrato mole que dificulta o acesso, tornando a limpeza extremamente difícil.

### 6.5.6 - Manguezal - Índice 10 A (ISA 10A)

#### DESCRIÇÃO:

- ✓ Zona salobra ou de água salgada, com vegetação adaptada ao meio, mangue (**Figuras 6.32 e 6.33**).
- ✓ Sedimentos lamosos formando solos com muita matéria orgânica.
- ✓ Manguezais frontais e manguezais de estuários.
- ✓ Região com grande importância ecológica; os recursos biológicos incluem plantas e animais sensíveis ao óleo.

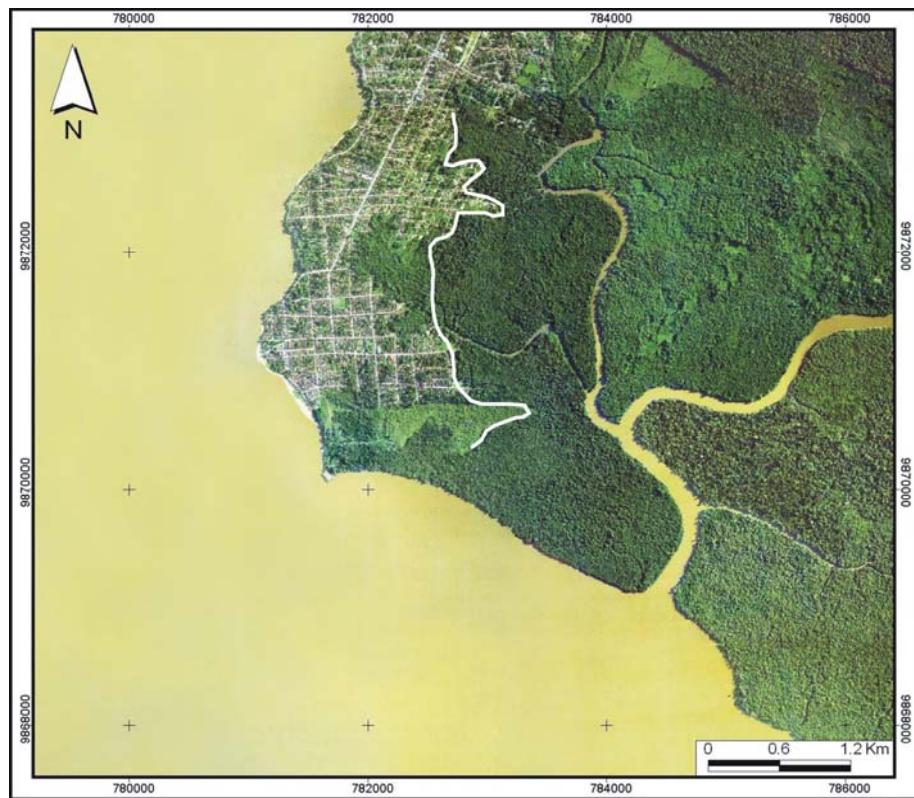
- ✓ Formado em planícies de maré, que é uma região com baixa declividade, estando sujeito a níveis de energia mais baixos (tempo de permanência do óleo mais prolongado e menor ação de limpeza natural). Possui superfície de intermarés, que permite o estabelecimento de comunidades biológicas como, por exemplo, leitos de mexilhões, caranguejos e comunidades de plantas.

#### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ Sedimentos lamosos com baixa permeabilidade e saturados em água; consequentemente, a penetração do óleo é muito limitada. Contudo, como este substrato é habitado por vários organismos, há escavações por bioturbação, e as tocas podem proporcionar a penetração do óleo.
- ✓ Constituem um dos habitats mais sensíveis, devido à elevada riqueza e valor biológico, e funcionam como verdadeiras armadilhas de retenção de óleo.

#### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ Em substratos lamosos, o uso de equipamentos de limpeza ou proteção não é, em geral, possível, devido à sua baixa consistência. Em substratos vegetados, tal como os manguezais, os equipamentos de limpeza não devem ser utilizados. Nesses ambientes, admite-se apenas limpeza manual.
- ✓ O substrato mole e a dificuldade de acesso tornam a limpeza impraticável; o esforço nesse sentido tende a introduzir o óleo nas camadas mais profundas, agravando o dano.



**Figura 6.32** - Manguezal, Índice 10 A, mostrando o contato entre a região de manguezal e a Terra Firme (ortofoto, CODEM).



**Figura 6.33** - Manguezal, Índice 10 A, mostrando típica vegetação de mangue.

### 6.5.7 - Várzea - Índice 10 B (ISA 10B)

#### DESCRIÇÃO:

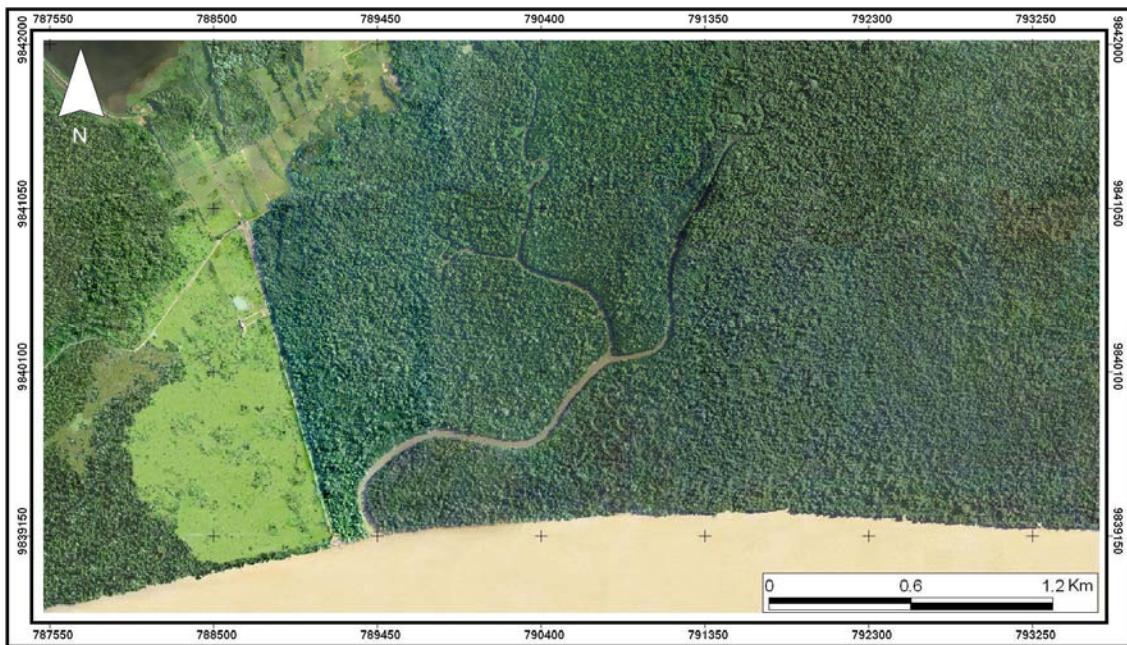
- ✓ Terraços alagadiços formados a partir das margens dos rios (**Figura 6.34 e 6.35**).
- ✓ Formado em planícies aluviais ou estuarina, numa região com baixa declividade (menor que 3 graus), estando sujeitos a baixos níveis de energia (maior tempo de permanência do óleo e menor ação de limpeza natural). Possui ampla superfície de inundação, que permite o estabelecimento de rica comunidade biológica.
- ✓ Substrato plano, arenoso a lamoso, com sedimentos saturados em água e baixa permeabilidade sendo, assim, de baixa trafegabilidade.

#### COMPORTAMENTO DO ÓLEO:

- ✓ A penetração é limitada, com possibilidade de cobertura direta da vegetação pelo óleo na zona intermarés. A cobertura direta com óleos viscosos pode sufocar os sistemas de raízes; o impacto na biota pode ser alto devido à exposição tóxica ou asfixia.

#### AÇÕES DE RESPOSTA:

- ✓ A remoção natural ocorre de forma extremamente lenta, devido aos baixos níveis de energia.
- ✓ As dificuldades de acesso devido à grande densidade e diversidade de vegetação, tornam a limpeza mecanizada muito difícil. Assim, de maneira geral, não é possível a utilização de equipamentos de limpeza, admitindo-se apenas limpeza manual.



**Figura 6.34** - Imagem de alta resolução (ortofoto CODEM, 1998), mostrando a várzea baixa que comumente ocorre ao longo dos canais fluviais. Rio Guamá.



**Figura 6.35** – Várzea, Índice 10 B, apresentando ampla superfície de inundação com rica comunidade biológica associada.

## **CAPÍTULO 7**

### **7- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

#### **7.1- CONCLUSÕES**

O monitoramento ambiental em áreas onde há exploração, produção e transporte de petróleo e derivados é imprescindível para a conservação ambiental. Além disso, a elaboração de mapas de índices de sensibilidade ambiental é um componente importante para o gerenciamento das atividades econômicas e sociais nas áreas costeiras, uma vez que estes são utilizados para prever e minimizar impactos ocasionados por derramamentos de óleo. Tais produtos podem, ainda, ser utilizados pelos agentes sociais e governamentais responsáveis pelo gerenciamento costeiro.

A gestão de segurança e meio ambiente, com o aprimoramento de estratégias de prevenção e controle de acidentes durante as atividades relacionadas com o setor petrolífero, tem sido o grande desafio estratégico e o diferencial das grandes companhias de petróleo no mundo. Assim, o custo elevado envolvido nas atividades de limpeza, pagamento de indenizações e a restauração dos ambientes afetados por um derramamento de óleo faz com que a melhor estratégia de resposta seja a prevenção.

Ademais, foi observado que os principais parâmetros ambientais que controlam a dinâmica nos ambientes costeiros amazônicos são influenciados pelo regime das marés, assim como pela energia da descarga fluvial, proporcionando os processo de agradação e degradação da paisagem. Assim, a altura das marés tem relação direta com a extensão das áreas inundadas, considerando que o tamanho da zona intermaré representa a extensão da área que potencialmente pode ser atingida, no caso de um derramamento de óleo. Este parâmetro é de fundamental importância para a classificação dos índices de sensibilidade a derramamentos de óleo nos ambientes costeiros amazônicos.

Por isso, as áreas inundáveis ao longo dos cursos fluviais têm grande importância para manutenção e conservação dos ambientes flúvio-estuarinos, além de alta sensibilidade a derramamentos de óleo. Dessa maneira, as marés e a descarga fluvial devem ser considerados quando da análise dos ISA para a zona costeira amazônica.

Os 64 cenários hipotéticos delineados para o mapeamento dos ISA na Amazônia, em condições ideais, consideram a interação da dinâmica das marés com o ciclo dos rios amazônicos.

Tais cenários contemplam 16 composições de maré e quatro estágios de nível de água. Esse grande número de cenários mostra a complexidade e a necessidade de uma abordagem específica para região amazônica, observando suas peculiaridades.

Portanto, a análise das imagens LANDSAT-7 ETM+ separadamente mostra uma ampla gama de informações espectrais (componente cromático). Isto tem permitido uma clara distinção das diversas feições na área em estudo, apresentando a desvantagem de ser uma imagem com baixa informação textural, com a limitação de aquisição de imagens em condições atmosféricas adversas, dada a grande cobertura de nuvens na região.

Para as imagens RADARSAT-1 W1, a análise dos valores de coeficientes de retroespalhamento mostrou uma grande dificuldade de mapeamento para determinadas unidades de paisagem encontradas na área, em função da sobreposição entre os valores estatísticos de coeficiente de retroespalhamento para as Regiões de Várzea, Planície de Maré e Terra Firme. Esse efeito impossibilita, ou dificulta sobremaneira, a identificação e o mapeamento destes ambientes usando somente essas imagens. No entanto, foi possível mapear com grande acurácia, os corpos de água e as áreas construídas.

Assim, observou-se uma baixa influência da maré na resposta do RADARSAT-1 W1 para área em estudo, uma vez que na imagem em condição de maré mais alta (29 de janeiro de 2003), não há aumento significativo nos valores médios de coeficiente de retroespalhamento. De forma inversa, é significativa a influência da precipitação pluvial na resposta do RADARSAT-1 W1, pois a imagem de 5 de janeiro de 2003, com precipitação média relativamente maior apresenta, de maneira geral, maiores valores de coeficiente de retroespalhamento do que a imagem de 29 de janeiro, quando a precipitação média foi menor. Este resultado mostra claramente a influência da precipitação no retroespalhamento da radiação na banca C.

Este trabalho demonstra que os radares de abertura sintética (SAR) são importantes para o monitoramento das zonas costeiras amazônicas, tendo em vista sua capacidade de penetração em nuvens e chuva, bem como pela iluminação independente da fonte solar. Isto possibilita o monitoramento sistemático de uma região em uma escala temporal de pequeno a médio período, permitindo medir a evolução e a gestão de um problema ambiental.

Todavia, é importante a utilização de técnicas de integração de dados, uma vez que fica comprometida a identificação e o mapeamento de algumas unidades de paisagem, usando as imagens RADARSAT-1 W1 e LANDSAT-7 ETM+ isoladamente. Ademais, as técnicas de fusão

utilizadas, permitiram maximizar a extração de informações, aproveitando o sinergismo obtido com a imagem híbrida gerada apresentando, assim, qualidade superior para extração de feições e atributos, o que possibilita uma melhor identificação e mapeamento dos ambientes costeiros.

Dentro disso, destaca-se que o produto integrado a partir da técnica SPC-SAR mostrou excelentes resultados para o mapeamento da região, permitindo uma melhor variação nos padrões de cores e texturas facilitando, assim, a interpretação dos ambientes. Dessa forma, este foi o produto que mais forneceu valor agregado para interpretação e mapeamento dos ambientes.

Técnicas de classificação supervisionada e não-supervisionada mostraram ser importantes, em função da facilidade e rapidez para o mapeamento das unidades de paisagem, obtendo resultados confiáveis, num pequeno intervalo de tempo. Assim, este procedimento subsidiou a elaboração das cartas de índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo. Dessa forma, em situações emergenciais em áreas cujas variáveis ainda não são bem conhecidas, a agilidade nas ações de resposta é a chave para uma estratégia de contingência eficaz, com a proteção dos ambientes ameaçados e mitigação dos danos gerados.

A utilização dos dados de sensores remotos orbitais permitiu a produção de mapas atualizados, em escala adequada, com maior rapidez, acurácia e menor custo. Além disso, a visão sinóptica obtida com esses sensores propiciou o melhor entendimento dos processos atuantes nos ambientes costeiros amazônicos, bem como de suas inter-relações, uma vez que possibilitaram a análise das relações espaciais integradas e o reconhecimento mais eficaz dos ambientes em campo.

Ademais, é preciso ter em mente que o homem amazônico é um agente ativo nesse processo e parte fundamental na dinâmica destes ambientes. Uma vez que as áreas mais sensíveis são aquelas com importância econômica e social para os habitantes da região, pois uma expressiva parcela da população ribeirinha encontra-se em risco de ser diretamente afetada no caso de um derramamento de óleo. Portanto, os moradores das regiões flúvio-estuarinas amazônicas têm no ambiente onde vivem sua principal riqueza, pois é de lá que tiram sua subsistência. Esta Dissertação intentou contribuir para a manutenção das condições de vida das populações ribeirinhas amazônicas, tentando compatibilizar a potencialidade do uso sustentável dos recursos naturais e a fragilidade destes ecossistemas, não os tratando como santuários intocáveis, mas como uma fonte esgotável de recursos.

## 7.2- RECOMENDAÇÕES

Como continuação da pesquisa se faz necessária à aquisição de imagens em diferentes modos de operação e em diferentes condições ambientais, na tentativa de se modelar melhor a influência das marés e precipitação na resposta do RADARSAT-1. Assim, outros modos de imageamento considerando diferentes ângulos de incidência, direção de visada e resolução espacial, devem ser usados para investigar a região, buscando entender como estes parâmetros do sistema sensor interagem com os alvos. Poder-se-á, dessa forma, identificar os ambientes e compreender os processos atuantes com a maior acurácia possível.

Doravante, é possível estender os principais resultados obtidos neste trabalho para outras áreas da costa amazônica, a partir da rotina de procedimentos aqui traçada para o mapeamento e identificação dos índices de sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo objetivando, dessa maneira, um maior grau de conhecimento da região.

A utilização de sistemas SAR polarimétricos para averiguação da zona costeira amazônica, com múltiplas polarizações e diferentes freqüências (e.g. RADARSAT-2 e ALOS/PALSAR), permitirá a obtenção de informações importantes relacionadas com a interação das microondas com os alvos. Esses estudos aumentarão sobremaneira o emprego potencial do sensoriamento remoto nas microondas para as questões aqui discutidas. Essa tecnologia de última geração aponta ao futuro com grandes possibilidades ainda a serem desvendadas.

Investigações com esse tipo de sistema permitirão o monitoramento dos ambientes tropicais com maior acurácia, uma vez que os novos sensores polarimétricos, com alta resolução espacial, vão permitir a identificação das assinaturas radiométricas dos alvos, medindo a amplitude e fase do pulso de microondas retroespelhado. Ademais, espera-se que o Sistema de Proteção da Amazônia, que possui um moderno sistema de sensoriamento remoto aerotransportado, com um sistema SAR polarimétrico, seja uma importante fonte de informações sobre a Amazônica.

## REFERÊNCIAS

- ABDEL-KADER, A. F.; NASR, S. M.; EL-GAMILY, H. I.; EL-RAEY, M. 1998. Environmental sensitivity analysis of potential oil spill for Ras-Mohammed coastal zone, Egypt. *Journal of Coastal Research*, 14 (2): 502-510.
- ALMEIDA FILHO, R. 2002. Remote detection of hydrocarbon microseepage areas in the Serra do Tonã region, Tucano Basin, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28 (6): 750-757.
- ANDRADE, N.S.O. 1999. *Qualidade geométrica de imagens JERS-1 (SAR) e RADARSAT (Modos S2 e S3) em ambiente de floresta tropical (Rondônia)*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 188p. (Dissertação de mestrado).
- ARIMA, E.; MACIEL, N.; UHL, C. 1998. *Oportunidades para o desenvolvimento do estuário amazônico*. Belém, Imazon, 34 p. (Série Amazônia n.º 15).
- ARPEL .1997. *Guía para el desarrollo de mapas de sensibilidad ambiental para la planificación y respuesta ante derrames de hidrocarburos*. ARPEL (Asociacion Regional de Empresas de Petroleo y Gas Natural en Latinoamerica y el Caribe), 50p.
- ARZANDEH, S. & WANG, J. 2002. Texture evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28 (5): 653-666.
- BARBOSA, M.P.; SINGHROY, V.; SAINT-JEAN, R.1999. Mapping coastal erosion in southern Paraíba, Brazil from RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25 (3): 323- 328.
- BEISL, C.H.; MIRANDA, F.P.; PEDROSO, E.C.; LANDAU, L. 2003. Generation of oil sensitivity index information in Western Amazonia, Brazil, using dual season SAR image mosaics of the Global Rain Forest Mapping Project. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,11, Belo Horizonte, *Anais...INPE*: p. 823-830.
- BENTZ, C.M. & MIRANDA, F.P. 2001. Application of remote sensing data for oil spill monitoring in the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu. *Anais... INPE*: p.747- 752.
- BERREDO, J.F.; MENDES, A.C.; SALES, M.E.C.; SARMENTO, J.P. 2001. Nível de Contaminação por Óleo nos Sedimentos de Fundo e na Água do Rio Pará, Decorrente do Acidente com a Balsa Miss Rondônia. In: PROST, M.T. *Ecossistemas Costeiros: Impactos e Gestão Ambiental*, Museu Paraense Emílio Goeldi.

- CARLOS, N. 2001. Bush zomba do protocolo de Kyoto. *Mundo: Geografia e política internacional*, São Paulo, ano 9, nº4, p. 5-8.
- CARVALHO, M. 2003. *Mapeamento da sensibilidade ambiental ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará utilizando imagens ETM+/LANDSAT-7 e geoprocessamento*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 186 p. (Dissertação de mestrado).
- CHAVES, J.M. 2002. *Discriminação de litotipos com base em dados de radar de abertura sintética e sinergismo radar/ sistema óptico*. Brasília-DF, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 154 p. (Tese de Doutorado).
- CHAVEZ JR., P.S. 1988. An improved dark-Object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3):459-479.
- CHAVEZ JR. P. S. & KWARTENG, A. Y. 1989. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (3): 339-348.
- CHAVEZ JR., P.S.; BERLIN, G.L.; SOWERS, L.B. 1982. Statistical method for selecting Landsat MSS ratios. *Journal of Applied Photographic Engineering*, 8:23-31.
- CONGALTON, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 (35): 35- 45.
- CRACKNELL, A.P. 1999. Remote Sensing Techniques in Estuaries and Coastal Zones – An Update. *International Journal of Remote Sensing*, 19(3): 485-496.
- CUNHA, E.R.S.P. 2002. *Integração digital de imagens de radar e Landsat-TM com dados geológicos e aerogamaespectrométricos no auxílio ao mapeamento geológico da região do complexo granítico estrela –Pará (PA)*. São José dos Campos, Instituto nacional de Pesquisas Espaciais, 149 p. (Dissertação de Mestrado).
- CUNHA, E.R.S.P.; SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; SALES, M.E.C.; LANDAU, L. 2004. O Projeto Piatam Mar e a gestão ambiental e social da zona costeira amazônica. In: RIO OIL & GÁS EXPO AND CONFERENCE 2004. Rio de Janeiro. *Anais...* Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás: IBP789\_04.
- DAVIES, J.H. 1964. A Morphogenic Approach of world shorelines. *Z. Geomorphology*, 8:127-142.

- DHN - Departamento de Hidrografia e Navegação. 2002. *Tábuas de marés para 2002, Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros*. Rio de Janeiro, DHN.
- DHN - Departamento de Hidrografia e Navegação. 2004. *Tábuas de marés para 2002, Costa do Brasil e alguns portos estrangeiros*. Rio de Janeiro, DHN. p.1-6.
- DNMET (Departamento Nacional de Meteorologia). 1992. *Normas Climatológicas*. Departamento Nacional de Meteorologia, Brasília.
- DUTRA, L.V.; 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...NPDI, DCC, ICEx/UFMG*, p. 4-13.
- DUTRIEUX, E.; CANOVAS, S.; DENIS, J.; HÉNOCQUE, Y.; QUOD, J.P.; BIGOT, L. 2000. *Guidelines for vulnerability mapping of coastal zones in the Indian Ocean*. Paris, UNESCO/IOC. (Manuals and Guides, nº38).
- EL-ROBRINI, M.E.S. 2001. *Variabilidade morfológica e sedimentar de praias estuarinas, Ilha de Mosqueiro - Belém*, Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, 85p. (Dissertação de Mestrado).
- EPA. 1999. *Understanding oil spills and oil spill response: understanding oil spills in freshwater environments*. US Environmental Protection Agency, p 44.
- ESA (European Space Agency). 1998. *ERS and its Marine Application*. Noordwijk.
- ESRI. 2001. *Using ArcView GIS*, New York, 350 p.
- FERNADES, D. & FERNADES, M.T.C. 1998. Imagens de radar de abertura sintética como instrumento de auxílio na avaliação do impacto ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9 , Santos. *Anais... SBSR'98*. CD-ROM.
- FONSECA, L.M.G.; LOPES, E.S.S.; YAMAGUCHI, F.Y.; VINHAS, L. 2000. *Processamento Digital de Imagens*. Apostila digital do INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br>>. Acesso em: 20 abril de 2004.
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; SIMÕES, M.S.; 2001. Radarsat Backscattering from an Agricultural Scene. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 36 (5): 823-830.

- GONÇALVES, F.D. 2003. *Mapeamento da Sensibilidade Ambiental a Derrame de Óleo na Baía de Guajará (Belém-PA) Usando Imagens ETM+ Landsat 7 e Sistema de Informações Geográficas*. 57p. Belém, Universidade Federal do Pará, Curso de Geologia. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- GONÇALVES, F.D. & SOUZA FILHO, P.W.M. 2004. Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derrames de óleo na Baía de Guajará (Belém-PA) usando imagens Radarsat-1, Landsat ETM+ 7 e sistema de infomação geográfica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRÁFIA 2004, Itajaí. *Anais...UNIVALI*. CD-ROM.
- GRUNSKY, E.C. 2002. The application of principal components analysis to multi-beam RADARSAT-1 satellite imagery: A tool for land cover and terrain mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(6):758-769.
- GUNDLACH, E.R. & HAYES, M.O. 1978. Classification of coastal environments in terms of potential vulnerability to oil spill impact. *Marine Technology Society Journal*, 12: 18-27.
- HARRIS, J. R.; BOWIE, C. RENCZ, A. N. GRAHAM, D. 1994. Computer-enhancement techniques for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20(3): 210-221.
- HELM, A ; BRAUN, A.; EICKSCHEN, S.; SCHÖNE, T. 2002. Calibration of the Shuttle Radar Topography Mission X-SAR instrument using a synthetic altimetry data model. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(4): 573-580.
- HESS, L.L.; MELACK, J.M.; FILOSO, S.; WANG, Y. 1995. Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4): 896-904.
- HUGENHOLTZ, C. & VAN DER SANDEN, J. 2001. *Polarimetric SAR for Geomorphic Mapping in the Intertidal Zone, Minas Basin, Bay of Fundy, Nova Scotia*, Canada Center for Remote Sensing, 24 p.
- IMO & IPIECA. 1994. *Sensitivity mapping for oil spill response*. IMO (International Marine Organization) and IPIECA (International Petroleum Industry Environmental Conservation Association), p. 24. (Report Series, 1).
- IPIECA. 1991. *Directrices sobre las consecuencias biológicas de la contaminación por hidrocarburos*. International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, p.18. (Repertorio de Informes IPIECA, Vol. 1).

- IRISH, R. 1998. *Landsat 7 science data users handbook*: Greenbelt, Maryland, GSFC. Versão eletrônica. Disponível em:< [http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html)>. Acesso em: 10 setembro de 2004.
- JENSEN, J.R. 1996. *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*. second edition, New Jersey, Prentice Hall, 318 p. (Series in Geographic Information Science).
- JENSEN, J.R.; MURDAY, M.; SEXTON, W.J.; GREEN, C.J. 1993. Coastal environment sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. *Geocarto International*, 2:5-13.
- KAMPEL, M. & AMARAL, S. 2001. Imagens TM/LANDSAT na Detecção de Mancha de Óleo na Baía da Guanabara - RJ - Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, *Anais...INPE*: p. 801-809.
- KUPLICH, T. M .2001. *Temporal, spatial, spectral and polarisation characteristics of the SAR backscatter from regenerating tropical forests*. Southampton, University of Southampton (Department of Geography), 216 p. (PhD. Thesis).
- 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.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, F.M.; HOLCOMB, D. W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. *Principles & applications of imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Jonh Willey & Sons, p. 131-180.
- MACHADO, H.M.; LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; ZULLO Jr., J. 2003. Estudo da variação de parâmetros atmosféricos necessários para correção atmosférica de imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, *Anais...INPE*: p. 2537-2539.
- MADRUCCI, V. 1999. *Avaliação dos produtos integrados TM-LANDSAT, RADARSAT e gamaespectrométricos na caracterização tectônica e mapeamento geológico de área mineralizada em ouro na região de Alta Floresta-MT*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 179 p. (Dissertação de Mestrado).

- MALDONADO, F.D. 1999. *Análise por componentes principais (ACP) na caracterização da dinâmica do uso da terra em área do semi-árido brasileiro*: Quixaba- PE. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 128 p. (Dissertação de Mestrado).
- MARTINELLI, M. & PEDROTTI, F. 2001. A cartografia das unidades de paisagem: Questões metodológicas. *Revista do Departamento de Geografia*. 14: 39-46.
- MELO, D.H.C.T.B. 2002. *Uso de dados IKONOS II na análise urbana: Testes operacionais na zona leste de São Paulo*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 148 p. (Dissertação de mestrado).
- METZGER, J. P. 2001. O que é ecologia de paisagens?, *Biota Neotropica*, 1(1): 1-9. Disponível em: <<http://www.biotaneotropica.org.br/>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2005.
- MICHEL, J.; HAYES, M.O.; BROWN, P.J. 1978. Application of an oil spill vulnerability index to the shoreline of Lower Cook Inlet, Alaska. *Environmental Geology*, 2(2): 107-117.
- MIRANDA, F.P.; MARMOL, A.M.Q.; PEDROSO, E.C.; BEISL, C.H.; WELGAN, P.; MORALES, L.M. 2004. Analysis of RADARSAT-1 data for offshore monitoring activities in the Cantarell Complex, Gulf of Mexico, using the unsupervised semivariogram textural classifier (USTC). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): 424-436.
- MIRANDA, L.B.; CASTRO, B.M.; KJERFVE, B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 400p. (Acadêmica 42).
- MMA. 2002. *Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo (cartas SAO)*. Rio de Janeiro, 22p.
- MORAIS, M. C.; PARADELLA, W. R.; RENNÓ, C. D. 2002. Mapeamento de lateritas mineralizadas em ferro do depósito N1 (Carajás-PA) através de classificação textural de imagens de radar do SAREX' 92. *Revista Brasileira de Geociências*, 32 (3):351-360.
- MORENA, L.C.; JAMES, K.V.; BECK, J. 2004. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30(3): 221- 234.
- MUEHE, D. 1998. O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: CUNHA, S.B., GUERRA, A.J.T., *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p. 273-349.
- NASCIMENTO, M.C. & SILVA, P.C. 2003. Análise comparativa entre as imagens radar da aeronave de sensoriamento remoto do SIVAM e ótica do LANDSAT 7 ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, *Anais...*, INPE, p. 2351-2358.

- NOAA. 2002. *Environmental sensitivity index guidelines*, NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. Version 3.0. Seattle. NOAA Technical Memorandum NOS OR&A 11, 89p.
- 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*, Vitória, 3: 109-123.
- PARÁ, 1995. *Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbanas*: Região Metropolitana de Belém. Belém, Governo do Estado do Pará/IBGE, 157p.
- PARADELLA, W.R. & BIGNELLI, P. A., 1996. *Radar em Geociências*: Princípios e Aplicações. Apostila do curso “Radar e a Integração Digital com Dados Auxiliares Aplicados a Geologia”.
- PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P. MORAIS, M. C. 1999. *Avaliação de dados do RADARSAT-1 em aplicação geológica na Província Mineral de Carajás*, Estado do Pará. Relatório Final: FAPESP #10946-4/1997, INPE, São José dos Campos.
- 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): 538-542.
- PARADELLA, W.R.; SANTOS, A.R.; VENEZIANI, P.; MORAES, M.C. 2001 O Sinergismo de Imagens Standard Descendente do RADARSAT-1 e Thematic Mapper do Landsat-5 em Aplicação Geológica na Amazônia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, Anais...INPE: p. 315-322.
- PARASHAR, S.; LANGHAM, E.; MCNALLY, J.; AHMED, S. 1993. RADARSAT mission requirements and concept. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 19(4): 280- 288.
- PCI GEOMATICS. 2004. *Geomatica*: User Manual. PCI geomatics, Version 9.1, Canada.
- PETROBRAS. Petróleo Brasileiro S.A. 2002. *Manual Básico para Elaboração de Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Sistema Petrobras*: Ambientes Costeiros e Estuarinos. Rio de Janeiro, 134p.
- PICCHIOTTI, A.; CASACCHIA, R.; SALVATORI, R. 1997. Multitemporal Principal Component Analysis of spectral and spatial features of the Venice Lagoon. *International Journal of Remote Sensing*, 18(1): 183-196.

- PIEDADE, M.T.F. *Influência do pulso das cheias e vazantes na dinâmica ecológica de áreas inundáveis*. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/prog/ppg7/projetos/proj986.pdf>>. Acesso em: 22 de novembro de 2004.
- PINHEIRO, R.V.L. 1987. *Estudo hidrodinâmico e sedimentológico do Estuário Guajará-Belém/PA*. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, 164p. (Dissertação de Mestrado).
- PONÇANO, W.L.; CARNEIRO, C.D.R.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, F.F.M.; PRANDINI, F.L. 1981. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, IPT, 94p. (Monografia 5).
- PORTOBRAS/INPH. 1980. *Porto de Belém, Transporte de material sólido em suspensão na Baía de Guajará*. Rio de Janeiro, 170 p. (Relatório INPH 147/80).
- PRITCHARD, D. W. 1967. What is an estuary?: Physical view point. In: LAUFF, G.H. *Estuaries*. Washington, American Association for the advance of science, p. 3.5.
- PROISY, C.; MOUGIN, E.; FROMARD, F.; KARAM, M.A. 2000. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment*, 71(1): 56-66.
- 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. *ISPR Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 241-262.
- RADARSAT INTERNATIONAL, 1995. *RADARSAT Illuminated: Your Guide to Products and Services*. 60p. Disponível em: <[http://www.rsi.ca/rsic/education/rsiug98\\_499.pdf](http://www.rsi.ca/rsic/education/rsiug98_499.pdf)>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2004.
- RADARSAT INTERNATIONAL. 1997. *RADARSAT Geology Handbook*, Unpublished manual, 60 p. Disponível em: <<http://www.rsi.ca/rsic/education/rghb.pdf>>. Acesso em: 15 de Junho de 2003.
- RAMSEY III, E.W.; NELSON, G.A.; SAPKOTA, S.K. 1998. Classifying coastal resources by integrating optical and radar imagery and color infrared photography. *Mangroves and Salt Marshes*. 2: 109-119.
- RANEY, K. 1998. Radar Fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F.M. & LEWIS, A.J. *Principles & applications of imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Jonh Willey & Sons, p. 8-130.

- RANGEL, M.E.S. 2000. *Contribuição dos dados integrados dos sistemas sensores TM/LANDSAT-5 e ERS-1/SAR para o estudo de uso e cobertura da Terra no nordeste da Ilha do Maranhão*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 112 p. (Dissertação de Mestrado).
- ROSENQVIST, O. 1997. *Analysis of the backscatter characteristics of rubber, oil palm and irrigated rice in multi-band polarimetric synthetic aperture radar imagery*. Tokyo, University of Tokyo (Institute of Industrial Science), 116 p. (PhD. Thesis).
- ROSS, J.L.S. 1996. Geomorfologia Aplicada aos EIAs-RIMAs. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p.291-336.
- ROSS, J.L.S. 1998. Geomorfologia Ambiental. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. *Geomorfologia do Brasil*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p.351-388.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A.M. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos barreiras e pós-barreiras na região bragantina, NE do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Belém, 1(1) :25-37.
- SENA, M. J. S. & MESQUITA, A. L. A. 2004. Descrição da técnica de modelagem numérica do escoamento na Baía do Guajará. In: UHLY, S. & SOUZA, E. L. *A questão da água na grande Belém*. Belém, Casa de Estudos Germânicos, p. 207-229.
- SILVA, B.S.G.; VALERIANO, D.M. 2003. Georeferenciamento e Análise da Correção Atmosférica para o Cálculo de Albedo Usando o Sensor Landsat ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, *Anais...INPE*: p. 2143-2150.
- 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, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 61p. (Dissertação de mestrado).
- SINGHROY, V. 1992. Radar Geology: Techniques and results. *Episodes*, 15(1): 15-20.
- SINGHROY, V. 1996. Interpretation of SAR images for coastal zone mapping in Guyana. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 22(3): 317-328.
- SINGHROY, V. & MOLCH, K. 2004. Geological case studies related to RADARSAT-2. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 30 (6): 893-902.

- SINGHROY, V. & SAINT-JEAN, R. 1999. Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(3): 211- 217.
- SOLER, L. S. 2000. *Detecção de manchas de óleo na superfície do mar por meio de técnicas de classificação textural de imagens de radar de abertura sintética (RADARSAT-1)*, São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 167p. (Dissertação de mestrado).
- SOLER, L.S.; FREITAS, C.C.; LORENZETTI, J.A. 2001. Uso de Radar de Abertura Sintética na Detecção de Manchas de Óleo na Superfície do Mar a partir de Classificação Textural na Região da Bacia de Campos - RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, Foz do Iguaçu, *Anais...*, INPE, p. 859-868.
- 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 (Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica). 219p. (Tese de Doutorado).
- SOUZA FILHO, P.W.M. 2004. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação do maior cinturão contínuo de manguezais do mundo. *Revista Gerenciamento Costeiro Integrado*, número especial Ecossistema Manguezal. In press.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R., 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(2): 123-132.
- SOUZA FILHO, P.W.M. & PARADELLA, W.R. 2003. Use of Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Geomorphological Features, Land-use Assessment and Shoreline Changes in Bragança Coast, Pará, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 75(3): 341-356.
- SOUZA FILHO, P.W.M.; MIRANDA, F.P.; BEISL, C.H.; ALMEIDA, E.F.; GONÇALVES, F.D. 2004. Environmental sensitivity mapping for oil spill in the Amazon coast using remote sensing and GIS technology. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM – IGARSS 2004, Anchorage, Alaska. *Proceedings...: IEEE Geoscience and Remote Sensing*.

- SOUZA FILHO, P.W.M.; PARADELLA, W.R.; SILVEIRA, O.F.M. 2005. Synthetic Aperture Radar for Recognition of Coastal Features in the Wet Tropics: Applications in the Brazilian Amazon Coast. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi*, 1(1): 149-154. (série ciências naturais).
- SRIVASTANA, S. & SHEPHERD, N. 2000. *Extraction of beta nought and sigma nought from RADARSAT-1 CDPF products*. Altrix Systems, 12 p. (Reports n.º: AS 97- 5001).
- SZLAFSZTEIN, C. F. 2003. *Vulnerability and response measures to natural hazard and sea level rise impacts: Long-term coastal zone management, NE of the state of Pará, Brazil*. Bremen, University of Kiel (Faculty of Mathematics and Natural Sciences), ZMT- Center for Tropical Marine Ecology, p. 192. (PhD. Thesis).
- TOUTIN, T. 1995. Multi-source data fusion with an integrated and unified geometric modelling. *EARSeL Journal –Advances in Remote Sensing*, 4(2): 118-129.
- TOUTIN, T. & GRAY, L. 2000. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 55 (2000): 13-33.
- VILLWOCK, J.A. 1994. A Costa Brasileira: Geologia e Evolução. *Notas técnicas*, 7: 38-49.
- VRIELING, A. & VAN DER SANDEN, J. 2000. *Satellite remote sensing for monitoring coastline dynamics of the Canadian Beaufort sea coast*. Canada Center for Remote Sensing, 31 p.
- 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.