



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

TESE DE DOUTORADO

**RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA APLICADO AO
MAPEAMENTO E RECONHECIMENTO DE ZONAS ÚMIDAS
COSTEIRAS**

Tese apresentada por:

SHEILA GATINHO TEIXEIRA

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA)

**BELÉM
2011**

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

T266r Teixeira, Sheila Gatinho

Radar de abertura sintética aplicado ao mapeamento e reconhecimento de zonas úmidas costeiras / Sheila Gatinho Teixeira; orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho – 2011
xxii, 105 f.: il.

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

1. Sensoriamento remoto. 2. Coeficiente de retroespalhamento. 3. Manguezais. 4. Campos inundáveis. 5. Microtopografia. 6. Ângulo de incidência. 7. ALOS-PALSAR. 8. RADARSAT. I. Souza Filho, Pedro Walfir Martins e, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22º ed.: 621.3678



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

**RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA APLICADO AO
MAPEAMENTO E RECONHECIMENTO DE ZONAS ÚMIDAS
COSTEIRAS**

TESE APRESENTADA POR

SHEILA GATINHO TEIXEIRA

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

Data de Aprovação: 09 / 12 /2011

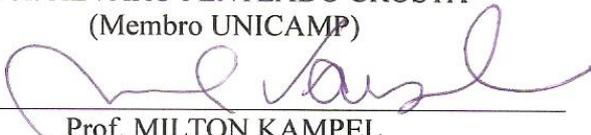
Banca Examinadora:



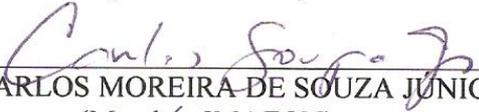
Prof. PEDRO WALFIR MARTINS E SOUZA FILHO
(Orientador-UFPA)



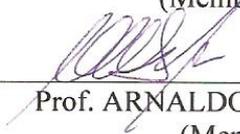
Prof. ALVARO PENTEADO CRÓSTA
(Membro UNICAMP)



Prof. MILTON KAMPEL
(Membro-INPE)



Prof. CARLOS MOREIRA DE SOUZA JÚNIOR
(Membro-IMAZON)



Prof. ARNALDO QUEIROZ DA SILVA
(Membro-UFPA)

*Aos meus pais, Nailene e Reinaldo,
a minha irmã, Amanda e ao Alexandre,
por todo amor e apoio que sempre me
dedicaram.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela realização desta tese.

Para mim, é com alegria e prazer, que expresso aqui meus sinceros agradecimentos a diversas pessoas e instituições, sem as quais não seria possível a realização desta tese.

À Universidade Federal do Pará – comunidade de ensino e pesquisa aberta na Amazônia.

Ao PPGG – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da UFPA, pela oportunidade da realização do curso de doutorado.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado durante os primeiros doze meses de desenvolvimento desta tese.

À Petrobras pelo suporte financeiro através do projeto *PIATAM mar* que tornou possível as viagens de campo.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais através da Supervisora Cristiane Sousa, do Gerente Tomaz Lobato, do Superintendente Regional Manfredo Ximenes e do Diretor de Relações Institucionais Fernando Carvalho, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho através da licença concedida para a finalização da tese.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho, não apenas pela orientação, mas também pelo apoio, dedicação e compreensão.

Ao Prof. Dr. Arnaldo Queiroz, pelas sugestões e ensinamentos repassados durante a fase final deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido (LAIT/UFPA), Suzan Rodrigues, Wilson da Rocha, Diogo Corrêa, Paulo José de Oliveira, Lourival Gomes, Glenda Carvalho e Karla Nascimento, pela amizade, apoio durante os trabalhos no LAIT e também pela convivência harmoniosa durante o período de execução desta tese.

Ao companheiro imprescindível em todas as etapas de campo, Afonso Quaresma (UFPA). Agradeço toda a dedicação, por não medir esforços em tornar possível o levantamento de dados para este trabalho. Agradeço também todos aqueles que me ajudaram nos levantamentos dos dados de campo, como oceanógrafo Gustavo Miranda, o geógrafo Wilson da Rocha e o geólogo Diogo Corrêa.

À amiga, Prof. Dra. Ana Valéria Pinheiro, pela solidariedade, paciência e grande amizade durante o período de execução deste trabalho.

E em especial aos meus pais e minha irmã, por sempre acreditarem em mim e ao meu esposo Alexandre Lins, pelo encorajamento, por sua compreensão, companheirismo e apoio durante toda a realização desta tese.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

RESUMO

O uso de imagens SAR na identificação de zonas úmidas costeiras, sob diferentes configurações de aquisição e diferentes condições ambientais é um tema de pesquisa na fronteira do conhecimento na área de sensoriamento remoto. Para que seja avaliada as potencialidades do uso de imagens SAR em ambientes costeiros tropicais foi escolhida uma Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense para ser investigada, dado o estado de preservação da área de estudo, onde observa-se, principalmente os ecossistemas manguezais, campos salinos e campos inundáveis por água doce. Imagens RADARSAT e ALOS PALSAR em diferentes modos de imageamento foram adquiridas em diferentes condições ambientais. Em imagens RADARSAT-1 *Wide* 1 foi possível a separação entre os manguezais e os campos inundáveis, nas estações seca e chuvosa, principalmente quando as imagens foram adquiridas em condições de precipitação nula, pois havendo umidade no sistema a separação entre estes ambientes tende a diminuir pelo incremento no retroespalhamento. Não foi verificada a influência da condição de maré alta, nos valores de retroespalhamento das imagens RADARSAT-1. A classificação automática contextual baseada na frequência conseguiu separar os manguezais dos campos inundáveis e da água, nas duas estações do ano. As imagens RADARSAT-1 *Wide* e *Fine*, adquiridas durante o período chuvoso, sob altas precipitações, diferentes condições de maré e diferentes ângulos de incidência (20° - $47,8^\circ$) foram transformadas pelo método de análise por principal componente que atestou que as mesmas são altamente correlacionadas. A análise do retroespalhamento destas imagens mostrou uma baixa separabilidade para ângulos de incidência menores (20° a 31°), enquanto que nas imagens adquiridas em ângulos de incidência maiores (41° a 47°) a separabilidade é um pouco maior, quando analisado os ambientes manguezais e campos inundáveis. Em imagens multipolarizadas RADARSAT-2 e PALSAR-HH, adquiridas na estação seca, em áreas de campos inundáveis, salinos e pastejados foi verificado que o parâmetro de microtopografia H_{RMS} , das áreas de campos, influenciou cerca de 49% os valores de σ^0 , da imagem PALSAR-HH. Para as imagens RADARSAT-2, nas polarizações HV e VH, esta influência foi baixa, cerca de 24% e 26%, respectivamente. Nas polarizações paralelas a microtopografia não exerceu influência nas variações de sigma zero. Portanto, imagens SAR podem ser consideradas uma excelente fonte de dado para o reconhecimento e monitoramento de zonas úmidas costeiras tropicais.

Palavras-chaves: Sensoriamento remoto. Coeficiente de retroespalhamento. Manguezais. Campos inundáveis. Microtopografia. Ângulo de incidência. ALOS-PALSAR e RADARSAT.

ABSTRACT

The use SAR images in the identification of coastal wetlands under, different acquisition settings and different environmental conditions is a subject of research at the frontier of knowledge in remote sensing. For that evaluates the potential use of SAR images in coastal tropical environments was chosen an Environmental Protection Area of “Baixada Maranhense” to be investigated, due the preservation state of the study area, where there is mainly mangrove ecosystems, salt marshes and freshwater marshes. RADARSAT and ALOS PALSAR images in different imaging modes were acquired under different environmental conditions. In RADARSAT-1 Wide images was possible the separation between the mangroves and freshwater marshes, in dry and rainy seasons, especially when the images were acquired under conditions of zero precipitation, because if there is moisture in the system, the separation between these environments tends to decrease due the increase in backscattering. There was no influence of the high tide condition in backscattering values RADARSAT-1 images. The frequency-based contextual classification method was able to separate the mangroves, freshwater marshes and water in two seasons. Images RADARSAT-1 Wide and Fine, acquired during the rainy season under high rainfall, different tide conditions and different incidence angles (20° - 47.8°) were transformed by the method of principal component analysis which attested that they are highly correlated. The backscattering analysis of these images showed a low separability for small incident angles (20° to 31°), while the images acquired at incidence angles larger (41° to 47°) separability is slightly higher when analyzed mangroves and freshwater marshes. In multipolarized RADARSAT-2 and PALSAR-HH images, acquired in the dry season, but under different conditions of precipitation, in areas of freshwater marshes, salt marshes and pastures was verified that the microtopography parameter H_{RMS} influenced about 49 % σ^0 values of PALSAR – HH image. For RADARSAT-2 images, the HV and VH polarizations, this influence was low, about 24% and 26%, respectively. In parallel polarizations microtopography did not influenced the variations of sigma zero. Therefore, SAR images can be considered an excellent source of data for the recognition and monitoring of tropical coastal wetlands.

Keywords: Remote sensing. Backscattering coefficients. Mangroves. Freshwater marshes. Microtopography. Incidence angles. ALOS-PALSAR and RADARSAT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2:

- Figura 2.1:** Localização da área em estudo: a) Ilha dos Caranguejos e b) região de campos da Baixada Maranhense..... 5
- Figura 2.2** - Imagem do satélite GOÉS, mostrando a posição da ITCZ sobre a área de estudo: a) em março de 2008 e b) em novembro de 2008. 7
- Figura 2.3** Ecossistemas de zonas úmidas costeiras (manguezal, campos inundáveis, pastejados e salinos): a) Ilha dos Caranguejos e b) região de campos da Baixada Maranhense. 8
- Figura 2.4** – Aspecto dos campos salinos durante a estação seca: a) Vista geral e b) Detalhe dos cristais de sais na superfície dos campos salinos 9
- Vista geral dos Campos Pastejados: a) Encharcados durante o período chuvoso e b) Vegetação seca em forma de turfos no verão 10
- Figura 2.5:** Vista geral dos Campos Pastejados: a) Encharcados durante o período chuvoso e b) Vegetação seca em forma de turfos no verão..... 10
- Figura 2.6:** Vista geral dos Campos Inundáveis: a) lâmina d’água rasa durante a estação chuvosa e b) vegetação seca sem a presença da lâmina d’água durante o verão. 11
- Figura 2.7:** Espécies mais comuns nos manguezais maranhenses: a) Vista oblíqua da vegetação de mangue do tipo *Rhizophora mangle*; b) Detalhe da vegetação do tipo *Rhizophora mangle*; c) Aspecto geral da espécie *Laguncularia racemosa* e d) Detalhe da espécie *Avicennia nítida* 12
- Figura 2.8** – Modelo digital de superfície (originado dos dados da SRTM), com perfil topográfico da Ilha dos Caranguejos mostrando as diferenças de cota entre os manguezais e os campos inundáveis..... 13

CAPÍTULO 3:

- Figura 3.1:** Zoneamento da planície de maré da costa maranhense. **NP:** Nível de preamar, **NB:** Nível de baixamar. **1:** Região de declive moderado colonizada por *Spartina brasiliensis* e *Laguncularia racemosa*. **2:** Região de declive acentuado colonizada por *Rhizophora* spp. **a:** *Avicennia nítida* – **h:** *Heleocharis geniculata* e *Acrostichum aureum* – **l:** *Laguncularia racemosa* – **r:** *Rhizophora* spp. – **s:** Spartines..... 16
- Figura 3.2:** Geometria de imageamento por radar..... 18

| | |
|---|----|
| Figura 3.3: Direções de propagação do campo elétrico: a – polarização vertical e b – polarização horizontal..... | 20 |
| Figura 3.4: Desenho esquemático do ângulo de incidência e ângulo de incidência local..... | 22 |
| Figura 3.5: Relação entre tipo de terreno imageado e ângulo de incidência Modificado de Singhroy & Saint-Jean (1999). | 23 |
| Figura 3.6: Direções de visada do sistema RADARSAT. | 24 |
| Figura 3.7: Célula de resolução, a qual é tridimensional no espaço iluminado. | 25 |
| Figura 3.8: Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: a - superfície lisa; b – superfície intermediária e c – superfície rugosa. Fonte: Modificado de Lewis e Henderson (1998)..... | 26 |
| Figura 3.9: Curvas típicas de retroespalhamento para superfícies lisas, moderadamente rugosas e muito rugosas..... | 27 |
| Figura 3.10: Principais fontes de espalhamento de uma floresta, onde: - Coeficiente de retroespalhamento do dossel; - Coeficiente de retroespalhamento direto dos troncos das árvores; - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo; - Coeficiente de retroespalhamento da dupla-reflexão (<i>double –bounce</i>) entre os troncos e a superfície do solo; - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e o dossel. | 29 |
| Figura 3.11: Principais fontes de espalhamento de uma vegetação herbácea, onde: - Coeficiente de retroespalhamento da vegetação herbácea; - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo; - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e a vegetação..... | 31 |

CAPÍTULO 4:

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 – Modelo teórico de espalhamento na banda C para florestas e vegetação herbácea em condições de inundação e não inundação. | 33 |
| Figura 4.2: Localização da área de estudo, Ilha dos Caranguejos (MA), com a identificação dos ecossistemas presentes na área..... | 36 |
| Figura 4.3. Amplitudes de maré para o Porto do Itaqui (São Luís Maranhão): a – Dia 16 de janeiro de 2003; b – dia 09 de fevereiro de 2003; c – dia 07 de setembro de 2004 e d – dia 01 de outubro de 2004. | 38 |
| Figura 4.4. Precipitação registrada na estação meteorológica de São Luís, para os 5 dias que antecederam o dia da aquisição das imagens RADARSAT-1. A barra em vermelho destaca o | |

| | |
|---|----|
| dia da aquisição a – aquisição do dia 16 de janeiro de 2003; b – dia 09 de fevereiro de 2003; c – dia 07 de setembro de 2004 e d – dia 01 de outubro de 2004. | 39 |
| Figura 4.5 - <i>Boxplots</i> dos valores de σ^0 obtidos nas imagens RADARSAT-1, para os ambientes manguezal, campos inundáveis e a água, nas imagens adquiridas em: a) 16 jan/2003; b) 09 fev/2003; c) 07 set/2004 e d) 01 out/2004. | 45 |
| Figura 4.6 - <i>Boxplots</i> dos valores de NDVI, nas três classes analisadas (manguezal, campos inundáveis e água) nos dois períodos: a) estação chuvosa e b) estação seca. | 47 |
| Figura 4.7 – Variação dos valores médios do coeficiente de retroespalhamento e de NDVI, para o manguezal, campos inundáveis e água: a) estação chuvosa e b) estação seca. | 48 |
| Figura 4.8 – Imagem NDVI: a) junho de 2004 (estação chuvosa) e b) outubro de 2008 (estação seca). | 50 |
| Figura 4.9 – Imagens coeficientes de retroespalhamento RADARSAT-1 do período chuvoso: a) 16 jan/03 e b) 09 fev/03, onde: - retroespalhamento total; - retroespalhamento da superfície da vegetação; - retroespalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação e - espalhamento especular. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retroespalhada. | 51 |
| Figura 4.10 – Imagens coeficientes de retroespalhamento RADARSAT-1 do período chuvoso: a) 07 set/04 e b) 01 out/04, onde: - retroespalhamento total; - retroespalhamento da superfície da vegetação; - retroespalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação; - retroespalhamento de tronco e - retroespalhamento da superfície do solo. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retroespalhada. | 53 |
| Figura 4.11 – Resultado das classificações contextuais das imagens reduzidas: a) – período chuvoso e b) – período seco. | 54 |

CAPÍTULO 5:

| | |
|--|----|
| Figura 5.1: Modelo de retroespalhamento para banda C-HH de Wang et al. (1995) para florestas inundadas e não inundadas na planície Amazônica. Onde: t – retroespalhamento total; c – espalhamento de volume; d – espalhamento tronco-terreno; m – espalhamento dossel-terreno e s- espalhamento de superfície. | 60 |
| Figura 5.2: Localização da área de estudo, Ilha dos Caranguejos (MA), com a identificação dos ecossistemas presentes na área. | 61 |
| Figura 5.3 – Esquema de aquisição das imagens RADARSAT – 1 utilizadas. θ = ângulo de incidência. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.4 – Contribuições dos canais originais para a primeira (a), segunda (b), terceira (c) principal componente. | 65 |
| Figura 5.5 – Imagens componentes principais das imagens RADARSAT-1, modos F2A, S2A, S7A, e S7D. a) Primeira componente principal; (b) Segunda componente principal; (c) Terceira componente principal. | 67 |
| Figura 5.6 – Coeficientes de retroespalhamento (σ^0) para os ambientes costeiros analisados além da água nas imagens F3N, F5F e W1. | 68 |
| Figura 5.7 – Imagens coeficientes de retroespalhamento SAR RADARSAT-1. a) – W1 (20° - 31°); b) F3N (41,1° - 43,7°); c) – F5F (45,6° - 47,8°), onde: - retroespalhamento total; - retroespalhamento da superfície da vegetação e - retroespalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retroespalhada. | 70 |

CAPÍTULO 6:

| | |
|--|----|
| Figura 6.1 – Localização e mapa de ecossistemas costeiros da área de estudo. Fonte: Modificado de Mochel e Castro (2003)..... | 74 |
| Figura 6.2 - Distribuição dos pontos de amostragem de microtopografia em campo sobre as imagens: a) L-HH; b) C-HH; c) C-HV; d) C-VH; e) C-VV..... | 79 |
| Figura 6.3 – Rugosímetro utilizado em campo para a obtenção dos parâmetros de microtopografia: a) nos campos inundáveis; b) nos campos pastejados; c) nos campos salinos. | 80 |
| Figura 6.4 – <i>Boxplots</i> dos parâmetros de microtopografia: a) H_{RMS} e b) L_C , nas classes CI (campos inundáveis); CP (campos pastejados) e CS (campos salinos)..... | 83 |
| Figura 6.5 – <i>Boxplots</i> dos valores de σ^0 obtidos nas imagens RADARSAT-2, para as diferentes classes de campos nas polarizações: (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV..... | 85 |
| Figura 6.6 – <i>Boxplot</i> dos valores de σ^0 obtidos na imagem L-HH PALSAR para as classes CI (campos inundáveis); CP (campos pastejados) e CS (campos salinos)..... | 87 |
| Figura 6.7 – <i>Scatterplots</i> das regressões lineares entre os valores de sigma zero extraídos das imagens SAR e o inverso do parâmetro H_{RMS} : a) - C-HV; b) C-VH e c) L-HH. | 93 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3:

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1: Comprimento de onda e frequência das bandas utilizadas nos radares imageadores..... | 19 |
|--|----|

CAPÍTULO 4:

| | |
|--|----|
| Tabela 4.1 - Fenofase das folhas das espécies de manguezais da Amazônia. ● = novas folhas; ■ = período de pico. Fonte: Modificado de Menezes et. al (2008). | 35 |
| Tabela 4.2 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas..... | 37 |
| Tabela 4.3 - Coeficiente <i>Kappa</i> e os respectivos conceitos da classificação | 44 |
| Tabela 4.4 – Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos das imagens RADARSAT- e os p-valores do <i>Mann-Whitney (U)</i> , usado para comparar as médias de σ^0 entre as classes analisadas (Manguezal, Campos Inundáveis e Água), com nível de significância de 5%. | 46 |
| Tabela 4.5 – Valores de média e desvio padrão de NDVI das imagens de junho de 2004 e outubro de 2008 e os p-valores do <i>Mann-Whitney (U)</i> usado para comparar as médias de NDVI entre as classes analisadas (Manguezal, Campos Inundáveis e Água), com nível de significância de 5%. | 47 |
| Tabela 4.6 – Resultados do teste de correlação de Spearman entre os valores de NDVI e o retroespalhamento médio para as imagens RADARSAT-1, nas estações chuvosa e seca..... | 49 |
| Tabela 4.7 - Matriz de confusão gerada para a classificação contextual da imagem reduzida: a) período chuvoso e b) período seco. | 55 |

CAPÍTULO 5:

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas..... | 62 |
| Tabela 5.2 – Valores de RMSE para a ortorretificação das imagens SAR..... | 63 |
| Tabela 5.3 – Matriz de correlação das imagens RADARSAT-1..... | 65 |
| Tabela 5.4 – Auto-valores dos novos canais, com as respectivas porcentagens de informação. | 66 |
| Tabela 5.6: Separabilidade por divergência transformada (DT) entre os pares de classes nas três imagens SAR. | 71 |

CAPÍTULO 6:

| | |
|--|----|
| Tabela 6.1 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas..... | 75 |
| Tabela 6.2 – Valores do Erro Médio Quadrático e CMAS encontrados no processo de validação das imagens corrigidas geometricamente..... | 76 |
| Tabela 6.3 – Valores de média e desvio padrão dos parâmetros de microtopografia por classe estudada (CI – campos inundáveis; CP – campos pastejados e CS – campos salinos), além dos valores p dos testes <i>Mann-Whitney</i> e <i>t Student</i> , usados respectivamente, para comparar as médias de H_{RMS} e L_C | 83 |
| Tabela 6.4 – Valores dos testes de <i>Shapiro-Wilk</i> para as quatro polarizações da imagem RADARSAT-2. | 84 |
| Tabela 6.5 – Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos das quatro polarizações da imagem RADARSAT-2 e os p-valores do teste <i>t Student</i> usado para comparar as médias de σ^0_{HH} , σ^0_{HV} , σ^0_{VH} e σ^0_{VV} entre as classes de campos (CI – campos inundáveis, CP – campos pastejados e CS – campos salinos), com nível de significância de 5%..... | 86 |
| Tabela 6.6 – Matriz de correlação baseado no coeficiente de <i>Pearson</i> entre os parâmetros de microtopografia e os valores de σ^0 extraídos das polarizações da imagem RADARSAT-2... | 87 |
| Tabela 6.7 – Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos da imagem PALSAR L-HH e os p-valores do teste <i>Mann-Whitney U</i> usado para comparar as médias de σ^0 entre as classes de campos (CI – campos inundáveis, CP – campos pastejados e CS – campos salinos), com nível de significância de 5%..... | 88 |
| Tabela 6.8 – Matriz de correlação baseado no coeficiente de <i>Spearman</i> entre parâmetros de microtopografia e valores de sigma zero, obtidos a partir da imagem PALSAR L-HH. | 88 |
| Tabela 6.9 – Limites das categorias de rugosidade calculados segundo critério de Peake e Oliver (1971), para as imagens RADARSAT-2 e PALSAR..... | 89 |
| Tabela 6.10 – Matriz de correlação entre os valores de sigma zero extraídos das imagens C – HH, C-HV, C-VH, C-VV e L-HH e as transformações aritméticas: logaritmo neperiano (\ln_{HRMS} e \ln_{LC}), raiz quadrada (\sqrt{HRMS} e \sqrt{LC}) e o inverso ($1/HRMS$ e $1/LC$). Em vermelho são destacadas as maiores correlações. | 91 |
| Tabela 6.11 – Valores de R^2 e coeficientes beta (b^*), com os correspondentes valores p (itálico) do teste t ($\alpha = 0,05$) para $1/HRMS$ | 92 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ALOS** - Advanced land observing Satellite
- ALUMAR** – Consórcio de Alumínio do Maranhão
- ANA** – Agência Nacional de Águas
- APA** – Área de Proteção Ambiental
- CCRS** - Canada Centre for Remote Sensing
- CMAS** – Circular map accuracy standard
- CPTEC** – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
- DN** – Digital Number
- DEM** - Digital Elevation Model
- DHN** – Diretoria de Hidrografia e Navegação
- ENVI** – Environment for Visualizing Images
- ENVISAT** - Environmental Satellite
- ERS** - European Remote Sensing Satellite
- ETM+** - Enhanced Thematic Mapper Plus.
- FBS** - Fine Beam Single Polarization
- FBD** - Fine Beam Double Polarization
- FLAASH** - Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
- GEMA** - Gerencia de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais
- GCP** - Ground Control points
- GPS** - Global Positioning System
- HRV** – High Resolution Visible
- H_{RMS}** – Raiz do quadrado médio da variação vertical do perfil
- IBGE** – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICP** – Independent Check points
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- ITZC** - Intertropical Convergence Zone
- JERS** – Japanese Earth Resources Satellite
- L_C** – Correlação lateral
- LAIT** – Laboratório de Análises de Imagens do Trópico Úmido
- LANDSAT** - Land Remote Sensing Satellite
- MDT** - Modelo Digital de Terreno
- NDVI** - Normalized Difference Vegetation Index

NASA - National Aeronautics and Space Administration

OIF - Optimum Index factor

PALSAR - Phased Array L-band SAR

PIXEL - Picture X Elements

RADAR - Radio Detection and Ranging

RADARSAT – Radar Satellite

RMSE - Root Mean Square Error

SIR - Spaceborne Imaging Radar

SAR - Synthetic Aperture Radar

SPOT - Système Probatoire d'Observation de la Terre

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

TM - Thematic Mapper

UFPA – Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

θ - Ângulo de incidência do SAR

λ - Comprimento da onda eletromagnética

c - Velocidade da luz

f - Frequência da onda eletromagnética

α - Ângulo de incidência local

$\cos \theta$ - Cosseno do ângulo θ

σ - Seção cruzada de radar

σ^0 - Coeficiente de retroespalhamento de um alvo

σ_c^0 - Coeficiente de retroespalhamento do dossel

τ_c - Transmissividade do dossel da vegetação

τ_t - Transmissividade da camada de troncos

σ_t^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto dos troncos das árvores

σ_s^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo

σ_d^0 - Coeficiente de retroespalhamento de dupla-reflexão (double –bounce)

σ_m^0 - Espalhamento por múltiplas reflexões.

β° - Brilho da Imagem

ρ_{ivp} - Banda do infravermelho próximo

ρ_v - Banda do vermelho

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| DEDICATÓRIA..... | iv |
| AGRADECIMENTOS | v |
| EPÍGRAFE..... | vii |
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT | ix |
| LISTA DE ILUSTRAÇÕES | x |
| LISTA DE TABELAS | xiv |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | xvi |
| LISTA DE SÍMBOLOS | xviii |
| | |
| CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 1 |
| 1.1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.2 – OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA TESE..... | 3 |
| | |
| CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO..... | 5 |
| 2.1 – LOCALIZAÇÃO..... | 5 |
| 2.2 – GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA DA ÁREA | 6 |
| 2.3 - CLIMA..... | 7 |
| 2.4 - MARÉS | 7 |
| 2.5 - ECOSSISTEMAS IDENTIFICADOS NA ÁREA EM ESTUDO | 8 |
| 2.5.1 - Campos salinos | 9 |
| 2.5.2 - Campos pastejados..... | 9 |
| 2.5.3 - Campos inundáveis | 10 |
| 2.5.4 - Manguezais | 11 |
| 2.6 – TOPOGRAFIA DOS ECOSSISTEMAS | 12 |
| | |
| CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 3.1 – ZONAS ÚMIDAS | 14 |
| 3.2 – O SISTEMA DE IMAGEAMENTO COM RADAR | 16 |
| 3.2.1 – Parâmetros do Sistema Sensor | 19 |
| 3.2.1.1 – Comprimento de onda | 19 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.1.2 – Polarização..... | 20 |
| 3.2.1.3 – Ângulo de Incidência..... | 21 |
| 3.2.1.4 – Direção de Visada..... | 23 |
| 3.2.1.5 – Resolução | 24 |
| 3.2.2 – Parâmetros da Superfície..... | 25 |
| 3.2.2.1–Rugosidade Superficial..... | 25 |
| 3.2.2.2 – Constante dielétrica e teor de umidade..... | 27 |
| 3.3 – INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO DAS MICRO-ONDAS COM AS ZONAS ÚMIDAS | 27 |
| 3.3.1 –Interação da energia das micro-ondas com as florestas..... | 28 |
| 3.3.2 – Interação da energia das micro-ondas com a vegetação herbácea | 30 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 4: INFLUÊNCIA DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS NO RETRO- ESPALHAMENTO MULTITEMPORAL DE IMAGENS RADARSAT-1 | 32 |
| 4.1 - INTRODUÇÃO | 32 |
| 4.2 - MATERIAS E ABORDAGEM METODOLÓGICA..... | 36 |
| 4.2.1 – Atributos das imagens SAR..... | 36 |
| 4.2.2 – Atributos das imagens Landsat- 5 TM utilizadas para a geração do NDVI..... | 37 |
| 4.2.3 – Levantamento da base planialtimétrica | 37 |
| 4.2.4 – Levantamento de dados de nível de maré e de precipitação..... | 38 |
| 4.2.5 – Processamento das imagens Landsat-4 e SRTM como base para o processo de ortorretificação | 39 |
| 4.2.6 – Processamento das imagens SAR..... | 40 |
| 4.2.6.1 – Leitura das imagens | 40 |
| 4.2.6.2 - Geração das imagens coeficiente de retroespalhamento para as cenas SAR | 40 |
| 4.2.6.3 – Ortorretificação das imagens SAR | 40 |
| 4.2.6.4 - Extração do coeficiente de retroespalhamento..... | 41 |
| 4.2.7 – Cálculo do NDVI..... | 41 |
| 4.2.8 - Análises estatísticas | 43 |
| 4.2.9 – Classificação Contextual..... | 43 |
| 4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 44 |
| 4.3.1- Análise estatística dos coeficientes de retroespalhamento das imagens RADARSAT-1..... | 44 |
| 4.3.2 – Análise estatística dos valores de NDVI | 46 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.3- Análise da relação entre o coeficiente de retroespalhamento e o NDVI | 48 |
| 4.3.4 - Classificação contextual das imagens SAR | 54 |
| 4.4 - CONCLUSÕES..... | 56 |
| CAPÍTULO 5: INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA NO RETROESPALHAMENTO DE FLORESTA DE MANGUE E CAMPOS INUNDÁVEIS..... | 58 |
| 5.1 - INTRODUÇÃO | 58 |
| 5.2 - MATERIAIS | 61 |
| 5.3 - MÉTODOS UTILIZADOS..... | 63 |
| 5.3.1 – Processamento das imagens SAR..... | 63 |
| 5.3.2 – Análise por principais componentes | 63 |
| 5.3.3 – Extração do coeficiente de retroespalhamento | 64 |
| 5.3.4 - Análise da separabilidade..... | 64 |
| 5.4 - RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO | 64 |
| 5.4.1 – Análise por principais componentes | 64 |
| 5.4.2 - Análise dos valores de retroespalhamento..... | 67 |
| 5.5 – CONCLUSÕES | 72 |
| | |
| CAPÍTULO 6: INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DOS CAMPOS NO RETROESPALHAMENTO DAS BANDAS C e L | 73 |
| 6.1 - INTRODUÇÃO | 73 |
| 6.2 - MATERIAIS | 75 |
| 6.3 - ABORDAGEM METODOLÓGICA..... | 76 |
| 6.3.1 - Processamento das imagens SAR | 76 |
| 6.3.2 - Extração da microrugosidade em campo..... | 77 |
| 6.3.3 - Processamento dos perfis de microrugosidade..... | 80 |
| 6.3.4 - Análises estatísticas | 81 |
| 6.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES | 82 |
| 6.4.1- Análise exploratória dos parâmetros de microtopografia..... | 82 |
| 6.4.2 - Análise exploratória dos coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR... 84 | 84 |
| 6.4.2.1 - Imagens RADARSAT-2 | 84 |
| 6.4.2.2 - Imagem PALSAR | 87 |

| | |
|---|-----------|
| 6.4.3 - Influência dos parâmetros de microtopografia nos valores de coeficiente de retroespalhamento das imagens SAR | 89 |
| 6.5 - CONCLUSÕES..... | 93 |
| | |
| CAPÍTULO 7: CONSIDERAÇÕES FINAIS | 94 |
| REFERÊNCIAS | 97 |

CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta indispensável no estudo das zonas costeiras tropicais. Diversos sensores que operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético (visível, infravermelho e micro-ondas) vêm sendo utilizados nestes estudos.

Com o desenvolvimento tecnológico dos sistemas sensores, a partir da década de 80, os levantamentos geomorfológicos em ambientes tropicais costeiros, começaram a ser feitos de maneira extensiva, através de sensores remotos orbitais ópticos, tais como, o TM e o ETM da série LANDSAT e o HRV da série SPOT, os quais se tornaram mais usuais ao longo dos anos (Yang *et al.* 1999 , Souza Filho & Paradella 2001 e Fromard *et al.* 2004). No entanto, nos últimos anos, a partir do advento do sistema SAR (radar de abertura sintética), os estudos em áreas costeiras tropicais têm sido beneficiados pelas características deste tipo de imageamento, pois: 1) a radiação de micro-ondas dos pulsos permite o imageamento em condições de tempo adversas aos sensores ópticos (nuvens e chuva); 2) a geometria de iluminação pode ser controlada; 3) possui maior sensibilidade às variações da morfologia da superfície, uma vez que mede propriedades geométricas e elétricas, enquanto que os sensores ópticos medem propriedades físico-químicas; 4) apresenta possibilidade de variações na polarização; e 5) o imageamento é independente de iluminação solar (Lewis & Henderson 1998).

A fim de aumentar a qualidade e confiabilidade das interpretações das imagens SAR é necessário o entendimento da interação da energia eletromagnética com os alvos, bem como dos parâmetros envolvidos. Segundo Lewis & Henderson (1998), os principais parâmetros que condicionam o retroespalhamento do radar estão relacionados ao sistema sensor e ao alvo.

Entre os parâmetros do sistema sensor estão: o comprimento de onda ou frequência, polarização, o ângulo de incidência, azimute de visada e resolução espacial. Enquanto que os parâmetros do alvo seriam a forma geométrica, rugosidade da superfície, constante dielétrica, inclinação e orientação (Lewis & Henderson 1998, Novo & Costa 2005).

A quantidade de energia espalhada pelo alvo em direção ao sensor (retroespalhamento), em relação à quantidade de energia que foi emitida pelo sensor, (pulso de micro-ondas) é chamada de coeficiente de retroespalhamento (σ°) (Raney 1998). A potência recebida pela antena de radar resume as características do sistema de radar, do objeto imageado e do sinal espalhado pelo objeto (Lewis & Henderson 1998).

Diversos estudos mostram a aplicação de imagens SAR em ambientes costeiros tropicais. Proisy *et al.* (2000) analisaram as assinaturas polarimétricas, nas bandas C, P e L, de diferentes estágios de desenvolvimento das florestas de manguezais na costa da Guiana Francesa. Eles verificaram que na banda P as assinaturas polarimétricas são mais proeminentes e também as razões polarimétricas, podem ser utilizadas para analisar os mecanismos de retroespalhamento e identificação dos vários estágios desenvolvimento dos manguezais.

Proisy *et al.* (2002) estudaram a influência da estrutura da copa das árvores, da floresta de manguezal, no retroespalhamento do sinal do radar em uma área da costa da Guiana Francesa. Estes autores concluíram que tanto os valores de coeficiente de retroespalhamento nas polarizações HH e HV na banda P, como as diferenças de fase HH-VV também na banda P são capazes de discriminar florestas de manguezais esparsas.

Singhroy (2002) aplicou a variação de ângulos de incidência em imagens SAR para o mapeamento de áreas com risco geológico em regiões tropicais, o caso da erosão costeira na Guiana Francesa.

Mitchell (2003) através de diversos sensores SAR analisou a estrutura da floresta, composição das espécies, biomassa e resposta a mudanças ambientais de manguezais no norte da Austrália.

Lucas *et al.* (2007) avaliaram a aplicação de imagens SAR, na banda L, para a quantificação, caracterização e detecção de mudanças em áreas de manguezal no norte da Austrália, Guiana Francesa e Malásia. Estes autores constataram que o mapeamento dos manguezais é mais efetivo, nas áreas onde a borda não é florestada e onde há diferenças na estrutura, em função da diversidade de espécies, estágio de crescimento e distribuição da biomassa. A detecção de mudança foi feita pelos autores através de comparação multitemporal, na qual estes mapearam áreas com processos de desflorestamento/regeneração e a dinâmica dos manguezais associadas a mudanças no padrão de sedimentação.

Em ambientes tropicais úmidos da Amazônia a utilização de imagens SAR vem apresentando resultados satisfatórios na discriminação dos ambientes costeiros, as quais são responsáveis pelo realce de feições topográficas, diferenças na altura da vegetação, geometria dos corpos e conteúdo de umidade (Souza Filho & Paradella 2001, 2002, Teixeira 2006, Teixeira & Souza Filho 2009). Souza Filho *et al.* (2011) avaliaram a performance de imagens multipolarizadas na banda L e observaram que a polarização VV foi superior para o recochenimento de planície de maré sem vegetação, a polarização HH apresentou melhor desempenho para o mapeamento de ambientes costeiros cobertos por vegetação como

manguezais e dunas vegetadas, enquanto a polarização HV foi melhor para distinguir a zona de transição manguezais-terra firme.

Dentro desse contexto, o presente trabalho pretende verificar a potencialidade do uso de imagens SAR, na identificação de ecossistemas costeiros alagáveis, sob diferentes configurações de aquisição e diferentes condições ambientais. A área escolhida para investigação compreende partes da região da Baixada Maranhense e do Golfão Maranhense, no extremo norte do Estado do Maranhão, região esta que compõe um grande sistema de manguezais contínuos, associados a diversos ambientes alagáveis, como os campos. Esta região é considerada complexa do ponto de vista ecológico, pois incorpora uma interface de ecossistemas, abrigando uma rica fauna e flora aquática terrestre, com um significativo número de espécies raras e grande abundância de aves litorâneas e migratórias continentais, além de possuir o maior conjunto de bacias lacustres do Nordeste brasileiro.

Devido a importância ecológica desta região, ela foi estabelecida como Área de Proteção Ambiental (Decreto nº11.900 de 11 de julho de 1991), denominada de APA da Baixada Maranhense, que engloba também a Ilha dos Caranguejos. Contudo, apesar de ser uma área de Unidade de Conservação, a criação extensiva de búfalos é apontada como um dos principais problemas para sua conservação, além de projetos de irrigação e construção de barragens (Costa-Neto *et al.* 2001/2002). Deste modo, estudos sobre os diversos ambientes alagáveis são extremamente importantes para que se possa não só caracterizá-los, mas também subsidiar tomadas de medidas de manejo e futuros monitoramentos.

1.2 - OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DA TESE

Os objetivos propostos nesta tese são: 1) avaliar o potencial de imagens RADARSAT-1, multitemporais, no mapeamento de manguezais e campos inundáveis, em diferentes condições ambientais; 2) analisar imagens RADARSAT-1 sob diferentes ângulos de incidência na separabilidade dos manguezais e campos inundáveis; e 3) verificar a influência de parâmetros da microtopografia de diferentes campos, em imagens multipolarizadas na banda C (RADARSAT-2) e na polarização HH na banda L (ALOS PALSAR).

A tese é composta por sete capítulos. O Capítulo 1 apresenta as considerações iniciais da tese com as justificativas e os objetivos da mesma, bem como sua organização. O Capítulo 2 faz uma descrição dos diferentes aspectos da área em estudo. O Capítulo 3 aborda a fundamentação teórica sobre as áreas úmidas e o imageamento com radar de abertura sintética. Os resultados obtidos na tese são abordados nos capítulos 4, 5 e 6, onde optou-se

organizar os capítulos por tema analisado, os quais possuem uma introdução ao tema, os materiais e a abordagem metodológica utilizada, os resultados e as conclusões do capítulo. Assim, o Capítulo 4 apresenta uma avaliação do potencial de imagens RADARSAT-1 multitemporais, adquiridas no período chuvoso e seco, na separabilidade dos manguezais e campos inundáveis, levando em consideração a densidade do dossel inferida através de valores de NDVI, além da produção de mapas temáticos para as duas estações do ano, utilizando classificação automática supervisionada baseada em pixel. O Capítulo 5 analisa as implicações da variação do ângulo de incidência de imagens RADARSAT-1, adquiridas no período chuvoso, na separação de manguezais e campos inundáveis da Ilha dos Caranguejos. O Capítulo 6 consiste na investigação da influência de parâmetros da microtopografia nos valores de retroespalhamento de imagens RADARSAT-2, banca C, nas polarizações HH, HV, VH e VV e também na imagem PALSAR, banda L na polarização HH em três tipos de campos observados na Baixada Maranhense (pastejados, inundáveis e salinos), cujos valores de rugosidade superficial foram medidos durante o período seco. No Capítulo 7 é realizado um resumo dos resultados e conclusões e por fim são listadas as referências bibliográficas utilizadas nessa tese.

CAPÍTULO 2: CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 - LOCALIZAÇÃO

A área em estudo (Figura 2.1a e 2.1b) está localizada na planície de maré do extremo norte do Estado do Maranhão, mais precisamente, na área de influência da Baía de São Marcos, na qual foram escolhidas duas áreas menores referente a Ilha dos Caranguejos (Figura 2.1a) e a região de campos da Baixada Maranhense (Figura 2.1b).

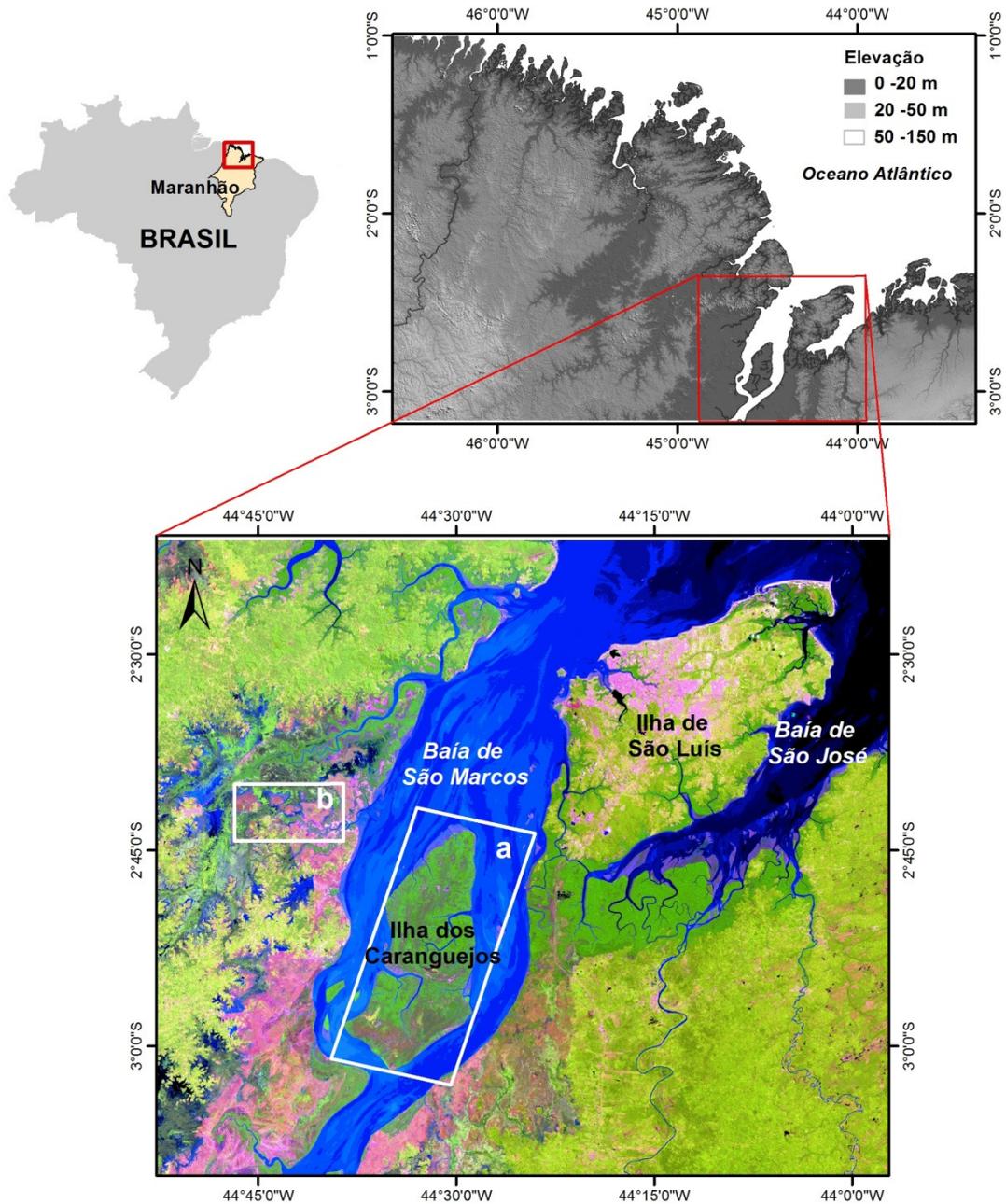


Figura 2.1: Localização da área em estudo: a) Ilha dos Caranguejos e b) região de campos da Baixada Maranhense.

2.2 – GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA DA ÁREA

De acordo com Rodrigues *et al.* (1994) e Montes (1997) na região da Ilha dos Caranguejos ocorrem sedimentos holocênicos constituídos por depósitos flúvio-marinhos, que são representados pelos sedimentos lamosos inconsolidados onde dominam os solos de mangue. Na região de campos da Baixada Maranhense, além dos depósitos flúvio-marinhos ocorrem também os depósitos holocênicos flúvio-lagunares que são representados por sedimentos arenosos inconsolidados e argilosos não adensados que preenchem as partes topográficas mais baixas.

A Ilha dos Caranguejos é caracterizada por um relevo plano, resultante da acumulação flúvio-marinha, com cotas altimétricas que não ultrapassam os 6 m, e está inserida no compartimento geomorfológico conhecido por Golfão Maranhense (Teixeira & Souza Filho 2009).

O Golfão Maranhense é uma ampla área de colmatagem estuarina, correspondente a um antigo golfão flandriano cujos limites atingiam uma extensão de 180 km em seu eixo principal, por 70 km de largura, comportando baías (as principais: São Marcos e São José), ilhas (as maiores: São Luís e Caranguejos), lagoas, campos inundáveis, planícies de marés, estuários e extensos manguezais que ocorrem ao longo dos diversos braços de marés. A gênese do Golfão Maranhense resultou da erosão fluvial, condicionada pela regressão pré-flandriana, e posterior colmatção da área pela coalescência das drenagens dos sistemas Pindaré/Grajaú/Mearim e, secundariamente, Itapecuru (Ab'Saber 1960).

A região de campos ocorre no compartimento geomorfológico chamado de Baixada Maranhense, que corresponde à região do entorno do Golfão, que sofre influência do fluxo direto, maré dinâmica. É caracterizada por um relevo rebaixado e plano a suavemente ondulado contendo extensas áreas rebaixadas que são alagadas durante o período chuvoso, dando origem a extensos lagos interligados por um sistema de drenagem com canais divagantes, associados aos baixos cursos dos rios Mearim, Grajaú, Pindaré e Pericumã. A convergência dos cursos dos rios Mearim, Pindaré e Grajaú, associada a movimentos transgressivos e regressivos do mar, modelou o ambiente deposicional que é preenchido pelo excedente de águas fluviais no período chuvoso, dando origem a extensas superfícies lacustres que condicionam a vida das comunidades residentes na região. Durante o período seco, o cenário hídrico transforma-se em grandes extensões de campos (Feitosa 2006).

2.3 - CLIMA

Segundo Barbosa & Pinto (1973), o clima na região, situada na transição entre o superúmido da Amazônia e o semi-árido do Nordeste é caracterizado segundo a classificação de Köppen, como tropical úmido, do tipo Aw com inverno seco e com precipitação média, do mês mais seco, inferior a 60 mm. A área está sob influência da variabilidade espaço-temporal da Zona de Convergência Intertropical (ITZC), que durante os meses de janeiro a junho se encontra em sua posição mais ao sul, alcançando as áreas costeiras e oceânicas próximas do Equador, ocasionando chuvas mais fortes com maior frequência, no qual as máximas de precipitação pluviométrica ocorrem nos meses de março ou abril (Figura 2.2a). No período de setembro a novembro, ocorrem as menores taxas de precipitações associadas à posição da ITZC, que neste período do ano se encontra deslocada para o hemisfério norte, havendo as mínimas de precipitação ou ausências nos meses de setembro, outubro ou novembro (Figura 2.2b) (Silva *et al.* 2007). As temperaturas médias anuais são relativamente uniformes, e oscilam em torno de 26°C, com uma amplitude térmica anual sempre inferior a 13°C.

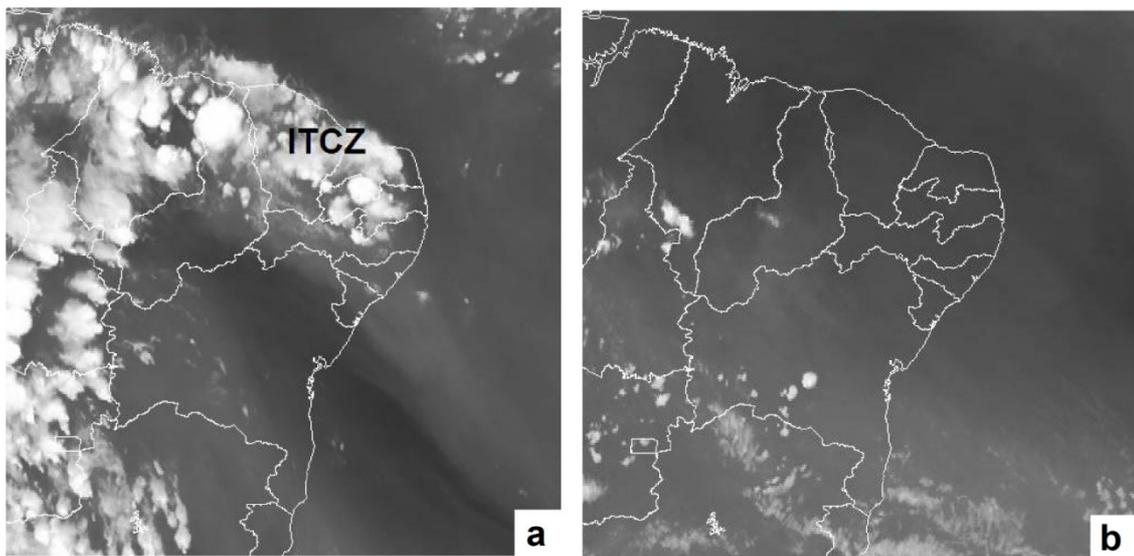


Figura 2.2 - Imagem do satélite GOÉS, mostrando a posição da ITCZ sobre a área de estudo: a) em março de 2008 e b) em novembro de 2008. Fonte: (CPTEC 2009).

2.4 - MARÉS

A hidrodinâmica das águas das marés caracteriza essa região como sendo de alta energia com um regime de macromaré semidiurna, com variações médias de 4 m e máxima superior a 7 m, e correntes de marés máximas superiores a 4 m/s (Rebello-Mochel 1997).

2.5 - ECOSSISTEMAS IDENTIFICADOS NA ÁREA EM ESTUDO

Na região da Ilha dos Caranguejos são identificados dois ecossistemas de zonas úmidas costeiras, os manguezais e os campos inundáveis (Figura 2.3a), enquanto na região de campos da Baixada Maranhense, de acordo com Mochel & Castro (2003) ocorrem quatro ecossistemas, que seriam os campos pastejados, campos inundáveis, campos salinos e os manguezais (Figura 2.3b).

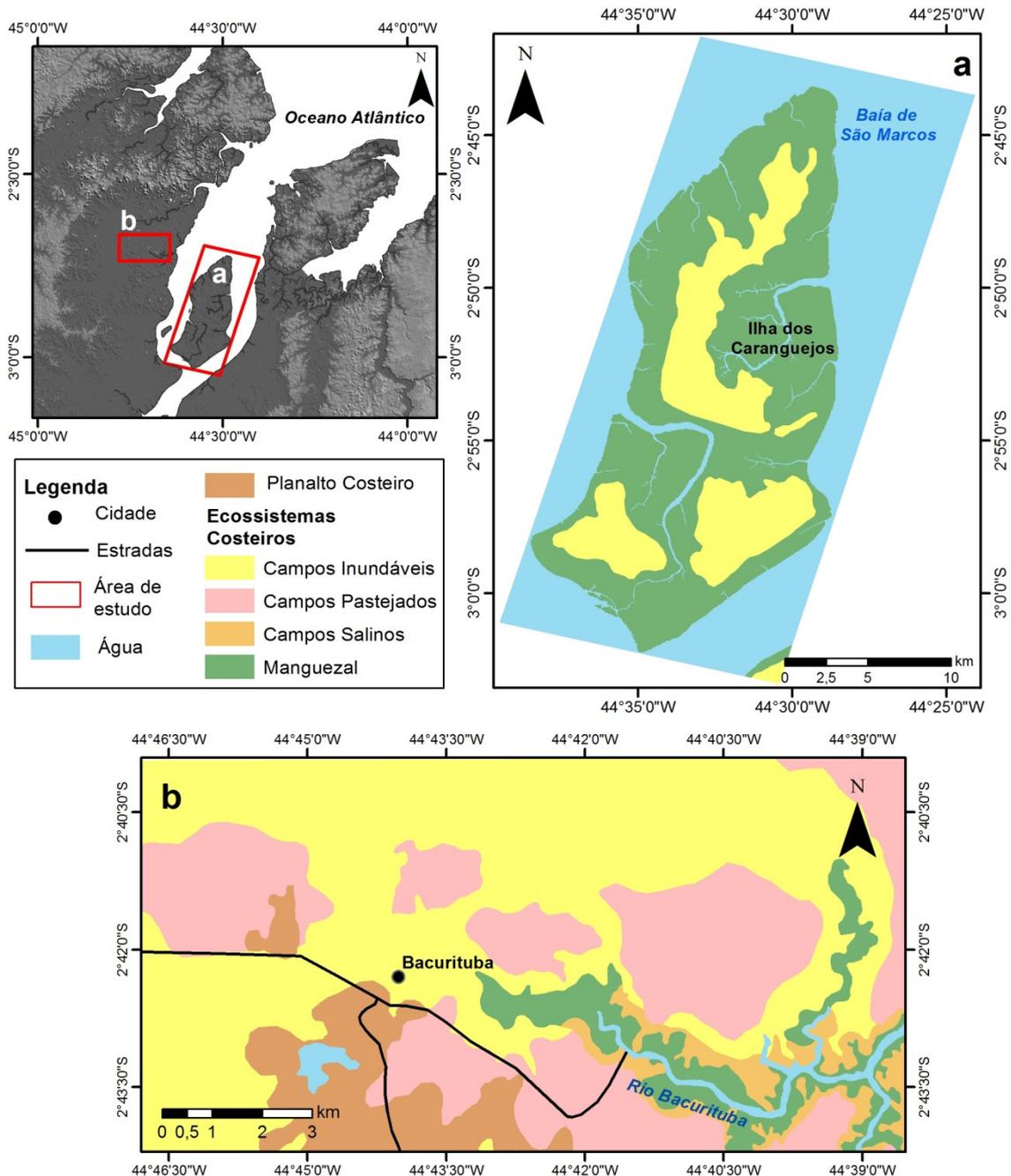


Figura 2.3 – Ecossistemas de zonas úmidas costeiras (manguezal, campos inundáveis, pastejados e salinos): a) Ilha dos Caranguejos (Modificado de Teixeira 2006) e b) região de campos da Baixada Maranhense (Modificado de Mochel & Castro 2003).

2.5.1 - Campos salinos

Também conhecidos como apicuns, desenvolvem-se entre o nível da maré alta de sizígia e de quadratura. Em função da alta salinidade do solo, estas áreas não possuem vegetação arbustiva (Figura 2.4a), apresentando no máximo uma cobertura herbácea esparsa de *Sesuvium portulacastrum* e *Batis marítima* (Mochel & Castro 2003). Durante a estação seca formam salinas naturais pelo processo de eflorescência, que é a cristalização de sais na superfície do solo a partir da forte evaporação, que permite um processo de ascensão capilar da água do solo, promovendo o afloramento de sais nela dissolvidos (Figura 2.4b).



Figura 2.4 – Aspecto dos campos salinos durante a estação seca: a) Vista geral e b) Detalhe dos cristais de sais na superfície dos campos salinos

2.5.2 - Campos pastejados

Segundo Mochel & Castro (2003), os campos pastejados ocorrem nas áreas com cerca de 0,5 a 1,0 m acima dos campos inundáveis, geralmente não ficam submersos, apenas encharcados durante o período chuvoso (Figura 2.5a). Sua cobertura típica é uma ciperácea do gênero *Cyperus*. Estas áreas são tradicionalmente utilizadas para pecuária extensiva de gado bovino e durante o verão é possível observar a vegetação seca em forma de tufo espaçados que permitem a exposição do solo (Figura 2.5b).

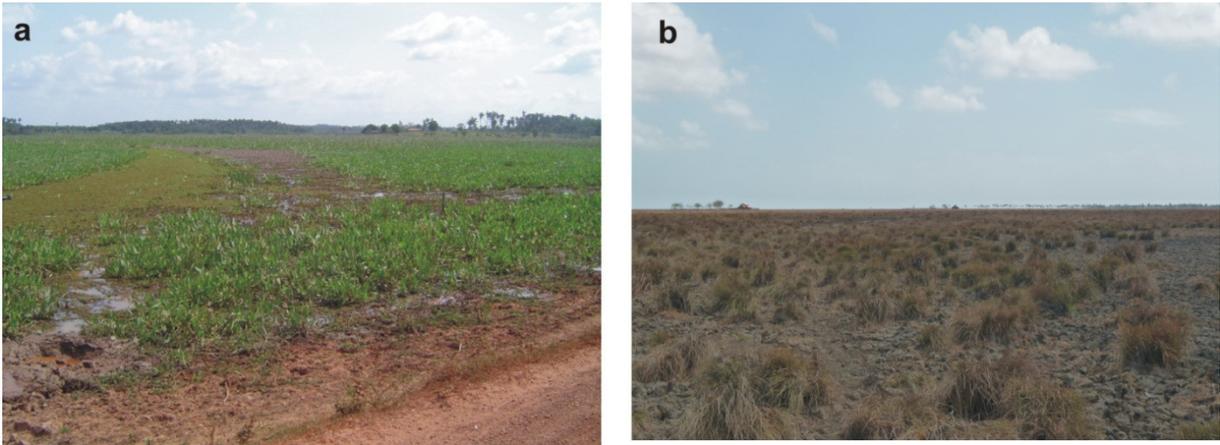


Figura 2.5: Vista geral dos Campos Pastejados: a) Encharcados durante o período chuvoso e b) Vegetação seca em forma de tufos no verão.

2.5.3 - Campos inundáveis

Os campos inundáveis estão acima da cota de preamar da região que varia de 4 a 5,7 m (Mochel & Castro 2003), sujeitos a inundação sazonal, com espessura da lâmina d'água de aproximadamente 50 cm, durante o período chuvoso (Figura 2.6a). O crescimento da vegetação herbácea é regulado pelas cheias periódicas dos rios que divagam por numerosos cursos d'água temporários, controladas pelas marés altas que barram as águas dos maiores rios em suas embocaduras. O lençol freático está usualmente perto ou na superfície ou o terreno é coberto por lâminas de águas rasas. Estes sistemas estão geralmente associados com rios, lagos, lagoas e reservatórios, formando grandes sistemas integrados e se caracterizam por um regime hidrológico peculiar (frequência, duração, nível de água). A importância atribuída a estes está associada ao grande número de funções que desempenham, entre elas, a ciclagem de matéria e a contenção de picos de cheias e sedimentos (GEMA 2003). A produtividade de espécies vegetais é controlada pela amplitude das marés, salinidade, grau de inundação, disponibilidade de nutrientes e temperatura que determina o ciclo sazonal no desenvolvimento das espécies da cobertura vegetal (Figura 2.6b). Segundo Mochel & Castro (2003), as principais espécies vegetais encontradas nos campos inundáveis da região costeira maranhense são da família das ciperáceas (*Eleocharis mutata*, *Eleocharis caribboea*, *Eleocharis mucronata* e *Eleocharis interstincta*), que são caracterizadas por caules trígonos e folhas estreitas que podem atingir entre 60 a 80 cm de altura; as gramíneas (*Paspalum sp*) e as plantas aquáticas do gênero *Nymphaeae sp.*, caracterizadas por serem perenes, apresentam folhas achatadas e geralmente são flutuante.

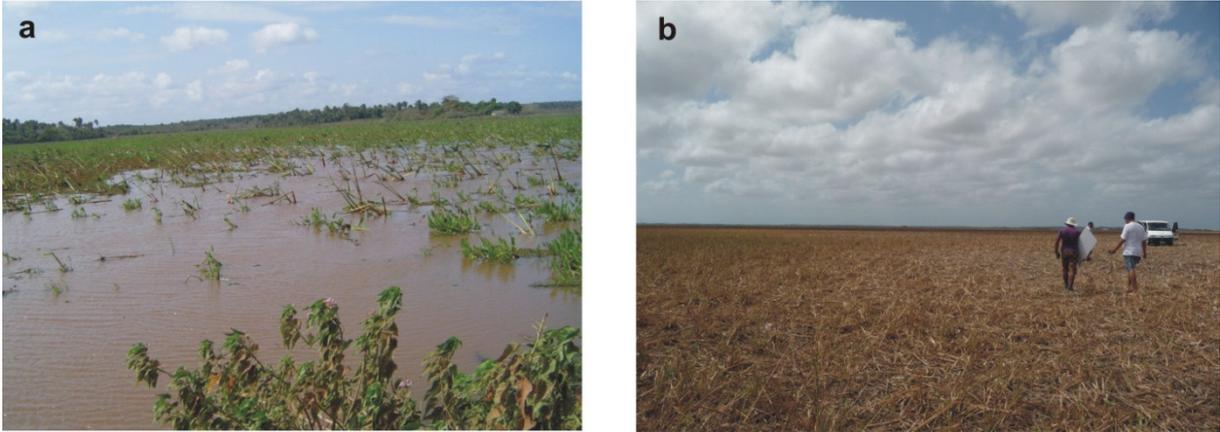


Figura 2.6: Vista geral dos Campos Inundáveis: a) lâmina d'água rasa durante a estação chuvosa e b) vegetação seca sem a presença da lâmina d'água durante o verão.

2.5.4 - Manguezais

Os manguezais colonizam a zona de intermaré, que fica situada na costa maranhense entre as cotas de 1,0 a 5,5 m. (Mochel & Castro 2003). Na porção da costa em estudo, os manguezais formam florestas mistas extensas, que adentram o continente por aproximadamente 100 km. As espécies que ocorrem nos manguezais maranhenses são *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora harrisonii*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa* e *Conocarpus erectus*, conforme Mochel, (1993). No entanto, as espécies *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* (sinônimo de *Avicennia nítida*) e *Laguncularia racemosa* as espécies mais comuns, especialmente nas áreas influenciadas pelas marés salinas (Mochel 2000).

Conforme Damásio (1980), as espécies mais comuns apresentam as seguintes descrições:

Rhizophora mangle: árvore de copa arredondada que cresce de 5 a 8 m, com sistema radicular muito ramificado, distribuído radialmente, originando-se principalmente ao longo do tronco ou dos ramos caulinares (raízes escoras) (Figura 2.7a e 2.7b).

Laguncularia racemosa: árvore com 4 a 8 m de altura, com aspecto ora arbustivo ora arborescente, as ramificações caulinares, podem ocorrer próximas ou distantes do solo, sistema radicular subterrâneo, pouco profundo, com os pneumatóforos pequenos e expostos (Figura 2.7c).

Avicennia nítida: árvore com 6 a 12m de altura, copa cônica nas plantas em desenvolvimento (assemelhando-se a pinheiros), alongada nas plantas velhas, sistema radicular com disposição radiada horizontal, muito ramificado, apresentando pneumatóforos cônicos bem expostos (Figura 2.7d).

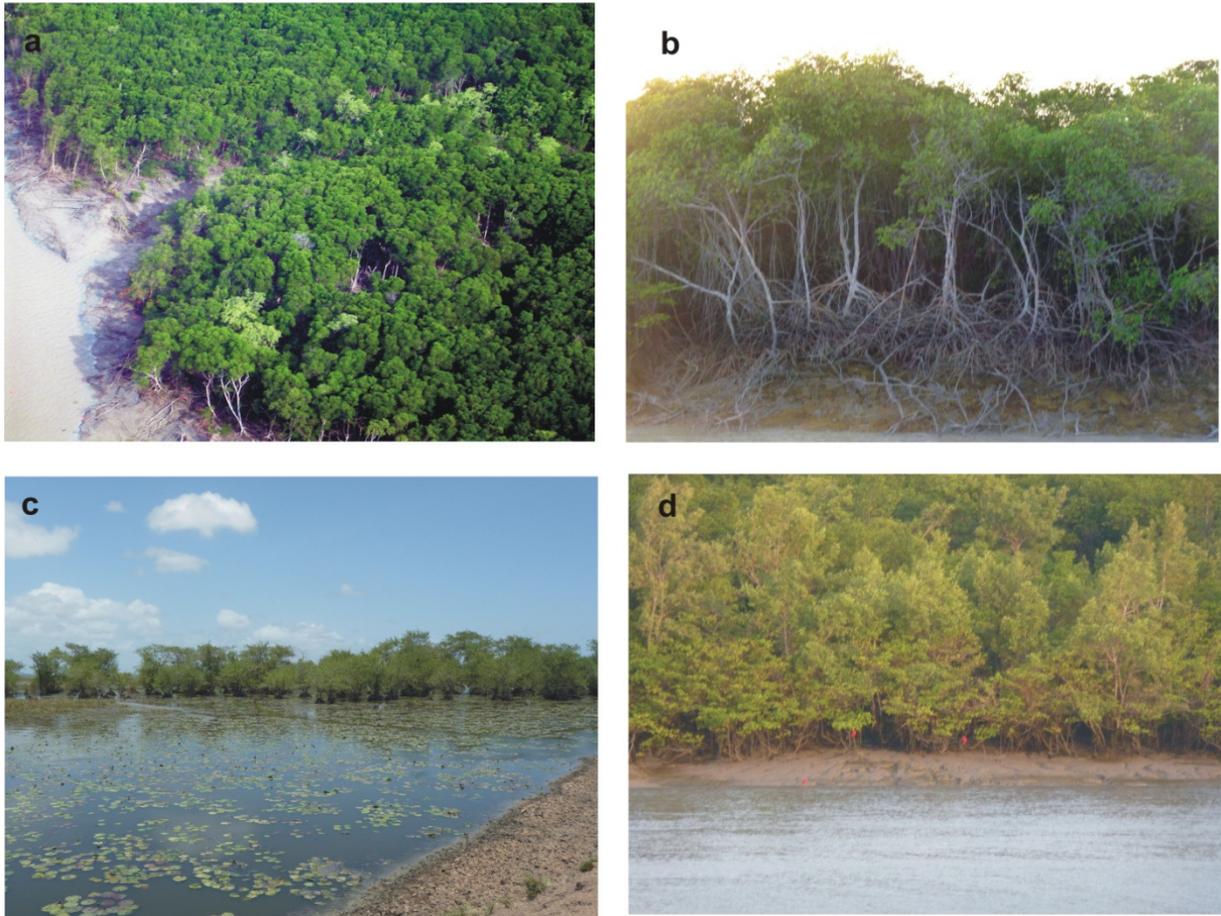


Figura 2.7: Espécies mais comuns nos manguezais maranhenses: a) Vista oblíqua da vegetação de mangue do tipo *Rhizophora mangle*; b) Detalhe da vegetação do tipo *Rhizophora mangle*; c) Aspecto geral da espécie *Laguncularia racemosa* e d) Detalhe da espécie *Avicennia nítida*.

2.6 – TOPOGRAFIA DOS ECOSISTEMAS

O contraste topográfico entre os manguezais e os campos inundáveis pode ser visto na Figura 2.8, que mostra o modelo digital de superfície da região da Ilha dos Caranguejos, com o perfil topográfico ressaltando a diferença de cota topográfica dos dosséis da floresta de mangue que alcançam cotas em torno de 30 m e as áreas de campos inundáveis que estão em cotas de aproximadamente 6m.

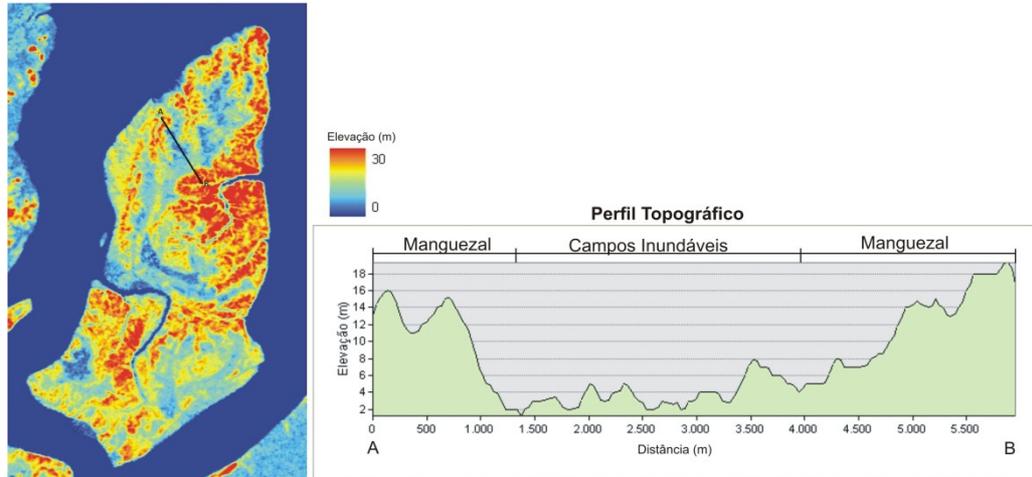


Figura 2.8 – Modelo digital de superfície (originado dos dados da SRTM), com perfil topográfico da Ilha dos Caranguejos mostrando as diferenças de cota entre os manguezais e os campos inundáveis.

CAPÍTULO 3: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 – ZONAS ÚMIDAS

Existem várias definições para zonas úmidas, no entanto, segundo Wolanski *et al.* (2009), a mais abrangente é a definição proposta na Convenção de Ramsar, que foi um tratado intergovernamental, que ocorreu no Irã, em 1971, e marcou o início das ações nacionais e internacionais para a conservação e o uso sustentável das zonas úmidas e de seus recursos naturais. Segundo este tratado, as zonas úmidas são definidas como “áreas de pântanos, charcos, turfas, várzeas, rios, pantanais, estuários, manguezais e até os recifes de corais, ou seja, áreas cobertas de água de regime natural ou artificial, permanentes ou temporárias, contendo água corrente ou parada, doce, salobra ou salgada, porém a profundidade desta última não deve exceder 6m”.

A convenção também classificou as áreas úmidas de importância mundial, as quais foram chamadas de Sítios Ramsar. Mundialmente são conhecidos 1.556 sítios Ramsar definidos por suas características, biodiversidade e importância estratégica para as populações locais. No Brasil existem oito áreas classificadas como Sítios Ramsar, a saber: Parque Nacional do Pantanal Matogrossense (MT), Estação Ecológica Mamirauá (AM), Ilha do Bananal (TO), Reentrâncias Maranhenses (MA), Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense (MA), Parque Estadual Marinho do Parcel de Manoel Luz (MA), Lagoa do Peixe (RS) e a Reserva Particular do Patrimônio Natural SESC Pantanal (MT).

Como a área de estudo fica situada em um sítio Ramsar, aqui será dada uma maior atenção aos ecossistemas que compõe as zonas úmidas costeiras, no entanto, mais detalhes sobre estas áreas, podem ser encontrados em Tiner (1999).

Segundo Wolanski *et al.* (2009), as zonas úmidas costeiras são ecossistemas encontrados dentro de um gradiente de elevação que varia entre as profundidades marinhas, nas quais a luz penetra e apoia a fotossíntese das plantas bentônicas, até o limite em que o continente deixa de sofrer as influências hidrológicas do mar e passa sofrer influencia dos processos atmosféricos e de água subterrânea. Diversos ecossistemas são reconhecidos dentro deste gradiente hidrológico, entre eles: gramíneas marinhas, planícies de maré, pântanos salinos, pântanos de água doce (palustres) e manguezais.

Na área em estudo, os ecossistemas reconhecidos são as planícies de maré com os pântanos salinos (chamado nesta tese de campos salinos) e os manguezais, além dos pântanos de água doce palustres (em Mochel & Castro 2003, foram chamados de campos pastejados e campos inundáveis, termos adotados nesta tese).

As planícies de maré são partes importantes das zonas úmidas costeiras e são formadas em condições onde os processos de maré dominam sobre os outros processos hidrodinâmicos. Podem ser divididas em três partes de acordo com sua relação ao nível da maré: (1) zona de supramaré, está localizada acima do nível de maré alta de sizígia e é inundada apenas em condições extremas; (2) zona de intermaré está localizada entre o nível de maré alta e maré baixa de sizígia e é inundada periodicamente durante os ciclos de maré, e (3) zona de inframaré fica localizada abaixo do nível de maré baixa e raramente é exposta (Gao 2009).

As planícies de maré são caracterizadas por uma sequência granodecrescente ascendente, o que reflete em um decréscimo de energia da zona de inframaré para a zona de supramaré, o que leva a um zoneamento vertical na sedimentação, na qual o material arenoso tende a se acumular na parte inferior da planície, enquanto que materiais lamosos depositam-se na parte superior da planície (Darlymple 1992). Este zoneamento reflete em uma distribuição espacial dos sedimentos na planície de maré e o padrão de distribuição geral, ao longo de um perfil da zona de supramaré à zona de inframaré: pântanos salinos, planície lamosa, planície mista e planície arenosa (Figura 3.1). Nos pântanos salinos, ocorre a deposição do material mais fino, com a presença de matéria orgânica derivada das plantas e organismos dos pântanos, que são tolerantes a presença de água doce e também a certo grau de salinidade (Boorman 2009). A planície lamosa é coberta com argila e silte e é geralmente localizada entre os níveis de maré alta de sizígia e quadratura. As planícies mistas são próximas ao nível do mar, onde as areias são depositadas durante as marés de sizígia e as lamas são depositadas durante as marés de quadratura. Sobre as partes mais baixas da planície de maré depositam-se areias bem selecionadas, formando a planície arenosa (Gao 2009).

Os manguezais ocorrem entre o nível de maré alta e o nível médio do mar (Figura 3.1), os quais são caracterizados por zonas de espécies que geralmente apresentam um padrão perpendicular a linha de costa, as quais refletem um forte padrão espacial na frequência de inundação, “inputs” sedimentares e de nutrientes, salinidade e processos biológicos. Estes processos são dependentes do substrato geomorfológico, expressado na microtopografia em relação a posição do nível do mar e a amplitude de maré (Ellison 2009).

Conforme Damásio (1980), a planície de maré da costa maranhense apresenta estes ecossistemas bem marcados, pela colonização das seguintes espécies vegetais: nas porções baixas, de declive acentuado ocorrem a *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia nítida*, *Rhizophora* sp., *Heleocharis geniculata*, *Hibiscus tiliaceus*, *Mandevila* sp. e *Acrostichum aureum*. As regiões baixas de declive moderado são colonizadas por *Spartina*

brasiliensis, *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora*, *Avicennia nítida*, *Heleocharis geniculata* e *Acrostichum aureum* (Figura 3.1).

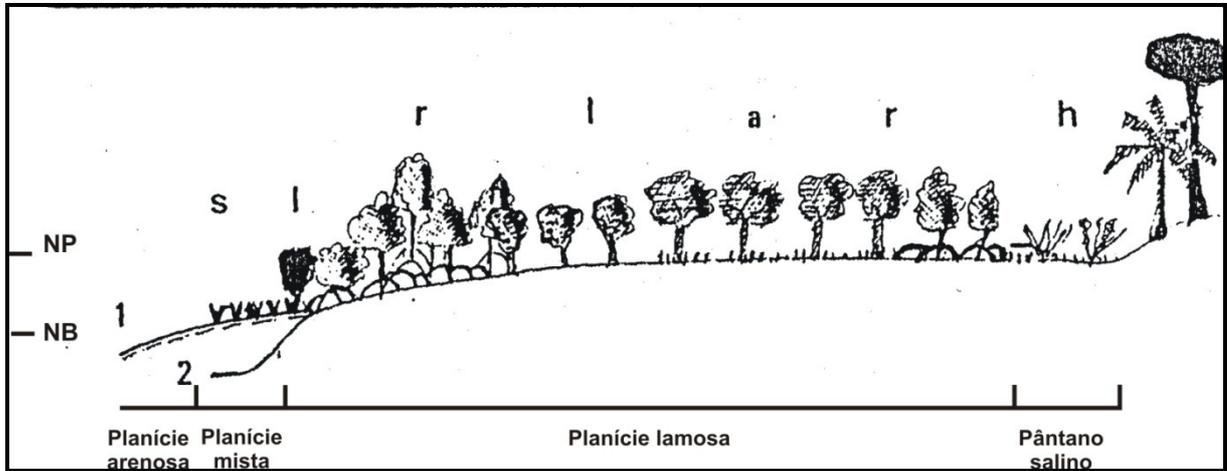


Figura 3.1: Zonamento da planície de maré da costa maranhense. **NP:** Nível de preamar, **NB:** Nível de baixamar. **1:** Região de declive moderado colonizada por *Spartina brasiliensis* e *Laguncularia racemosa*. **2:** Região de declive acentuado colonizada por *Rhizophora* spp. **a:** *Avicennia nítida* – **h:** *Heleocharis geniculata* e *Acrostichum aureum* – **l:** *Laguncularia racemosa* – **r:** *Rhizophora* spp. – **s:** Spartines. Fonte: Damásio (1980).

Os pântanos de água doce localizam-se acima do nível da maré de sizígia e são influenciados sazonalmente pelas inundações dos rios e pela precipitação, podendo ou não formar lagos (Tiner 1999).

3.2 – O SISTEMA DE IMAGEAMENTO COM RADAR

O termo RADAR (*Radio Detection and Ranging*) refere-se a um dispositivo sensor capaz de detectar informações dos alvos através da indicação da sua posição e distância (Sabins 1996). Um radar imageador é considerado um sistema ativo, pois possui sua própria fonte de energia para obter uma imagem. Desta forma, os radares podem operar tanto de dia quanto à noite. Um radar de imageamento transmite e recebe pulsos, situados na faixa das micro-ondas, entre as bandas P e K, a intervalos regulares e confinados a curto intervalo de tempo. Os pulsos são transmitidos através de uma antena e atingem a superfície do terreno, e a interação faz com que a energia seja espalhada em várias direções. Uma parcela desta é espalhada em direção ao próprio sensor, o que é chamado de retroespalhamento (“*backscattering*”) e é recuperada à medida que o sensor se desloca. A recepção do sinal de retorno pode ser feita utilizando-se a mesma antena emissora (sistemas monoestáticos) ou

uma segunda antena (sistemas biestáticos), onde o sistema computa a intensidade (detecção) e o tempo (alcance) dos sinais retroespalhados (Raney 1998).

Um radar de abertura sintética utiliza o efeito *Doppler*, que simula uma antena virtual longa, através do deslocamento de uma antena fisicamente curta, ao longo da direção de voo da plataforma. As posições sucessivas da antena são tratadas eletronicamente como se fossem elementos de uma única antena longa, assim derivando o termo abertura sintética. Os objetos são discriminados a partir das modificações na frequência (inverso do comprimento de onda) dos sinais em função do movimento relativo entre os objetos no terreno e a plataforma. A informação de frequência *Doppler* é obtida pela comparação eletrônica do sinal refletido pelo objeto com o sinal de referência do pulso emitido. Os dados brutos são transformados em imagem, sendo que o feixe sintético tem largura constante, fazendo com que a resolução azimutal seja constante (Raney 1998).

Para um melhor entendimento da geometria de voo de um SAR, a Figura 3.2 ilustra os principais elementos que descrevem a configuração de um sistema SAR operando em uma plataforma móvel. Esta plataforma pode ser uma aeronave, satélite ou ônibus espacial e situa-se a uma altura da superfície terrestre, que consiste na sua altitude. A direção de voo é chamada de azimute e a antena é posicionada perpendicularmente a direção de voo, e é chamada de direção de alcance (*range*). A largura da área imageada recebe o nome de faixa imageada (“*swath*”) e é a distância entre o alcance próximo (“*near range*” - extremidade da imagem mais próxima da antena do radar, ou do sinal transmitido pela antena) e o alcance distante (“*far range*” - extremidade da imagem mais distante do sinal transmitido pela antena). A direção do feixe incidente forma com a normal à superfície, o ângulo de incidência θ , medido no alvo. O eixo radial ou linha de visada do radar é denominado de alcance inclinado (“*slant-range*”), enquanto que a área coberta pelo feixe da antena na superfície do terreno é referida como área de iluminação da antena (“*antena footprint*”) (Lee Potier 2009).

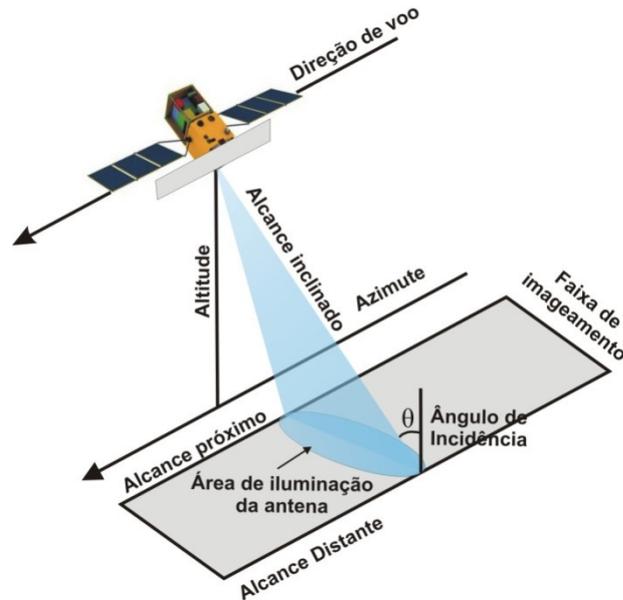


Figura 3.2: Geometria de imageamento por radar baseado em Lee Potier (2009).

Para a interpretação de imagens de radar, deve-se ter um entendimento da interação entre a energia incidente e a superfície imageada. Este entendimento tem como base principal o retroespalhamento, cuja intensidade é determinada pelos parâmetros do sistema de radar (comprimento de onda ou frequência, polarização da energia utilizada, ângulo de incidência, direção de visada e resolução) e parâmetros da superfície (rugosidade da superfície, constante dielétrica – teor de umidade e inclinação e orientação) (Lewis & Henderson 1998).

A relação entre os parâmetros do sistema de radar, do alvo, e do sinal que é transmitido pela antena (que interage com o alvo e novamente retorna para a antena), pode ser resumida através da equação de radar (Equação 3.1) (Ulaby *et al.* 1986, Lewis & Henderson 1998):

$$Pr = \frac{PtG^2\lambda^2}{(4\pi)^3R^4}\sigma A \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde os termos da equação são descritos como: Pr - potência do sinal recebido que é diretamente proporcional à potência do sinal transmitido (Pt); ao ganho da antena (G); ao comprimento de onda do radar (λ); a seção cruzada de radar (σ); à área efetiva da abertura da antena (A) e a $1/4\pi^3R^4$, onde R é distância em *range* entre o radar e o alvo, considerando a transmissão e a recepção da energia de forma isotrópica. A seção cruzada de radar está diretamente relacionada aos parâmetros dos alvos, enquanto que os demais termos da equação do radar se relacionam com os parâmetros do sensor (Ulaby *et al.* 1986).

Como a maior parte das aplicações envolve alvos extensos, usualmente maiores que uma célula de resolução, define-se uma seção transversal cruzada diferencial média ou seção cruzada por unidade de área e considera a intensidade média do retorno. Esta seção cruzada diferencial média é conhecida por coeficiente de retroespalhamento e comumente chamada de σ° (Ulaby *et al.* 1986).

3.2.1 – Parâmetros do Sistema Sensor

3.2.1.1 – Comprimento de onda

O comprimento de onda e a frequência estão inter-relacionados como pode ser visto na Equação 3.2 (Lewis & Henderson 1998):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz e f é a frequência (Hz).

Segundo Paradella (1996), as bandas frequentemente utilizadas por radares imageadores são X, C, S, L e P, cujas características podem ser vista na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Comprimento de onda e frequência das bandas utilizadas nos radares imageadores.

| Bandas | Comprimento de Onda (cm) | Frequência |
|--------|--------------------------|---------------|
| X | 2,4 a 3,8 | 12,5 a 8 GHz |
| C | 3,8 a 7,5 | 8 a 4 GHz |
| S | 7,5 a 15 | 4 a 2 GHz |
| L | 15 a 30 | 2 a 1 GHz |
| P | 75 a 133 | 225 a 400 MHz |

Entre estas bandas, as mais aplicadas nos estudos de zonas úmidas são as bandas X, C e L. As bandas C e L também têm sido amplamente utilizadas, devido a uma maior disponibilidade de sensores orbitais com estas configurações, tais como o RADARSAT-1,2, ERS-1,2, ENVISAT, e SIR-C em banda C; e JERS-1 e ALOS-PALSAR em banda L.

O comprimento de onda é uma variável importante porque controla o coeficiente de retroespalhamento e a profundidade de penetração.

A capacidade de penetrar através da precipitação e em uma camada de superfície aumenta para comprimentos da onda maiores. Os radares que operam em comprimento de

onda superior a 2 cm não são afetados de forma significativa pela cobertura de nuvens, no entanto, a chuva representa um fator importante em comprimentos de onda inferiores a 4 cm (Paradella 1996).

A aparência da vegetação, superfície do solo e água, áreas abaixo dos dosséis das florestas e características de sub-superfície variam em função do comprimento de onda (Lewis & Henderson 1998).

A penetração das micro-ondas na vegetação é maior para os maiores comprimento de onda. Desta forma, os comprimentos de onda menores possibilitam obter informações acerca das camadas superiores da vegetação (dossel), pois interagem com as menores partes, como folhas e galhos, enquanto os maiores permitem obter informações das camadas inferiores (caules e troncos) e da superfície do terreno. Neste caso, porém, não é somente isso que influencia, mas também o grau de umidade existente, a densidade da vegetação e o ângulo de incidência da radiação eletromagnética (Ulaby *et al.* 1986).

3.2.1.2 – Polarização

A polarização se refere à orientação do campo elétrico utilizado. As antenas de um sistema radar podem ser configuradas para transmitir e receber a radiação eletromagnética polarizada horizontal ou verticalmente. A polarização é definida como paralela quando as energias transmitida e recebida são polarizadas na mesma direção. HH indica energias transmitida e recebida horizontalmente; VV energias transmitida e recebida verticalmente. A polarização é definida como cruzada quando as energias transmitida e recebida são polarizadas na direção ortogonal (HV, VH) (Raney 1998). A Figura 3.3 representa esquematicamente as direções de propagação do campo elétrico.

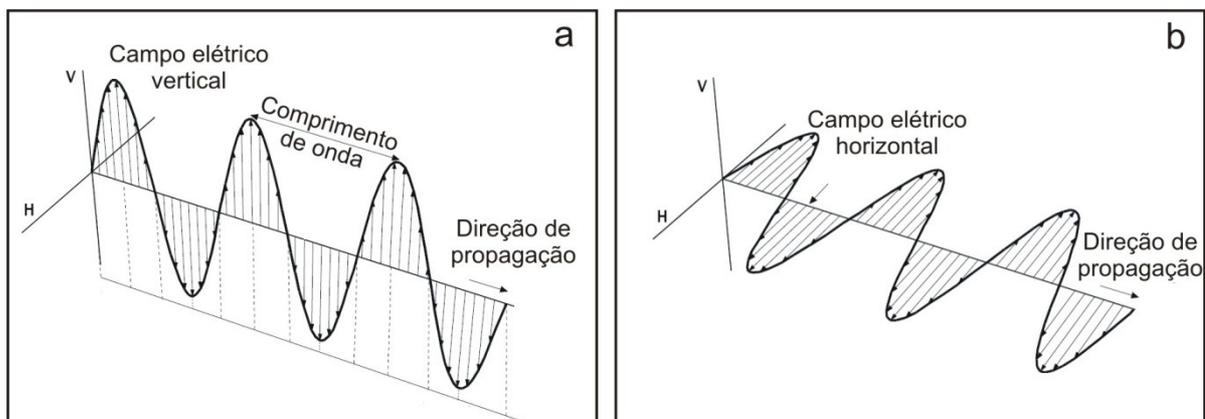


Figura 3.3: Direções de propagação do campo elétrico: **a** – polarização vertical e **b** – polarização horizontal. Fonte: Modificado de Van der Sanden (1997).

Quando a onda de radar incide em uma superfície e é refletida, a polarização pode ser modificada, segundo as propriedades da superfície. Tal modificação afeta o modo como o alvo aparece nas imagens polarimétricas de radar. Assim, as imagens de radar registram não só a intensidade da energia retroespalhada pela superfície, como também sua capacidade de alterar a polarização da radiação, para isso é necessário considerar a informação da diferença de fase (Novo 2006).

Segundo Ulaby *et al.* (2006), a profundidade de penetração da radiação também é influenciada pela polarização, levando em consideração um comprimento de onda fixo. No imageamento de uma área de floresta, quando as folhas se comportam como pequenos espalhadores verticais a onda polarizada horizontalmente tenderá a não interagir com o dossel, e apresentará uma maior profundidade de penetração podendo interagir com o substrato. Em se tratando de uma imagem polarizada verticalmente, haverá uma forte interação da radiação com o dossel, havendo maior atenuação da radiação pela vegetação e conseqüente redução de sua profundidade de penetração. Assim, o sinal de retorno para antena representará o retroespalhamento produzido predominantemente pelo dossel.

Em zonas úmidas diversos trabalhos mostram a aplicação de dados de multi-polarização. De acordo com os trabalhos de Bourgeau-Chavez *et al.* (1996), Kasischke & Bourgeau-Chavez (1997), imagens da banda C e polarização VV são capazes de detectar e monitorar zonas úmidas, com vegetação herbácea e florestas espaçadas. Hess *et al.* (1995), Wang *et al.* (1995), Bourgeau-Chavez *et al.* (2001) mostraram que a banda L-HH é a melhor banda para separar florestas inundadas das não inundadas. Bourgeau-Chavez *et al.* (2001) concluíram que a banda L-HV é capaz de discriminar áreas de florestas de vegetação herbácea, e a banda C-HH para discriminar áreas de agricultura de áreas com vegetação herbácea no estágio inicial de crescimento. Estudos realizados por Proisy *et al.* (1996), nas florestas de manguezais da Guiana Francesa, mostraram que as polarizações cruzadas (P-HV, L-HV e C-HV) apresentaram os melhores resultados na identificação de parâmetros estruturais de manguezais (diâmetro, altura, densidade das árvores e área basal). No entanto, estes autores confirmaram que a melhor estimativa da altura das árvores é obtida pela polarização P-VV.

3.2.1.3 – Ângulo de Incidência

O ângulo de incidência (θ) é o ângulo entre a direção de iluminação do radar e a normal à superfície do solo (Figura 3.4). O ângulo de incidência varia entre o alcance próximo

e o alcance distante, dependendo da altura da trajetória do radar. Essa mudança de ângulo afeta a geometria de visada. O ângulo de incidência local (α) é um termo que leva em consideração o declive local do terreno em qualquer ponto da imagem. Este ângulo determina parcialmente o brilho ou a tonalidade de cada *pixel*. Desta maneira, a declividade do local pode produzir um efeito significativo sobre o brilho da imagem. Quando o ângulo de incidência diminui e a declividade do terreno permanece constante existe uma correspondência com o ângulo de incidência local, que também diminui. Em superfícies planas, o retroespalhamento e o ângulo de incidência são inversamente proporcionais. Em áreas com topografia acentuada, o decréscimo no retroespalhamento é menor com o aumento do ângulo de incidência (Lewis & Henderson 1998, CCRS 2001).

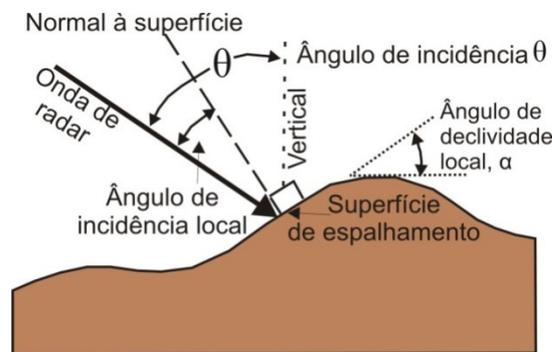


Figura 3.4: Desenho esquemático do ângulo de incidência e ângulo de incidência local. Modificado de Lewis & Henderson (1998).

Singhroy & Saint-Jean (1999) propuseram um guia para a seleção do ângulo de incidência do RADARSAT-1 em aplicações geológicas, de acordo com o tipo de terreno investigado. Para terrenos montanhosos, ângulos de incidência variando entre 40-59° são capazes de mapear aspectos estruturais e geomorfológicos; ângulos de incidência entre 20-35° realçam terrenos de relevo moderado; e uma ampla faixa de ângulos de incidência de 25-45°, é indicada para terrenos planos (Figura 3.5).

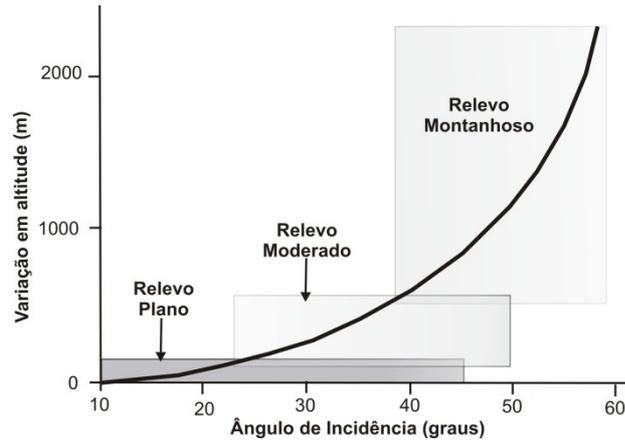


Figura 3.5: Relação entre tipo de terreno imageado e ângulo de incidência Modificado de Singhroy & Saint-Jean (1999).

O coeficiente de retroespalhamento é fortemente influenciado pelo ângulo de incidência. Diferentes superfícies podem ter seu sinal diferenciado em função do comportamento angular do retroespalhamento (Wang *et al.* 1995, Lang *et al.* 2008). No caso de florestas inundadas, a influência do ângulo de incidência no restroespalhamento varia de acordo com a estrutura da floresta (ex. área basal, altura do dossel, profundidade do dossel e qualidade dos galhos) e características do terreno, incluindo rugosidade da superfície, umidade do solo, e a presença ou ausência de água. A energia de micro-ondas transmitida em ângulos de incidência maiores determina uma menor capacidade de penetração, logo a energia é espalhada no interior do dossel, aumentando a habilidade do radar em estimar as características do dossel. No entanto, a energia transmitida em pequenos ângulos de incidência faz uma trajetória menor, através do dossel, aumentando a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície (Lang *et al.* 2008).

3.2.1.4 – Direção de Visada

A direção de visada é definida como o ângulo entre o norte geográfico e a direção do feixe de iluminação do radar em sentido horário, ou seja, perpendicular à direção de movimento da plataforma (Lewis & Henderson 1998).

Em geral a direção de visada tem um impacto significativo na interpretação das feições em uma imagem. O nível de realce ou supressão de feições lineares nas imagens depende principalmente, da sua orientação relativa a uma dada direção de visada da iluminação do radar. Geralmente feições que posicionam em uma direção ortogonal à direção de visada são muito mais realçadas, havendo um aumento no coeficiente de

retroespalhamento. Ao contrário quando as feições lineares estão orientadas paralelamente à iluminação, há uma menor interação entre elas e a radiação incidente, havendo conseqüentemente uma redução no coeficiente de retroespalhamento (Jensen 2009).

Em sistemas de visada fixa, como é o caso do sistema RADARSAT-1, pode-se adquirir duas direções de visada, utilizando-se as passagens de órbita ascendente (visada para leste) e descendente (visada para oeste), como ilustrado na Figura 3.6.

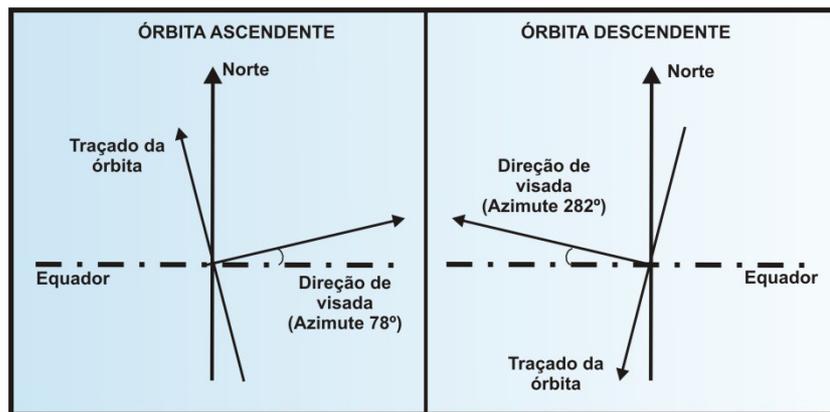
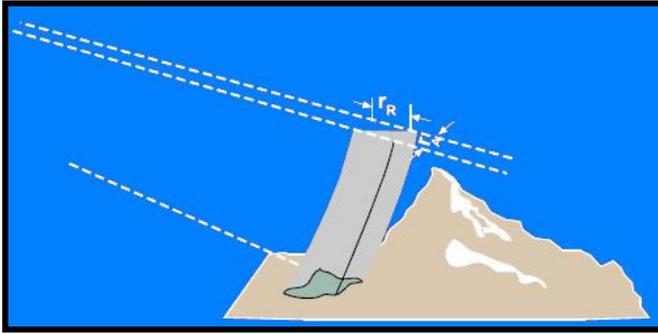


Figura 3.6: Direções de visada do sistema RADARSAT. Modificado de Silva & Souza Filho (2011)

3.2.1.5 – Resolução

Uma outra característica importante na determinação do conteúdo da informação de um sistema SAR é a resolução. A resolução é a distância mínima que descreve a capacidade do radar em distinguir refletores posicionados em intervalos pequenos (Raney 1998). No sistema SAR, a resolução espacial é medida nas direções de azimute e alcance e é controlada pelas características do sistema radar e do sensor (Figura 3.7).

A resolução em alcance (“*range*”) de um SAR é medida ao longo da direção de iluminação do radar e é proporcional ao comprimento do pulso processado. Quanto menor o comprimento do pulso, mais detalhada é a resolução em *range*. Os dados de radar são gerados no domínio do alcance inclinado (“*slant-range*”), mas normalmente são projetados sobre o plano do alcance no terreno (“*ground-range*”) quando processados em uma imagem. A resolução em azimute em um sistema SAR é dada pelo comprimento da antena dividido por dois (Lewis & Henderson 1998).



Onde:

Γ_R - resolução em alcance;

Γ_A - resolução em azimute.

Figura 3.7: Célula de resolução, a qual é tridimensional no espaço iluminado. Fonte: CCRS (2001) modificado de Raney (1998).

3.2.2 – Parâmetros da Superfície

3.2.2.1–Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial é a propriedade da superfície que influencia fortemente a intensidade do retroespalhamento, normalmente definida em termos das variações estatísticas da altura e extensão das irregularidades da superfície. Segundo Lewis & Henderson (1998), as características das diferentes escalas de rugosidade devem ser consideradas. Para estes autores, existem três escalas de rugosidade, que podem ser consideradas quando se trata de interpretação a partir de dados de radar: rugosidade de macroescala, mesoescala e microescala. A rugosidade de macroescala é controlada pelas mudanças na macrotopografia (vales, serras, morros e todas as grandes ondulações no terreno) e está relacionada às estruturas e a geomorfologia (padrões de macrot textura muitas vezes maiores que a célula de resolução). A rugosidade de mesoescala ou textura está relacionada com mudanças na elevação da superfície e na variabilidade da declividade em relação a resolução espacial do sistema. Em uma superfície vegetada. A textura do radar está relacionada com a estrutura do dossel da vegetação e do tamanho relativo da célula de resolução. E por fim a rugosidade de microescala é a rugosidade na escala das frações do comprimento de onda e determina fortemente a tonalidade da imagem. Em um terreno vegetado, parâmetros das folhas (número, tamanho, área, etc.) são os principais controles dos tons da imagem. Se a área não é completamente coberta por vegetação, a rugosidade do terreno (rochas, solos, etc.) irá contribuir para a rugosidade de microescala. Para áreas vegetadas, esta é a rugosidade do dossel da vegetação, em uma escala maior que a resolução espacial da célula.

Segundo Lewis & Henderson (1998), existem diversos níveis de aproximação que caracterizam a sensibilidade do radar à microrugosidade da superfície, entre eles o proposto por Peake & Oliver (1971), que supõe que as irregularidades da superfície são expressas em

função das variações de altura da superfície pelo erro quadrático médio das variações verticais do terreno (H_{RMS}), pelo comprimento de onda (λ) e pelo o ângulo de incidência (θ). De acordo com estes autores, a rugosidade superficial pode ser classificada em três categorias:

Lisa: $H_{RMS} < \lambda / 25 \cos \theta$;

Intermediária: $\lambda / 4 \cos \theta < H_{RMS} < \lambda / 25 \cos \theta$;

Rugosa: $H_{RMS} > \lambda / 4 \cos \theta$.

Superfícies horizontais lisas refletem quase toda energia incidente na direção oposta ao radar, fenômeno este chamado de reflexão especular, no qual essencialmente nenhuma radiação é retroespalhada. Estas superfícies aparecem com tons de cinza mais escuros nas imagens de radar (Figura 3.8a). A radiação incidente sobre superfícies de rugosidade intermediária é refletida de uma forma mais difusa, entretanto não homogênea e deve produzir uma resposta em um tom de cinza médio (Figura 3.8b). A radiação de micro-ondas que incide em uma superfície rugosa apresenta um espalhamento em todas as direções, incluindo na direção do radar (retroespalhamento), recebendo o nome de reflexão difusa (Figura 3.8c). As superfícies rugosas aparecem com tons de cinza mais claros nas imagens de radar Lewis & Henderson (1998).

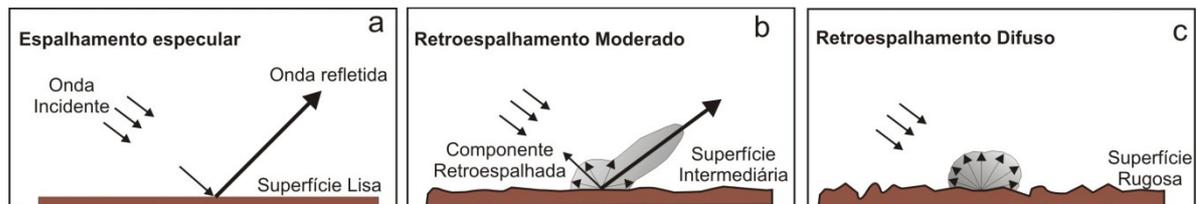


Figura 3.8: Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal: **a** - superfície lisa; **b** - superfície intermediária e **c** - superfície rugosa. Fonte: Modificado de Lewis & Henderson (1998).

Dado um comprimento de onda, uma determinada superfície parece mais rugosa à medida que o ângulo de incidência aumenta. Como pode ser observado na Figura 3.9, pequenas mudanças no ângulo de incidência, menores que 20° a 25° resultam em mudanças relativamente grandes na intensidade do retorno (NASA¹ *apud* Lewis & Henderson 1998).

¹ NASA. 1988. *SAR Synthetic Aperture Radar: Instrument panel report*. Washington, D.C., (Earth Observing System, v.2).

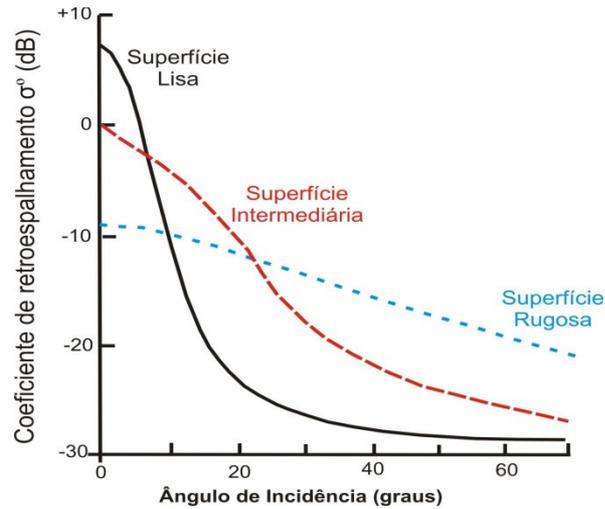


Figura 3.9: Curvas típicas de retroespalhamento para superfícies lisas, moderadamente rugosas e muito rugosas. Fonte: Modificado de NASA¹ *apud* Lewis & Henderson, 1998).

3.2.2.2 – Constante dielétrica e teor de umidade

A constante dielétrica é uma medida das propriedades elétricas dos materiais, incluindo a capacidade de absorver, refletir e transmitir a radiação das micro-ondas em resposta a um sinal incidente. Na região das micro-ondas, a constante dielétrica varia de 3 a 8 na maioria dos materiais naturais, quando secos; e a água tem uma constante dielétrica de aproximadamente 80. Assim, a presença de umidade aumenta a constante dielétrica do material, afetando o modo como esse material aparece numa imagem de radar. Materiais idênticos podem variar na aparência em momentos ou locais diferentes, de acordo com o teor de umidade. O retroespalhamento e, conseqüentemente, o brilho da imagem, em áreas com vegetação e superfícies naturais, aumenta com o aumento do seu teor de umidade, pois em terrenos que apresentam um teor de umidade maior há uma redução da penetração das micro-ondas abaixo da superfície e através do dossel da vegetação (Lewis & Henderson 1998).

3.3 – INTERAÇÕES DA RADIAÇÃO DAS MICRO-ONDAS COM AS ZONAS ÚMIDAS

O entendimento da capacidade de dados SAR em detectar, mapear e monitorar ecossistemas em zonas úmidas requer um conhecimento básico do espalhamento de micro-ondas a partir de superfícies vegetadas (Bourgeau-Chavez *et al.* 2005).

Em zonas úmidas costeiras tropicais, em geral existem dois diferentes tipos estruturais de vegetação, no caso a floresta arbustiva que inclui os manguezais e a vegetação herbácea de pequeno porte, que inclui os diferentes tipos de pântanos.

As interações das micro-ondas com estas diferentes estruturas de vegetação e a quantidade de energia que retorna em direção ao sensor vão depender como visto anteriormente, das características do sensor utilizado e das condições ambientais no momento da aquisição. A seguir são apresentados modelos de interação da energia de micro-ondas, com as florestas e com as vegetações herbáceas.

3.3.1 –Interação da energia das micro-ondas com as florestas

Um modelo simples pode ser usado para descrever as interações da energia das micro-ondas com os diferentes elementos das florestas. Em geral, o coeficiente de retroespalhamento total de uma floresta (Equação 3.3) pode ser expresso como uma interação entre o espalhamento direto e atenuação da energia das micro-ondas pelas três camadas que compõem uma floresta: o dossel, o tronco e a superfície (Figura 3.10) (Kasischke & Bourgeau-Chavez 1997, Townsend 2002 e Lang *et al.* 2008).

$$\sigma^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 \tau_t^2 (\sigma_t^0 + \sigma_s^0 + \sigma_d^0 + \sigma_m^0) \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

- σ_c^0 - Coeficiente de retroespalhamento do dossel constituído de galhos menores e folhas (ex. espalhamento de volume);
- τ_c - Transmissividade do dossel da vegetação;
- τ_t - Transmissividade da camada de troncos;
- σ_t^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto dos troncos das árvores;
- σ_s^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo;
- σ_d^0 - Coeficiente de retroespalhamento da dupla-reflexão (*double –bounce*) entre os troncos e a superfície do solo;
- σ_m^0 - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e o dossel.

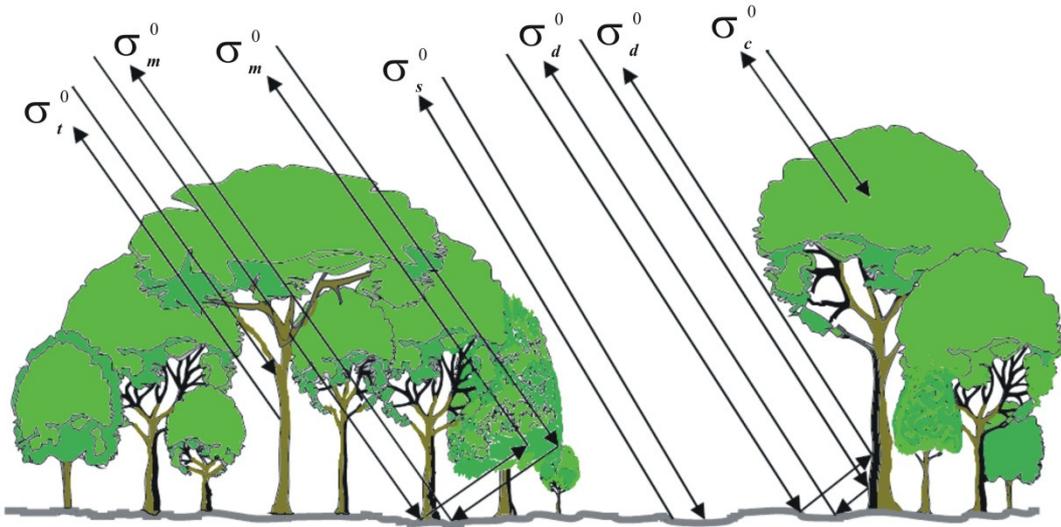


Figura 3.10: Principais fontes de espalhamento de uma floresta, onde: σ_c^0 - Coeficiente de retroespalhamento do dossel; σ_t^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto dos troncos das árvores; σ_s^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo; σ_d^0 - Coeficiente de retroespalhamento da dupla-reflexão (*double-bounce*) entre os troncos e a superfície do solo; σ_m^0 - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e o dossel. Modificado de Kasischke & Bourgeau-Chavez (1997) e Van der Sanden (1997).

Para a banda C que possui um pequeno comprimento de onda, a interação irá ocorrer com as pequenas partes do dossel (galhos e folhas), logo o coeficiente de retroespalhamento total será influenciado principalmente pelo retroespalhamento do dossel. A interação maior com o dossel, também ocorre quando a energia de micro-ondas é transmitida em grandes ângulos de incidência, o que diminui a transmissividade na copa das árvores (Lang *et al.* 2008).

Em florestas inundadas o espalhamento “*double-bounce*” e pelas múltiplas reflexões podem ter um efeito considerável no valor total do coeficiente de retroespalhamento, quando a transmissividade do dossel e dos troncos é suficientemente alta. Esta situação pode ocorrer quando a energia incidente possui um comprimento de onda maior como é o caso da banda L, que é capaz de atravessar a estrutura do dossel (Ormsby *et al.* 1985). E também, a energia transmitida em pequenos ângulos de incidência faz uma rota menor, através do dossel, aumentando a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície (Lang *et al.* 2008).

Além disso, a inundação também elimina o espalhamento de superfície. Devido ao aumento do coeficiente de retroespalhamento total, causado pela inundação, florestas inundadas geralmente tem um coeficiente de retroespalhamento total maior do que as florestas não inundadas. Nas florestas não inundadas, uma elevação na umidade do solo aumenta o coeficiente de retroespalhamento de superfície e o de múltiplas reflexões. Entretanto, o aumento no espalhamento “*double-bounce*” e nas múltiplas reflexões que a inundação causa é muito maior que o aumento causado pela umidade do solo (Wang *et al.* 1995). O aumento nos índices de área foliar nos dosséis, durante os meses chuvosos, diminui a transmissividade da copa das árvores, logo, a quantidade de energia de micro-ondas que alcança a superfície da floresta diminui. Consequentemente, um aumento na folhagem deve reduzir a habilidade de detectar florestas inundadas usando dados SAR (Lang *et al.* 2008).

3.3.2 – Interação da energia das micro-ondas com a vegetação herbácea

Para as áreas com vegetação herbácea um modelo simples de duas camadas pode ser usado (Equação 3.4): uma camada constituída pelo dossel, que é a própria vegetação herbácea e a superfície do solo (Figura 3.11) (Kasischke & Bourgeau-Chavez 1997).

$$\sigma^0 = \sigma_c^0 + \tau_c^2 (\sigma_s^0 + \sigma_m^0) \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

σ_c^0 - Coeficiente de retroespalhamento do dossel constituído pela vegetação herbácea;

τ_c - Transmissividade do dossel da vegetação;

σ_s^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo;

σ_m^0 - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e a vegetação.

A interação da energia de micro-ondas com vegetação herbácea, em solo seco, gera espalhamentos múltiplos, a partir das interações da energia com a vegetação e a superfície do terreno, causando um baixo retorno de sinal. Com o aumento da umidade do solo ocorre o realce do retroespalhamento devido a um incremento na constante dielétrica e um possível espalhamento “*double bounce*”, em função da interação da vegetação herbácea com o terreno. No caso da superfície do terreno com vegetação inundada, toda energia incidente é refletida na direção oposta ao sensor (espalhamento especular) e o retroespalhamento é tipicamente menor do que no caso de solo seco (Bourgeau-Chavez *et al.* 2005).

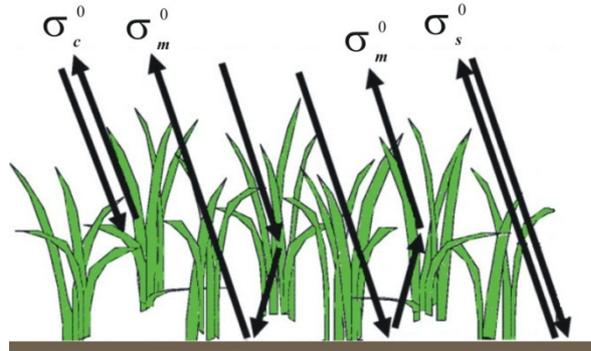


Figura 3.11: Principais fontes de espalhamento de uma vegetação herbácea, onde: σ_c^0 - Coeficiente de retroespalhamento da vegetação herbácea; σ_s^0 - Coeficiente de retroespalhamento direto da superfície do solo; σ_m^0 - Espalhamento por múltiplas reflexões entre a superfície do solo e a vegetação. Modificado de Kasischke & Bourgeau-Chavez (1997) e Oh *et al.* (2009).

CAPÍTULO 4: INFLUÊNCIA DAS CONDICIONANTES AMBIENTAIS NO RETRO-ESPALHAMENTO MULTITEMPORAL DE IMAGENS RADARSAT-1

4.1 - INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento tecnológico e o advento do sistema SAR (radar de abertura sintética), novas técnicas de reconhecimento e mapeamento de zonas úmidas costeiras têm sido desenvolvidas, propiciando um avanço no monitoramento e cartografia deste ecossistema (Proisy *et al.* 2000, Parmuchi *et al.* 2002, Proisy *et al.* 2002, Townsend 2002, Li *et al.* 2007; Lucas *et al.* 2007, Lang & Kasischke 2008, Lang *et al.* 2008, Mougin *et al.* 2009)

Diversos estudos investigam as relações diretas entre as variáveis do sistema sensor (comprimento de onda, polarização e ângulo de incidência) e as variáveis do alvo (tamanho, forma geométrica, densidade, rugosidade da superfície e constante dielétrica) (Pope *et al.* 1997, Proisy *et al.* 2000, Parmuchi *et al.* 2002, Li *et al.* 2007, Lucas *et al.* 2007, Lang *et al.* 2008, Mougin *et al.* 2009).

Bourgeau-Chavez *et al.* (2005) consideram que para o monitoramento de zonas úmidas, as características envolvidas no processo de imageamento podem ser agrupadas em três tipos: estrutura da vegetação, rugosidade superficial do terreno e a presença ou ausência de água. Em zonas úmidas com diferentes tipos estruturais de vegetação, o espalhamento do sinal de radar é afetado diferentemente. Para as áreas com floresta arbustiva, existem duas camadas de vegetação que devem ser consideradas: o dossel, que consiste de pequenos galhos e folhagem; e o tronco que consiste de galhos maiores e o tronco propriamente dito. A radiação de micro-ondas quando entra em contato com estas características terá dois tipos distintos de interação: o espalhamento direto e a absorção ou atenuação da energia (Bourgeau-Chavez *et al.* 2005). Outra característica importante que deve ser considerada é a constante dielétrica, que é um número complexo que descreve como a superfície atenua ou transmite a radiação de micro-ondas, pois quanto menor a constante dielétrica maior a transmissão de energia de micro-ondas, que possui uma relação direta com o teor de umidade do sistema (Lewis & Henderson 1998).

A rugosidade superficial do terreno é um fator importante no retorno do sinal, quando esta aumenta também aumenta o coeficiente de retroespalhamento. Quando uma superfície rugosa está úmida o retorno do sinal é maior do que quando a superfície está seca. Quando a

superfície está inundada, a rugosidade superficial é eliminada e a energia é espalhada na direção oposta ao sensor (Kasischke & Bourgeau-Chavez 1997).

Um outro fator que deve ser levado em consideração é o tamanho do comprimento de onda. Segundo Lang *et al.* (2008), na banda C do SAR, onde o comprimento de onda geralmente varia de 5 a 6 cm, o coeficiente total de retroespalhamento é principalmente influenciado pelo espalhamento da copa das árvores, pois há uma interação maior com as menores partes do dossel, como galhos e folhas.

A Figura 4.1 mostra o espalhamento teórico da banda C em zona úmida com vegetação de floresta (arbustiva) e com vegetação herbácea em condições de solo seco, úmido e inundado.

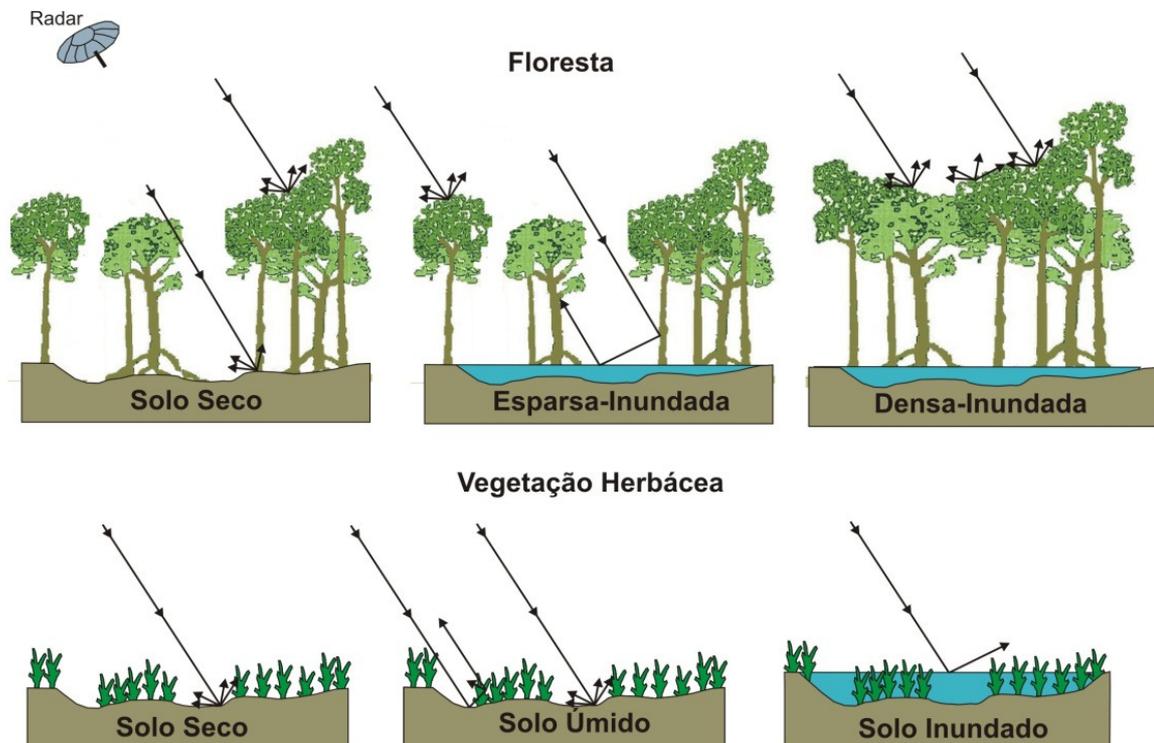


Figura 4.1 – Modelo teórico de espalhamento na banda C para florestas e vegetação herbácea em condições de inundações e não inundações. Adaptado de Bourgeau-Chavez *et al.* (2005).

Para Bourgeau-Chavez *et al.* (2005), em florestas com dosséis densos e úmidos, a energia de micro-ondas incidente é espalhada pelo próprio dossel em várias direções, alcançando as outras partes com uma quantidade de energia menor. No caso de florestas esparsas alguma radiação de micro-ondas penetra através da copa das árvores e interage com a superfície do terreno permitindo a detecção de inundações ou umidade do solo. A transmissividade da copa é influenciada pela variação do índice de área foliar, que varia durante as estações do ano, assim no período chuvoso, onde o índice de área foliar dos dosséis é maior a transmissividade da copa diminui, diminuindo também a quantidade de energia que

alcança a superfície da floresta. Consequentemente, um aumento na folhagem do dossel, deve reduzir a habilidade de detectar florestas inundadas usando dados SAR (Lang *et al.* 2008). Para florestas esparsas com solo seco, a radiação é espalhada em múltiplas direções tanto a partir da copa das árvores como da superfície do terreno. Quando o terreno está inundado a maior parte da energia é espalhada no sentido oposto a partir da superfície lisa e em seguida rebate nos troncos das árvores e retorna em direção ao sensor (espalhamento *double bounce*). Neste caso, o espalhamento originado das interações terreno-tronco é muitas vezes realçado pela alta constante dielétrica da água e dos troncos das árvores (Bourgeau-Chavez *et al.* 2005).

Em zonas úmidas com vegetação herbácea em solo seco ocorrem espalhamentos múltiplos a partir da vegetação e superfície do terreno, causando um baixo retorno de sinal. Com o aumento da umidade do solo ocorre o realce do retroespalhamento devido a um incremento na constante dielétrica e um possível espalhamento *double bounce* em função da interação da vegetação herbácea com o terreno. No caso da superfície do terreno com vegetação inundada, toda energia incidente é refletida na direção oposta ao sensor e o retroespalhamento é tipicamente menor do que no caso de solo seco (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2005).

Para o entendimento da interação da radiação eletromagnética com a vegetação é necessário também o conhecimento do ciclo fenológico das espécies vegetais da área em estudo. A maioria das espécies vegetais encontradas em florestas, áreas úmidas, pastagens etc., possuem ciclos fenológicos de crescimento relativamente específicos. Cada uma destas espécies possuem seus específicos períodos de brotação, de máxima folhagem verde, maturidade e senescência, períodos estes que, em função da espécie, geralmente ocorrem sempre à mesma época do ano (Jensen 2009). Assim, o desenvolvimento de dosséis florestais e de vegetações herbáceas seguem ciclos relativamente previsíveis.

Segundo Fernandes *et al.* (2005) a fenologia das espécies de mangue é pobremente estudada na região amazônica, que possui características peculiares de precipitação, umidade e temperatura, características estas que influenciam nas fenofases das espécies vegetais. No entanto, Menezes *et al.* (2008) fazem uma síntese do conhecimento sobre a vegetação dos manguezais da costa norte do Brasil, mais especificamente nos estados do Pará e Maranhão, onde as variações sazonais do regime de chuvas e da salinidade afetam a fenologia das espécies. Estes mesmos autores sintetizam o ciclo fenológico de diversas espécies de mangue que ocorrem na costa norte brasileira, como pode ser observado na (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Fenofase das folhas das espécies de manguezais da Amazônia. ● = novas folhas; ■ = período de pico. Fonte: Modificado de Menezes *et al.* (2008).

| Espécies/fenofases | Meses do ano | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
| <i>Avicennia germinans</i> | | | | | | | | | | | | |
| Folhas | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ■ | ■ | ■ | ● |
| <i>Rhizophora mangle</i> | | | | | | | | | | | | |
| Folhas | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| <i>Laguncularia racemosa</i> | | | | | | | | | | | | |
| Folhas | ● | ■ | ● | ● | ● | ■ | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

Segundo Menezes *et al.* (2008) para a espécie *Avicennia germinans* as novas folhas aparecem principalmente durante a transição da estação chuvosa com seca quando a salinidade é menor e a média de vida das folhas é de 275 dias. As folhas da *Laguncularia racemosa* caem durante o ano inteiro. Novas folhas são produzidas durante o ano nas áreas inundadas, mas as taxas de produção são maiores durante a estação chuvosa. A média de vida das folhas é de 100 dias. As folhas da espécie *Rhizophora mangle* caem ao longo de todo ano e novas folhas são também produzidas continuamente. A produção das folhas é maior na estação chuvosa (Tabela 4.1), quando a salinidade do solo é menor. A média de vida das folhas é variável, porém raramente excede um ano.

Para a maioria das espécies vegetais que habitam os campos inundáveis, da costa norte brasileira, não se tem pesquisas sobre fenologia destas. Porém para a espécie *Paspalum sp.*, segundo Araujo (2008) esta produz folha o ano inteiro.

Dentro deste contexto, o presente capítulo apresenta uma discussão sobre os coeficientes de retroespalhamento de ambientes alagáveis, previamente mapeados na região da Ilha dos Caranguejos (Figura 4.2), no extremo leste da Amazônia. Quatro imagens multitemporais RADARSAT-1, banda C (modo Wide-1, descendente) foram adquiridas nas estações chuvosa e seca, e em condições de precipitação e amplitudes de marés distintas. Para verificar a influência da densidade da vegetação nos valores de retroespalhamento, nas duas estações do ano, foram realizadas análises estatísticas dos valores médios dos índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) do sensor Landsat-5 TM, nos períodos de junho de 2004 (período chuvoso) e outubro de 2008 (período seco), como uma tentativa de correlacionar o índice de vegetação com a variação da transmissividade nas diferentes estações do ano. Além disso, foram aplicados às imagens multitemporais SAR, o método de classificação contextual, com o objetivo de avaliar a acurácia da discriminação dos ambientes alagáveis nas estações chuvosa e seca.

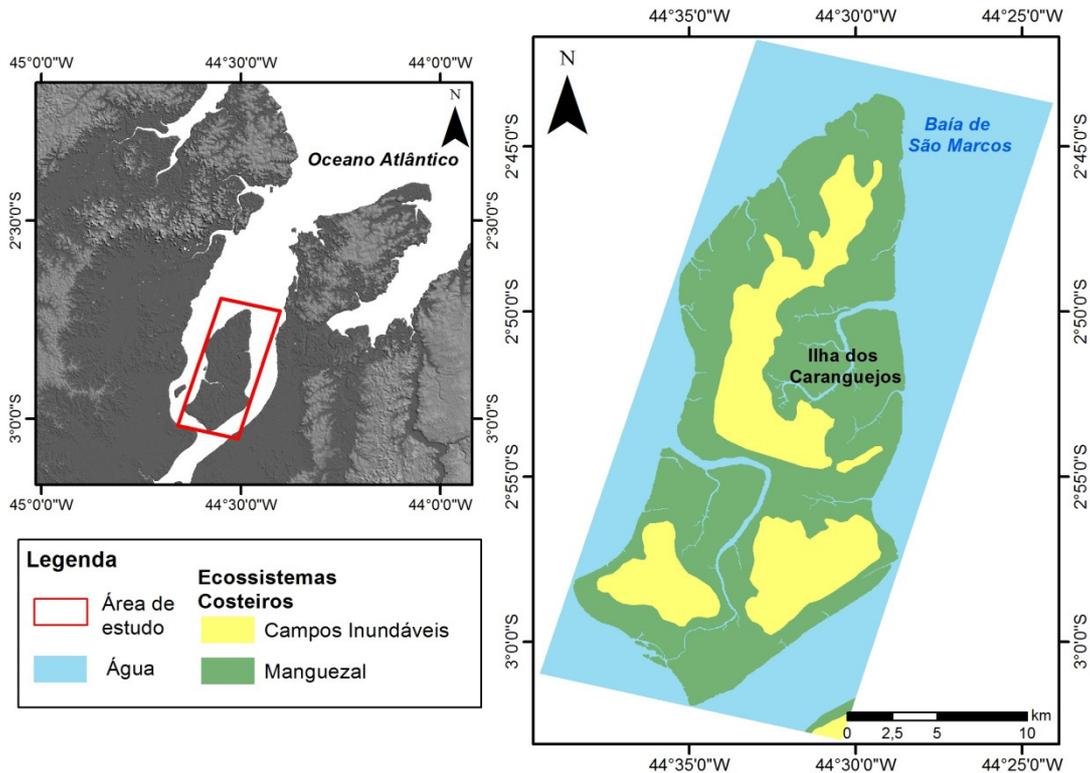


Figura 4.2: Localização da área de estudo, Ilha dos Caranguejos (MA), com a identificação dos ecossistemas presentes na área. Modificado de Teixeira (2006).

4.2 - MATERIAS E ABORDAGEM METODOLÓGICA

4.2.1 – Atributos das imagens SAR

Quatro imagens RADARSAT-1 (banda C, polarização HH e órbita descendente) foram analisadas. Estas imagens foram adquiridas em diferentes condições ambientais, correspondendo ao contraste entre o período chuvoso e o período seco, além de diferentes condições de inundação pela variação da maré (Tabela 4.2). As imagens do período chuvoso correspondem as datas de 16 de janeiro de 2003 e 09 de fevereiro de 2003 e serão designadas neste trabalho como 16 jan/03 e 09 fev/03, respectivamente. As do período seco foram adquiridas em 07 de setembro de 2004 e 01 de outubro de 2004 e serão designadas neste trabalho como 07 set/04 e 01 out/04, respectivamente.

Tabela 4.2 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas.

| Plataforma/ Sensor | Data de Aquisição | Angulo de incidência (near/far) | Resolução Nominal (range x azimute) (m) | Tamanho do pixel (m) | Swath (km) | Condição de maré | Precipitação acumulada 5 dias antes da aquisição |
|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|---------------|---------------------|---|
| RADARSAT-1 /SAR | 16-Jan, 2003 | 20° - 31° | 35.5 x 27 | 12,5 | 165 | Alta | 1,5 mm |
| RADARSAT-1 /SAR | 09-Fev, 2003 | 20° - 31° | 35.5 x 27 | 12,5 | 165 | Baixa | 628,75 mm |
| RADARSAT-1 /SAR | 07-Set, 2004 | 20° - 31° | 35.5 x 27 | 12,5 | 165 | Baixa | 1,0 mm |
| RADARSAT-1 /SAR | 01-Out, 2004 | 20° - 31° | 35.5 x 27 | 12,5 | 165 | Alta | 32,5 mm |

4.2.2 – Atributos das imagens Landsat- 5 TM utilizadas para a geração do NDVI

Para a análise do índice de vegetação normalizada (NDVI) foram utilizadas as bandas 3 e 4 da cena Landsat-5 TM, da órbita 221 e do ponto 062 com 28,5 m de resolução espacial. Durante a pesquisa tentou-se obter imagens dos mesmos meses e anos das imagens RADARSAT-1, porém não foi possível em função da cobertura de nuvens que para essas datas era acima de 50%. Assim, foram selecionadas imagens com menor cobertura de nuvens referente aos períodos chuvoso e seco, correspondendo as datas de 02 de janeiro de 2004 e 03 de outubro de 2008. Estas imagens foram adquiridas gratuitamente no acervo digital do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), através de download do site <http://www.dgi.inpe.br/>.

4.2.3 – Levantamento da base planialtimétrica

Em virtude da dificuldade de se localizar pontos de controle no terreno e da dificuldade de acesso, não foi possível coletar pontos de controle no campo. Além disso, as cartas planialtimétricas da área estão na escala de 1:100.000 não possuindo curvas de nível para a região, apenas três pontos cotados e inferidos. Assim, para dados de elevação foram utilizados as imagens da SRTM-3 (*Shuttle Radar Topography Mission*), de fevereiro de 2000 adquiridas pelo ônibus espacial *Endeavour* (download no site <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>) e como base cartográfica, uma cena TM do Landsat-4 (órbita/ponto 221/062, de 13/09/1992) adquirida gratuitamente no acervo da Universidade de Maryland, através de *download* do site <http://glcf.umd.edu/data>. A cena TM já se encontrava ortorretificada e no formato *geotiff*, e foi utilizada na pesquisa em virtude do baixo recobrimento de nuvens.

4.2.4 – Levantamento de dados de nível de maré e de precipitação

Para a avaliação das condições de maré, no momento de aquisição das imagens SAR foram analisados os dados da tábua de maré para o Porto do Itaquí (São Luís – Maranhão) (Figura 4.3). Estes dados estão disponíveis no *site* da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN 2005).

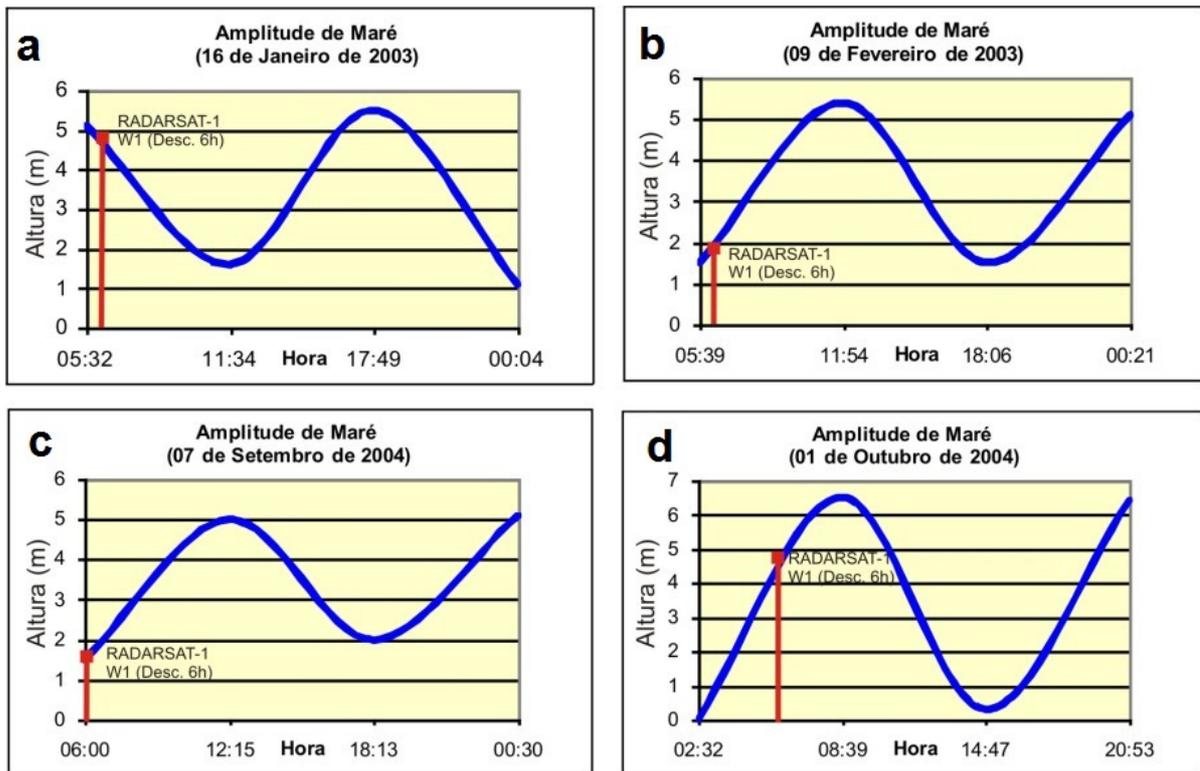


Figura 4.3. Amplitudes de maré para o Porto do Itaquí (São Luís Maranhão): **a** – Dia 16 de janeiro de 2003; **b** – dia 09 de fevereiro de 2003; **c** – dia 07 de setembro de 2004 e **d** – dia 01 de outubro de 2004. (Fonte: DHN 2005).

Também foram utilizados os dados das médias diárias de precipitação, referentes os cinco dias que antecederam a aquisição das imagens SAR, além da média da precipitação do dia da aquisição (Figura 4.4). Para as imagens da Ilha dos Caranguejos, foram utilizados os dados de precipitação registrados na estação meteorológica de São Luís (CPTEC 2006).

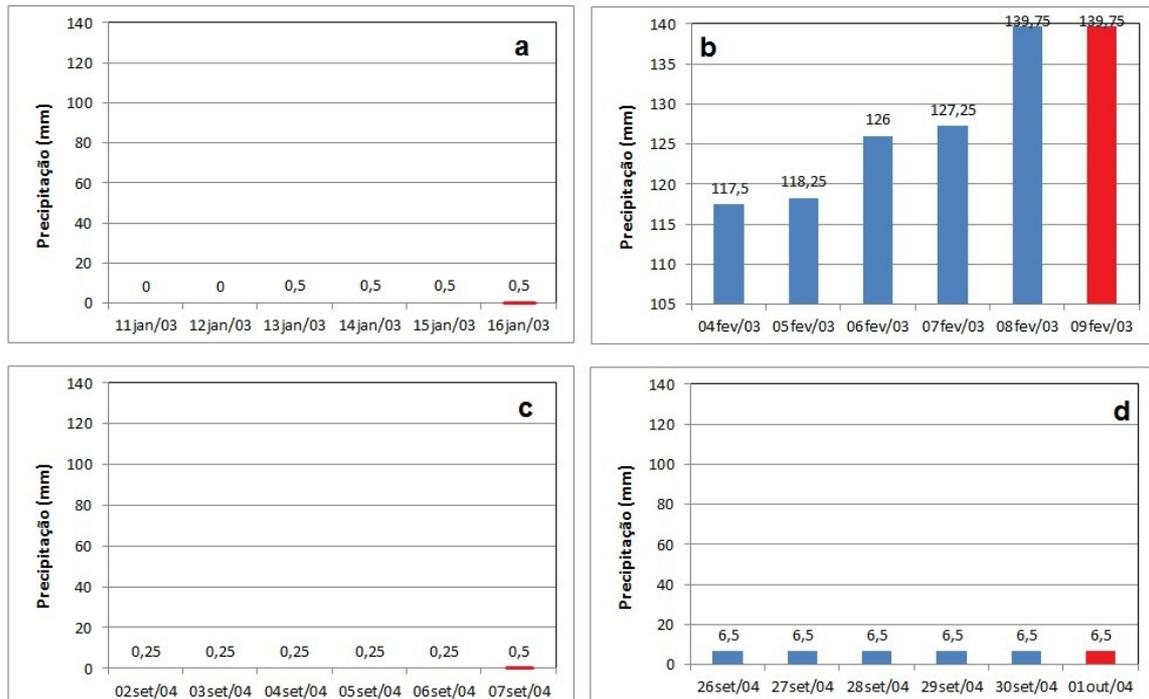


Figura 4.4. Precipitação registrada na estação meteorológica de São Luís, para os 5 dias que antecederam o dia da aquisição das imagens RADARSAT-1. A barra em vermelho destaca o dia da aquisição **a** – aquisição do dia 16 de janeiro de 2003; **b** – dia 09 de fevereiro de 2003; **c** – dia 07 de setembro de 2004 e **d** – dia 01 de outubro de 2004. (Fonte: CPTEC 2006).

4.2.5 – Processamento das imagens Landsat-4 e SRTM como base para o processo de ortorretificação

Na imagem TM primeiramente foi realizada correção atmosférica, com o método de ajuste do histograma (Jensen, 1996). Posteriormente, foi feita a escolha do melhor triplete de bandas TM (1, 4 e 5) através do cálculo OIF (*Optimum Index factor*) (Chavez Jr. *et al.* 1982). E por fim, foi aplicado o aumento do contraste linear. O *software* utilizado para o processamento foi o PCI Geomatica 10.4.

As imagens da SRTM-3 foram manipuladas primeiramente no *software* SRTM FILL, no qual foram interpolados os valores de elevação para preenchimento de áreas sem informação. Em seguida, no *software* Global Mapper versão 8.0., as imagens foram recortadas com o objetivo de restringir os dados à área de interesse. Posteriormente, os dados foram processados no PCI 10.3, onde foi feita a extração automática do DEM (modelo digital de elevação).

4.2.6 – Processamento das imagens SAR

4.2.6.1 – Leitura das imagens

Para as imagens RADARSAT-1 a leitura dos cabeçalhos (*header*) foi realizada na função *CDSAR* do programa *XPace* do PCI 10.3, onde foi possível a extração dos dados de efemérides. Gerando imagens no formato *.PT* com informações de amplitude.

4.2.6.2 - Geração das imagens coeficiente de retroespalhamento para as cenas SAR

Para a aquisição dos valores dos coeficientes de retroespalhamento após a leitura das imagens foi realizada a leitura dos ângulos de incidência aplicados sobre as imagens na fase de aquisição dos dados, através do algoritmo *Sarincd* do PCI 10.4. Em seguida através do algoritmo *Sarsigm* também do PCI 10.3 foram corrigidos os valores de brilho através da Equação 4.1, que permitiu o cálculo dos valores de coeficiente de retroespalhamento utilizando a Equação 4.2, levando em consideração a variação do ângulo de incidência $I(r)$ (Raney *et al.* 1998).

$$\beta^{\circ}(r) = 10 \times \log_{10}[\{DN^2 + A_0\} / A(r)] \text{ (Equação 4.1)}$$

$$\sigma^{\circ}(r) = \beta^{\circ}(r) + 10 \times \log_{10}\{\sin(I(r))\} \text{ (Equação 4.2)}$$

Onde:

$\beta^{\circ}(r)$ = brilho da imagem

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

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

DN^2 = 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).

4.2.6.3 – Ortorretificação das imagens SAR

A ortorretificação é um método rigoroso, pois reflete a realidade da geometria e corrige distorções devido à plataforma (posição, velocidade e altitude), ao sensor (azimute de visada, ângulo de incidência, etc.), à Terra (elipsóide) e à projeção cartográfica, levando em consideração os dados de efemérides (“*orbit*”) e as informações da elevação (Lewis & Henderson 1998).

Para cada imagem RADARSAT-1 (tanto as imagens de amplitude como as coeficiente de retroespalhamento) foi criado um projeto no *software OrthoEngine* do PCI Geomatics 10.3, onde são definidos o modelo matemático a ser utilizado, o sistema de projeção cartográfica, com o elipsoide, além do tamanho do *pixel*.

O modelo matemático utilizado foi o de *Toutin*. Os dados de elevação usados na ortorretificação foram extraídos do modelo digital de terreno da SRTM-3 e os pontos de controle foram obtidos a partir da imagem ortorretificada do Landsat-4 TM. Para a redução do ruído *Speckle*, nas imagens RADARSAT-1 foi aplicado o filtro *Enhanced Frost* com janela 3x3, durante a ortorretificação, como forma de minimizar a perda de informações radiométricas e texturais.

4.2.6.4 - Extração do coeficiente de retroespalhamento

As imagens SAR com os valores de coeficientes de retroespalhamento foram sobrepostas ao mapa de ambientes alagáveis, para a extração dos valores digitais de cada um dos ambientes alagáveis presentes na área: Manguezal, Campos inundáveis e Água. Na coleta de amostras (*pixel*), tentou-se extrair aleatoriamente, o maior número de *pixels* representativos das áreas de distribuição espacial de cada uma dos ambientes analisados. Assim, foram coletadas 50 amostras com tamanho de 3 x 3 *pixels*, para cada uma das classes analisadas, os manguezais, campos inundáveis e a água. O objetivo da amostragem aleatória realizada é dar representatividade estatística dos valores de coeficientes de retroespalhamento para uma determinada população específica, no caso os ambientes alagáveis.

4.2.7 – Cálculo do NDVI

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), foi proposto por Rouse *et al.* (1974), a partir da normalização do Índice de Vegetação da Razão Simples para o intervalo de -1 a +1. Este consiste numa relação entre as medidas de reflectância das bandas do infravermelho próximo e a do vermelho, que proporciona estimar a vegetação fotossinteticamente ativa.

De acordo com a literatura este índice possui alta correlação com a densidade de vegetação (Ormsby *et al.* 1987), biomassa foliar verde (Tucker 1979) e índice de área foliar, com o qual apresenta uma relação exponencial (Daughtry *et al.* 1984 e Jackson *et al.* 1983).

Antes de gerar o NDVI, se fez necessário georreferenciar as imagens Landsat-5 TM. Para tanto, utilizou-se como base a imagem Landsat-4 TM, obtida já ortorretificada. O processamento foi realizado no *software* ENVI 4.6.1.

Após o georreferenciamento, cada uma das bandas das imagens foram radiometricamente corrigidas, onde foram feitas as conversões dos valores de nível de cinza em valores físicos de reflectância. Para isso foi utilizado a correção atmosférica do módulo FLAASH, do ENVI. Os dados de entrada utilizados na interface padrão do módulo são relativos às características da imagem, do sensor e da órbita/ponto, tais como data e hora de aquisição, altitude do sensor, altitude média, coordenadas geográficas do centro da cena, além do tamanho do pixel. Foram selecionados o modelo de atmosfera tropical e o modelo de aerossóis rural. Um único valor de altitude, considerado 40 m, foi utilizado, uma vez que a Ilha dos Caranguejos não possui grandes variações altimétricas. Para o parâmetro de visibilidade foi aplicado o valor de 70 km, pois para cenas claras é indicada uma visibilidade de 40 a 100. E por fim, foi selecionado como multiplicador da coluna d'água o valor 1.0.

Após a transformação de radiância para reflectância foi realizado o cálculo do NDVI, no qual foram utilizadas as bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo), conforme a Equação 4.3 proposta por Rouse *et al.* (1974).

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{ivp}} - \rho_{\text{v}}) / (\rho_{\text{ivp}} + \rho_{\text{v}}) \quad (\text{Equação 4.3})$$

Onde:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*;

ρ_{ivp} = banda do infravermelho próximo

ρ_{v} = banda do vermelho

O resultado da aplicação da Equação 4.3 são imagens índices, que são geradas em número digital, representadas por uma grade numérica com sinal de 16 bits, porém estas são normalizadas, variando assim de -1 a +1. Em seguida os dados de NDVI foram divididos em intervalos, gerando-se uma cartografia temática para possibilitar a visualização da variação de NDVI. Nesta divisão, foram considerados que os menores valores obtidos até 0, representariam a água, não sendo tão significativos para o estudo, e agrupados em uma mesma classe, e receberam a cor azul. Já os valores entre 0 e o maior valor obtido foram divididos em quatro classes a saber 0 – 0,2; 0,2 – 0,4; 0,4 – 0,6; 0,6 – maior valor obtido. A cada uma destas classes, foi atribuída uma cor.

Para a extração dos valores médios de NDVI, para cada uma das classes analisadas, nas duas imagens, foram utilizados os mesmos polígonos, usados para a extração dos valores de retroespalhamento das imagens SAR. Assim, foram coletadas 50 amostras com tamanho de 3 x 3 *pixels*, para cada uma das classes: manguezais, campos inundáveis e água.

4.2.8 - Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas através do *Software Statistica 10* versão *Trial*, onde os valores médios das amostras de NDVI e de coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR, passaram pela análise exploratória, conforme detalhado em Kutner *et al.* (2004). Onde primeiramente foram verificada a normalidade da distribuição das amostras, através do método de *Shapiro-Wilk*. Em seguida foram construídos *boxplots*, que visaram verificar as médias, dispersão em torno da média, no qual foi adotado 2 vezes o desvio padrão da média amostral – (2*SE) (Silva 2010), os valores extremos e *outliers*, que são valores anormais a população amostral. Para verificar a presença destes, as amostras foram testadas pelo método de *Dixon*.

Posteriormente foi verificada a similaridade entre as médias das amostras, utilizando o teste *Mann-Whitney U*, para as amostras que não apresentaram a normalidade da distribuição. E a última etapa foi verificar a correlação entre os valores médios das amostras de NDVI e coeficiente de retroespalhamento, através do coeficiente de correlação de *Spearman* (Kutner *et al.* 2004).

4.2.9 – Classificação Contextual

A classificação contextual é um método de classificação supervisionada proposta por Gong & Howarth (1992), que é baseada na frequência de ocorrência, definida por estes autores como o número de vezes que o valor do *pixel* ocorre em uma janela de *pixels*. Para a realização da classificação contextual é necessário primeiramente a geração de uma imagem de redução do nível de cinza, a qual utiliza imagens em 8 bits. Nesta pesquisa foram geradas duas imagens de redução, uma para o período chuvoso, na qual foram utilizadas as imagens de amplitude 16 jan/03 e 09 fev/03 e outra para o período seco, em que utilizou-se as imagens de amplitude 07 set/04 e 01 out/04. Para a geração da imagem de redução foi utilizado o algoritmo *Reduce* do PCI 10.3.

Para cada uma das imagens reduzidas geradas foi aplicada a classificação contextual baseada na frequência. O algoritmo utilizado foi o *Context* do PCI 10.3, no qual utilizou-se o

método de reamostragem por vizinho mais próximo. Foram testados diversos tamanhos de janela e a que obteve o melhor desempenho foi o tamanho 7x7. Foram coletadas áreas de treinamento representativas de cada uma das classes previamente determinadas (manguezais, campos inundáveis e água).

A última etapa foi a avaliação da acurácia, na qual 512 pontos de referência foram distribuídos aleatoriamente, pelo programa, sobre a área estudada e comparados com a verdade terrestre. Além disso, foram calculadas as matrizes de confusão, que mostram o percentual de *pixels* que foram mapeados de forma correta, e ainda, foi analisado o índice *Kappa* que é usado na avaliação da concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático gerado pela classificação (Congalton 1991). O valor obtido pelo índice *Kappa* é um indicativo do desempenho da classificação gerada (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Coeficiente *Kappa* e os respectivos conceitos da classificação (Cohen 1960).

| Coeficiente <i>Kappa</i> | Desempenho da classificação |
|--------------------------|-----------------------------|
| < 0 | Péssimo |
| $0 < K \leq 0.2$ | Mau |
| $0.2 < K \leq 0.4$ | Razoável |
| $0.4 < K \leq 0.6$ | Bom |
| $0.6 < K \leq 0.8$ | Muito Bom |
| $0.8 < K \leq 1.0$ | Excelente |

4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1- Análise estatística dos coeficientes de retroespalhamento das imagens RADARSAT-1

Para verificar a normalidade dos valores médios das amostras de coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR, estas foram testadas pelo método estatístico *Shapiro-Wilk*, o qual atestou a não normalidade da distribuição das amostras em todas as imagens analisadas, a um nível de 5% de significância.

Para verificar a separabilidade dos ambientes nas imagens SAR, primeiramente foram construídos *boxplots*, que permitiram uma análise visual a partir dos valores de média, dispersão, *outliers* e extremos (Figura 4.5). No entanto, pelo teste de *Dixon* estas amostras não foram confirmadas como *outliers*.

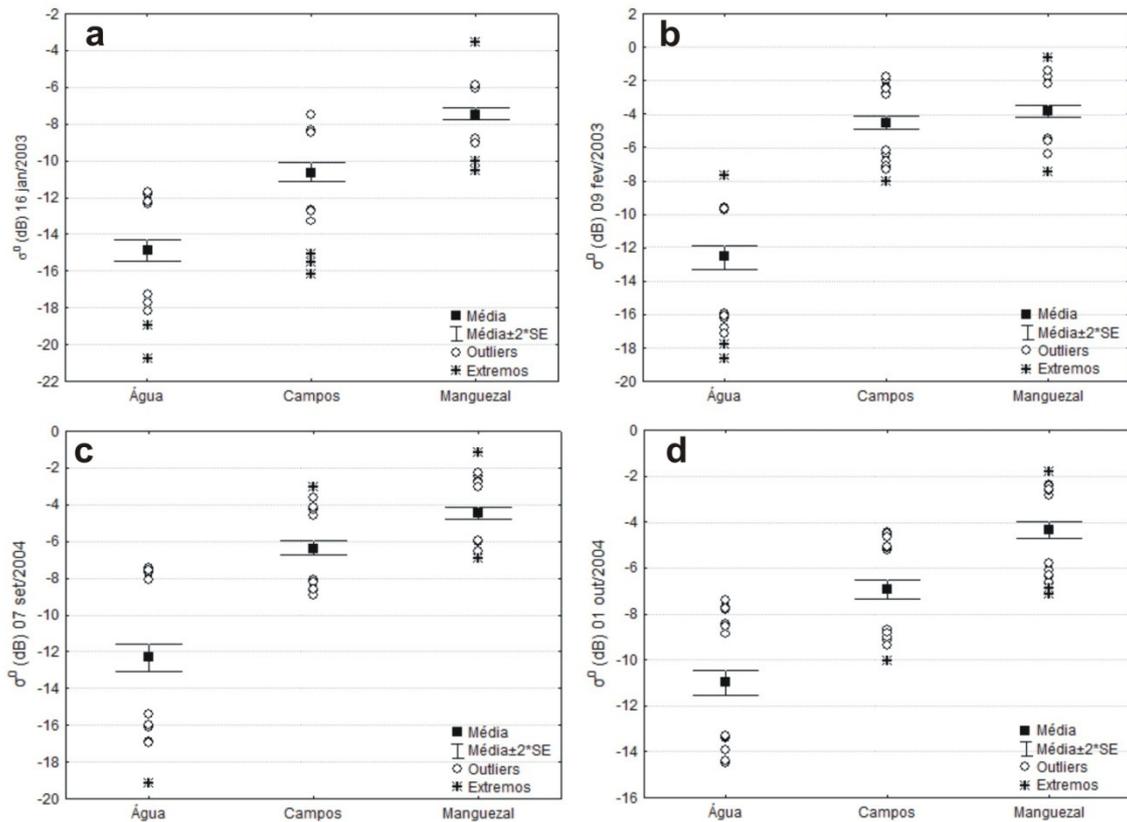


Figura 4.5 - *Boxplots* dos valores de σ^0 obtidos nas imagens RADARSAT-1, para os ambientes manguezal, campos inundáveis e a água, nas imagens adquiridas em: **a)** 16 jan/2003; **b)** 09 fev/2003; **c)** 07 set/2004 e **d)** 01 out/2004.

Como é possível observar nas Figuras 4.5a, 4.5b, 4.5c e 4.5d, os manguezais possuem os maiores valores de médias de coeficiente de retroespalhamento em todas as imagens, seguidos pelos campos inundáveis e os menores valores de médias foram encontrados para água. Visualmente, percebe-se uma baixa dispersão em torno da média. Para as imagens do período chuvoso são observados dois comportamentos. Na imagem 16jan/03 os manguezais são visualmente separáveis dos campos inundáveis, enquanto que na imagem 09 fev/03 há certa sobreposição das dispersões destes dois ambientes, o que pode dificultar a separação dos mesmos. Para as imagens do período seco, os manguezais são separáveis dos campos nas duas imagens. Para verificar a similaridade das médias dos valores de retroespalhamento, na água e nos ambientes alagáveis, os dados das amostras das quatro polarizações foram testados pelo método *Mann-Whitney (U)*, pois apresentaram uma distribuição não normal (Tabela 4.4).

Tabela 4.4– Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos das imagens RADARSAT- e os p-valores do *Mann-Whitney (U)*, usado para comparar as médias de σ^0 entre as classes analisadas (Manguezal, Campos Inundáveis e Água), com nível de significância de 5%.

| | | Água | Campos | Manguezal |
|-----------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| $\sigma^0_{16jan/03}$ | Média | -14,870 | -10,612 | -7,447 |
| | Desvio padrão | 1,961 | 1,807 | 1,156 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,000 |
| | média Campos | | | |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | 0,000 | - |
| $\sigma^0_{09fev/03}$ | Média | -12,567 | -4,494 | -3,829 |
| | Desvio padrão | 2,393 | 1,441 | 1,348 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,031 |
| | média Campos | | | |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | 0,031 | - |
| $\sigma^0_{07set/04}$ | Média | -12,336 | -6,356 | -4,457 |
| | Desvio padrão | 2,512 | 1,384 | 1,185 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,000 |
| | média Campos | | | |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | 0,000 | - |
| $\sigma^0_{01out/04}$ | Média | -11,001 | -6,920 | -4,332 |
| | Desvio padrão | 1,805 | 1,470 | 1,255 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,000 |
| | média Campos | | | |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | 0,000 | - |

A similaridade estatística entre as médias de σ^0 dos ambientes alagáveis e da água, não foi confirmada pelo teste *Mann-Whitney (U)*, como observado na Tabela 4.4. Este resultado confirma que as classes analisadas são separáveis nas quatro imagens, mesmo na imagem 09 fev/03, a qual apresentou certa sobreposição da dispersão das médias dos campos e manguezal (Figura 4.5b).

4.3.2 – Análise estatística dos valores de NDVI

A normalidade das médias de valores de NDVI, para as duas imagens analisadas foram testadas pelo método *Shapiro-Wilk*, que atestou a não normalidade da distribuição das amostras, nas duas imagens, da mesma maneira que os dados das imagens SAR.

Através da construção de gráficos do tipo *boxplot*, nos quais são plotados os valores de média, dispersão, *outliers* e extremos, foi possível fazer uma primeira análise, visual da separabilidade dos ambientes nas imagens NDVI (Figura 4.6).

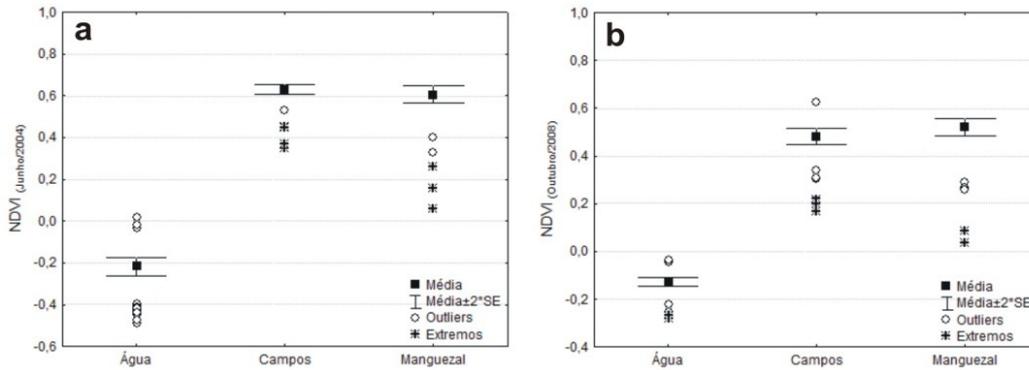


Figura 4.6 - *Boxplots* dos valores de NDVI, nas três classes analisadas (manguezal, campos inundáveis e água) nos dois períodos: **a)** estação chuvosa e **b)** estação seca.

Analisando os gráficos das Figuras 4.6a e 4.6b, nota-se a presença de *outliers*, que foram avaliados pelo teste de *Dixon*, o qual não confirmou a presença destes. Os valores de média de NDVI foram um pouco maiores para os dois ambientes alagáveis no período chuvoso, do que no período seco. Porém a análise visual dos dados permite inferir que há certa sobreposição das dispersões dos valores das médias de NDVI dos campos inundáveis e dos manguezais, nas duas imagens, o que pode levar certa dificuldade de separação entre os ambientes. E a água é separável dos ambientes alagáveis nas duas imagens. Para verificar a similaridade das médias dos valores de NDVI, nas classes estudadas, as amostras das duas imagens foram testadas pelo método *Mann-Whitney (U)*, devido a natureza não-paramétrica (Tabela 4.5).

Tabela 4.5– Valores de média e desvio padrão de NDVI das imagens de junho de 2004 e outubro de 2008 e os p-valores do *Mann-Whitney (U)* usado para comparar as médias de NDVI entre as classes analisadas (Manguezal, Campos Inundáveis e Água), com nível de significância de 5%.

| | | Água | Campos | Manguezal |
|------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| NDVI _{Junho/2004} | Média | -0,217 | 0,628 | 0,605 |
| | Desvio padrão | 0,150 | 0,081 | 0,146 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,874 |
| | média _{Campos} | 0,000 | 0,874 | - |
| | média _{Manguezal} | 0,000 | - | - |
| NDVI _{Outubro/2008} | Média | -0,126 | 0,483 | 0,521 |
| | Desvio padrão | 0,063 | 0,118 | 0,133 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,000 | - | 0,015 |
| | média _{Campos} | 0,000 | 0,015 | - |
| | média _{Manguezal} | 0,000 | - | - |

Os dados apresentados na Tabela 4.5 confirmam que é possível separar a água dos campos inundáveis e dos manguezais, nas duas imagens NDVI. No período chuvoso (imagem de junho de 2004) a separação entre os campos inundáveis e os manguezais é difícil, como atestado pelo método *Mann-Whitney*. Já para o período seco a separação entre estes dois ambientes é possível.

4.3.3- Análise da relação entre o coeficiente de retroespalhamento e o NDVI

Para avaliar se o retroespalhamento nas imagens RADARSAT-1, nas duas estações foi influenciado pela diferença de estrutura, provocada pelo vigor da vegetação, analisou-se a relação entre os valores médios de retroespalhamento e os valores médios do índice de vegetação NDVI, que foram agrupados por estação do ano.

A partir da análise das Figuras 4.7a e 4.7b é possível observar que os maiores valores médios de retroespalhamento, observados para os ambientes alagáveis, coincidiram com os maiores valores de NDVI médio, tanto para a estação chuvosa como para a estação seca.

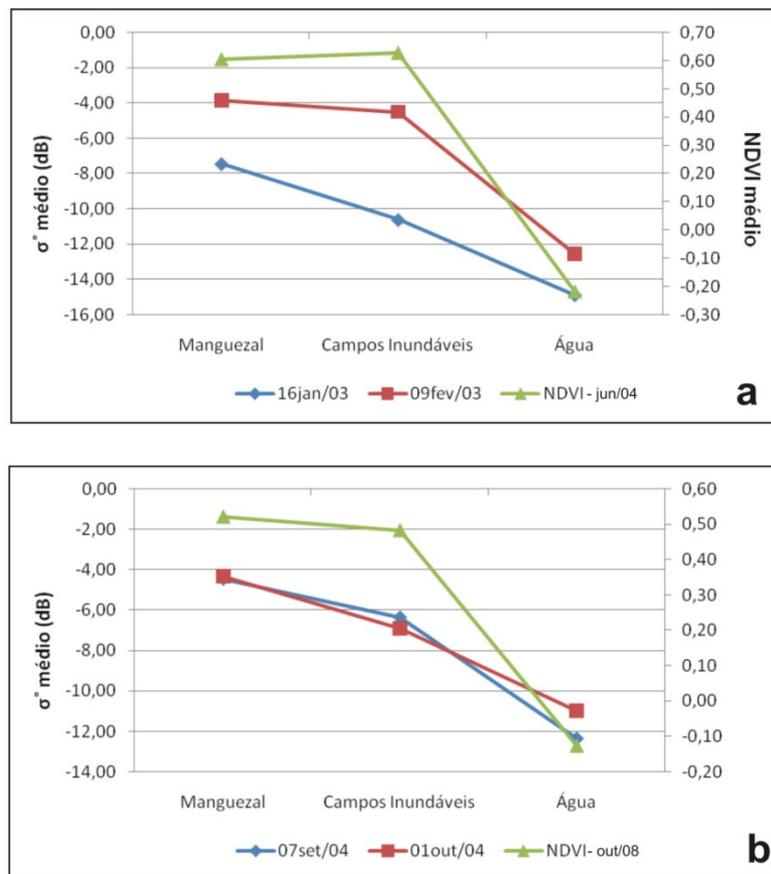


Figura 4.7 – Variação dos valores médios do coeficiente de retroespalhamento e de NDVI, para o manguezal, campos inundáveis e água: a) estação chuvosa e b) estação seca.

Para verificar a correlação entre os valores médios de σ^0 e os valores médios de NDVI, utilizou-se o coeficiente de correlação de *Spearman* (r_s), em função da natureza não paramétrica das amostras. A Tabela 4.6 apresenta o coeficiente de correlação (r_s), a probabilidade do teste t de *Student* para (n-2) graus de liberdade e os p-valores resultantes do teste de correlação, realizado entre o NDVI médio e os valores de retroespalhamento nas estações chuvosa e seca.

Tabela 4.6 – Resultados do teste de correlação de *Spearman* entre os valores de NDVI e o retroespalhamento médio para as imagens RADARSAT-1, nas estações chuvosa e seca.

| | Estação | r_s | t(n-2) | p-valor |
|---------------------|----------------|-------------------------|---------------|----------------|
| σ^0 16jan/03 | Chuvosa | 0,656 | 10,482 | ≈ 0 |
| σ^0 09fev/03 | Chuvosa | 0,561 | 8,151 | ≈ 0 |
| σ^0 07set/04 | Seca | 0,661 | 10,597 | ≈ 0 |
| σ^0 01out/04 | Seca | 0,668 | 10,815 | ≈ 0 |

Os resultados do teste de correlação de *Spearman* mostraram que as correlações entre os valores de NDVI e os valores médios de retroespalhamento em todas as quatro imagens SAR são significativas ao nível de confiança de 5%, as quais são asseguradas pelo p-valor ≈ 0 . Na estação chuvosa a maior correlação ocorreu com a imagem 16jan/03, enquanto que na estação seca, os valores de correlações foram quase iguais, sendo que o valor observado para a imagem 01out/04 foi ligeiramente maior. Estes resultados indicam que a banda C, na polarização HH é sensível às variações de densidade da vegetação.

A partir dos dados aqui expostos, pode-se dizer que no período chuvoso tanto os manguezais como os campos inundáveis apresentam altos valores médios de NDVI (Figuras 4.7a e 4.8a), ou seja, áreas com alto vigor vegetativo, logo áreas com elevada biomassa. Isto é corroborado com os dados do ciclo fenológico das espécies de manguezais (Tabela 4.1) e também da alta produtividade da vegetação herbácea para a região, segundo Araujo (2008).

Para o período chuvoso, acredita-se que a floresta de mangue esteja mais bem desenvolvida, com o maior número de galhos e folhas, formando um dossel mais homogêneo e mais denso, o que afeta a estrutura do dossel e conseqüentemente a interação da radiação das micro-ondas, pois a transmissividade tende a diminuir, havendo uma interação maior da energia na banda C com os menores constituintes do dossel, como visto na Figura 4.1. Essa baixa transmissividade não permite que o sinal ultrapasse a copa das árvores, não havendo assim, a detecção da inundação pela maré, que no momento da aquisição da imagem 16jan/03

estava alta. Desta maneira, os valores de coeficiente de retroespalhamento para a floresta de mangue nesta imagem (média de aproximadamente $-7,4$ dB) representam principalmente o sinal que retornou do interior do dossel, através do espalhamento volumétrico (Figura 4.9a), com contribuição do retroespalhamento da superfície do dossel. Na imagem 09fev/03, acredita-se que os altos valores de retroespalhamento, em torno de $-3,8$ dB, para a floresta de mangue, deve-se ao aumento da umidade, em função da alta precipitação registrada para os cinco dias que antecederam a aquisição da imagem. Com o aumento da umidade houve uma menor penetração da energia incidente no dossel, logo um retorno maior do sinal, também como consequência do espalhamento de volume. (Figura 4.9 b).

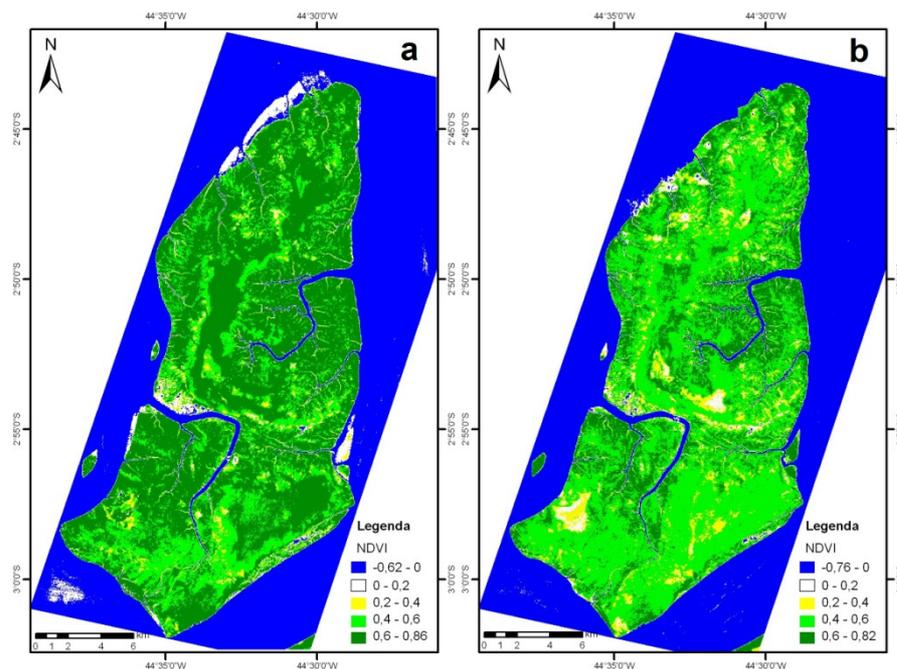


Figura 4.8 – Imagem NDVI: a) junho de 2004 (estação chuvosa) e b) outubro de 2008 (estação seca).

Para os campos inundáveis, durante o período chuvoso a precipitação pluviométrica e as inundações dos rios formam lâminas d'água rasas, as quais permitem o maior desenvolvimento das espécies vegetais herbáceas, o que reflete altos valores de NDVI (Figuras 4.7a e 4.8a). Boa parte da vegetação herbácea fica exposta sobre a superfície da lâmina d'água, assim, a energia registrada pelo sensor é a energia espalhada pelo sistema que funciona como uma superfície de rugosidade intermediária, pois boa parte da energia é perdida em função da presença da água, que funciona como uma superfície especular que reflete a energia na direção oposta ao sensor, porém a vegetação existente cria um espalhamento de volume e também de múltiplas reflexões, mesmo que pequenos, estes retornam ao sensor, como observado na imagem 16jan/03 (Figura 4.9a), onde os valores médios de retroespalhamento foram de aproximadamente $-10,6$ dB. Para a imagem 09fev/03

os valores de retroespalhamento dos campos foram maiores em torno de $-4,4\text{dB}$ (Figura 4.7a), os quais podem ser explicados pelo aumento da umidade, como visto anteriormente para esta imagem, que aumentou a intensidade do retorno da energia em direção ao sensor (Figura 4.9b).

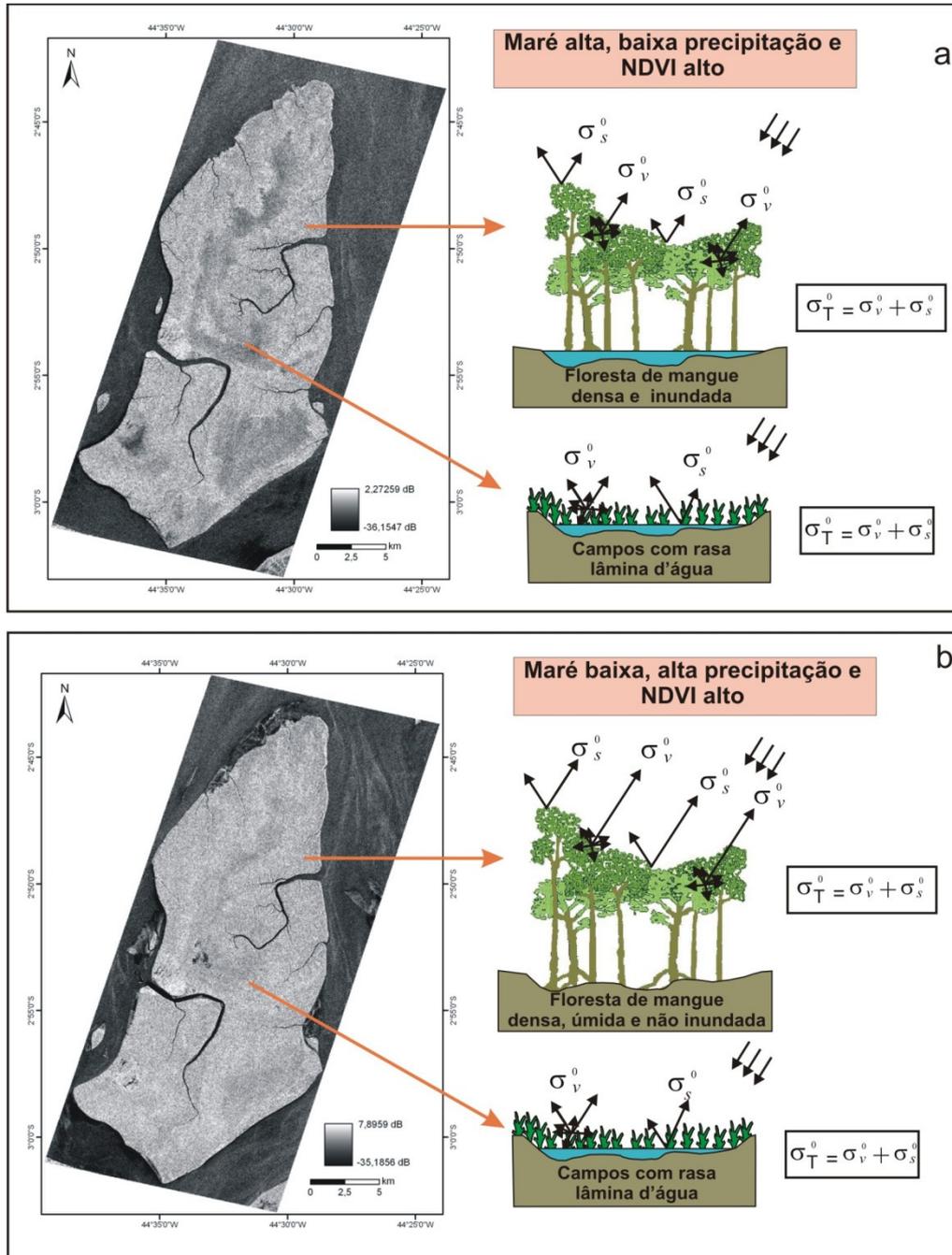


Figura 4.9 – Imagens coeficientes de retroespalhamento RADARSAT-1 do período chuvoso: a) 16 jan/03 e b) 09 fev/03, onde: σ_T^0 - retroespalhamento total; σ_s^0 - retroespalhamento da superfície da vegetação; σ_v^0 - retroespalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação e σ_e^0 - espalhamento especular. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retroespalhada.

No período seco os manguezais e os campos inundáveis apresentaram os menores valores médios de NDVI (Figuras 4.7b e 4.8b). Estes valores refletem a diminuição da produtividade da vegetação. Para as áreas de manguezais há produção de folhas das espécies *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa*, porém este não é o período de pico para estas espécies como visto na (Tabela 4.1). Entretanto, para a espécie *Avicennia germinans* o período de pico de produção das folhas ocorre entre os meses de setembro e novembro, que pode ter influenciado nos valores de médio de NDVI. Na Figura 4.8b as áreas de manguezal que possuem altos valores de NDVI, são bem mais restritas quando comparada com a imagem da Figura 4.8a, refletindo assim possivelmente, as áreas com vegetação da espécie *Avicennia germinans*. E também, os valores mais baixos de NDVI, representados na Figura 4.8b com tons de verde claro, podem representar áreas de floresta de mangue mais esparsas, em função dos dosséis menos homogêneos.

Nas duas imagens SAR do período seco (07 set/04 e 01out/04), adquiridas sob baixa precipitação, verificou-se também que a condição de maré alta ou baixa não influenciou nos valores médios do coeficiente de retroespalhamento dos manguezais (Figura 4.7b), uma vez que estes apresentaram valores muito próximos, -4,4 e -4,3dB, respectivamente para as imagens 07 set/04 e 01 out/04. Desta maneira, acredita-se que no período seco a quantidade de energia que retornou da floresta de mangue em direção ao sensor foi produto principalmente da interação da radiação espalhada em diversas direções no interior do dossel (espalhamento volumétrico), mesmo havendo uma maior transmissividade, a energia não foi capaz de atingir o nível da inundação pela maré. Os valores registrados nas imagens do período seco, para a floresta de mangue foram maiores do que o registrado na imagem 16 jan/03 do período chuvoso, adquirida sob baixa precipitação, assim acredita-se que em condição de dosséis mais densos, muita energia incidente é perdida no mecanismo de espalhamento volumétrico, enquanto que em dosséis com menos folhagem uma quantidade maior de energia incidente retorna na direção do sensor, possivelmente pelo incremento proveniente das interações da energia com os galhos maiores ou até mesmo por interações com os troncos (Figura 4.10a e 4.10b).

Para os campos inundáveis acredita-se que o comportamento da energia de micro-ondas também tenha sido o mesmo, nos dois dias de aquisição das imagens SAR do período seco. Como visto na Figura 4.7b, o valor médio de NDVI para as áreas de campos é em torno de 0,48, valores que em geral representam áreas vegetadas com grama ou vegetação esparsa. Na Figura 4.8b, também são observadas áreas com baixos valores de NDVI (tons de amarelo) nas áreas de campos, que são entendidas como áreas de solo exposto.

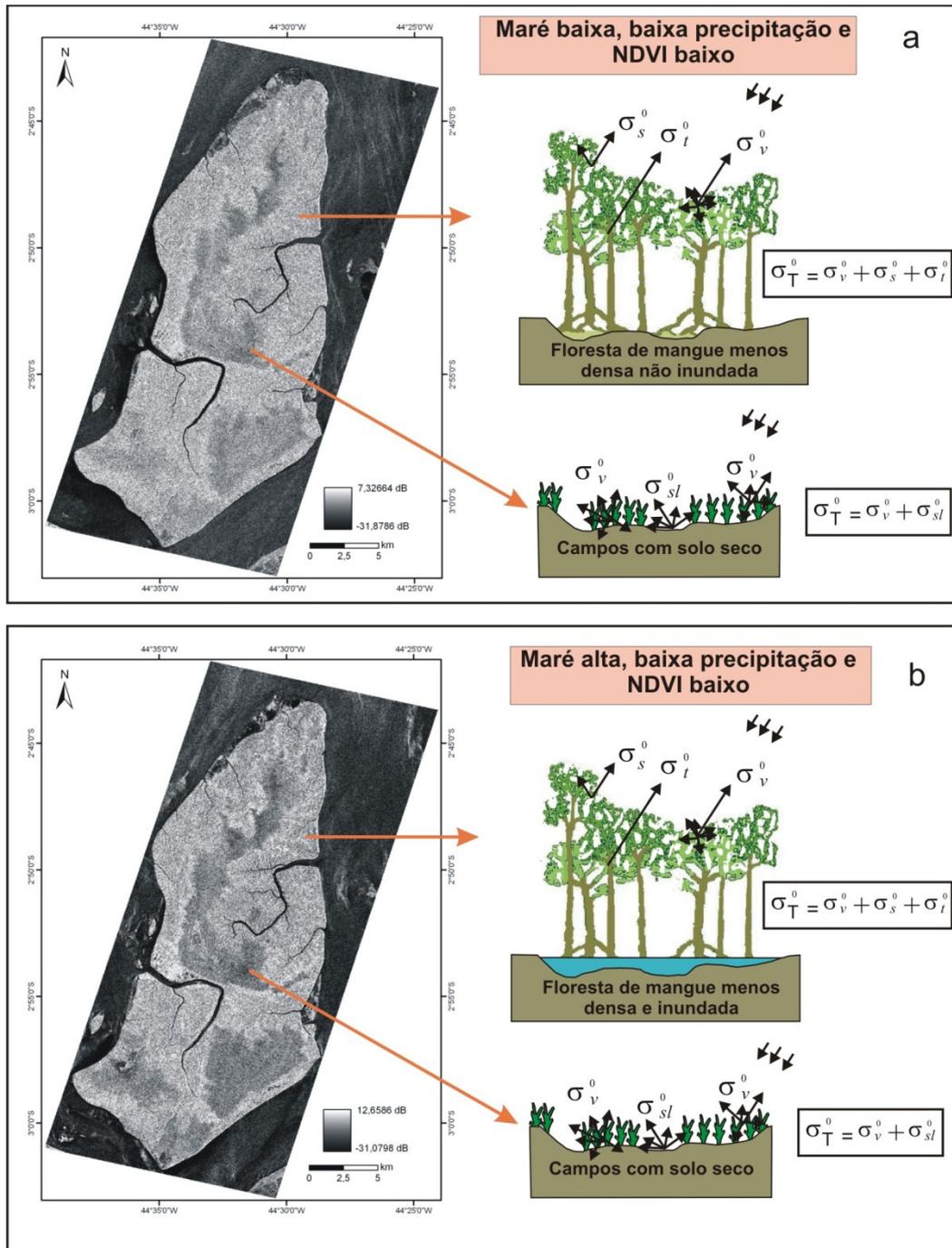


Figura 4.10 – Imagens coeficientes de retroespalhamento RADARSAT-1 do período chuvoso: a) 07 set/04 e b) 01 out/04, onde: σ_T^0 - retroespalhamento total; σ_s^0 - retroespalhamento da superfície da vegetação; σ_v^0 - retroespalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação; σ_i^0 - retroespalhamento de tronco e σ_{sl}^0 - retroespalhamento da superfície do solo. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retroespalhada.

Desta forma, os baixos valores de NDVI para as áreas de campo podem estar relacionados a evaporação da lâmina d'água, que provoca o desaparecimento das plantas aquáticas, permanecendo apenas as gramíneas e ciperáceas, sendo que estas crescem no formato de tufos e durante o verão observa-se que estes tufos apresentam-se distante um dos outros com a folhagem mais seca expondo parte dos solos. Assim, acredita-se que com a vegetação seca e com solo exposto também seco, a energia de micro-ondas incidente é espalhada em múltiplas direções, a partir da vegetação e da superfície do terreno, causando um baixo retorno do sinal (Figura 4.10a e 4.10b), registrando valores de retroespalhamento em torno de -6,0 dB, como visto na Figura 4.7b.

4.3.4 - Classificação contextual das imagens SAR

Como visto no item análise estatística, em todas as quatro imagens, é possível a separação dos manguezais, campos inundáveis e a água, em termos de média de coeficiente de retroespalhamento. Assim, optou-se em utilizar a classificação contextual, baseada na frequência como forma de avaliar a separabilidade dos ambientes alagáveis, nas imagens SAR, nos dois períodos, chuvoso e seco. Deste modo, as duas imagens de cada período foram combinadas para gerar uma imagem reduzida para a estação chuvosa e outra imagem reduzida para a estação seca.

A partir das imagens reduzidas foram geradas as classificações contextuais que podem ser vistas nas Figuras 4.11a e 4.11b, respectivamente, para o período chuvoso e seco.

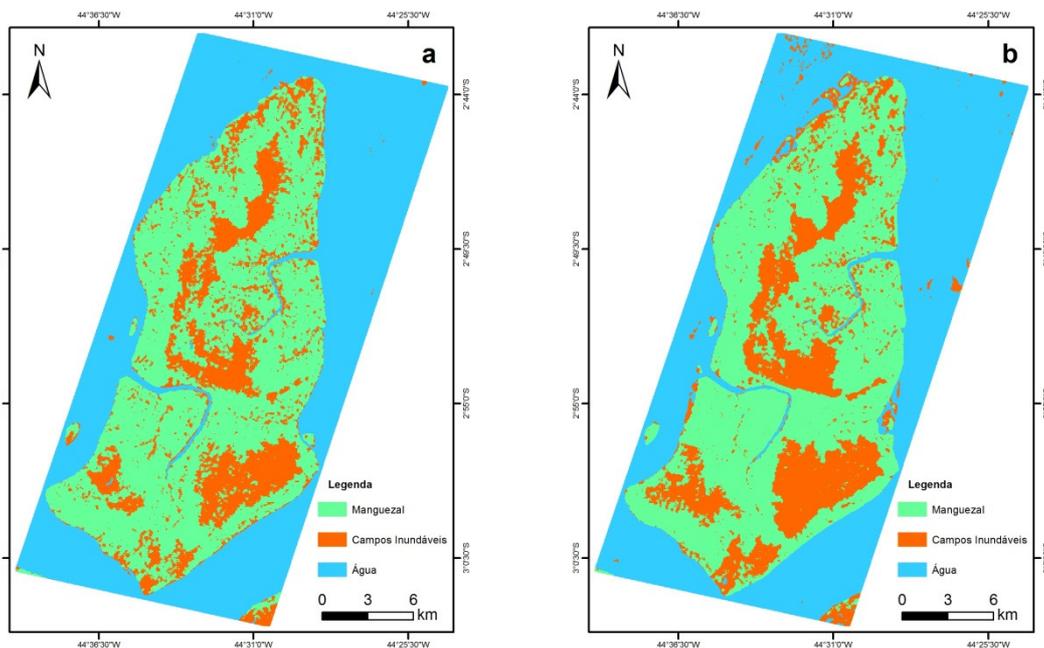


Figura 4.11 – Resultado das classificações contextuais das imagens reduzidas: a) – período chuvoso e b) – período seco.

Para se verificar a acurácia das classificações dos ambientes alagáveis foram analisadas também as matrizes de confusão e índice de exatidão geral. Analisando as Tabelas 4.7a e 4.7b, referente ao período chuvoso e seco respectivamente é possível verificar entre os ambientes alagáveis, o que apresentou o maior erro na classificação foram os campos inundáveis com erros de comissão (erro onde os *pixels* pertencentes a esta classe foram classificados como pertencente à outras classes) de 35,43% (Tabela 4.7a) e 19,67% (Tabela 4.7b). Esta classificação errônea de *pixels* principalmente como manguezal, pode ter sido influenciada, no período chuvoso, pela imagem 09 fev/03 (Figura 4.9a), na qual a resposta dos manguezais e campos inundáveis foram um pouco semelhantes, como pode ser atestado na Tabela 4.4, onde a diferença entre as médias de retroespalhamento entre estes dois ambientes é inferior a 1dB, o qual foi ocasionado pelo incremento da umidade, que aumentou de maneira generalizada o retroespalhamento da imagem, como visto anteriormente. Para o período seco, a classificação errônea pode ter sido ocasionada pela classificação de áreas de manguezais esparsos como áreas de campos inundáveis.

Tabela 4.7: Matriz de confusão gerada para a classificação contextual da imagem reduzida: a) período chuvoso e b) período seco.

| <i>Dado de Referência</i> | | | | | |
|--------------------------------|------------|-------------------|------------|--------------|--------------|
| Classes | Água | Campos Inundáveis | Manguezal | \sum linha | Comissão (%) |
| Água | 190 | 0 | 2 | 192 | 1,04 |
| Campos Inundáveis | 7 | 82 | 38 | 127 | 35,43 |
| Manguezal | 4 | 35 | 154 | 193 | 20,21 |
| \sum coluna | 201 | 117 | 194 | 512 | |
| <i>Omissão (%)</i> | 5,47 | 29,91 | 20,61 | | |
| <i>Índice Kappa = 0,743</i> | | | | | a |
| <i>Exatidão Geral = 83,20%</i> | | | | | |

| <i>Dado de Referência</i> | | | | | |
|--------------------------------|------------|-------------------|------------|--------------|--------------|
| Classes | Água | Campos Inundáveis | Manguezal | \sum linha | Comissão (%) |
| Água | 185 | 0 | 3 | 188 | 1,59 |
| Campos Inundáveis | 6 | 98 | 18 | 122 | 19,67 |
| Manguezal | 2 | 28 | 171 | 201 | 14,92 |
| \sum coluna | 194 | 126 | 192 | 512 | |
| <i>Omissão (%)</i> | 4,64 | 22,22 | 10,94 | | |
| <i>Índice Kappa = 0,827</i> | | | | | b |
| <i>Exatidão Geral = 88,67%</i> | | | | | |

Avaliando o índice de exatidão geral (índice que representa a concordância da classificação para toda a área de um modo geral, utilizando os valores da diagonal principal da matriz) pode-se concluir que a classificação contextual da imagem do período seco, obteve um desempenho um pouco melhor do que a classificação da imagem reduzida da estação chuvosa. Além disso, as tabelas mostram que a classificação contextual da estação seca foi a que obteve o maior índice *kappa* 82,7%, obtendo assim um desempenho excelente, conforme a classificação de Cohen (1960).

4.4 - CONCLUSÕES

Através da análise de correlação de *Spearman* entre os valores médios de NDVI e os valores médios de retroespalhamento, mostraram que todas as correlações foram estatisticamente significativas, ressaltando que as maiores correlações ocorrem para as imagens SAR adquiridas sem influência de precipitação, dentre as quais as correlações entre o NDVI e as imagens da estação seca obtiveram os melhores resultados. Deste modo acredita-se que imagens adquiridas na banda C e na polarização HH são sensíveis às variações de densidade da vegetação.

A partir das análises qualitativas e quantitativas das imagens RADARSAT-1 e dos valores médios de σ^0 das florestas de mangue e dos campos inundáveis pode-se observar que estes ambientes são separáveis em imagens SAR da banda C, principalmente quando estas forem adquiridas em condições de baixa precipitação, pois havendo umidade no sistema a separação entre estes ambientes tende a diminuir pelo incremento no retroespalhamento. Como observado, a separação entre os dois ambientes foi possível, nas duas estações do ano, uma vez que os valores médios de retroespalhamento dos manguezais são sempre maiores que os valores médios dos campos inundáveis, corroborando com a ideia de que a quantidade de energia que retorna em direção ao sensor proveniente do espalhamento volumétrico que ocorre no dossel das florestas de mangue é maior do que a energia que retorna do espalhamento difuso dos campos inundáveis.

O método de classificação contextual mostrou-se eficiente no mapeamento dos ambientes alagáveis, nas duas estações do ano, pois apresentaram classificações consideradas muito boa para a estação chuvosa e excelente para a estação seca.

Assim, a técnica de classificação utilizada produziu com facilidade e rapidez mapas de ambientes costeiros, com acurácia cartográfica, servindo desta maneira, como base para o mapeamento destes tipos de ambientes, uma vez que áreas de manguezais e campos inundáveis foram bem delimitados.

As imagens multitemporais do RADARSAT-1 mostraram-se ferramentas úteis para o monitoramento e a discriminação de ambientes alagáveis em clima tropical úmido. As quais permitiram a avaliação da influência das condições ambientais na interação entre a radiação de micro-ondas e os ambientes imageados.

CAPÍTULO 5: INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA NO RETROESPALHAMENTO DE FLORESTA DE MANGUE E CAMPOS INUNDÁVEIS

5.1 - INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas radares com diferentes configurações operacionais (frequência, geometria de visada, ângulo de incidência, resolução, etc.) têm mostrados bons resultados, na identificação, mapeamento e monitoramento de ambientes alagáveis na Amazônia (Proisy *et al.* 2002, Costa 2004, Souza Filho *et al.* 2005, 2011, Novo & Costa 2005 e Novo 2006) e também em outras regiões úmidas (Hess *et al.* 1990, Wang *et al.* 1995, Bourgeau-Chavez *et al.* 2001, Townsend 2002, Kasischke *et al.* 2003, Bourgeau-Chavez *et al.* 2005, Li *et al.* 2007, Lang & Kasischke 2008 e Lang *et al.* 2008) caracterizadas pela alta frequência de chuva, neblina e nuvens, as quais não são obstáculos para o imageamento por radar. As áreas alagáveis reúnem ambientes da superfície terrestre, cuja característica comum é possuírem comunidades vegetais adaptadas a substratos sujeitos à inundação permanente ou periódica (Tiner 1999). Desta forma, o substrato dessas áreas pode em função da época do ano (sistemas alagáveis continentais) ou do horário (sistemas costeiros) se constituir de superfície líquida, superfície lamosa ou seca, (Novo & Costa 2005). Quando há água no sistema, esta é um elemento controlador, na aplicação do sistema SAR (radar de abertura sintética), pois afeta a constante dielétrica da superfície e interfere nos mecanismos de interação da radiação com a vegetação que coloniza essas áreas.

O total de retroespalhamento de uma área com vegetação do tipo floresta pode incluir diversos mecanismos de retroespalhamento como: (1) espalhamento do dossel das árvores, que inclui múltiplos espalhamentos (espalhamento de volume), (2) retroespalhamento direto dos troncos (geralmente menor), (3) retroespalhamento direto da superfície do terreno, (4) retroespalhamento dossel-terreno (*double-bounce*) e (5) retroespalhamento tronco-terreno (*double-bounce*). Estes dois últimos podem ser em ambas as direções, da árvore para o terreno ou do terreno para a árvore (Leckie 1998).

A magnitude de cada um desses tipos de retroespalhamento dependerá do comprimento de onda, polarização, ângulo de incidência e características do terreno e da estrutura da floresta.

Diversos estudos tem mostrado a aplicação de imagens SAR com diferentes ângulos de incidência em ambientes alagáveis, pois o coeficiente de retroespalhamento é fortemente

afetado pelo ângulo de incidência (Hess *et al.* 1990, Wang *et al.* 1995, Costa *et al.* 1997, Li *et al.* 2007e Lang *et al.* 2008).

Li *et al.* (2007) investigaram o efeito do ângulo de incidência ($20^\circ - 49^\circ$) de imagens RADARSAT-1, na discriminação de zonas úmidas do Canadá, constituídas de turfeiras abertas com vegetação herbácea, turfeiras arborizadas com vegetação de médio porte espaçada e pântanos de água doce. Os resultados encontrados por estes autores mostraram que a separação entre estes ambientes não variou significativamente, com o aumento do ângulo de incidência, sob as mesmas condições hidrológicas. Entretanto, o ângulo de incidência afeta a discriminação de turfeiras abertas inundadas dos outros ambientes. Eles concluíram também que a energia em todos os ângulos de incidência analisados pode penetrar nas vegetações herbáceas elevadas dos pântanos de água doce, porém penetra apenas sob baixos ângulos de incidência em vegetação de pequeno porte, nas áreas de turfeiras abertas inundadas. E por fim, eles sugerem o uso de imagens RADARSAT-1 com ângulo de incidência abaixo de 31° para o reconhecimento destes ecossistemas em zonas úmidas.

Através de estudos realizados por Wang *et al.* (1995) para detectar florestas inundadas e não inundadas na planície amazônica, foram gerados modelos de retroespalhamento da copa das florestas para as bandas C, L e P. Para a banda C com polarização HH, o retroespalhamento total (curva t), quando o terreno está inundado, é principalmente oriundo do espalhamento de volume (curva c) para ângulos de incidência entre 20° a 60° , considerando que não há espalhamento de superfície pela presença da água (Figura 5.1). Algumas contribuições para o retroespalhamento total ocorrem a partir da interação do tronco-terreno (curva d) e interação dossel-terreno (curva m) para pequenos ângulos de incidência, mas suas contribuições diminuem, assim que há o aumento do ângulo de incidência. Com o aumento do ângulo de incidência, há um aumento das duas trajetórias que a radiação percorre (incidência e retroespalhamento), sendo a radiação atenuada exponencialmente pela vegetação. Menos energia penetra através da copa para chegar à superfície e ser refletida pelo terreno pelas interações tronco-terreno e dossel-terreno (*double-bounce*).

Para terrenos não inundados, o total do retroespalhamento na banda C-HH é predominantemente proveniente do espalhamento de volume na copa. Há o retroespalhamento de superfície (curva s), em função da superfície não ser lisa, mas esta contribuição no retroespalhamento total é pequena (Figura 5.1). O desaparecimento das interações tronco-terreno e copa-terreno na condição de floresta não inundada resulta de uma diminuição da reflexão de superfície. A proporção de retroespalhamento para o modelo de Wang *et al.*

(1995) na banda C-HH para florestas inundadas e não inundadas é cerca de 2.6 dB para um ângulo de incidência de 20°, mas diminui para 0 dB em um ângulo de 60°. A redução da taxa de retroespalhamento com o aumento do ângulo de incidência é um resultado dos espalhamentos tronco-superfície e copa superfície Wang *et al.* (1995).

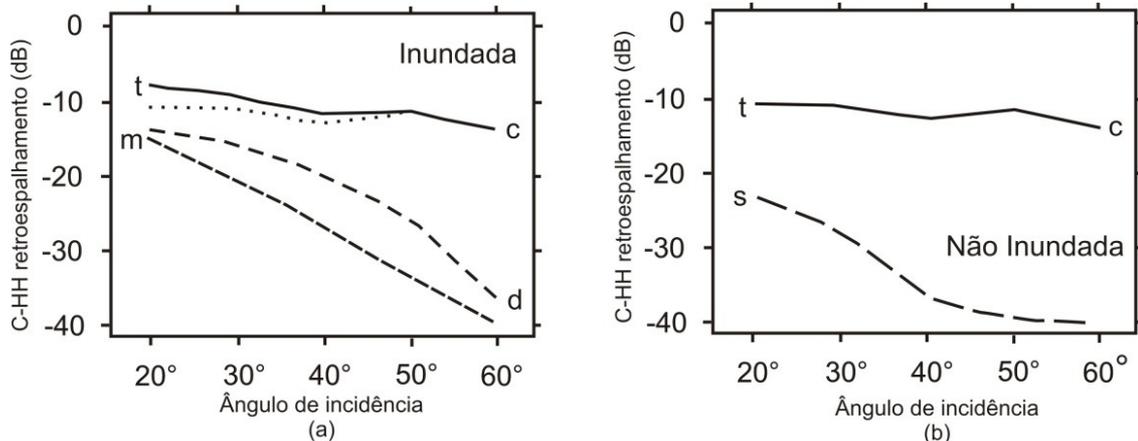


Figura 5.1: Modelo de retroespalhamento para banda C-HH de Wang *et al.* (1995) para florestas inundadas e não inundadas na planície Amazônica. Onde: t – retroespalhamento total; c – espalhamento de volume; d – espalhamento tronco-terreno; m – espalhamento dossel-terreno e s – espalhamento de superfície.

Neste capítulo, será discutido o efeito da variação do ângulo de incidência de imagens RADARSAT-1, dos modos *Wide* e *Fine* adquiridas durante o período chuvoso, condições de precipitação alta e diferentes condições de maré, no reconhecimento de ambientes alagáveis costeiros influenciados por maré, no caso manguezal e campos inundáveis na Ilha dos Caranguejos, localizada no extremo norte do Estado do Maranhão (Figura 5.2). Para isso, as imagens foram submetidas à técnica da análise por principais componentes (Grunsky 2002), análise quantitativa dos valores de retroespalhamento (σ^0) das imagens SAR nos diferentes ângulos de incidência e também análise da separabilidade dos ambientes alagáveis.

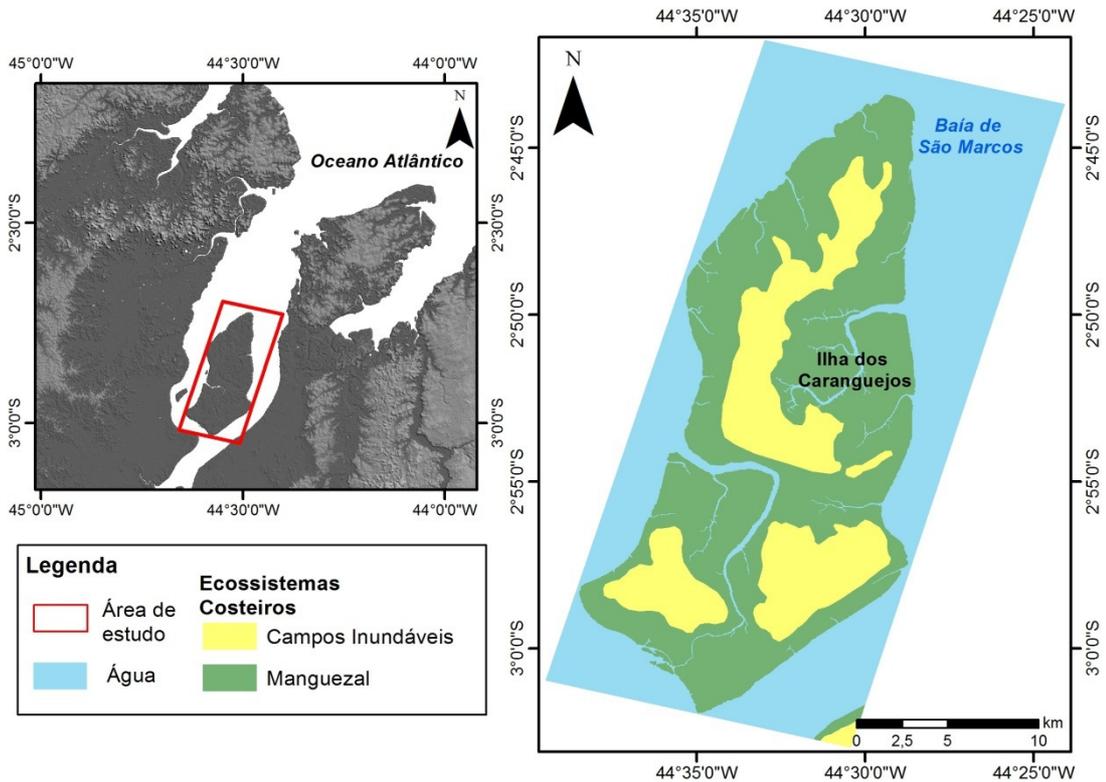


Figura 5.2: Localização da área de estudo, Ilha dos Caranguejos (MA), com a identificação dos ecossistemas presentes na área. Modificado de Teixeira (2006).

5.2 - MATERIAIS

Neste estudo foram analisadas três imagens do satélite RADARSAT-1, que opera na banda C (frequência de 5,3 Ghz; 5,6 cm de comprimento de onda) e polarização HH. As imagens são do modo *Wide 1*, *Fine 3N* e *Fine 5F* e possuem diferentes ângulos de incidência. As imagens foram adquiridas sob mesmo azimute de visada descendente, em datas distintas, porém durante o período chuvoso, diferentes condições de maré e sob as mesmas condições de precipitação. Nos cinco dias que antecederam e no dia da aquisição das imagens foram registradas altas precipitações na estação de meteorológica de São Luís (CPTEC 2006). Neste trabalho, as imagens do modo *Wide* e *Fine* serão designadas como: W1, F3N e F5F. As características da aquisição e das imagens são resumidas nas Figuras 5.3 e Tabela 5.1.

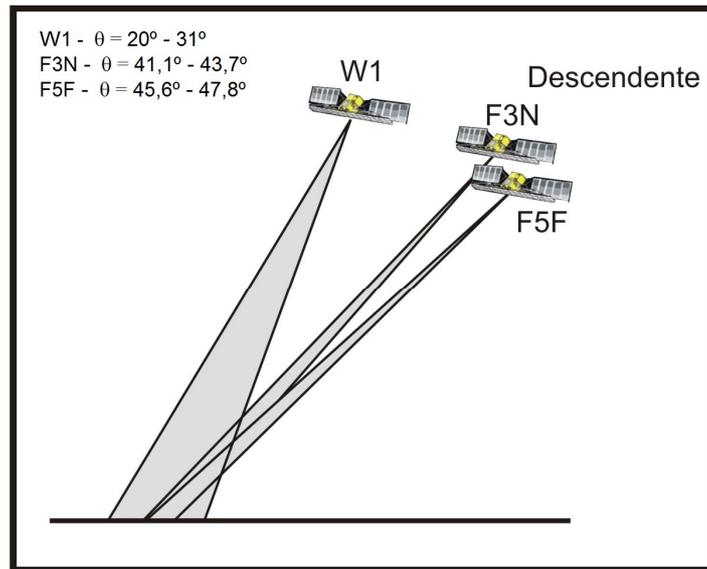


Figura 5.3 – Esquema de aquisição das imagens RADARSAT – 1 utilizadas. θ = ângulo de incidência.

Tabela 5.1 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas.

| Imagens | Wide (Beam 1) W1 | Fine (Beam 3) F3N | Fine (Beam 5) F5F |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Polarização | C-HH | C-HH | C-HH |
| Azimute de Visada | 282° (desc.) | 282° (desc.) | 282° (desc.) |
| Data de aquisição | 09-Fev, 2003 | 14-Mai, 2006 | 21-Mai, 2006 |
| Ângulo de Incidência (<i>near/far</i>) | 20° - 31° | 41,1° -43,7° | 45,6° - 47,8° |
| Nº de <i>Looks</i> | 4 | 1 | 1 |
| Resolução Nominal (range x azimute) (m) | 35.5 x 27 | 8,7 x 8,4 | 8,7 x 8,4 |
| Tamanho do pixel (m) | 12,5 | 6,25 | 6,25 |
| Largura da faixa (km) | 165 | 50 | 50 |
| Condição de maré no momento da aquisição | Baixa | Alta | Baixa |
| Precipitação acumulada 5 dias antes da aquisição | 628,75 mm | 681,79 mm | 1115,52 mm |

Em função da dificuldade de se localizar pontos de controle no terreno e da dificuldade de acesso, não foi possível coletar pontos de controle no campo, da mesma maneira como explicado no capítulo 4. Assim, utilizou-se também como base planimétrica

uma cena TM do Landsat-4 e o modelo digital de elevação da SRTM-3. As características destas imagens, bem como o processamentos destas podem ser vistos no capítulo 4.

5.3 - MÉTODOS UTILIZADOS

5.3.1 – Processamento das imagens SAR

A leitura das imagens RADARSAT-1 modo *Wide* e *Fine*, a geração das imagens coeficientes de retroespalhamento, o processo de ortorretificação das imagens amplitude e σ^0 , seguiram os mesmos protocolos já descritos no capítulo 4. A estatística da ortorretificação apresentou que o erro residual foi inferior a dois pixels por cena (Tabela 5.2). A fim de manter a integridade radiométrica e geométrica das imagens, o conjunto de dados foi reamostrado para um valor de pixel comum, no caso 10m.

Tabela 5.2 – Valores de RMSE para a ortorretificação das imagens SAR.

| Imagens RADARSAT-1 | Nº de GCPs | RMSE (m) | | Total RMS |
|--------------------|------------|----------|-------|-----------|
| | | X | Y | |
| Wide (Beam 1) W1 | 18 | 9,37 | 8,00 | 12,25 |
| Fine (Beam 3) F3N | 23 | 5,79 | 5,04 | 7,68 |
| Fine (Beam 5) F5F | 22 | 4,74 | 10,69 | 11,69 |

5.3.2 – Análise por principais componentes

Ao conjunto de imagens de amplitude já corrigidas radiométrica e geometricamente foi aplicada a transformação por principais componentes (PC).

Esta técnica é frequentemente aplicada para análise de imagens, gerando compressão de dados de uma cena e realce de imagem (Crósta 1993, Jensen 1996, Picchiotti *et al.* 1997 e Richards e Jia 2006). O objetivo desta técnica é mostrar uma estrutura básica que existe dentro de um conjunto de observações multivariáveis, expressada como um padrão de variâncias e covariâncias entre variáveis e como similaridades entre as observações (Jensen 1996, Picchiotti *et al.* 1997).

Assim, a análise por principais componentes é feita por transformações matemáticas, que produzem um novo conjunto de bandas não-correlacionadas (principais componentes), ou eixos gerados posteriormente a rotação do sistema de coordenadas original, que redistribuem a variância original dos dados (Crósta 1993, Harris *et al.* 1994, Picchiotti *et al.* 1997).

De acordo com Picchiotti *et al.* (1997), usando um pequeno grupo de imagens altamente correlacionadas, como os dados de entrada à análise por principal componente, as informações de todas estas bandas serão mapeadas na primeira PC, e a medida que a ordem das PCs diminui, há também uma diminuição na quantidade de informação.

Esta técnica teve como canal de entrada a imagem *Wide* e as duas imagens do modo *Fine*. Avaliou-se aqui as matrizes de correlação, auto-valores e auto-vetores, de forma a analisar a contribuição de cada imagem em cada componente principal gerada.

5.3.3 – Extração do coeficiente de retroespalhamento

De posse das imagens coeficientes de retroespalhamento foram coletados 50 amostras aleatórias, com tamanho de 3 x 3 pixels de cada um dos alvos que ocorrem na área: manguezal, campos inundáveis e água.

5.3.4 - Análise da separabilidade

A medida de separabilidade é usada para investigar a separabilidade entre pares de classes em uma imagem. O *transformed divergence* ou divergência transformada (DT) é uma dessas medidas de separabilidade estatística amplamente utilizada, a qual é baseada na razão entre as probabilidades de ocorrência de duas classes (Swain & Davis 1978). O valor obtido pelo cálculo da separabilidade entre dois tipos de cobertura varia de 0 a 2.0. Um valor igual a zero indica que as classes não são separáveis do todo, enquanto que um valor igual a 2.0, permite a separação quase completa dos pares de classe. Um valor abaixo de 1.0 indica que as duas assinaturas são estatisticamente muito próximas uma da outra e têm baixa separabilidade. Valores entre 1.0 e 1.9 indicam que as classes são separáveis até certo ponto (Li *et al.* 2007).

5.4 - RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

5.4.1 – Análise por principais componentes

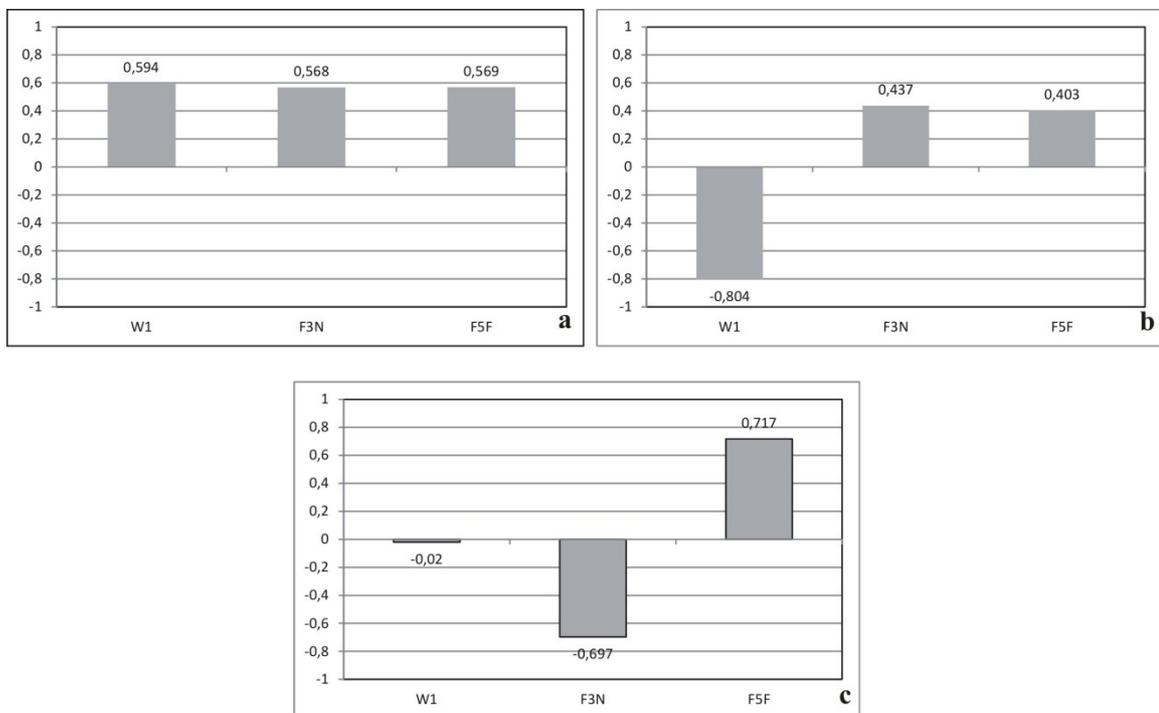
As relações entre as imagens RADARSAT-1 dos diferentes modos analisados são apresentadas na matriz de correlação da Tabela 5.3. Os valores mostram que os dados não são muito correlacionados, de forma que cada imagem contribui de forma distinta devido às diferenças nos ângulos de incidência.

Tabela 5.3 – Matriz de correlação das imagens RADARSAT-1.

| Imagens | W1 | F3N | F5F |
|---------|-------|-------|-------|
| W1 | 1,000 | 0,874 | 0,877 |
| F3N | 0,874 | 1,000 | 0,913 |
| F5F | 0,877 | 0,913 | 1,000 |

Pode-se observar que o maior grau de correlação ($r = 0,913$) ocorreu com o par de imagens (F3N/F5F) de mesmo modo de imageamento e com o menor extremo de variação de ângulo de incidência, significando uma maior redundância entre os dados. A menor correlação ($r = 0,874$) ocorreu entre o par de imagens (F3N/W1) de modos de imageamento distintos, ou seja, há uma maior complementariedade dos dados. Estes resultados sugerem que a variação ângulo de incidência para um mesmo azimute de visada representa um papel relevante na resposta dos alvos.

A transformação por principais componentes gera auto-valores e auto-vetores baseados na matriz de covariância. A Figura 5.4 apresenta os auto-vetores que descrevem qual das imagens originais, no caso as imagens SAR de amplitude, mais contribuiu na formação de cada componente principal, numa combinação aditiva e linear.

**Figura 5.4** – Contribuições dos canais originais para a primeira (a), segunda (b), terceira (c) principal componente.

A Tabela 5.4 apresenta os auto-valores após a transformação por principais componentes, a porcentagem de informação (contribuição) e a porcentagem de informação acumulada.

Tabela 5.4 – Auto-valores dos novos canais, com as respectivas porcentagens de informação.

| | Auto-Valor | Contribuição (%) | Contribuição Acumulativa (%) |
|-------|------------|------------------|------------------------------|
| 1° CP | 2,776 | 92,53 | 92,53 |
| 2° CP | 0,137 | 4,57 | 97,10 |
| 3° CP | 0,087 | 2,9 | 100 |

A primeira principal componente (PC1) contribui com 92,53% da variância total (Tabela 5.4 e Figura 5.5a), e a magnitude da influencia de cada uma das três imagens é praticamente igual, como observado na Figura 5.4a. Em comparação com o mapa de ambientes costeiros da região (Teixeira 2006) observa-se que esta componente apresenta uma variação de brilho entre as regiões de manguezais e campos inundáveis, o que permite a separação destes. Como nesta componente a influência da imagem *Wide* é ligeiramente maior do que as das imagens *Fine*, pode-se dizer que a variação entre os ângulos de incidência 20° e 31° contribuiu para o brilho mais claro observado nesta componente.

A segunda componente principal (Figura 5.5b), com 4,57% da variância total (Tabela 5.4), é predominantemente influenciada pela imagem W1 (Figura 5.4b). A comparação entre a imagem da segunda principal componente com o mapa de referência mostra uma pobre discriminação dos ecossistemas costeiros quando comparado com a primeira componente. Entretanto, esta componente realçou algumas áreas em tons de cinza claro, na região dos campos inundáveis, que podem estar relacionadas a diferenças nas espécies vegetais. A partir desta componente, pode-se evidenciar a importância da variação do ângulo de incidência, em imagens SAR, adquiridas sob alta precipitação, pois para ângulos menores a discriminação entre os ambientes costeiros é prejudicada.

A terceira principal componente (Figura 5.5c) possui 2,9% da variância total e mostra basicamente uma imagem de contraste entre as imagens F3N e F5F (Figura 4.c), que são imagens do mesmo modo imageamento (*Fine*) e uma baixa influência da imagem W1.

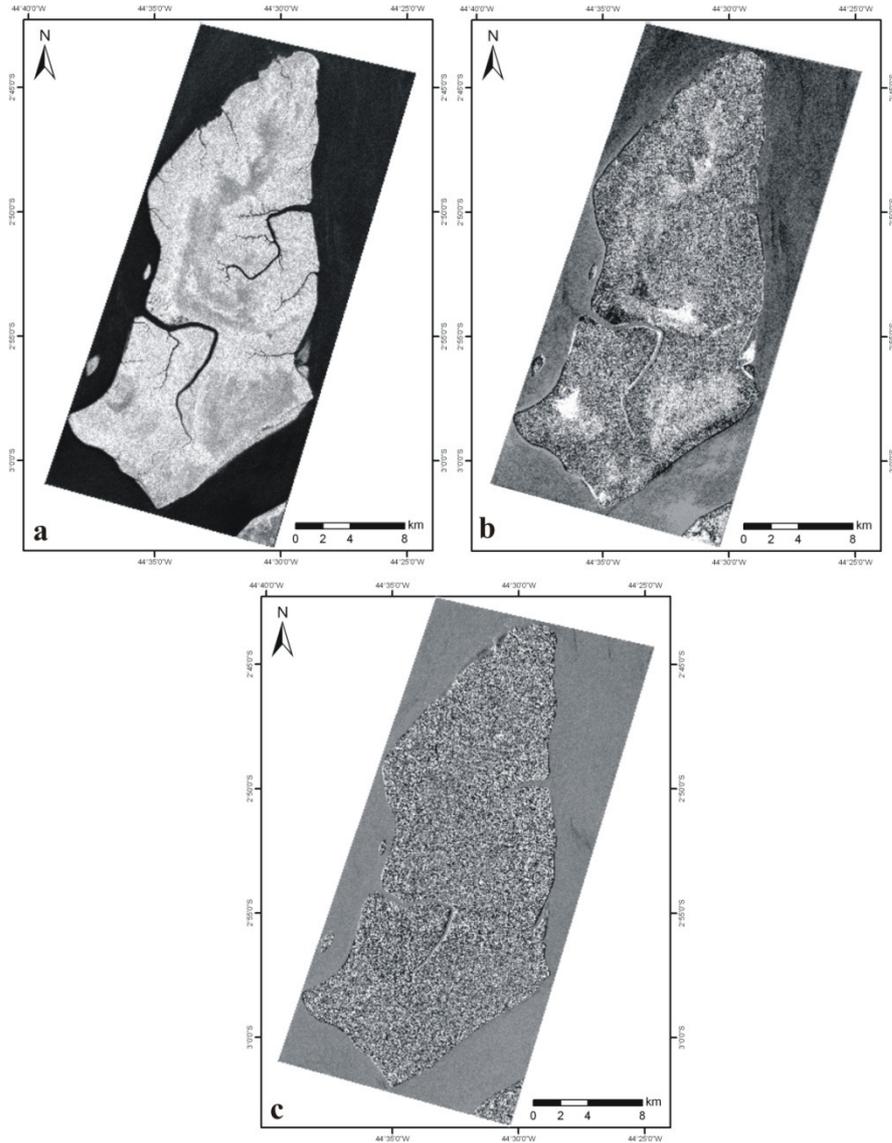


Figura 5.5 – Imagens componentes principais das imagens RADARSAT-1, modos F2A, S2A, S7A, e S7D. a) Primeira componente principal; (b) Segunda componente principal; (c) Terceira componente principal.

5.4.2 - Análise dos valores de retroespalhamento

A Figura 5.6 apresenta os valores de retroespalhamento calculados para os ambientes costeiros e a água nas três imagens RADARSAT-1 com diferentes ângulos de incidência.

Como dito anteriormente, as imagens SAR foram adquiridas sob o mesmo azimute de visada e em condições de precipitação elevada, variando apenas os valores de ângulo de incidência.

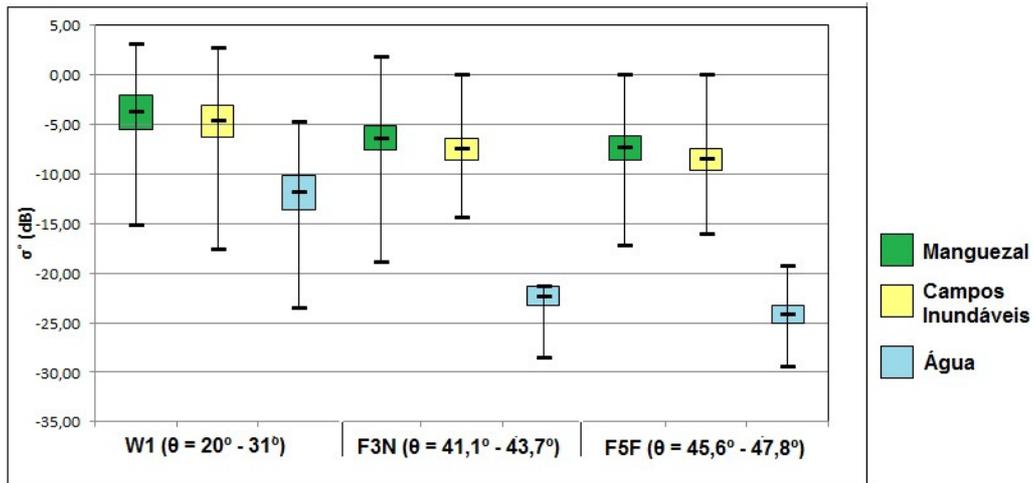
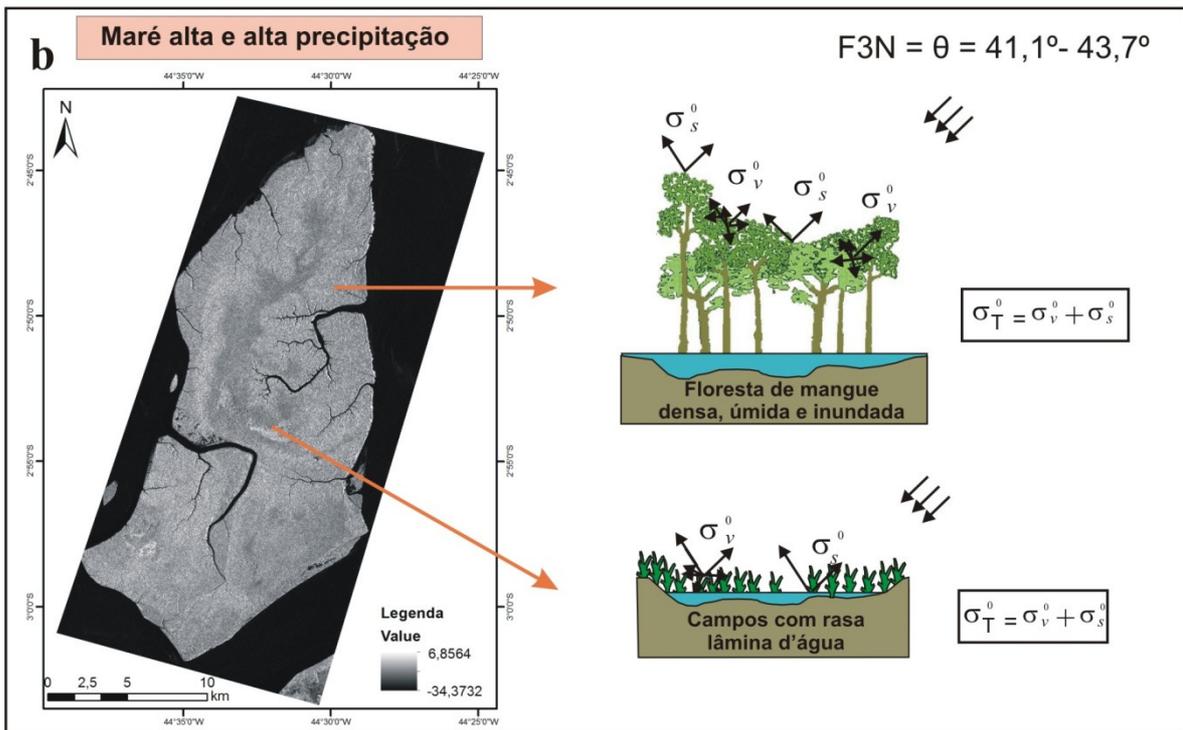
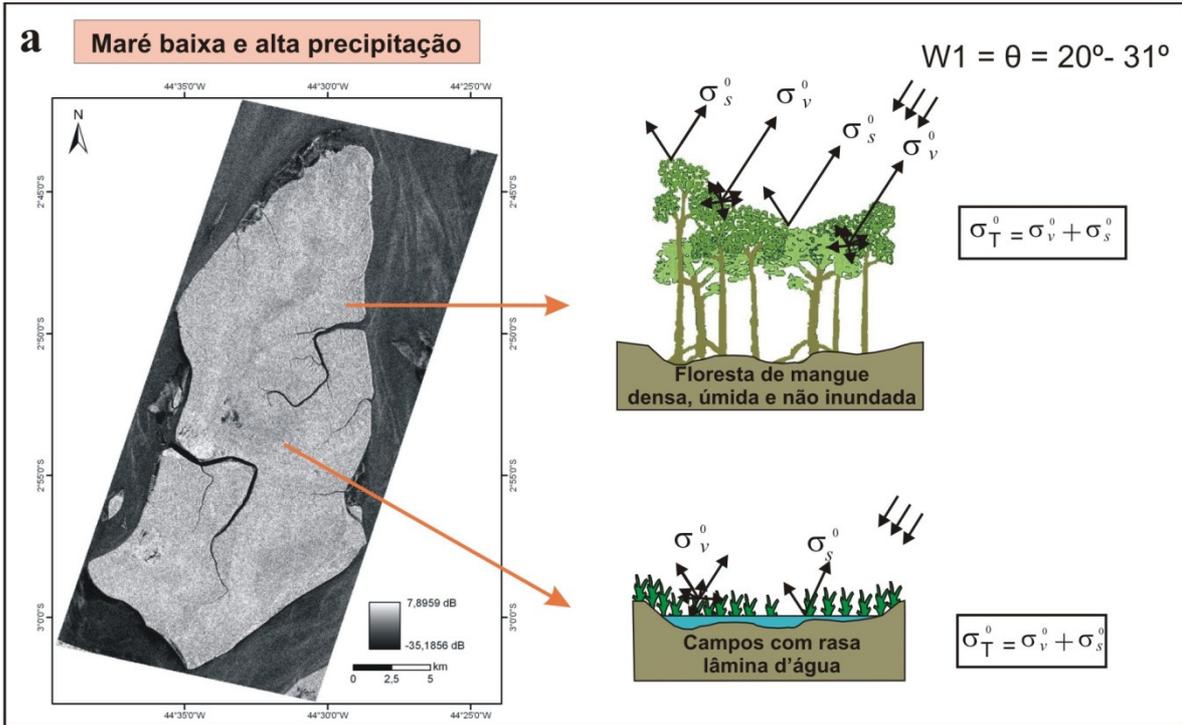


Figura 5.6 – Coeficientes de retroespalhamento (σ^0) para os ambientes costeiros analisados além da água nas imagens F3N, F5F e W1.

Analisando a Figura 5.6 e as Figuras 5.7 é possível verificar que os maiores valores de retroespalhamento para o manguezal, campos inundáveis e a água foram registrados na imagem W1, que possui o menor ângulo de incidência e estes valores foram diminuindo com o aumento do ângulo de incidência nas imagens F3N e F5F.

A Figura 5.6 mostra que a floresta de mangue na imagem W1 (Figura 5.7a), com baixo ângulo de incidência, apresenta os maiores valores de retroespalhamento, quando comparadas as imagens do modo *Fine*. Este fato se deve a trajetória menor da energia incidente, que possui uma intensidade de retorno maior em função, principalmente, do retroespalhamento de volume e pela alta umidade, presente nas folhas, que aumenta também o retroespalhamento da superfície do dossel na direção do sensor. Acredita-se também que não houve contribuição do espalhamento do tipo *double bounce*, uma vez que a imagem W1 foi adquirida em condições de maré baixa e que a energia incidente não foi capaz de atravessar o dossel, como já discutido no capítulo 4.

A floresta de mangue nas imagens com os maiores ângulos de incidência (Figura 5.7b e 5.7c) apresentou os menores valores de retroespalhamento. Acredita-se que a redução do retroespalhamento esteja relacionado a atenuação da radiação incidente em resposta ao aumento da trajetória, provocada por uma maior interação da radiação com a superfície do dossel, havendo baixa interação com o interior do dossel (espalhamento volumétrico).



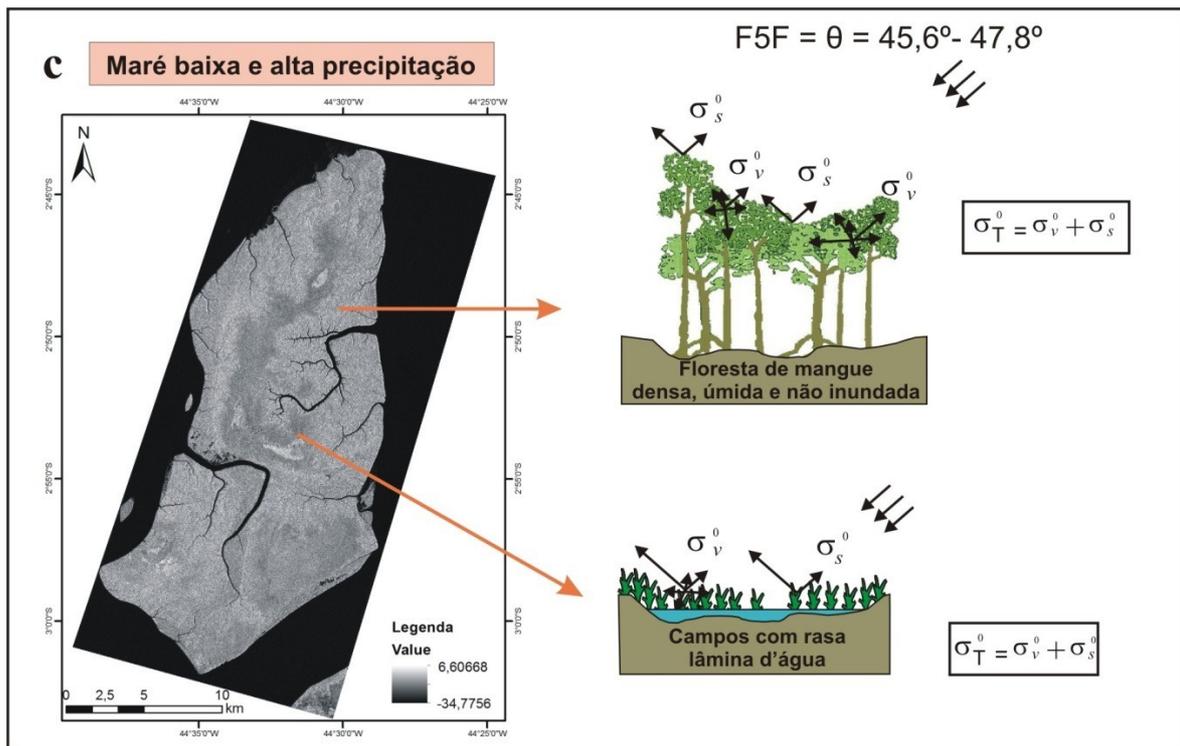


Figura 5.7 – Imagens coeficientes de retrospalhamento SAR RADARSAT-1. a) – W1 ($20^\circ - 31^\circ$); b) F3N ($41,1^\circ - 43,7^\circ$); c) – F5F ($45,6^\circ - 47,8^\circ$), onde: σ_T^0 - retrospalhamento total; σ_s^0 - retrospalhamento da superfície da vegetação e σ_v^0 - retrospalhamento volumétrico, do interior do dossel da vegetação. O comprimento da seta está relacionado a quantidade de energia retrospalhada.

A Tabela 5.6 mostra o resultado da análise por separabilidade (DT) medida entre pares de classe para as três imagens SAR com diferentes ângulos de incidência. Como observado, o par floresta de mangue e campos inundáveis apresentam baixa separabilidade nas três imagens. A baixa separabilidade deve-se a alta precipitação, pois conforme Leckie (1998), a redução no contraste das classes nas imagens SAR, às vezes, está relacionada com imagens adquiridas sob condições úmidas ou chuvosas, como visto no capítulo 4. Nas imagens com ângulos de incidência maiores (Figura 5.7b e 5.7c), a separação é comprometida pelo baixo retorno do sinal incidente, pois muita energia se perde, em função da trajetória da onda ser maior. No entanto, analisando este conjunto de imagens, a que apresenta a maior separabilidade do par floresta de mangue - campos inundáveis é a imagem F5F, o que nos leva a considerar que para condições de alta precipitação, imagens com altos ângulos de incidência são mais indicadas para separar as floresta de mangue dos campos inundáveis.

A separação quase completa pode ser vista para os pares de classe água - manguezal e água- campos, com valor de separabilidade igual a 2,0, nas imagens com os maiores ângulos

de incidência. Na imagem W1 essa separação ocorre até certo ponto, uma vez que o valor foi igual a 1,170.

Tabela 5.6: Separabilidade por divergência transformada (DT) entre os pares de classes nas três imagens SAR.

| Pares de Classes | W1 | F3N | F5F |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| Campos-Floresta de Mangue | 0,005 | 0.090 | 0.112 |
| Água – Floresta de Mangue | 1.245 | 2,000 | 2,000 |
| Água – Campos | 1,170 | 2,000 | 2,000 |

Os resultados mostram que o retroespalhamento na banda C-HH em florestas de mangue é controlado principalmente pelo espalhamento volumétrico e pelo conteúdo de umidade das folhas, para aquisições sob baixo ângulo de incidência, não havendo contribuição do espalhamento *double-bounce*, como já discutido no capítulo 4. Tal fato, difere do comportamento da floresta ombrófila densas, descrito por Wang *et al.* (1995). O aumento do ângulo de incidência determina uma menor capacidade de penetração da radiação no dossel, logo pouca energia proveniente do espalhamento de volume retorna na direção do sensor e muita energia é perdida para o sistema.

Observando os valores de retroespalhamento dos campos inundáveis e dos manguezais, verifica-se que estes são muito próximos nas três imagens, apresentando dispersões que se sobrepõem, principalmente nas imagens W1 e F5F, o que acarreta em uma menor separabilidade entre estes ambientes, gerando uma maior confusão na identificação dos ambientes.

De acordo com Mochel & Castro (2003), durante o período chuvoso há formação de lagos perenes, com lâminas d'águas rasas, que permitem que parte da vegetação herbácea fique exposta, além da presença de plantas aquáticas emersas. Como visto na Figura 5.6 as áreas de campos inundáveis mostram valores de retroespalhamento baixos para todos os ângulos de incidência, isto se deve ao fato deste ambiente apresentar uma superfície de baixa rugosidade e com alta constante dielétrica devido o conteúdo de água intersticial, resultando em uma reflexão lambertiana.

Como observado, os valores de retroespalhamento para a água são os mais baixos para todos os ângulos de incidência em função do espalhamento especular.

5.5 – CONCLUSÕES

Através da análise por principal componente foi possível concluir que as imagens adquiridas sob ângulos de incidência que variaram entre 20° e 31° são altamente correlacionadas com as imagens adquiridas sob ângulos de incidência maiores, em torno de 45°, ou seja, havendo redundância de informação.

Para as áreas de manguezal, acredita-se que o mecanismo de espalhamento predominante tenha sido o de volume em todos os ângulos de incidência. No entanto, para a imagem W1 (menor ângulo de incidência) o incremento nos valores de retroespalhamento, se deve a alta influência da umidade, não havendo contribuição do *double bounce*, pela inundação da maré. Assim, as variações diárias de maré não são detectadas por sistemas que operam na banda C-HH, ao contrário das inundações sazonais em áreas de planícies fluviais que são detectadas por estes sistemas, conforme a literatura.

Os campos inundáveis apresentaram baixos valores de retroespalhamento em função da sua baixa rugosidade, que gera um retroespalhamento difuso, porém boa parte da energia incidente é refletida na direção oposta ao sensor.

CAPÍTULO 6: INFLUÊNCIA DA MICROTOPOGRAFIA DOS CAMPOS NO RETROESPALHAMENTO DAS BANDAS C e L

6.1 - INTRODUÇÃO

O uso de imagens SAR (Radar de abertura sintética) na separação, mapeamento e monitoramento de ambientes alagáveis já vem sendo utilizado desde a década de 80, como vistos nos trabalhos de Ormsby *et al.* (1985) e Richards *et al.* (1987), nos quais os autores utilizaram na pesquisa o comprimento de onda referente a banda L. Com o avanço desta tecnologia, pesquisas foram conduzidas para avaliar a utilização de imagens multi-polaziradas e multi-frequências no mapeamento dos ambientes alagáveis, tanto costeiros como continentais (Pope *et al.* 1994, 1997, Hess *et al.* 1990, 1995, Wang *et al.* 1995, Proisy *et al.*, 2000, Bourgeau-Chavez *et al.* 2001, Proisy *et al.* 2002, Costa 2004, Bourgeau-Chavez *et al.*, 2005, Lang & Kasischke 2008 e Marti-Cardona *et al.* 2010).

Bourgeau-Chavez *et al.* (2005) consideram que para a identificação, mapeamento e monitoramento de ambientes alagáveis é necessário o conhecimento das várias características da superfície, que irão influenciar como ocorrerá as interações com a energia de micro-ondas e como estas serão registradas pelo sensor. Para estes autores, as características podem ser classificadas em três grandes grupos: estrutura da vegetação, rugosidade superficial do terreno e a presença ou ausência de água.

Quanto à estrutura da vegetação esta pode ser arbórea ou herbácea, as quais irão produzir interações diferenciadas com a energia de micro-ondas, logo serão registradas diferentemente pelo sensor.

Para áreas com vegetação herbácea e solo seco, espalhamentos múltiplos ocorrem a partir da vegetação e superfície do terreno, causando um baixo retorno de sinal. Com o aumento da umidade do solo ocorre o realce do retroespalhamento, em função do incremento na constante dielétrica e um possível espalhamento *double bounce* em função da interação vegetação herbácea – superfície do terreno. Caso a superfície esteja inundada, toda energia incidente é refletida na direção oposta ao sensor e o retroespalhamento é tipicamente menor do que no caso de solo seco (Bourgeau-Chavez *et al.* 2005).

A rugosidade é a propriedade do terreno que influencia fortemente o retroespalhamento do sinal de radar. Segundo Dierking (1999), a rugosidade é separada em três regimes diferentes: a macrotopografia, microtopografia e escala intermediária, que situa-se entre estes dois regimes. Segundo Paradella *et al.* (2009a), a macrotopografia é controlada

pelas mudanças decamétricas na declividade e orientação das facetas da superfície, que estão relacionadas com as estruturas geológicas, padrões erosionais e com a geomorfologia. A microtopografia está relacionada com as variações de alturas e comprimentos de ondulações do terreno que são comparáveis ao comprimento de onda do radar e determina a intensidade e o tipo de espalhamento da energia do radar (Dierking 1999). O efeito da escala intermediária, segundo Paradella *et al.* (2009a) não é tão bem conhecido, como os da macro e microtopografia. Segundo estes mesmos autores, em terrenos planos os efeitos da microtopografia são mais realçados do que os da macrotopografia.

Várias pesquisas mostraram a influência da microtopografia no retroespalhamento de imagens SAR (banda C e L) em ambientes tropicais. Estes estudos foram realizados para fim de mapeamento geológico e através de análises estatísticas foi possível concluir que a rugosidade da superfície apresenta certa correlação linear com o retroespalhamento (Rabelo 2007, Knust 2008, Paradella *et al.* 2009a, Paradella *et al.* 2009b, Silva *et al.* 2009 e Silva, 2010).

Neste capítulo foram analisadas imagens SAR de áreas alagáveis da região de campos da Baixada Maranhense (extremo norte do estado do Maranhão) (Figura 6.1), com o objetivo de verificar a relação entre a microtopografia e o coeficiente de retroespalhamento, extraído da imagem ascendente L-HH, PALSAR, modo *Fine Beam Single* (FBS), e nas quatro polarizações da banda C do RADARSAT-2, modo *Fine Quad-Pol*, descendente, durante a estação seca.

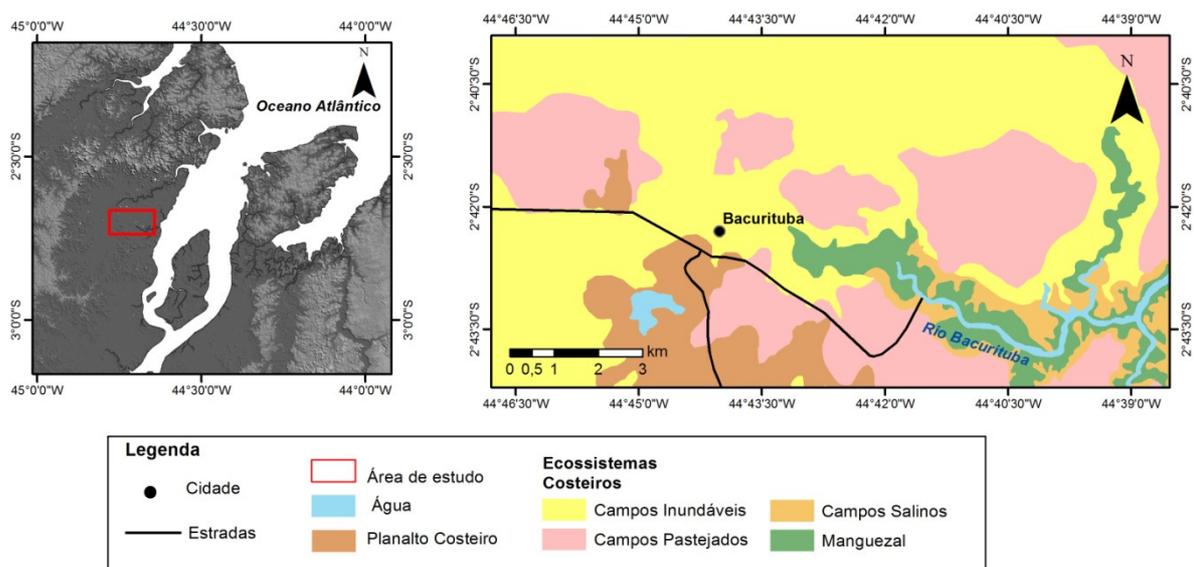


Figura 6.1 – Localização e mapa de ecossistemas costeiros da área de estudo. Fonte: Modificado de Mochel & Castro (2003).

6.2 - MATERIAIS

A investigação foi baseada em uma cena do satélite RADARSAT-2 e uma cena do ALOS/PALSAR. O RADARSAT-2 opera na banda C com diferentes modos. Neste estudo foi utilizada uma cena do modo *Fine Quad-Pol* descendente. O PALSAR opera na banda L e o modo de aquisição utilizado na pesquisa foi o *Fine Beam Single* (FBS), com polarização HH ascendente. As imagens foram adquiridas em datas distintas, porém durante o período de estiagem. De acordo com dados registrados pela Estação telemétrica de São Bento, que faz parte da rede de monitoramento hidrometeorológico da ANA (Agência Nacional de Águas 2011), localizada a 14 km da área em estudo, tanto para a cena RADARSAT-2 quanto para a cena ALOS PALSAR não foi registrada precipitação pluviométrica nos cinco dias que antecederam a aquisição. As duas imagens foram adquiridas em condições de preamar segundo os dados de tábuas de maré do terminal da ALUMAR (Diretoria de Hidrografia e Navegação - DHN 2011). As características das imagens podem ser vistas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Características das imagens RADARSAT-1 utilizadas.

| CARACTERÍSTICAS | PALSAR | RADARSAT-2 |
|--|-------------------------|----------------------|
| Banda | 23,6 | 5,6 |
| Comprimento de Onda | L | C |
| Polarização | HH | HH/HV/VH/VV |
| Azimute de Visada | 78° (ascendente) | 282° (descendente.) |
| Modo de Aquisição | <i>Fine Beam Single</i> | <i>Fine-Quad-Pol</i> |
| Nível de Processamento | 1.5 - Georeferenciada | Single Look Complex |
| Ângulo de Incidência (centro) | 36,6° - 40,9° | 20,9° -22,8 |
| Nº de Looks | 4 | 1 |
| Resolução Nominal (range x azimute) (m) | 10 x 10 | 5,2 x 7,6 |
| Espaçamento em pixel (range x azimute) (m) | 6,25 x 6,25 | 4,73x 5,34 |
| Largura da faixa (km) | 70 | 25 |
| Data de aquisição | 15-Dez, 2008 | 23-Out, 2010 |
| Condição de maré | Alta | Alta |
| Precipitação acumulada 5 dias antes da aquisição | 0,0 mm | 0,0 mm |

6.3 - ABORDAGEM METODOLÓGICA

6.3.1 - Processamento das imagens SAR

Para a cena RADARSAT-2, primeiramente, foi realizada a leitura da imagem, com a escolha da calibração para sigma zero (σ^0) em escala linear, no PCI Geomatica versão 10.3. Para a cena PALSAR, que foi adquirida em amplitude, e para a cena RADARSAT-2, em escala linear foi aplicado o filtro *Enhanced-frost* (janela de 5 x 5), para reduzir o ruído *speckle*.

O passo seguinte foi a ortorretificação das imagens, para isso utilizou-se os modelos matemáticos *Rational Function* e de *Toutin* do PCI Geomatica *OrtoEngine V10.3*, respectivamente para as imagens RADARSAT-2 e PALSAR. O DEM utilizado na ortorretificação foi o extraído das imagens de elevação SRTM4 (*Shuttle Radar Topography Mission*) e os dados planimétricos foram extraídos de outra imagem PALSAR disponibilizada no banco de dados do IBGE, no formato FBD de abril de 2008 que segundo IBGE (2011), que apresenta um erro quadrático médio de 31m.

Posteriormente, a correção geométrica foi avaliada pelo cálculo do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error - RMSE*) e pelo Erro Circular com 90% de probabilidade (*Circular Map Accuracy Standard - CMAS*) (Paradella *et al.*, 2005). O RMSE foi calculado considerando as coordenadas de pontos independentes de validação (ICPs – *Independent Check Points*), adquiridos com GPS durante a etapa de campo e as coordenadas das feições correspondentes a estes pontos observados nas imagens corrigidas (Paradella *et al.* 2003). O resultado da avaliação pode ser visto na Tabela 6.2.

Tabela 6.2– Valores do Erro Médio Quadrático e CMAS encontrados no processo de validação das imagens corrigidas geometricamente.

| IMAGEM | RMSE (E) | RMSE (N) | RMSE (TOTAL) | CMAS | N. GCPs | N. ICPs |
|------------|----------|----------|--------------|---------|---------|---------|
| RADARSAT-2 | 4,7 m | 3,15 m | 3,5 m | 7,53 m | 12 | 23 |
| PALSAR | 7,24 m | 8,39 m | 8,66 m | 23,84 m | 15 | 25 |

As imagens analisadas possuem diferentes resoluções e tamanho de pixel, desta maneira após a ortorretificação estas foram reamostradas para 6,25 m que é o espaçamento em pixel da imagem PALSAR, de menor resolução espacial.

Como verificado na Tabela 6.2, o CMAS variou entre 7 e 23 m, desta maneira para manter uma boa relação entre as medidas de microtopografia de campo e o sigma zero

extraído das imagens SAR. Assim, criou-se um *buffer* de raio de 25 m em torno dos pontos de campo, dentro do qual se calculou um valor médio dos valores, no caso sigma linear para as imagens RADARSAT-2 e valores de amplitude para a imagem PALSAR.

Os valores extraídos das imagens foram tabulados em uma planilha do Excel, no qual foram convertidos para valores de sigma zero em escala logarítmica. Para as imagens RADARSAT-2 foi utilizada a Equação 6.1 e para a imagem PALSAR a conversão foi realizada através da equação Equação 6.2 (Shimada *et al.* 2007).

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 \times \log_{10} (\sigma^0_{\text{linear}}) \quad \text{(Equação 6.1)}$$

$$\sigma^0 \text{ (dB)} = 10 \times \log_{10} (\text{DN}^2) + \text{CF} \quad \text{(Equação 6.2),}$$

onde:

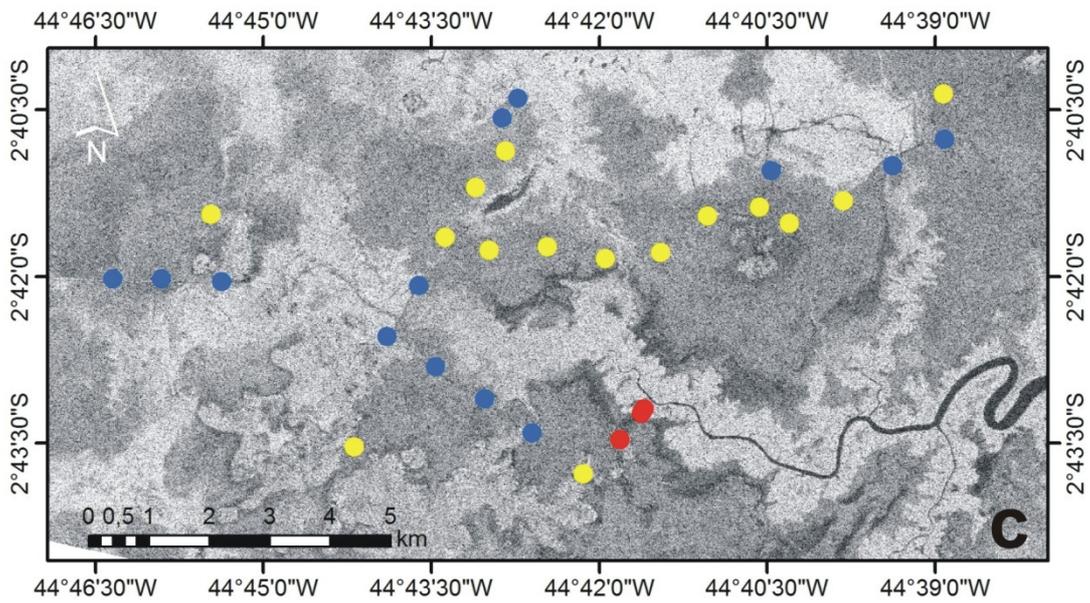
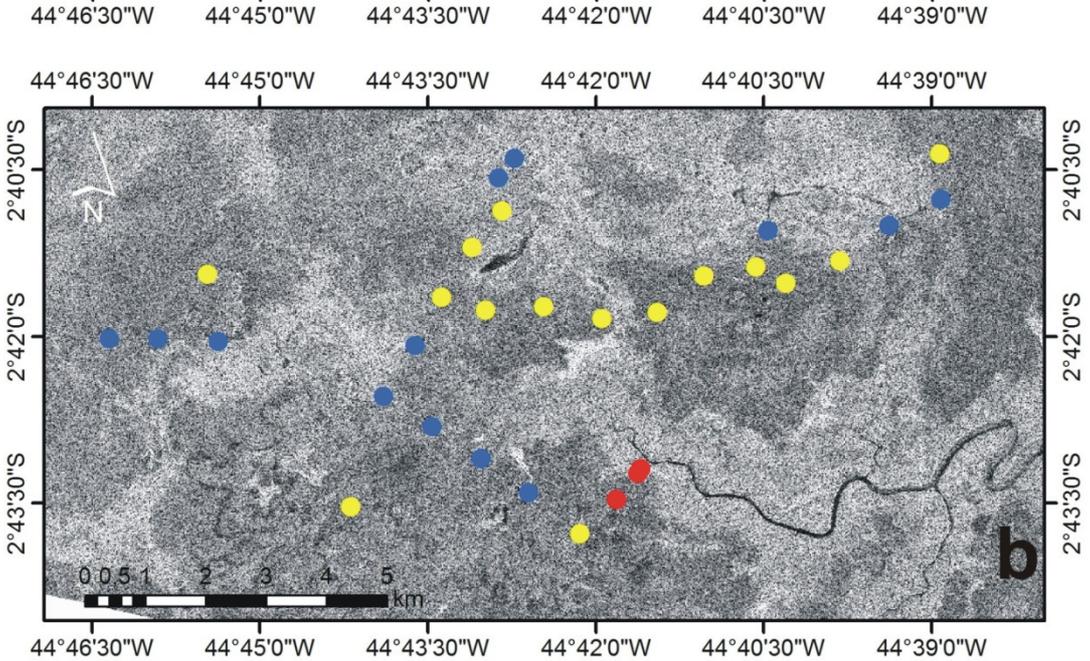
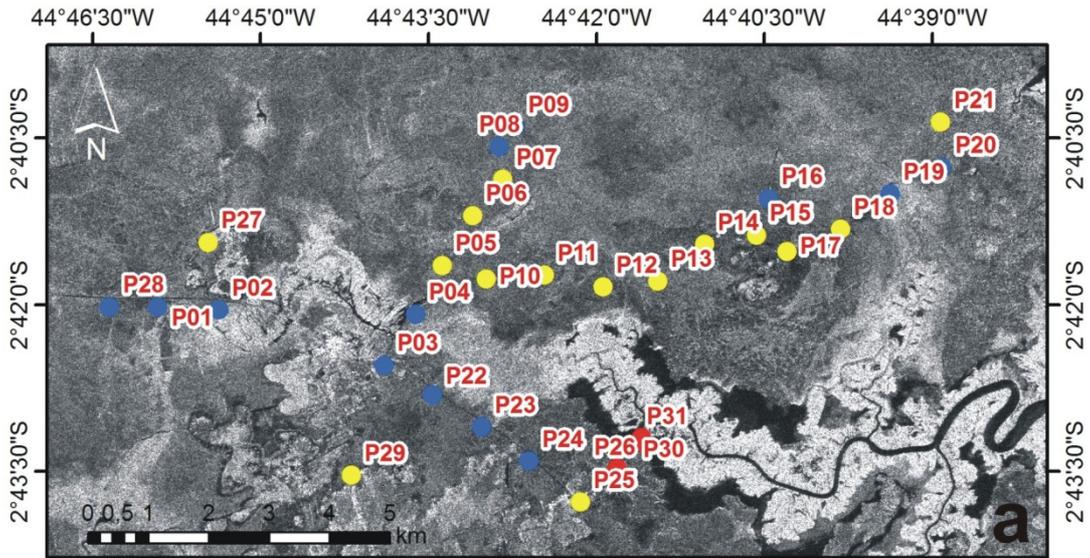
DN é o número digital da imagem amplitude;

CF é um fator de conversão = - 83.

6.3.2 - Extração da microrugosidade em campo

As medidas da microrugosidade foram realizadas na etapa de campo em novembro de 2010, durante a estação seca, as quais foram medidas nas três classes de campos (inundáveis, pastejados e salinos) descritas por Mochel & Castro (2003), onde as medidas foram realizadas na superfície do solo com vegetação seca das três classes.

Foram amostrados 31 pontos dos quais 15 em campos pastejados, 13 em campos inundáveis e 3 em campos salinos (Figura 6.2). Em cada ponto foram coletados três perfis de rugosidade, ortogonais e distantes cinco metros entre si. Para a medida foi utilizado um rugosímetro (*meshboard*), cuja metodologia foi definida por Mattia *et al.* (2003), e posteriormente utilizada em terrenos tropicais (Silva *et al.* 2009, Paradella *et al.* 2009 e Silva, 2010). A técnica envolveu a inserção na superfície do terreno de uma placa de PVC, com 40 cm de altura e 1,2 m de comprimento (Figura 6.3), com uma grade quadriculada de espaçamento de 2 cm. Em seguida, foi feito o registro fotográfico de cada um dos perfis para posterior processamento em escritório.



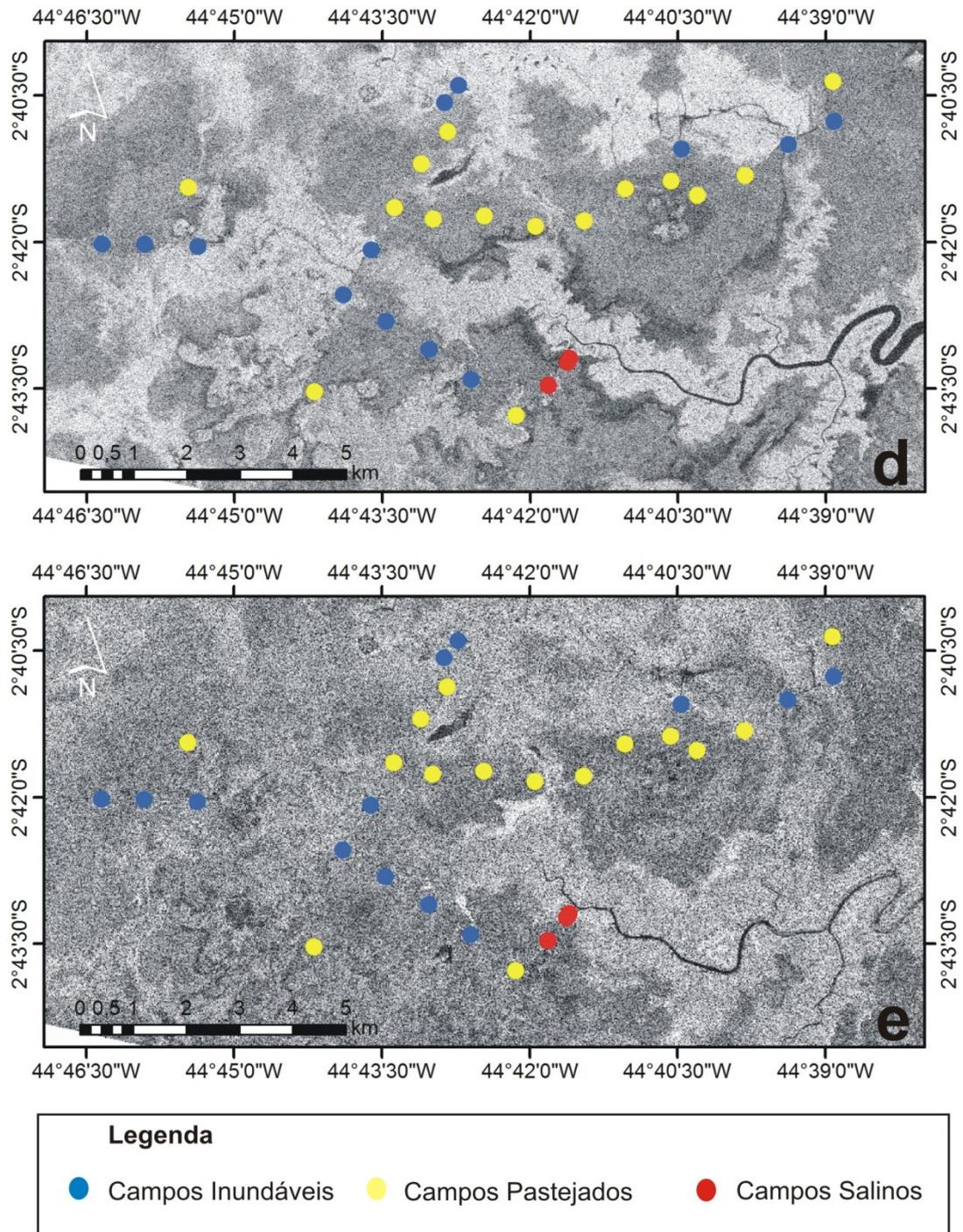


Figura 6.2 - Distribuição dos pontos de amostragem de microtopografia em campo sobre as imagens: a) L-HH; b) C-HH; c) C-HV; d) C-VH; e) C-VV.



Figura 6.3 – Rugosímetro utilizado em campo para a obtenção dos parâmetros de microtopografia: a) nos campos inundáveis; b) nos campos pastejados; c) nos campos salinos.

6.3.3 - Processamento dos perfis de microrugosidade

As fotografias dos perfis de microrugosidade adquiridas em campo foram digitalizadas no *software Roughness*, desenvolvido por Rennó (2008), o qual utiliza linguagem IDL (*Interface Description Language*). A partir da utilização do perfil é possível calcular os dois parâmetros da rugosidade: O parâmetro H_{RMS} que corresponde a raiz do quadrado médio da variação vertical do perfil, ou seja, este parâmetro descreve a rugosidade vertical e é dado pela Equação 6.3, definida por Ulaby *et al.* (1982); e o parâmetro L_C , que é a correlação lateral, derivada da função de autocorrelação normalizada, que é uma medida da similaridade entre as alturas z medidas em dois pontos distintos do perfil separados por uma distância x' , dada pela Equação 6.4, Ulaby *et al.* (1982). A correlação lateral L_C é definida então como a distância horizontal, no qual o perfil de superfície é autocorrelacionado com um valor maior do que $1/e$ ($\approx 0,368$), em outras palavras expressa a rugosidade horizontal.

$$H_{RMS} = \left[\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N (Z_i)^2 - N(\bar{Z})^2 \right) \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 6.3})$$

onde $\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i$, sendo N é o número de amostras.

$$\rho(x') = \frac{\sum_{i=1}^{N+1-j} Z_i Z_{i+j}}{\sum_{i=1}^N Z_i^2} \quad (\text{Equação 6.4})$$

onde j é um número inteiro ≥ 1 .

6.3.4 - Análises estatísticas

Após o processamento dos perfis de microtopografia e a extração dos parâmetros H_{RMS} e L_C , para cada ponto adotou-se a média das três medidas de cada um destes parâmetros, que foram organizados em uma planilha, juntamente com os valores de coeficiente de retroespalhamento extraídos das imagens RADARSAT-2 e PALSAR.

As análises estatísticas foram realizadas através do *Software Statistica* 10 versão *Trial* e tiveram por objetivo a análise de regressão linear simples entre os valores de microrugosidade e os coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR. Os procedimentos estatísticos utilizados neste capítulo foram os mesmos adotados por Silva *et al.* (2009) e Silva (2010), em estudo da influência da microtopografia no retroespalhamento de área de canga laterítica em Carajás.

De acordo com Kutner *et al.* (2004), a análise de regressão é uma metodologia estatística, que utiliza a relação entre duas variáveis ou mais variáveis, de tal maneira que uma variável pode ser predita por outra. Assim, neste trabalho utilizou-se a análise de regressão linear, com o objetivo de estimar o quanto os valores dos parâmetros de microtopografia estão correlacionados com os valores de retroespalhamento das imagens RADARSAT-2 nas quatro polarizações e na imagem PALSAR HH.

Para tal análise os dados (valores das amostras de microtopografia e de coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR) passaram primeiramente pela análise exploratória, que é descrita mais detalhadamente por Kutner *et al.* (2004), onde verificou-se a princípio a normalidade das amostras, através do teste de *Shapiro-Wilk*.

Em seguida foram construídos *boxplots*, que visaram verificar as médias, dispersão em torno da média, no qual foi adotado 2 vezes o desvio padrão da média amostral – ($2*SE$), os valores extremos e *outliers*, que são valores anormais a população amostral. Para verificar a presença *outliers*, as amostras foram testadas pelo método de *Dixon*.

Posteriormente foi verificada a similaridade entre as médias das amostras, utilizando o teste *t* de *Student*, quando as amostras apresentavam distribuição normal e o teste *Mann-Whitney U*, para as amostras que não apresentavam a normalidade da distribuição.

A última etapa da análise exploratória foi a verificação do grau de correlação entre os parâmetros de microtopografia e os valores de σ^0 , por meio do coeficiente de *Pearson*, para as variáveis com distribuição normal e o coeficiente de *Spearman* entre as variáveis que não apresentaram normalidade na distribuição. Após a análise exploratória deu-se início a construção dos modelos de regressão linear, para as variáveis com maior grau de correlação.

Onde foram testadas transformações aritméticas dos parâmetros de microtopografia para elevar a correlação com os valores de σ^0 .

O último passo foi calcular o coeficiente de determinação (R^2), que mede a qualidade do ajuste, ou seja, mede a proporção da variação de uma variável em relação à média que é explicada pela regressão. A validade do modelo foi feita através da análise do p-valor em relação ao nível de significância adotado e também pelo teste de *Fisher*, que irá verificar se a variação total explicada pela regressão é estatisticamente significativa.

6.4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.4.1- Análise exploratória dos parâmetros de microtopografia

Primeiramente foram analisadas a normalidade dos parâmetros de microtopografia, H_{RMS} e L_C , obtidos através do processamento dos perfis de rugosidade coletados em campo. A normalidade foi testada pelo método de *Shapiro-Wilk*, que é recomendado para um número de amostras pequenas. A hipótese H_0 testada por este método considera que as amostras provem de uma população com distribuição normal, onde o valor de p deve ser maior que 0,05, quando a hipótese é verdadeira.

Os valores obtidos através do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* foram de: $W=0,927$ e $p\text{-valor} = 0,04$ para o parâmetro H_{RMS} ; $W= 0,946$ e $p\text{-valor} = 0,123$ para L_C . Estes valores indicam que as amostras dos parâmetros de rugosidade apresentam distribuição normal apenas para o parâmetro L_C .

Os parâmetros H_{RMS} e L_C também foram analisados considerando cada uma das três classes investigadas. Para cada classe, foram calculados os valores de média, a dispersão em torno deste parâmetro, além dos valores extremos e *outliers* (Figuras 6.4a e 6.4b). No entanto, pelo teste de *Dixon* estas amostras não foram confirmadas como *outliers*.

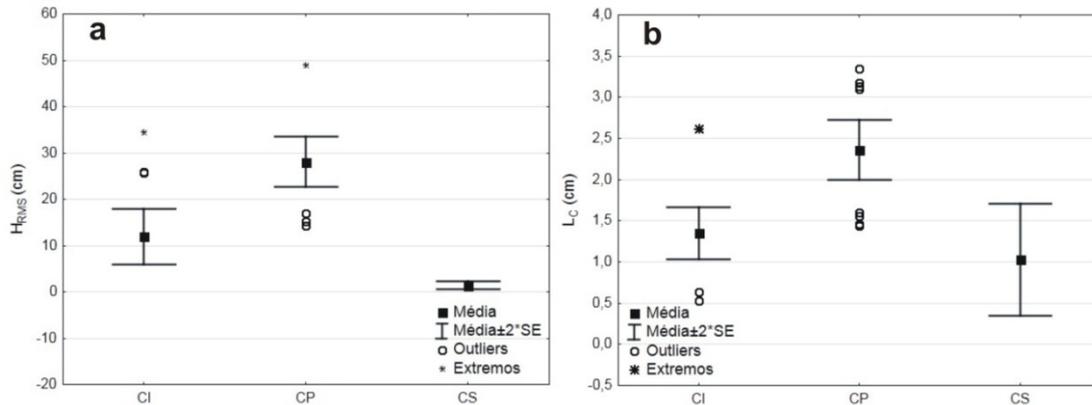


Figura 6.4 – *Boxplots* dos parâmetros de microtopografia: a) H_{RMS} e b) L_C , nas classes CI (campos inundáveis); CP (campos pastejados) e CS (campos salinos).

Analisando os *boxplots* das Figuras 6.4a e 6.4b é possível verificar que os campos pastejados apresentam os maiores valores de média para H_{RMS} e L_C . Já os campos salinos possuem os menores valores de média, nos dois parâmetros. As maiores dispersões foram encontradas para os campos inundáveis para H_{RMS} e campos salinos em L_C . Visualmente observa-se uma separação entre as três classes para o parâmetro H_{RMS} , no entanto, quando se observa L_C , há sobreposição dos intervalos de dispersão das classes campos inundáveis e salinos, o que pode levar a uma dificuldade na separabilidade destas duas classes, quando analisado este parâmetro.

Para verificar a similaridade das médias dos parâmetros H_{RMS} e L_C , nas três classes estudadas, os dados do parâmetro H_{RMS} foram testados pelo método de *Mann-Whitney (U)*, pois não apresentaram distribuição normal, enquanto que os dados do parâmetro L_C foram testados pelo método *t Student*, pois apresentaram normalidade na distribuição (Tabela 6.3).

Tabela 6.3– Valores de média e desvio padrão dos parâmetros de microtopografia por classe estudada (CI – campos inundáveis; CP – campos pastejados e CS – campos salinos), além dos valores p dos testes *Mann-Whitney* e *t Student*, usados respectivamente, para comparar as médias de H_{RMS} e L_C .

| | | CI | CP | CS |
|-----------|---------------------------|--------|--------|-------|
| H_{RMS} | Média | 11,944 | 28,094 | 1,424 |
| | Desvio padrão | 10,941 | 10,455 | 0,686 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | | | |
| | média _{CP} | 0,001 | - | 0,009 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | | | |
| | média _{CS} | 0,022 | 0,009 | - |

| | | | | |
|-------|----------------------|--------|-------|-------|
| L_C | Média | 1,353 | 2,358 | 1,030 |
| | Desvio padrão | 0,569 | 0,705 | 0,590 |
| | p-valor do Teste t | | | |
| | média $_{CP}$ | 0,0003 | - | 0,008 |
| | p-valor do Teste t | | | |
| | média $_{CS}$ | 0,393 | 0,008 | - |

Os resultados dos testes de similaridades apresentados na Tabela 6.3 confirmam a separabilidade para as três classes de vegetação investigadas em relação ao parâmetro H_{RMS} , e confirma também a dificuldade de separação entre as classes campos inundáveis e salinos para o parâmetro L_C .

6.4.2 - Análise exploratória dos coeficientes de retroespalhamento das imagens SAR

6.4.2.1 - Imagens RADARSAT-2

Os valores do coeficiente de retroespalhamento das imagens RADARSAT-2, nas quatro polarizações foram analisados da mesma maneira que os dados dos parâmetros da microtopografia. Os valores de σ^0 analisados se referem a média dos *pixels* contidos em um *buffer* de raio 25m, como descrito no item abordagem metodológica, para as quatro polarizações.

Para verificar a normalidade dos valores de σ^0 , as amostras foram testadas pelo método *Shapiro-Wilk* e os resultados podem ser vistos na Tabela 6.4.

Tabela 6.4– Valores dos testes de *Shapiro-Wilk* para as quatro polarizações da imagem RADARSAT-2.

| | SW-W | p-valor |
|-----------------|-------|---------|
| σ^0_{HH} | 0,952 | 0,180 |
| σ^0_{HV} | 0,938 | 0,074 |
| σ^0_{VH} | 0,939 | 0,081 |
| σ^0_{VV} | 0,979 | 0,812 |

Os valores obtidos através do teste de normalidade de *Shapiro-Wilk*, apresentados na Tabela 6.4 indicam que todas as amostras analisadas das quatro polarizações da imagem RADARSAT-2, possuem distribuições normais.

A partir dos dados das amostras de coeficiente de retroespalhamento das quatro polarizações da imagem RADARSAT-2 foram calculados os valores de média, a dispersão, os *outliers* e extremos (Figura 6.5). No entanto, pelo teste de *Dixon* estas amostras não foram confirmadas como *outliers*.

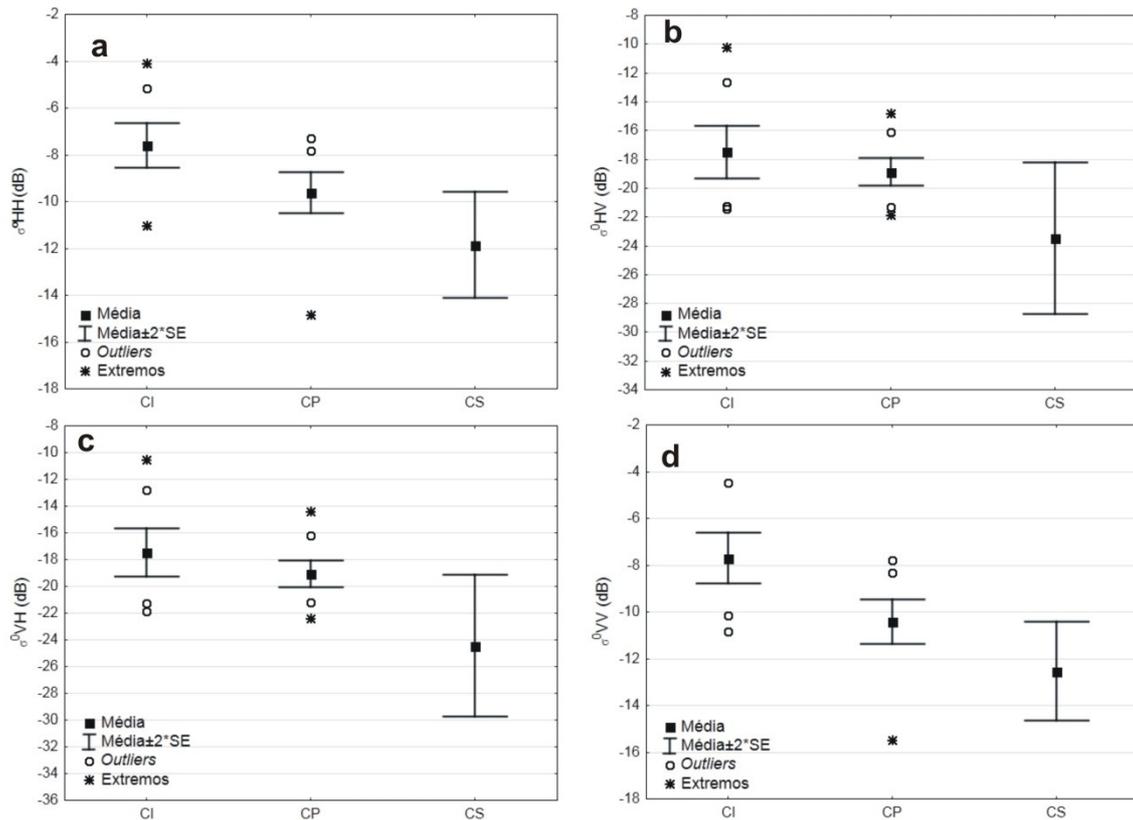


Figura 6.5 – *Boxplots* dos valores de σ^0 obtidos nas imagens RADARSAT-2, para as diferentes classes de campos nas polarizações: (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV.

Analisando os *boxplots* da Figura 6.5 é possível notar que os campos inundáveis apresentam as maiores médias de coeficiente de retroespalhamento em todas as polarizações, seguidos pelos campos pastejados e os menores valores de médias foram encontrados para os campos salinos, bem como as maiores dispersões. Nas polarizações paralelas percebe-se visualmente uma separação entre a vegetação de campos inundáveis e campos pastejados, no entanto, visualmente há certa dificuldade de separação entre os campos pastejados e campos salinos em virtude da sobreposição das dispersões. Observa-se também uma dificuldade de separação entre os campos inundáveis e os pastejados nas polarizações cruzadas, onde há certa sobreposição das dispersões destas classes, porém há separabilidade entre os campos salinos e estas duas classes. Para verificar a similaridade das médias dos valores de retroespalhamento, nas três classes estudadas, os dados das amostras nas quatro polarizações

foram testados pelo método *t Student*, pois apresentaram normalidade na distribuição (Tabela 6.5).

Tabela 6.5 - Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos das quatro polarizações da imagem RADARSAT-2 e os p-valores do teste *t Student* usado para comparar as médias de σ^0_{HH} , σ^0_{HV} , σ^0_{VH} e σ^0_{VV} entre as classes de campos (CI – campos inundáveis, CP – campos pastejados e CS – campos salinos), com nível de significância de 5%.

| | | CI | CP | CS |
|-----------------|--|----------------------------|--------------|--------------|
| σ^0_{HH} | Média | -7,597 | -9,619 | -11,844 |
| | Desvio padrão | 1,732 | 1,705 | 1,972 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CP} | 0,004 | - | 0,060 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CS} | 0,002 | 0,060 | - |
| σ^0_{HV} | Média | -17,481 | -18,875 | -23,481 |
| | Desvio padrão | 3,287 | 1,858 | 4,560 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CP} | 0,171 | - | 0,007 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CS} | 0,018 | 0,007 | - |
| σ^0_{VH} | Média | -17,460 | -19,052 | -24,428 |
| | Desvio padrão | 3,248 | 1,948 | 4,597 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CP} | 0,121 | - | 0,003 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CS} | 0,007 | 0,003 | - |
| σ^0_{VV} | Média | -7,691 | -10,420 | -12,539 |
| | Desvio padrão | 1,984 | 1,823 | 1,830 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CP} | 8 x 10⁻⁴ | - | 0,084 |
| | p-valor do Teste <i>t</i> média _{CS} | 0,002 | 0,084 | - |

A similaridade estatística entre as médias de coeficiente de retroespalhamento dos campos pastejados e campos salinos, nas polarizações paralelas (HH e VV), e entre os campos inundáveis e os campos pastejados, nas polarizações cruzadas, foi confirmada através do teste *t Student*, como visto na Tabela 6.5. Este resultado confirma a dificuldade de separação entre as classes nestas imagens. Confirmando o que foi observado nos *boxplots* da Figura 6.5. Foi observado também, em todas as polarizações, que as classes campos inundáveis e campos salinos são distinguíveis estatisticamente.

Para verificar o grau de correlação entre os parâmetros de microrrugosidade e os dados de σ^0 , foi utilizado o coeficiente de *Pearson*, devido a natureza paramétrica das variáveis. Como visto na Tabela 6.6, a correlação entre as variáveis é baixa.

Tabela 6.6– Matriz de correlação baseado no coeficiente de *Pearson* entre os parâmetros de microtopografia e os valores de σ^0 extraídos das polarizações da imagem RADARSAT-2.

| | H_{RMS} | L_C |
|-----------------|-----------|-------|
| σ^0_{HH} | 0,02 | -0,12 |
| σ^0_{HV} | 0,13 | 0,10 |
| σ^0_{VH} | 0,13 | -0,09 |
| σ^0_{VV} | -0,08 | -0,13 |

6.4.2.2 - Imagem PALSAR

Os valores do coeficiente de retroespalhamento da imagem L-HH/ PALSAR foram analisados da mesma maneira que os dados extraídos das imagens RADARSAT-2.

Para verificar a normalidade dos valores de σ^0 , as amostras foram testadas pelo método *Shapiro-Wilk* e o resultado foi de SW-W = 0,824 e p-valor=0,0001. Estes valores atestam a não normalidade da distribuição das amostras de coeficiente de retroespalhamento da imagem L-HH.

A partir dos dados das amostras de coeficiente de retroespalhamento da imagem L-HH PALSAR foram calculados os valores de média, a dispersão em torno deste parâmetro, *outliers* e extremos, que são apresentados no *boxplot* da Figura 6.6. A presença de *outliers* não foi confirmada pelo teste de *Dixon* em nenhum dos dados de coeficientes de retroespalhamento.

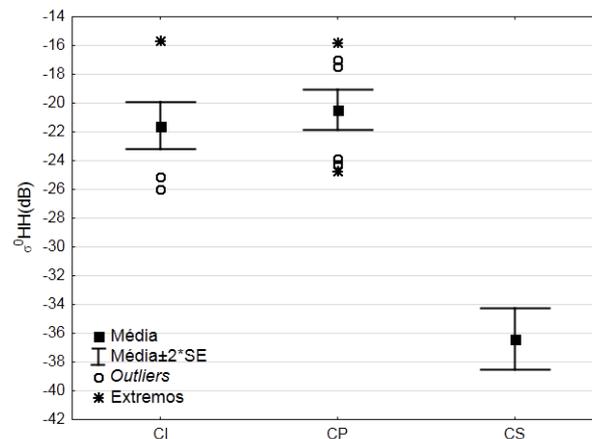


Figura 6.6 – *Boxplot* dos valores de σ^0 obtidos na imagem L-HH PALSAR para as classes CI (campos inundáveis); CP (campos pastejados) e CS (campos salinos).

Analisando a Figura 6.6 é possível verificar que a classe de campos pastejados apresenta as maiores média de σ^0 . No entanto, há certa sobreposição da dispersão desta classe com os campos inundáveis, o que pode dificultar a separabilidade entre estas. No entanto, entre estas classes e os campos salinos a distinção é clara. Para verificar a similaridade das médias dos valores de retroespalhamento, nas três classes estudadas, os dados das amostras da imagem L-HH foram testados pelo método *Mann-Whitney (U)*, pois apresentaram não normalidade na distribuição (Tabela 6.7).

Tabela 6.7– Valores de média e desvio padrão de σ^0 extraídos da imagem PALSAR L-HH e os p-valores do teste *Mann-Whitney U* usado para comparar as médias de σ^0 entre as classes de campos (CI – campos inundáveis, CP – campos pastejados e CS – campos salinos), com nível de significância de 5%.

| | | CI | CP | CS |
|-----------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|
| σ^0_{HH} | Média | -21,561 | -20,475 | -36,411 |
| | Desvio padrão | 2,936 | 2,726 | 1,846 |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,311 | - | 0,009 |
| | média _{CP} | | | |
| | p-valor do Teste <i>U</i> | 0,010 | 0,009 | - |
| | média _{CS} | | | |

A similaridade estatística entre as médias das classes campos pastejados e campos salinos, na imagem L-HH, foi confirmada através do teste *Mann-Whitney (U)*, como apresentado na Tabela 6.7. Este resultado confirma a dificuldade de separação entre as classes na imagem L-HH.

Para verificar as correlações entre os parâmetros de microtopografia e as amostras de σ^0 da imagem L-HH, foi utilizado o coeficiente de *Spearman*, em função da natureza não paramétrica dos dados. Como visto na Tabela 6.8, o maior valor de correlação foi encontrado com o parâmetro H_{RMS} , seguido por L_C .

Tabela 6.8– Matriz de correlação baseado no coeficiente de *Spearman* entre parâmetros de microtopografia e valores de sigma zero, obtidos a partir da imagem PALSAR L-HH.

| | H_{RMS} | L_C |
|-------------------|-----------|-------|
| σ^0_{L-HH} | 0,35 | 0,25 |

6.4.3 - Influência dos parâmetros de microtopografia nos valores de coeficiente de retroespalhamento das imagens SAR

Como visto anteriormente, houve dificuldade de separação das classes de campos, nas imagens analisadas. Para todas as imagens, só foi possível a separabilidade entre os campos inundáveis e salinos, havendo dificuldade de separação entre os campos inundáveis e pastejados e deste último com os campos salinos, nas diferentes polarizações e comprimentos de onda investigados.

Primeiramente, para se ter um entendimento das interações das radiações analisadas, com os diferentes tipos de campos é necessário caracterizá-los, quanto a sua rugosidade. Segundo Lewis & Henderson (1998), existem diversos níveis de aproximação que caracterizam a rugosidade da superfície. Entre eles, o proposto por Peake & Oliver (1971) que supõe que as irregularidades da superfície são expressas em função das variações de altura da superfície pelo erro quadrático médio das variações verticais do terreno (H_{RMS}), pelo comprimento de onda (λ) e pelo o ângulo de incidência (θ). Segundo estes autores, a rugosidade superficial pode ser classificada em três categorias:

Lisa: $H_{RMS} < \lambda / 25 \cos \theta$;

Intermediária: $\lambda / 4 \cos \theta < H_{RMS} < \lambda / 25 \cos \theta$;

Rugosa: $H_{RMS} > \lambda / 4 \cos \theta$.

Analisando os dados de comprimento de onda e ângulo de incidência das imagens estudadas os limites das categorias de rugosidade para cada imagem são apresentados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Limites das categorias de rugosidade calculados segundo critério de Peake e Oliver (1971), para as imagens RADARSAT-2 e PALSAR.

| Imagem | λ (cm) | θ_i | Superfície | Superfície | Superfície |
|------------|-------------------|------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| | | | Lisa ($H_{RMS} <$) | Intermediária ($<H_{RMS} <$) | Rugosa ($H_{RMS} >$) |
| RADARSAT-2 | 5,6 | 21,9° | 0,241 cm | 0,241-1,509 cm | 1,509 cm |
| FBS-PALSAR | 23,6 | 38,7° | 1,120 cm | 1,120-7,560 cm | 7,560 cm |

Analisando os valores médios do parâmetro H_{RMS} para as amostras analisadas de cada uma das classes de vegetação tem-se: 11,944 cm, 28,094 cm e 1,424 cm, respectivamente para as classes campos inundáveis, pastejados e salinos. Deste modo, tanto para as imagens do

RADARSAT-2 como para a imagem PALSAR, os campos salinos comportam-se como superfícies intermediárias. Entretanto, os campos inundáveis e pastejados apresentam-se como superfícies rugosas, o que dificulta a separação destas classes nas configurações das imagens analisadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva *et al.* (2009) e Silva (2010), em estudo de unidades de canga laterítica na região de Carajás.

Como observado a separação entre os campos pastejados e os salinos não foi possível para as polarizações paralelas na banda C. Tanto os campos salinos e os pastejados são caracterizados por áreas de solo exposto e nas polarizações paralelas há uma grande contribuição do retroespalhamento de superfície, logo os dois tipos de campos, conseqüentemente, tiveram valores semelhantes de sigma zero. Para a banda L, na polarização HH, estes campos foram bem delimitados, uma vez que com a banda L a penetração da radiação na superfície dos campos salinos deve ter sido maior, tanto pelo maior tamanho do comprimento de onda, pela ausência de vegetação, como pela condição de solo seco, logo boa parte do sinal não retornou em direção o sensor, o que pode ser comprovado pelos baixos valores de sigma zero, vistos no *boxplot* da Figura 6.5.

Nas polarizações cruzadas da banda C a dificuldade de separação ocorreu entre os campos inundáveis e os pastejados. Nestas polarizações, a interação ocorre principalmente com a cobertura vegetal, que provocam a despolarização da onda incidente, havendo assim o predomínio dos espalhamentos múltiplos. Desta maneira, nestas polarizações há dificuldade de separação entre o tipo de vegetação dos campos inundáveis e dos pastejados, na estação seca.

Na banda L e polarização HH, também não houve separabilidade entre os campos inundáveis e os campos pastejados. A energia em grandes comprimentos de onda e nesta polarização é capaz de atravessar a pequena cobertura vegetal (herbácea) e como neste caso o solo estava seco, múltiplos espalhamentos ocorreram em função das interações da energia com o solo e com a vegetação, logo sendo registrado um baixo retorno do sinal pelo sensor, o que é comprovado pelos baixos valores de sigma zero observados no *boxplot* da Figura 6.6, dificultando assim a separação destas duas classes.

Como visto no item análise exploratória, as imagens SAR apresentaram baixa correlação com os parâmetros de microtopografia. Análises mais detalhadas foram realizadas para verificar estas baixas correlações.

Com a finalidade de se aumentar a correlação entre os valores σ^0 das imagens com os parâmetros H_{RMS} e L_C , foram testadas algumas transformações aritméticas, como o logaritmo neperiano ($\ln H_{RMS}$ e $\ln L_C$), a raiz quadrada ($\sqrt{H_{RMS}}$ e $\sqrt{L_C}$) e o inverso ($1/H_{RMS}$ e $1/L_C$).

As maiores correlações obtidas foi para inverso de H_{RMS} , para as polarizações HV e VH da banda C e para a imagem L-HH (Tabela 6.10), resultados semelhantes foram encontrados por Knust (2008), para imagens fine RADARSAT-1 com polarização HH, em estudos de litounidades da região do semi-árido do Estado da Bahia. Para as imagens HH e VV da banda C, os valores de correlação com as transformações aritméticas foram estatisticamente não significantes.

A baixa correlação dos valores de retroespalhamento com o parâmetro L_C está ligada a grande variabilidade deste parâmetro (Verhoest *et al.* 2008). Segundo estes autores, os valores de L_C , dependem do comprimento do perfil usado em campo, que sofrem um incremento à medida que, o comprimento do perfil de campo aumenta.

Estes resultados também estão de acordo com os que mostraram que os valores do parâmetro L_C , possuem baixa correlação com os valores de retroespalhamento, devido a grande variabilidade.

Tabela 6.10 – Matriz de correlação entre os valores de sigma zero extraídos das imagens C –HH, C-HV, C-VH, C-VV e L-HH e as transformações aritméticas: logaritmo neperiano ($\ln_{H_{RMS}}$ e \ln_{L_C}), raiz quadrada ($\sqrt{H_{RMS}}$ e $\sqrt{L_C}$) e o inverso ($1/H_{RMS}$ e $1/L_C$). Em vermelho são destacadas as maiores correlações.

| σ^0 | $\ln_{H_{RMS}}$ | \ln_{L_C} | $\sqrt{H_{RMS}}$ | $\sqrt{L_C}$ | $1/H_{RMS}$ | $1/L_C$ |
|------------|-----------------|-------------|------------------|--------------|--------------|---------|
| C-HH | 0,09 | -0,05 | 0,04 | -0,09 | -0,27 | -0,04 |
| C-HV | 0,26 | 0,07 | 0,18 | 0,09 | -0,48 | -0,04 |
| C-VH | 0,27 | 0,07 | 0,18 | 0,08 | -0,51 | -0,04 |
| C-VV | 0,01 | -0,10 | -0,05 | -0,13 | -0,17 | 0,03 |
| L-HH | 0,57 | 0,33 | 0,49 | 0,32 | -0,71 | -0,33 |

A partir da identificação da transformação aritmética ($1/H_{RMS}$) que elevou a correlação dos parâmetros da microtopografia com os valores de sigma zero das imagens SAR (C-HV, C-VH e L-HH), as relações entre estas variáveis foram analisadas por meio de modelos de regressão linear simples.

Primeiramente foram calculados os valores do coeficiente de determinação (R^2), que determina a intensidade da relação entre sigma zero e a variável independente, no caso o inverso de H_{RMS} , além do coeficiente beta, que é o valor normalizado do parâmetro da microtopografia (Tabela 6.11).

Tabela 6.11– Valores de R^2 e coeficientes beta (b^*), com os correspondentes valores p (itálico) do teste t ($\alpha = 0,05$) para $1/H_{RMS}$.

| σ^0 | $(b^*)1/H_{RMS}$ | p-valor | R^2 |
|------------|------------------|------------------------------|--------|
| C-HV | -0,483 | <i>(0,005)</i> | 0,2339 |
| C-VH | -0,510 | <i>(0,003)</i> | 0,2602 |
| L-HH | -0,705 | <i>(9 x 10⁻⁶)</i> | 0,4977 |

A Tabela 6.11 mostra que os p-valores associados aos coeficientes beta normalizados são menores que o nível de significância, $\alpha = 0,05$, o que denota uma relação linear entre os parâmetros de microtopografia e os valores de σ^0 nas imagens analisadas. A avaliação do ajuste linear também foi feita por meio do teste de *Fisher* (F), que também atestou uma relação linear entre os parâmetros envolvidos no modelo. As regressões lineares simples podem ser vistas nas Figuras 6.7a, 6.7b e 6.7c, onde cada classe de campo foi identificada por uma cor e símbolo diferente.

Analisando os valores do coeficiente de determinação R^2 , tem-se que 50%, 26% e 23%, das variações encontradas para os valores de retroespalhamento das imagens L-HH, C-VH e C-HV, respectivamente, podem ser explicadas pela influência do parâmetro de microtopografia (H_{RMS}). Assim, o restante das variações de σ^0 , para as imagens SAR podem ser explicados pela orientação da órbita, variações locais de declividade e limitações do método de coleta de campo (rugosímetro).

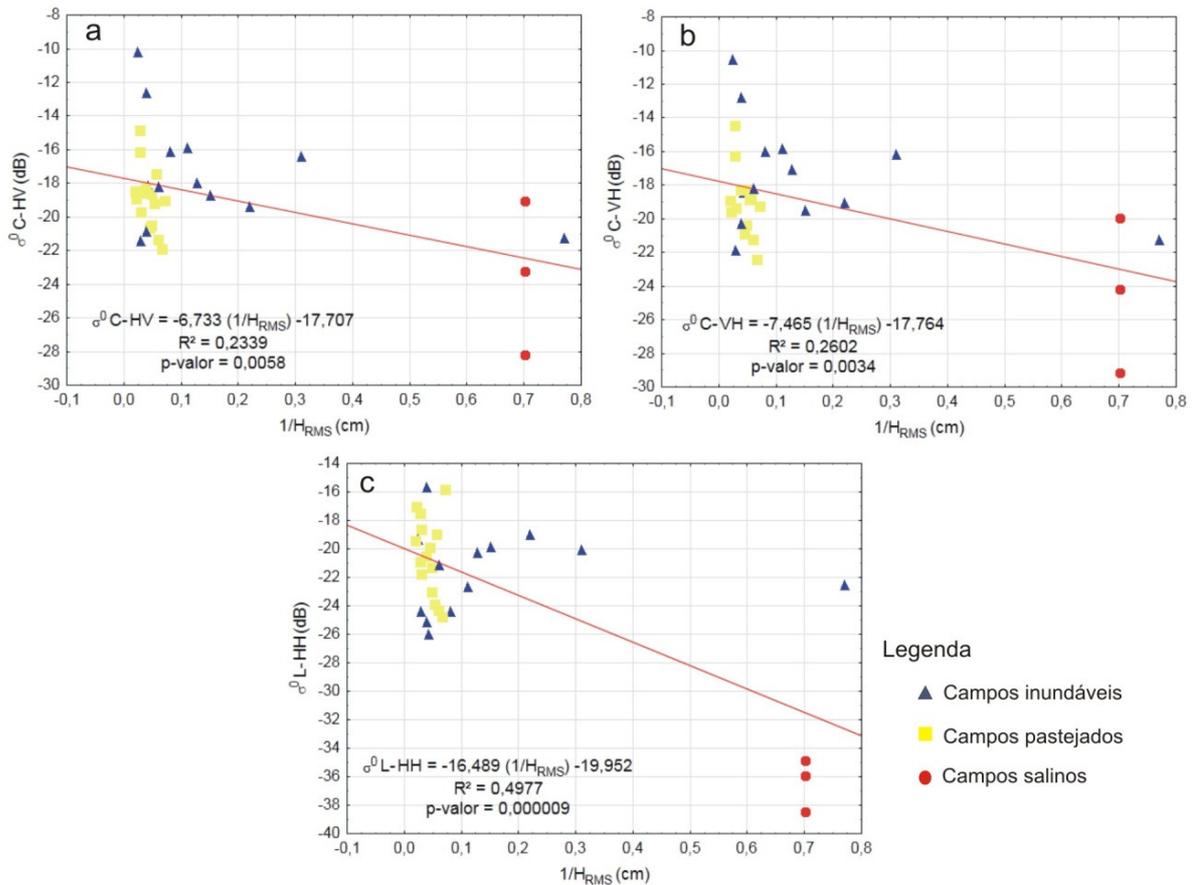


Figura 6.7 – Scatterplots das regressões lineares entre os valores de sigma zero extraídos das imagens SAR e o inverso do parâmetro H_{RMS} : a) - C-HV; b) C-VH e c) L-HH.

6.5 - CONCLUSÕES

Neste estudo, analisamos a influência dos parâmetros de microtopografia da região de campos da Baixada Maranhense, nos valores de retroespalhamento de imagens SAR em diferentes polarizações e comprimento de onda, adquiridos na estação seca, porém em diferentes condições de precipitação, utilizando modelos de regressão linear. Os resultados obtidos mostraram que o parâmetro H_{RMS} , possui a maior relação de dependência com os valores de σ^0 na imagem PALSAR HH. Para as imagens RADARSAT-2, nas polarizações HV e VH, a relação de dependência é baixa, inferior a 30%. Para as polarizações paralelas as análises estatísticas mostraram que os parâmetros de microtopografia não exercem influência nas variações de sigma zero.

CAPÍTULO 7: CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região da Baixada Maranhense, por estar localizada em uma zona úmida costeira, apresenta diversos ecossistemas considerados complexos, onde as condicionantes ambientais, como a precipitação pluviométrica, a amplitude das marés, uma vez que está inserida numa zona de macromaré, e as variações ambientais ligadas às estações do ano, são fatores determinantes na complexidade destes ambientes.

Os ecossistemas reconhecidos nas duas áreas investigadas foram: os manguezais, os campos inundáveis, salinos e pastejados.

Nas imagens SAR, banda C-HH (RADARSAT-1-modo *Wide*), com mesmo ângulo de incidência, verificou-se que é possível a separação entre os manguezais e os campos inundáveis, tanto na estação chuvosa, como na seca, principalmente quando estas imagens forem adquiridas em condições de precipitação nula, pois havendo umidade no sistema a separação entre estes ambientes tende a diminuir pelo incremento no retroespalhamento.

Os valores médios de NDVI das duas estações do ano e os valores médios de retroespalhamento das imagens RADARSAT-1 *Wide*, apresentaram boas correlações, no entanto, as maiores correlações ocorrem com as imagens SAR adquiridas sem influência de precipitação, onde as imagens da estação seca obtiveram os melhores resultados. Portanto, pode-se inferir que as imagens da banda C-HH são sensíveis às variações de densidade da vegetação.

O método de classificação contextual de imagens RADARSAT-1 *Wide*, mostrou-se eficiente no mapeamento dos manguezais e dos campos inundáveis, nas duas estações do ano, pois apresentaram classificações consideradas muito boa para a estação chuvosa e excelente para a estação seca, conforme o índice *kappa*.

A análise por principal componente de imagens RADARSAT-1, adquiridas durante o período chuvoso, sob altas precipitações, diferentes condições de maré e diferentes ângulos de incidência, mostrou que no intervalo entre 20° e 47°, as informações apresentam altas correlações, ou seja, há redundância de dados. A partir da análise dos valores de retroespalhamento, estas imagens apresentam baixa separabilidade para as regiões de manguezal e campos inundáveis. Quando as imagens são adquiridas sob baixos ângulos de incidência (20° a 31°), a alta precipitação, incrementa a umidade, logo eleva os valores de retroespalhamento de todos os ambientes, diminuindo a separabilidade. Nas imagens com ângulos de incidência maiores (41° a 47°), a separação é comprometida pelo baixo retorno do sinal incidente, pois muita energia se perde, em função da trajetória da onda ser maior. No

entanto, através da análise de separabilidade por divergência transformada pode-se concluir que para condições de alta precipitação, se obtém certa separabilidade entre os manguezais e campos inundáveis em imagens com alto ângulo de incidência. Este resultado parece indicar que para a identificação e para uma maior separabilidade dos ecossistemas em zonas úmidas costeiras, usando banda C, polarização HH, o mais indicado é a utilização de imagens sob baixos ângulos de incidência (20° a 31°), adquiridas em condições de baixa precipitação, como observado no período seco (julho a dezembro).

Os resultados destas análises mostraram também que o retroespalhamento na banda C-HH em florestas de mangue é controlado principalmente pelo espalhamento volumétrico e pelo conteúdo de umidade das folhas, para aquisições sob baixo ângulo de incidência, não havendo contribuição do espalhamento *double-bounce*, ao contrário do que acontece nas florestas ombrófilas densas. E o aumento do ângulo de incidência determina uma menor capacidade de penetração da radiação no dossel, logo pouca energia proveniente do espalhamento de volume retorna na direção do sensor e muita energia é perdida para o sistema, o que é está de acordo com a literatura.

A análise da influência dos parâmetros de microtopografia da região de campos da Baixada Maranhense (campos inundáveis, salinos e pastejados) nos valores de retroespalhamento de imagens multipolarizadas RADARSAT-2 e PALSAR HH, adquiridas na estação seca, mostrou que os campos salinos comportam-se como superfícies intermediárias nos dois tipos de imagens analisados e os campos inundáveis e pastejados comportam-se como superfícies rugosa, o que dificulta tal separação. As análises estatísticas realizadas mostraram que o parâmetro H_{RMS} , possui a maior relação de dependência com os valores de σ^0 , na imagem PALSAR HH. Para as imagens RADARSAT-2, nas polarizações HV e VH, a relação de dependência é baixa. Para as polarizações paralelas as análises estatísticas mostraram que os parâmetros de microtopografia não exercem influência nas variações de sigma zero.

O uso de imagens SAR, na banda C, sob diferentes configurações de aquisição mostrou-se sensível as condicionantes ambientais, principalmente a umidade causada pelas precipitações ocorridas nas datas de aquisição. A inundação causada pela maré parece não influenciar nos valores de coeficiente de retroespalhamento, ou se existe deve ser muito baixa.

O presente estudo visou contribuir para o melhor entendimento da influência das variantes ambientais, como a precipita o, maré, microrugosidade e a densidade de vegeta o dos manguezais e dos campos nos valores de retroespalhamento de imagens SAR de diferentes configura es. No entanto, após o entendimento das rela es gerais entre os

condicionantes ambientais e as configurações das imagens SAR, é necessário estudos mais aprofundados, onde se possa quantificar cada uma das interações, nas diferentes condições ambientais e nas diferentes configurações de imagens SAR. Desta maneira, recomenda-se a análise polarimétrica, uma vez que as imagens SAR polarimétricas registram além dos atributos de amplitude a fase, a qual permite medir um conjunto de quatro estimadores da refletividade polarimétrica para cada elemento na imagem, possibilitando analisá-la sobre todas as possíveis combinações de polarizações recebidas e transmitidas e conhecer os diferentes mecanismos de espalhamento.

REFERÊNCIAS

- Ab'Saber, A.N. 1960. Contribuição à Geomorfologia do Estado do Maranhão. *Notícia Geomorfológica*. Departamento de Geografia da UNICAMP. Campinas. São Paulo.
- ANA - AGENCIA NACIONAL DE ÁGUAS 2011. Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos - Precipitação (mm) da Estação de São Bento – Maranhão. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/portalsnirh/Esta%C3%A7%C3%B5esdaANA/tabid/359/Default.aspx>. Acessado em 05 jun. 2011.
- Araujo, N.A. 2008. Relações Ecológicas entre a Fauna Ictiológica e a Vegetação Ciliar da Região Lacustre do Baixo Pindaré na Baixada Maranhense e suas Implicações na Sustentabilidade da Pesca Regional. Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, 122p.
- Barbosa, G. V., Pinto, M. N. 1973. Geomorfologia. In: BRASIL. Projeto RADAM. *Folha SA.23 São Luís e parte da Folha SA.24 Fortaleza*. Rio de Janeiro, DNPM. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).
- Boorman, L.A. 2009. The role of freshwater flows on salt marsh growth and development. In: G.M.E Perillo, E. Wolanski, D.R.Cahoon, M.M.Brinson (eds.). *Coastal Wetlands: An integrated ecosystem approach*. Amsterdam: Elsevier, p.:493-514.
- Bourgeau-chavez, L. L., Kasischke, E. S., Smith, K. B. 1996. Using satellite radar imagery to monitor flood conditions in wetland ecosystems of southern Florida. In: Cecchi, G., D'urso, G., Engeman, E.T., Gudmandsen, P. *Remote sensing of vegetation and sea*. Taormina, Italy, p.:139–148. 1996.
- Bourgeau-chavez, L. L., Kasischke, E. S., Brunzell, S. M., Mudd, J.P., Smith, K. B., Frick, A.L. 2001. Analysis of space-borne SAR data wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, **22**(18): 3665–3687.
- Bourgeau-Chavez, L. L., Smith, K. B., Brunzell, S. M., Kasischke, E. S., Romanowicz, E. A., Richardson, C. J. 2005. Remote sensing of regional inundation patterns and hydroperiod in the greater Everglades using synthetic aperture radar. *Wetlands*, **25**:176–191.
- CCRS.CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING, NATURAL RESOURCES CANADA. 2001. *Globe-SAR – Recursos educacionais para sensoriamento remoto de radar*. Windows 98/2000/XP. 1 CD-ROM.
- 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.
- Cheng, P., Toutin, T., Tom, V. 2000. Orthorectification and data fusion of Landsat v7 data. Disponível em: http://www.pcigeomatics.com/support_center/tech_papers/ASPRS_2000_land7.pdf.> Acessado em 12 maio 2005.
- Cohen, J. A. 1960. Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, **20**(1): 37-46.

- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classification or remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **37**:35-45.
- Costa-Neto, J. P., Barbieri, R., Ibañez, M. S. R., Cavalcante, P. R. S., Piorski, N. M.. 2001/2002. Limnologia de três ecossistemas aquáticos característicos da Baixada Maranhense. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, **14/15**: 19-38.
- Costa, M.P.F. 2004 Use of SAR satellites for mapping zonation of vegetation communities in the Amazon floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, **20** (10): 1817–1835.
- CPTEC-CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2006. Observações e Instrumentação – Dados Automáticos – Plataformas de Coleta de Dados. Disponível em: <<http://tempo.cptec.inpe.br:9080/PCD/>>. Acessado em 15 jul 2006.
- CPTEC-CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, 2009. Divisão de Satélites e Sistemas ambientais. Satélite GOES – Imagens da região Nordeste. Disponível em: < <http://satelite.cptec.inpe.br/home/>>. Acessado em 23 mai. 2009.
- Crosta, A.P. 1993. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Ed. Revisada. Campinas, SP: IG/UNICAMP.
- Damásio, E. 1980. Contribuição ao conhecimento dos manguezais da Ilha de São Luís. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, **3** (1): 17-76.
- Dalrymple, R. W., Zaitlin, B. A., Boyd, R. 1992. Estuarine facies models, conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**: 1130-1146.
- Daughtry, C.S.T., Gallo, K.P., Biehl, L.L., Kanemasu, E.T., Asrar, G., Blad, B. Ll., Norman, J.M., Gardner, B.R. 1984. Spectral estimates of agronomic characteristics of crops. In: Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium, 10, 1984, Purdue University, West Lafayette, p. 348-356.
- Dierking, W. 1999. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**(5): 2397-2412.
- DHN- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO 2011. Previsões de Maré – Terminal da ALUMAR Estação do Maranhão. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/30114Out2010.htm>. Acessado em 05 jun 2011.
- Ellison, J.C. Geomorphology and sedimentology of mangroves.2009. In: G.M.E Perillo, E. Wolanski, D.R.Cahoon, M.M.Brinson (eds.). *Coastal Wetlands:An integrated ecosystem approach*.Amsterdam: Elsevier, p.:565-591.
- Feitosa, A. C. 2006. Relevo do Estado do Maranhão: Uma nova proposta de classificação topomorfológica. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia, Anais, p.: 1-11.
- Fernandes, M.E.B.,Virgulino, A.R.C.,Nascimento, A.A.M.,Rodrigues, L.F.P. 2005. Padrões de Floração e Frutificação em *Laguncularia racemosa* (L.) Gaertn. f.: Uma Avaliação Metodológica. *Boletim do Laboratório de Hidrobiologia*, **18**:33-38.

- Fromard, F., Vega, C., Proisy, C. 2004. Half a century of dynamic coastal change affecting mangrove shorelines of French Guiana. A case study based on remote sensing data analyses and field surveys. *Marine Geology*, **208**: 265–280.
- Gao, S. 2009. Geomorphology and sedimentology of tidal flats. In: G.M.E Perillo, E. Wolanski, D.R.Cahoon, M.M.Brinson (eds.). *Coastal Wetlands: An integrated ecosystem approach*. Amsterdam: Elsevier, p.: 295-316.
- GEMA - GERENCIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS 2003 – Governo do Estado do Maranhão. Execução do plano de gerenciamento participativo dos recursos hídricos da área de Proteção Ambiental (APA) da Baixada Maranhense – Relatório Final. São Luís: GEMA, 2003. 38p. [CD-ROM].
- Gong, P., Howarth, P. J. 1992. Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **58** :423-437.
- 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 Remote Sensing*, **28**(6): 758-769.
- Harris, J.R., Bowie, C., Renez, A.N., Graham, D. 1994. Computer-enhancement techniques for integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **20**:210-221.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Simonett, D.S. 1990. Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*, **11**: 1313–1325.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y. 1995. Delineation of inundated areas and vegetation along the Amazon floodplain with the SIRC synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **33** (4): 896–903.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA 2011. Banco de Metadados. Disponível em: <http://www.metadados.geo.ibge.gov.br/geonetwork/srv/br/metadata.show?id=6096&currTab=simple>. Acessado em 10 jun 2011.
- Jackson, R.D., Slater, P.N., Pinter Jr., P.J. 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing of Environment*, **13** (3): 187-208.
- Jensen, J. R. 1996. *Introductory digital image processing - A remote sensing perspective*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 318pp.
- Jensen, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente – Uma Perspectiva em Recursos Terrestre*. tradução Epiphânio, J.C.N. (Coordenador). São José dos Campos, SP: Parêntese, New Jersey: Prentice Hall, 358-410p.
- Kasischke, E. S., Smith, K. B., Bourgeau-Chavez, L. L., Romanowicz, E. A., Brunzell, S. M., Richardson, C. J. 2003. Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, **88**: 423-441.

- Kasischke, E. S., Bourgeau-Chavez, L. L. Monitoring south Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. 1997. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **63**: 281-291.
- Knust, S.S.A. 2008. Avaliação das imagens RADARSAT-1 sob diferentes geometrias de observação em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá, Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 150p.
- Kutner, M. N., Nachtsheim, C. J., Neter, J., Li, W. 2004. *Applied linear statistical models*. WCB/McGraw-Hill, 5th Ed., Boston, 1396 p.
- Lang, M.W., Townsend, P.A., Kasischke, E. S. 2008. Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **46**(2):535-546.
- Lang, M.W., Kasischke, E. S. 2008. Using C-band synthetic aperture radar data to monitor forested wetland hydrology in Maryland's coastal plain, USA. *Remote Sensing of Environment*, **112**: 3898-3907.
- Leckie, D.G. 1998. Forestry Applications Using Imaging Radar. In: F.M. HENDERSON & A.J. LEWIS (eds.). *Principles & Applications of Imaging Radar: manual of remote sensing*. 3rd ed., 2, John Willey, New York, p.: 435 - 509.
- Lee, S. E., Pottier, E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: from basics to applications*. CRC Press: Taylor & Francis Group, 398 pp.
- Lewis, A. J., Henderson, F.M. 1998. Radar fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F.M. HENDERSON & A.J. LEWIS (eds.). *Principles & Applications of Imaging Radar: manual of remote sensing*. 3rd ed., 2, John Willey, New York, p.: 131 - 181.
- Li, J., Chen, W., Touzi, R. 2007. Optimum RADARSAT-1 configurations for wetlands discrimination: a case study of the Mer Bleue peat bog. *Canadian Journal Remote Sensing*, **33**(suppl.1): S46-S55.
- Lucas, R. M., Mitchell, A.L., Rosenqvist, A., Proisy, C., Melius, A., Ticehurst, C. 2007. The potential of L-band SAR for quantifying mangrove characteristics and change: case studies from the tropics. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, **17**: 245-264.
- Marti-Cardona, B., Martinez, C.L., Ripolles, J. D., Bladè-Castelle, T. E. 2010. ASAR polarimetric multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environmental*, **114**:2802-2815.
- Mattia, F., Davidson, M.W.J., Le Toan, T., D'Haese, C.M.F., Verhoest, N.E.C., Gatti, A.M. Borgeaud, M. 2003. A Comparison between soil roughness statistics used in surface scattering models derived from mechanical and laser profilers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**(7): 1659-1671.
- Menezes, M.P.M., Berger, U., Mehig, U. 2008. Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. *Acta Amazonica*, **38**(3):403 – 420.

- Mitchell, A.L. 2003. Remote Sensing Techniques for Assessment of Mangrove Forest Structure, Species Composition and Biomass, and Response to Environmental Change. Thesis for the degree Doctor of Philosophy, School of Biological, Earth & Environmental Sciences, Kensington, University of New South Wales- Australia. 516p.
- Mochel, F. R. 1993. Mangroves of Maranhão State, North Brazil. *In: Proceedings of a Workshop on Conservation and Sustainable Utilization of Mangrove Forests in Latin America and Africa Regions*, 1, p.14.
- Mochel, F. R. 2000. Structural variability in mangroves influenced by sewerage in Turiaçu Bay, Maranhão, Brazil *In: Mangrove 2000. Conservation and Sustainability of Mangroves and Estuaries*, Recife.
- Mochel, F. R., Castro, A.C.L. *Zoneamento Costeiro do Estado do Maranhão*. Laboratório de Hidrobiologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 243pp.
- Montes, M. L. 1997. *Zoneamento geoambiental do Estado do Maranhão – Diretrizes gerais para a ordenação territorial*. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Salvador, 44pp.
- Mougin, E., Proisy, C., Marty, G., Fromard, F., Puig, H., Betoulle, L., Rudant, J, P. 1999. Multifrequency and Multipolarization Radar Backscattering from Mangrove Forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37** (1): 94-102.
- Novo, E. M. L. M., Costa, M. P. F. 2005. Fundamentos e aplicações de RADAR no estudo de áreas alagáveis. *In: R.B. de Souza (ed.) Oceanografia por Satélite*. Oficina de Textos, São Paulo, p.: 236-258.
- Novo, E. M. L. M. 2006. Bases teóricas para o uso de imagens SAR no estudo de áreas alagadas. *In: 1º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, Anais*, p.: 883-894.
- Oh, Y., Hong, S-Y, Kim, Y., Hong, J-Y., Kim, Y.H. 2009. Polarimetric backscattering coefficients of flooded rice fields at L and C – bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47** (8): 2714-2721.
- Ormsby, J.P., Blanchard, J.P., Blanchard, A.J. 1985. Detection of Lowland Flooding Using Active Microwave Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **51**(3): 317 – 328.
- Ormsby, J.P., Choudhury, B.J., Owe, M. 1987. Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, **8** (9): 1301-1306.
- Paradella, W. R. 1996. *Imageamento por Radar: Princípios e Aplicações Gerais*. Apostila do curso “Sensoriamento remoto com radar em aplicações geoambientais”.
- Paradella, W.R, Silva, A.Q., Knust, S.S.A., Rabelo, T.N. Santos, A.R., Rennó, C.D., Oliveira, C.G., Rodrigues, T.G. 2009a. Effect of microtopography on RADARSAT-1 and PALSAR backscattering from rock alteration products in the Curaçá Valley, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **35**(3): 262-269.

- Paradella W. R., Knust, S.S.A., Santos, A. R., Silva, A. Q., Rabelo, T.N., Oliveira, C. G. 2009b. Influence of Macroscale and Microscale Surface Roughness on Multi-Beam RADARSAT-1 Data: Implications for Geological Mapping in the Curaçá Valley (Brazil). *Photo Interprétation*, **45**: 51-63.
- Paradella W. R., Cecarelli, I. C.F., Luiz, S., Oliveira, C.G., Okida, R. 2005. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região amazônica (Serra dos Carajás, Pará). *Revista Brasileira de Geologia*, **35**(3):323-332.
- Paradella W. R., Cecarelli, I. C.F., Luiz, S., Oliveira, C.G., Cottini, C., Okida, R. 2003. Produção de Carta Topográfica através da Estereoscopia de Alta Resolução do RADARSAT-1 Integrada com Dados TM-Landsat 5: Uma Avaliação para Terrenos Planos da Floresta Nacional de Tapajós. *Revista Brasileira de Geociências*, **33** (2-Suplemento): 99-110.
- Parmuchi, M.G., Karszenbaum, H., Kandus, P. 2002. Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and decision-based classifier. *Canadian Journal Remote Sensing*, **28** (2): 175-188.
- Peake, W. H., Oliver, T. L. 1971. *The response of terrestrial surfaces at microwaves frequencies*. Report, Ohio State University Technical, Columbus, p.: 2770-2777.
- 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.
- Pope, K.O., Rejmankova, E., Paris, J.F., Woodfruff, R. 1997. Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, **59**:157-166.
- Pope, K.O., Rey-Benayas, J.M., Paris, J.F. 1994. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, **48**: 205-219.
- Proisy, C., Mougin E., Fromard, F. 1996. Investigating correlations between radar data and mangrove forests characteristics. In: Proc. IGARSS'96, Lincoln - Nebraska, USA, I, p.:733-735.
- Proisy, C., Mougin E., Fromard, F., Karam, M.A. 2000. Interpretation of polarimetric radar signatures of mangrove forests. *Remote Sensing of Environment*, **71**: 56-66.
- Proisy, C., Mougin E., Fromard, F., Trichon, V., Karam, M.A. 2002. On the influence of canopy structure on the radar backscattering of mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, **23** (20): 4197-4210.
- Rabelo, T.N. 2007. Avaliação das imagens multipolarizadas de radar em banda L do sensor SAR-R99B (SIVAM-CENSIPAM) em aplicação geológica no Vale do Rio Curuçá, Bahia. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 194p.
- Raney, K. 1998. Radar Fundamentals: technical perspective. In: F.M. HENDERSON & A.J. LEWIS (eds.). *Principles & Applications of Imaging Radar: manual of remote sensing*. 3rd ed., .2, John Willey, New York, p.:8 - 130.

- Rebello-Mochel, F. 1997. Mangroves on São Luís Island, Maranhão, Brazil. *In: B. Kjerve, L. D. Lacerda, E. H. S. Diop (eds). Mangrove ecosystem studies in Latin America and Africa.* Paris, UNESCO, p.: 145-154.
- Rennó, C. D. 2008. Roughness. Disponível em: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.05.12.39>. Acessado em 15 dez 2010.
- Richards, J.A., Woodgate, P.W., Skidmore, A.K. 1987. An Explanation of Enhanced Radar Backscattering from Flooded Forests. *International Journal of Remote Sensing*, **8** (7): 1093–1100.
- Richards, J.A., Jia, X. 2006. *Remote Sensing Digital Image analysis: An introduction.* Springer -Verlag, 4th Ed., Berlin, 439 pp.
- Rodrigues, T. L. N., Araújo, C. C. de, Camozzato, E., Ramgrab, G. E. 1994. São Luís. Folha SA.23-Z-A. Cururupu. Folha SA.23-X-C. Estado do Maranhão. Escala 1:250.000. Brasília, DF, CPRM. p. 3-106. (Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Scheel, J.A., Deering, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *In: Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium, Washington. Proceedings*, p.:309-317.
- Sabins, F. F. 1996. *Remote sensing: principles and interpretation.* W.H. Freeman and Company, 3d Ed, San Francisco, 494 pp.
- Shimada, M., Isoguchi, O., Tadono, T., Isono, K. 2009. PALSAR radiometric and geometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47** (12): 3915 – 3932.
- Silva, A.C., Araujo, M., Pinheiro, L.S. 2007. Caracterização Hidrográfica da Plataforma Continental do Maranhão a partir de Dados Oceanográficos Medidos, Remotos e Modelados. *Revista Brasileira de Geofísica*, **25**: 281 – 294.
- Silva, A. Q., Paradella W. R., Freitas, C. C., Oliveira, C. G. 2009. Relationship between PALSAR backscatter and surface roughness parameters from iron laterites in Carajás, Amazon Region. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**:4027-4031.
- Silva, A. Q. 2010. Avaliação de Imagens SAR no Mapeamento de Crostas Lateríticas do Depósito N1, Província Mineral de Carajás, Pará. Tese de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 247p.
- Silva, A. Q., Souza Filho, P. W. M. 2011. *Aplicações SAR em florestas.* Apostila do curso “Sensoriamento remoto por radar em aplicações geoambientais”.
- 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.
- Singhroy, V. 2002. SAR Incidence Angles for Mapping Areas Affected by Geological Hazards, Tropical Case Studies. *Asian Journal of Geoinformatics*, **2** (3): 53-57.

- Souza Filho, P. W. M., Paradella, W. R. 2001. Estudos da geomorfologia de ambientes costeiros tropicais úmidos a partir de imagens de sensores remotos. *Revista Pesquisas*, **28** (2):, p. 359-368.
- Souza Filho, P. W. M., Paradella, W. R. 2002. Recognition of the main geobotanical features in the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM e RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, Netherlands, **10** (2): 123-132.
- 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 do Museu Paraense Emílio Goeldi, series Ciências Naturais*, **1** (1): 201-207.
- Souza-Filho, P.W.M., Paradella, W.R., Rodrigues, S.W.P., Costa, F.R., Mura, J.C., & Gonçalves, F.D. 2011. Discrimination of coastal wetland environments in the Amazon region based on multi-polarized L-band airborne Synthetic Aperture Radar imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, *In Press*.
- Swain, P. H., Davis, S. M. 1978. *Remote Sensing. The Quantitative Approach*. McGraw-Hill Book Company, United States of America, 396pp.
- Teixeira, S. G. 2006. Análise de imagens de sensores remotos orbitais para mapeamento de ambientes costeiros tropicais e de índices de sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo no Golfão Maranhense. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 171p.
- Teixeira, S. G.; Souza Filho, P.W.M. 2009. Mapeamento de ambientes costeiros tropicais (Golfão Maranhense, Brasil) utilizando imagens de sensores remotos orbitais. *Revista Brasileira de Geofísica*, **27**: 69-82.
- Tiner, R.W. 1999. *Wetland indicators: a guide to wetland identification, delineation, classification, and mapping*. CRC Press, New York, 399pp.
- Townsend, P.A. 2002. Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR. *International Journal of Remote Sensing*, **23**(3): 443-460.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, **8**(2):127-150.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. 1982. *Microwave remote sensing: active and passive*. Artech House, vol. II, Boston, p.: 816-833.
- Ulaby, F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. 1986. *Microwave remote sensing: active and passive*, Artech House, vol. II. Norwood, 360 pp.
- Van Der Sanden. 1997. *Radar remote sensing to support tropical forest management*. Tropenbos-Guyana Serie 5, 331 pp.
- Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Wagner, W., Alvarez-Mozos, J., Moran, M.S., Mattia, F. 2008. On the soil roughness parametrization problems of bare surface from SAR. *Sensor*, **8**:4213-4248.

- Wang, Y., Hess, L.L., Foloso, S., Melack, J. M. 1995. Understanding the Radar Backscattering from flooded and nonflooded amazonian forests: Results from canopy backscatter modeling. *Remote Sensing of Environment*, **54**: 324–332.
- Wolanski, E., Brinson, M. M., Cahoon, D.R., Perillo, G.M.E. 2009. Coastal wetlands: A synthesis. *In*: G.M.E Perillo, E. Wolanski, D.R.Cahoon, M.M.Brinson (eds.). *Coastal Wetlands:An integrated ecosystem approach*. Amsterdam: Elsevier, p. 1-62, 2009.
- 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.



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

PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de SHEILA GATINHO TEIXEIRA

A banca examinadora da tese de doutorado de **SHEILA GATINHO TEIXEIRA** intitulada "**RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA APLICADO AO MAPEAMENTO E RECONHECIMENTO DE ZONAS ÚMIDAS COSTEIRAS**" composta pelos Professores Doutores Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador-UFPA), Álvaro Penteado Crosta (UNICAMP), Carlos Moreira de Souza Júnior (IMAZON), Milton Kampel (INPE) e Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA) após a apresentação oral e arguição da candidata, emite o seguinte parecer.

A candidata apresentou contribuição relevante ao conhecimento sobre a o uso das micro-ondas para caracterização e mapeamento de ambientes costeiros úmidos, tendo como área de estudo a região do Golfão Maranhense, com a utilização de abordagens quantitativas. A apresentação oral foi clara, bem estruturada e de conteúdo relevante, demonstrando conhecimento da literatura e discussão dos dados apresentados. Na arguição a candidata defendeu sua tese e a hipótese principal nela formulada, bem como respondeu às várias questões gerais e específicas apresentadas. O documento está bem redigido e bem estruturado. Contribuições foram feitas pela banca visando melhoria do trabalho para submissão de artigos científicos.

Com base no exposto, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

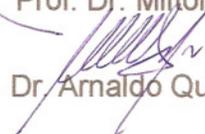
Belém, 9 de dezembro de 2011


Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (Orientador-UFPA)

Prof. Dr. Álvaro Penteado Crosta (UNICAMP)


Prof. Dr. Carlos Moreira de S. Júnior (IMAZON)


Prof. Dr. Milton Kampel (INPE)


Prof. Dr. Arnaldo Queiroz da Silva (UFPA)