



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

TESE DE DOUTORADO Nº 141

**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO
MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E
ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA
REGIÃO AMAZÔNICA.**

Tese apresentada por:

MICHELE FERREIRA COUGO

Orientador: Prof. Dr. Pedro Walfir M. Souza Filho (IG – UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Emanuel B. Fernandes (IECOS – UFPA)

Belém-PA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C853p Cougo, Michele Ferreira.
O potencial do sensoriamento remoto SAR no mapeamento, discriminação de gêneros e estudo da dinâmica de floresta de mangue na região Amazônica / Michele Ferreira Cougo. — 2019.
xx, 110 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Pedro Walfir Martins E Souza Filho
Coorientador(a): Prof. Dr. Marcus Emmanuel B. Fernandes
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.
1. Radar de abertura sintética. 2. Série temporal Sentinel1. 3. Manguezal. 4. Random Forest. 5. Biomassa. I. Título.

CDD 621.3678



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

**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO
MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E
ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA
REGIÃO AMAZÔNICA**

Tese apresentada por

MICHELE FERREIRA COUGO

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

Data de Aprovação: 26 / 04 / 2019

Banca Examinadora:

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

Prof.ª Dr.ª Moirah Paula M. de Menezes
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. João Roberto dos Santos
(Membro-INPE)

Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto
(Membro-UFPA)

*“À minha Mãe pela sintonia e sensibilidade
sabendo mais de mim do que eu.
Ao meu Pai pela confiança nas minhas
escolhas”*

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências e à Universidade Federal do Pará pela oportunidade de desenvolvimento desta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de Doutorado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE) – Código de Financiamento 001.

A empresa *Airbus Defense and Space* por ceder as imagens *Terrasar-X*.

Ao Prof. Dr. Pedro Walfir pela oportunidade de seguir trabalhando juntos, aceitando-me para o doutorado, pela liberdade de trabalho, por me impulsionar para sair da zona de conforto e descobrir novos horizontes, pela tranquilidade, paciência e compreensão no momento em que quase desisti.

Ao Prof. Dr. Marcus Fernandes por toda a atenção e disponibilidade, de tempo, do espaço no laboratório e por me acolher sempre que precisei em Bragança. Agradeço por todas as discussões e conversas para sanar minhas dúvidas sobre esse ecossistema tão fascinante que é o manguezal.

Aos Prof. Dr. Arnaldo Queiroz por aceitar o convite de estar na banca, pelas contribuições na etapa da qualificação e pelo esforço em ampliar meus conhecimentos, como no momento do curso de *SARscape* e também por me colocar em contato com pessoas da área.

Ao Prof. Dr. João Roberto dos Santos por aceitar o convite para a banca, pelas contribuições na qualificação e pelas tantas indicações de leitura.

À Profa. Dra. Moirah Menezes por aceitar o convite para a banca e pelas contribuições na qualificação.

Ao Prof. Dr. Nils Asp por aceitar participar da banca e pela disposição em ajudar nos tantos campos que fiz em Bragança.

Aos integrantes do Laboratório de Geologia Costeira (*LAGECO*) pelas ajudas na organização de campo, pela disposição de entrar na lama fazer levantamento e/ou buscar equipamentos e ajudar no processamento dos dados.

Aos integrantes do Laboratório de Ecologia de Manguezal (*LAMA*), especialmente ao Danilo

Gardunho e ao Diego Carneiro pelos inventários da vegetação de mangue.

Ao Prof. Dr. Laurent Polidori por aceitar o convite para o Doutorado Sanduíche, pelo acolhimento no Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO) - França, pela atenção e por todas as conversas que me acalmaram durante esta etapa intensa da tese, as quais me ajudaram a ver além dos resultados. Ao Dr. Ludovic Villard por aceitar ser meu tutor, pela disponibilidade e pela paciência com meu francês quando cheguei. Aos dois, Laurent e Ludovic, agradeço a colaboração no capítulo 5 desta tese, "*Série temporal Sentinell no estudo das florestas de mangue do litoral Amazônico*" que foi idealizado, desenvolvido e os resultados preliminares discutidos durante esta etapa.

A toda equipe BIOMASS do CESBIO, Dra. Thuy Le Toan, Dr. Stephane Mermoz, Dr. Alexandre Bouvet, Dr. Thierry Koleck e Dra. Milena Planells pela acolhida, receptividade e disponibilidade de discutir os resultados do trabalho. Ao David Morin pelas conversas a cerca da temática biomassa/multissensor e tantas trocas importantes. Ao Lucas Chamon que me guiou nos meus primeiros passos no software R.

Agradeço, especialmente, à Marie Ballere pela sincera e linda amizade, por todas as dicas, todas as conversas e ajudas sobre e no trabalho. Je suis très contente t'avoir connue, tu est super Marie!!

A todos os amigos que, como eu, estavam de passagem no CESBIO, Lola, Enric, Bouchra, Zoubair, Simon, Hakim e Marine, amigos de trocas de experiências, dividindo frustrações, mas também alegrias e felicidades durante o café com chocolate. Não poderia esquecer de agradecer a Laurence Keppel pelas ajudas com toda a burocracia e também por divertir a todos com quem fala.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Imagens do Trópico Úmido (LAIT), Paulo, João, Carlos, Gustavo e Francisco, em especial ao Wilson por tantas conversas em momento de crise e pela disponibilidade para os campos e à Glenda por toda ajuda e disposição neste período. Foram 8 anos neste laboratório, agradeço a cada pessoa com quem interagi durante minha formação.

Agradeço às secretárias do PPGG, Cleida e Joanicy, que sempre foram solícitas em me auxiliar nos momentos que a burocracia parecia não andar.

À minha amiga Thiely pela amizade e companheirismo nessa caminhada do Doutorado e na vida, dividindo preocupações, frustrações, felicidades e conquistas. Obrigada amiga tu és

demais!

A Rafaela, Rafinha, pelo companheirismo e por todas as conversas com relação aos avanços na temática do trabalho.

A todas as amigas que de alguma forma me deram força para desenvolver e concluir o Doutorado, Sol, Thiara, Denise, Mônica, Maria, Anne, Amintas, Fabrício, Amanda, Cristiane, Gabriela, Luciara, Antônio, Dea, Dan, Ana, Taiana, Bia, Karol, Neila, Nathalia e tantos outros que sempre estiveram ao meu lado, no norte, no sul ou do outro lado do Atlântico.

À Dalva e Heribert, por me acolherem como filha sempre com tanto carinho e alegria, por me acompanharem em muitos momentos importantes dessa jornada e por, nestes últimos meses, me darem asilo para finalizar a tese. À Marly pelo carinho no dia a dia.

Ao meu companheiro Fred pelo amor, por ouvir todas minhas lamentações, me tranquilizar e sempre me fazer sorrir de novo, foste essencial nessa finalização.

Agradeço à estrutura familiar que me fez chegar aqui, minha mãe, Nazionélia Ferreira, pelo seu olhar sensível e atencioso a cada passo meu, por tentar sempre que eu não esqueça o tamanho das minhas conquistas, pelo amor, carinho e dedicação como mãe, amiga e companheira de vida. Ao meu pai, Valmir Cougo, por todo amor e por não medir esforços em ver meus sonhos se tornando realidade, pela confiança e tranquilidade diante dos desafios que eu resolvi encarar. Aos meus irmãos Caroline, Lorena e Felipe, que cada um com seu jeito sempre me deram forças para continuar. À Catarina, pelo olhar que me fez ver a vida de maneira diferente e que sempre me dá força para seguir. Obrigada, família, por não me prender fisicamente ao lado de vocês e por sempre me impulsionar para seguir esta caminhada longe de casa, meu coração sempre esteve com vocês.

*“Apenas nos pusimos en dos pies
Y nos vimos en la sombra de la hoguera
Escuchamos la voz del desafío
Siempre miramos al río, pensando en la otra rivera*

*Somos una especie en viaje
No tenemos pertenencias, sino equipaje
Vamos con el polen en el viento
Estamos vivos porque estamos en movimiento
...
Es más mío lo que sueño, que lo que toco”*

Movimiento – Jorge Drexler

RESUMO

Esta tese tem como objetivo geral abordar o potencial dos dados de sensores SAR para diferenciar gêneros de mangue através de dados polarimétricos, estimativa de biomassa através da estrutura dos bosques e em produzir mapas temáticos as florestas de mangue através do uso de imagens SAR multifrequência. Dados SAR polarimétricos (Radarsat2), multifrequência (banda X, C e L) foram utilizados para cumprir este objetivo. A área de estudo é a península de Ajuruteua, localizada no setor leste da Zona Costeira Amazônica. Os manguezais desta região são considerados preservados e estão presentes as espécies: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana* e *Laguncularia racemosa*, sendo a espécie *R. mangle* a espécie dominante na região. Através de uma imagem polarimétrica Radarsat-2, banda C, foram avaliadas as respostas polarimétricas das parcelas com dominância dos dois principais gêneros ocorrentes na região (*Rhizophora* e *Avicennia*). Pela análise dos gráficos das respostas polarimétricas não foi possível definir um padrão por gênero que permitisse a diferenciação de gêneros através deste parâmetro. A análise do mecanismo de espalhamento foi realizada através das decomposições polarimétricas da matriz de coerência e covariância. No plano H- α todas as parcelas de vegetação foram classificadas na zona 5 de média entropia, zona atribuída ao espalhamento da vegetação e, na zona 6 de média entropia associada ao aumento da rugosidade superficial. Apenas a classe campos apresentou valor de H menor que as demais classes, o que à destacou das demais. As imagens dos mecanismos de espalhamento: *double-bounce*, volumétrico e superficial não permitiram a separação dos gêneros dominantes na região. Na série temporal anual de imagens Sentinel1-A o comportamento do σ° nas polarizações VV e VH foi similar e não apresentou diferenças com relação a valores de biomassa total. As variações dos valores de retroespalhamento ao longo do ano foram relacionados as condições ambientais (precipitação e regime das marés), alterações no dossel (fenologia) e ao ângulo de incidência. Os valores de σ° foram maiores no período do mês de maio ao fim de agosto e no mesmo período os valores da razão $\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$ foram menores, reflexo da dinâmica do dossel dos manguezais da região visto que este período é marcado pela maior produção de serrapilheira, apesar da modesta oscilação (1,5 dB). O uso das imagens SAR multifrequência para classificação no Random Forest dos ambientes da península baseada teve o melhor índice Kappa com valor de 0,53 para o modelo

que incluiu imagens Sentinel1-A e ALOS-PALSAR, com Kappa da classe mangue de 0.90. A classe mangue não apresentou discordância global (até 10%) mais alta que as demais, principalmente no tipo permuta com as classes mangue, planície hipersalina e outros, sendo que as duas últimas tiveram os menores índices Kappa por classe em todas as classificações. A classe mangue apresentou discordância global de no máximo 5% e índice Kappa maior que 0,90 em todas as classificações. Diante do exposto, concluímos que a abordagem por gênero de mangue, mesmo com elevado n amostral, não produz diferenças significativas para a distinção dos gêneros através de técnicas polarimétricas, quer seja resposta polarimétrica ou técnicas de decomposição. Dois avanços podem ser ressaltados no estudo dos manguezais através de séries temporais Sentinel-1A, a razão de polarização $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ está relacionada a dinâmica do dossel e o uso de imagens trimestrais de estações diferentes para a classificação das florestas de mangue. Além de ser reconhecido o potencial de uso das imagens SAR para o mapeamento das florestas de mangue principalmente quando utilizadas séries temporais de sensores nas bandas C e L através de técnicas de aprendizado de máquina.

Palavras-chave: Synthetic Aperture Radar. Manguezal. Série temporal Sentinel1. Random Forest. Biomassa. Polarimetria SAR.

ABSTRACT

This dissertation examines the potential of data generated from SAR sensors to differentiate between mangrove genera using polarimetric data, biomass estimates based on forest structure, and by producing thematic mangrove forest maps, using multi-frequency SAR images. Polarimetric SAR data (Radarsat2), multi-frequency (bands X, C and L) were used to achieve this goal. The study area is the Ajuruteua Peninsula, located in the eastern sector of the Amazon Coastal Zone. Mangroves in this region are considered preserved with the following species present: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana* and *Laguncularia racemose*, where *R. mangle* is the dominant species in this region. Through the polarimetric image Radarsat-2, band C, the polarimetric response of the parcels, dominated by these two principal genera (*Rhizophora* e *Avicennia*), were analyzed. Through the analysis of the polarimetric response, we were unable to define a pattern per genus to allow for the differentiation of the genera using this parameter. Analysis of the scattering mechanism was conducted through polarimetric decomposition of the coherence and covariance matrix. In the $H-\alpha$ plane, all vegetation parcels were classified as zone 5 of average entropy, attributed to vegetation scattering, and as zone 6, also of average entropy, associated to an increase in the surface-level roughness. Only the field class presented an H value lower than the other classes, standing out from the others. The images of scattering mechanisms: double-bounce, volumetric and surface-level did not permit the separation of dominant genera in the region. Using annual time series images Sentinel1-A, the behavior of the σ° polarizations VV and VH were similar and did not present differences in relation to total biomass values. Variations in radar backscatter over the year were related to environmental conditions (precipitation and tidal regime), canopy alterations (phenology) and incidence angle. The σ° values were greater during the month of May to the end of August, and in the same period, $\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$ rate values were lower, which is a reflex of mangrove canopy dynamics in the region given that during this period leaf litter production is greater, despite modest oscillation (1.5 dB). The use of multi-frequency SAR images for Random Forest classification of the environments on the peninsula resulted in the best Kappa index, 0.53, for the model that included the Sentinel1-A and ALOS-PALSAR images, with a Kappa mangrove class of 0.90. The dwarf mangrove class presented a global disagreement (up to

10%) higher than the others, principally in types exchange with mangrove classes, hypersaline plains and others, being that the last two had the lowest Kappa indices per class in all the classifications. The mangrove class showed a global disagreement maximum of 5% and a Kappa index greater than 0.90 in all classifications. Based on the above considerations, we conclude that the mangrove genera approach, even with a greater n sample, did not produced significant differences to distinguish genera through polarimetric techniques, be them polarimetric responses or scatter techniques. Two advances can be identified in the study of mangroves using time-series Sentinel-1A: $\sigma_{\text{VH}}^{\circ}/\sigma_{\text{VV}}^{\circ}$ polarization rate is related to canopy dynamics, and the use of trimester images, representing different seasons for the classification of mangrove forests. In addition, the potential of SAR images for mapping mangrove forests using time-series images from C and L bands through machine learning techniques is also recognized.

Keywords: Synthetic Aperture Radar. Mangrove. Sentinell time-series. Random Forest. Biomass. Polarimetric SAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1 - Distribuição global dos manguezais mostrando as seis regiões biogeográficas e dos dois hemisférios. (Duke 1993).....	8
Figura 2.2.1 - Funcionamento do RADAR. Os pulsos emitidos (A) em direção a superfície da Terra através do feixe do RADAR (B) interagem com o alvo retroespalhando (C) o sinal transmitido pela antena, captado pelo sensor. CCRS (2015).....	13
Figura 2.2.2 - Faixa das micro-ondas do espectro eletromagnético. Lee e Pottier (2009).....	13
Figura 2.2.3 - Geometria de imageamento SAR. Lee & Pottier (2009).....	15
Figura 2.2.4 - Principais fontes de espalhamento em um dossel de vegetação arbórea (adaptado de Lang et al. 2008).....	16
Figura 2.2.5 - Elipse de polarização. Modificado de van der Sanden 1997.....	18
Figura 2.2.6 - Respostas polarimétricas para um alvo teórico em co-polarização (esquerda) e de polarização cruzada (direita). Lee & Pottier (2009).....	20
Figura 2.2.7-Zonas admissíveis no plano H- α . Fonte: (Silva 2010), modificado de Lee & Pottier (2009).....	21
Figura 3.1.1 - Mapa da área de estudo.....	25
Figura 3.1.2 - Mapa das unidades geomorfológicas descritas em Souza Filho e Paradella (2002). Modificado de Souza Filho <i>et al.</i> (2011).....	27
Figura 3.1.3-Mapa de vegetação da península. Modificado de Krause & Bock (2010), tradução nossa.....	30
Figura 3.2.1 - Valores de biomassa em relação a densidade de árvores por hectare, com os valores de altura média.....	31
Figura 4.2.1 - Mapa da área de estudo com as classes utilizadas neste capítulo.....	36
Figura 4.2.2: Fluxograma apresentando os passos efetuados para a metodologia do trabalho.....	37
Figura 4.3.1 - Principais respostas polarimétricas encontradas para as classes de gêneros estudadas: RZ100, RZ90, AV90, AV80. Nesta figura constam duas RPs de parcelas de R. mangle com 100% de DoR.....	41
Figura 4.3.2 - Principais respostas polarimétricas para a classe Mangue em regeneração (MangReg).....	42
Figura 4.3.3 - Principais respostas polarimétricas para a classe campos, similar a uma das RPs preferenciais das classes da vegetação de mangue nas figuras 4.3.1 e 4.3.2.....	42

Figura 4.3.4 - Respostas polarimétricas para duas parcelas da classe Praia/duna, que apresentou RP diferentes para todas as parcelas.....	42
Figura 4.3.5 - Boxplot dos valores de altura de pedestal por classe. A escala desse parâmetro é de 0-1 porém, optamos por apresentar uma escala menor para uma melhor visualização.....	43
Figura 4.3.6 - Planos de classificação H-Ângulo Alpha para todos os pixels presentes na imagem.....	44
Figura 4.3.7 - Planos de classificação H-Ângulo Alpha os pixels por classe.....	44
Figura 4.3.8 - Porcentagem de cada parâmetro da decomposição de Freeman-Durden para as classes.....	45
Figura 5.2.1-Mapa da área de estudo com as parcelas e os 12 sítios (I a XII) que foram utilizados no estudo.....	51
Figura 5.3.1-Série temporal dos valores de retroespalhamento por parcela nos 12 sítios apresentados na figura (5.2.1). As cores das linhas representam a biomassa total de cada parcela como descrito na legenda.....	55
Figura 5.3.2-Série temporal variação dos valores de retroespalhamento na polarização VV por sítio. Para cada sítio foram utilizados os valores de todas as parcelas. Os detalhes em vermelho nos sítios 8, 10,11,12 mostram oscilações de valores em curto período de tempo...	56
Figura 5.3.3-Série temporal variação dos valores de retroespalhamento na polarização VH por sítio. Para cada sítio foram utilizados os valores de todas as parcelas.....	57
Figura 5.4.1-Séries temporais de $\sigma^{\circ vv}$ e $\sigma^{\circ vh}$ e da razão $\sigma^{\circ vh}/\sigma^{\circ vv}$. Dados de preamar e baixa-mar para todo o período e as alturas de maré para cada dia do imageamento e o acumulado por dia da precipitação. O detalhe em lilás mostra o período em que os valores de retroespalhamento aumentam como resultado do aumento do teor de umidade devido as marés e a época chuvosa.....	59
Figura 6.2.1-Mapa da área de estudo com as classes estudadas e algumas das amostras de treinamento, que serão detalhadas ao longo desta seção do capítulo.....	66
Figura 6.2.2-Fluxograma com as principais etapas da metodologia.....	68
Figura 6.2.3-Precipitação nos dias que antecedem à aquisição das imagens TerraSAR-X (a) e Radarsat-2 (b). Em vermelho a altura de maré (m) estimada para o horário do imageamento.	70
Figura 6.3.1-Erro OOB e número de variáveis (valor acima de cada barra) dos modelos	

gerados. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, rdst = imagens Radarsat-2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2 e tsx = imagens TerraSAR-X. Cada número após as siglas no eixo x corresponde a uma seleção diferente de variáveis de entrada do mesmo conjunto.....74

Figura 6.3.2-Classificações RF baseadas nos modelos da tabela 6.3.1. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2....78

Figura 6.3.3-Kappa por classe para as 6 classificações analisadas. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2....79

Figura 6.3.4-Erro de discordância global (quantidade, permuta e mudança) por classe para os seis modelos analisados. As classes são enumeradas como segue: 1 – Mangue, 2 – M. anão, 3 – Planície hipersalina , 4 – Água, 5 – Campos e 6 – Outros. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.2.2.1 - Descrição das classes utilizadas nas análises polarimétricas.....	39
Tabela 5.2.3.1-Características das imagens Sentinel-1A utilizadas.....	53
Tabela 6.2.2.1-Características das imagens SAR utilizadas na classificação RF.....	67
Tabela 6.2.2.2-Imagens derivadas calculadas através das polarizações iniciais de cada sensor.	69
Tabela 6.2.3.1-Descrição das classes definidas para o mapeamento.....	71
Tabela 6.3.1-Variáveis e índices de acurácia para os modelos que correspondem à seleção. Os nomes dos modelos é explicado na figura 6.3.1. As siglas das variáveis são formadas por: sensor, polarização e data, sendo que as razões de polarização $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ são indicadas por: rpol.....	75

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E/OU SÍMBOLOS

- ALOS – Advanced Land Observing Satellite
- APP – Área de Preservação Permanente
- BNDO – Banco Nacional de Dados Oceanográficos
- CNES – Centre National d'Etudes Spatiales
- CCRS – Canada Centre for Remote Sensing
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação
- dB – Decibel
- ESA – European Space Agency
- ENVI – Environment for Visualizing Images
- GSMaP – Global Rainfall Map
- GPS – Global Positioning System
- IECOS – Instituto de Estudos Costeiros
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil
- LAMA – Laboratório de Ecologia de Manguezal
- LANDSAT – Land Remote Sensing Satellite
- NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
- PALSAR – Phased Arrayed L-band Synthetic Aperture Radar
- PIXEL – Picture X Elements
- RADAR – Radio Detection And Ranging
- RSAT-2 – Rdarsat2
- RF – Random Forest
- SAR – Synthetic Aperture Radar
- SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
- UFPA – Universidade Federal do Pará
- σ° – Coeficiente de retroespalhamento
- χ – Ângulo de elipticidade
- ψ – Ângulo de orientação
- γ^0 – Gamma

SUMÁRIO

1 CAPÍTULO INTRODUÇÃO E SIGNIFICÂNCIA DA PESQUISA.....	1
1.1 CONTEXTO GERAL E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA DESENVOLVIDA DURANTE A TESE.....	1
1.2 OBJETIVO GERAL.....	4
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	5
2 CAPÍTULO FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 ECOSSISTEMA MANGUEZAL.....	7
2.1.1 Distribuição Global.....	8
2.1.2 Adaptações do Manguezal.....	9
2.1.3 Produtividade do Ecossistema Manguezal.....	10
2.1.4 Dinâmica do Ecossistema Manguezal.....	11
2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E IMAGENS SAR.....	12
2.2.1 Radar de abertura sintética.....	13
2.2.2 Polarimetria.....	18
3 CAPÍTULO ABORDAGEM DA PESQUISA.....	24
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	24
3.1.1 Clima.....	24
3.1.2 Geologia e Geomorfologia.....	25
3.1.3 Aspectos oceanográficos.....	28
3.1.4 Vegetação.....	29
3.2 DADOS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE.....	31
3.3. DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	32
4 CAPÍTULO A POLARIMETRIA SAR BANDA C E SUA RELAÇÃO COM A ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO DE MANGUE.....	34
4.1 INTRODUÇÃO.....	34
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4.2.1 Área de estudo.....	35

4.2.2 Dados de estrutura da vegetação de mangue.....	38
4.2.3 Dados SAR.....	39
4.3 RESULTADOS.....	40
4.4 DISCUSSÃO.....	45
4.5 CONCLUSÃO.....	48
5 CAPÍTULO SÉRIE TEMPORAL SENTINEL-1 NO ESTUDO DAS FLORESTAS DE MANGUE DO LITORAL AMAZÔNICO.....	49
5.1 INTRODUÇÃO.....	49
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
5.2.1 Área de estudo.....	50
5.2.2 Conjunto de dados de campo.....	52
5.2.3 Dados SAR.....	52
5.3 RESULTADOS.....	54
5.4 DISCUSSÃO.....	58
5.5 CONCLUSÃO.....	61
6 CAPÍTULO O USO DE IMAGENS SAR MULTIFREQUÊNCIA NA CLASSIFICAÇÃO DE MANGUEZAIS ATRAVÉS DO CLASSIFICADOR RANDOM FOREST.....	63
6.1 INTRODUÇÃO.....	63
6.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
6.2.1 Área de estudo.....	65
6.2.2 Dados SAR.....	65
6.2.3 Conjunto de dados de campo.....	70
6.2.4 Classificação Random Forest.....	72
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
6.4 CONCLUSÃO.....	82
7 CAPÍTULO CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....	83
REFERÊNCIAS.....	87

APÊNDICES	97
APÊNDICE 4 A – RESPOSTAS POLARIMÉTRICAS	98
APÊNDICE 6 A – MATRIZ DE CONFUSÃO	109

1 CAPÍTULO INTRODUÇÃO E SIGNIFICÂNCIA DA PESQUISA

1.1 CONTEXTO GERAL E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA DESENVOLVIDA DURANTE A TESE

O manguezal é um ecossistema presente na transição entre o ambiente marinho e o terrestre, em regiões tropicais e subtropicais, que desempenha múltiplas funções que lhe conferem elevada importância ecológica e socioeconômica na zona costeira. Dentre suas funções, a proteção da costa contra a ação erosiva das ondas (Alongi 2002), berçário e viveiro de inúmeras espécies de animais (Nagelkerken *et al.* 2008), forma rica cadeia alimentar (Barbier *et al.* 2011), exporta nutrientes para o ambiente marinho (Dittmar *et al.* 2006) e ainda proporciona bens e serviços para as populações humanas que vivem no seu entorno (Walters *et al.* 2008). Este ambiente é um indicador de mudanças climáticas, adaptando-se às condições de aumento do nível do mar (Hogarth 1999).

As regiões costeiras são, majoritariamente, as mais populosas no mundo e conseqüentemente este ecossistema está sob constante pressão antrópica (Kathiresan & Bingham 2001, Spalding *et al.* 2010, Tomlinson 1994). No Brasil, metade da população reside a não mais de 200 km do mar, e o país possui a terceira maior área de manguezal do mundo, que representa 7% da área global. No período de 1999 a 2018 apresentou uma perda de 2% de floresta de mangue (Diniz *et al.* 2019). Esta perda do ecossistema é decorrente de exploração de produtos florestais, expansão da população, alguns processos naturais como subida do nível do mar, mudanças na hidrodinâmica dos estuários (Alongi 2002) além da conversão do ambiente em viveiros para aquicultura (Tenório *et al.* 2015). No litoral norte do Brasil, este é o ecossistema predominante e corresponde a 80% da vegetação de mangue presente no país (Diniz *et al.* 2019 , Spalding *et al.* 2010). Nesta região os manguezais aparentam relativa preservação garantindo os bens e serviços deste ambiente para as comunidades locais, pois preserva a diversidade e riqueza dos recursos pesqueiros, visto que o manguezal é exportador de matéria orgânica para as águas adjacentes (Voivodic *et al.* 2003).

Este ecossistema é um dos ambientes mais produtivos do mundo com grande capacidade de capturar carbono da atmosfera pelas árvores e pelo solo. Estudos que envolvem a produtividade através de estimativas de biomassa, estoque e sequestro de carbono, auxiliam a

melhorar a compreensão da dinâmica da ciclagem do carbono no manguezal (Lugo & Snedaker 1974, Soares & Schaeffer-Novelli 2005). Este potencial de captura de carbono se torna preocupante uma vez que este ecossistema é desmatado e por conseguinte uma quantidade de carbono é emitida. Estima-se que o desmatamento do manguezal é responsável por 10% das emissões causadas por desmatamento em âmbito global, sendo que este ecossistema corresponde a não mais que 0,7% de área de floresta tropical (Donato *et al.* 2011).

Nas últimas duas décadas muitas mudanças ocorreram no desenvolvimento costeiro e principalmente na legislação ambiental (Ferreira & Lacerda 2016). No Código Florestal Brasileiro, os manguezais são considerados Área de Preservação Permanente (APP), entretanto com a mudança atual desta legislação, protege em sua maioria somente as partes florestadas do ecossistema manguezal, liberando 35% de toda a planície hipersalina (apicum) para ser convertida em viveiros de camarão (Oliveira-Filho *et al.* 2016). Frente a perda de áreas de manguezal e a flexibilização atual da legislação, levantamentos para prevenir danos e auxiliar no monitoramento e gestão dos manguezais são necessários, a fim de garantir os bens e serviços de que este ecossistema é provedor.

As imagens de sensores remotos apresentam cada vez mais capacidade de monitoramento devido a constante atualização tecnológica e aos acervos históricos existentes de imagens, como por exemplo as imagens Landsat disponíveis desde 1973, que permitem análises importantes para o monitoramento dos manguezais. A alta cobertura de nuvens é um obstáculo para o imageamento dos manguezais a partir de imagens ópticas. É neste contexto que as imagens dos radares de abertura sintética (SAR) ganham espaço, pois não são atenuadas pela atmosfera e oferecem informações complementares às imagens ópticas como, a sensibilidade à geometria do alvo que permite estudar os componentes estruturais da vegetação e o teor de umidade (Woodhouse 2005).

Neste sentido, o dado SAR polarimétrico permite diversas formas de avaliação do alvo sendo utilizado em investigações florestais, principalmente para melhor compreensão dos mecanismos do espalhamento dominante. Em ambientes como as florestas de mangue, é esperado que a resposta polarimétrica distinga-se das demais com facilidade (Proisy *et al.* 2000). Dados polarimétricos vêm sendo utilizados para descrição de estágios de mangue (Proisy *et al.* 2000, 2002), para mapeamento de espécies (Held *et al.* 2003) e mapeamento do manguezal (Zhen *et al.* 2018). Dois fatos fazem da temática da polarimetria um campo ainda

não esgotado para investigações com relação aos manguezais: a carência de levantamento de campo nos estudos (Proisy *et al.* 2000, 2002) e a particularidade ambiental de cada região pois, no caso do mapeamento de espécies na China e/ou Austrália, as relações encontradas não poderão ser aplicadas em manguezais do Brasil.

Devido à sensibilidade à geometria do alvo, as imagens SAR possuem alto potencial relacionado à estimativa de atributos da vegetação e de biomassa total que é amplamente explorado (Cougo *et al.* 2015, Kovacs *et al.* 2006, Kovacs *et al.* 2013, Mougin *et al.* 1999, Proisy *et al.* 2002, Pereira *et al.* 2016, Simard *et al.* 2006, 2008). Além disso, para regiões alagáveis como regiões de várzea, pântano e manguezais os dados SAR são excelentes na detecção de áreas de inundação devido à sensibilidade ao teor de umidade (Lang *et al.* 2009, Townsend 2002, Wang & Imhoff 1993, Wang *et al.* 1995).

Contudo, a produtividade do ambiente é variável ao longo do tempo e dependente das condições ambientais, estas características tornam estimativas de biomassa um desafio, em função da variabilidade temporal. Estudos da sensibilidade à sazonalidade em dados SAR foram principalmente focados em florestas temperadas, inicialmente por Proisy *et al.* (2000), sem boas relações. Mais recentemente, Frison *et al.* (2018) descreveram o comportamento sazonal da razão de polarização $\sigma^{\circ}_{VV}/\sigma^{\circ}_{VH}$ Sentinel-1A e 1B para florestas decíduais, com alta correlação com valores de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). A sazonalidade da correlação entre valores de biomassa e dados Sentinel-1 σ°_{VH} foram mostrados por (Laurin *et al.* 2018) com valores de correlação mais altos na estação com folhas para as florestas decíduais do Mediterrâneo. Os manguezais apresentam ciclo fenológico bem documentado para a península de Ajuruteua (Fernandes *et al.* 2007, Menezes 2006, Mehlig *et al.* 2010). Até o presente momento não existem relatos do acesso ao ciclo fenológico das florestas de mangue através de dados de sensores remotos, os quais podem ser abordados por dados dos satélites Sentinel-1. Os satélites Sentinel-1A e 1B, banda C, possuem resolução temporal de 6 a 12 dias e resolução espacial de até 20 m. Por se tratar da banda C (5,6 cm), é esperado que a energia interaja com os componentes pequenos da vegetação sendo sensível a mudanças sazonais como descrito anteriormente.

A espacialização de dados de vegetação em forma de mapa é uma ferramenta indispensável em pesquisas. Porém, apesar de haver informações disponíveis baseadas em dados de sensores remotos, informações precisas, confiáveis e em tempo real de distribuição e dinâmica das florestas de mangue do mundo não estão prontamente disponíveis (Giri 2016).

Para os manguezais do litoral brasileiro, investigações que envolvam mapeamento da distribuição da vegetação em escala local não são escassas. No mapeamento dos ambientes costeiros da região amazônica brasileira existem alguns estudos que envolvem fusão de dados SAR com ópticos, através da técnica SPC-SAR para distinguir unidades geobotânicas (Souza Filho & Paradella 2002, Souza Filho & Paradella 2005) e na classificação de ambientes costeiros (Rodrigues & Souza-Filho 2011), com ótimos produtos. Para a península de Ajuruteua existem dois mapas de distribuição das espécies de mangue desenvolvidos por (Krause & Bock 2010) e Menezes & Mehlig (2010), elaborados a partir da interpretação visual e classificação baseada em pixel de imagens Ikonos, respectivamente.

Na última década, com a maior disponibilidade de dados SAR, como os mosaicos globais anuais em banda L fornecidos pela JAXA e a constelação de sensores na banda C (Sentinel-1A e 1B), ambas com livre acesso as imagens, aumentou a possibilidade de mapeamentos em escalas espacial e temporal baseados em sensores deste tipo. A tecnologia de processamento destes dados acompanha estes avanços com maior número de algoritmos robustos de classificação. O Random Forest (RF) está entre os métodos mais utilizados atualmente para classificação e regressão baseadas em aprendizado de máquina, pois consegue lidar com grande um grande conjunto de dados, ideal para abordagens multissensor e multifrequência.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esta tese tem como objetivo geral abordar o potencial dos dados de sensores SAR para diferenciar gêneros de árvores de mangue através de dados polarimétricos, estimar biomassa acima do solo e em produzir mapas temáticos das florestas de mangue através do uso de imagens SAR multifrequência.

Para alcançar tal objetivo foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Definir assinaturas polarimétricas na banda C para os gêneros de árvores de mangue dominantes na região,
- Analisar os mecanismos de espalhamento dominantes e de que forma os mesmos podem auxiliar na distinção dos gêneros botânicos,
- Avaliar o potencial das imagens Sentinel-1A na definição de uma assinatura temporal

de floresta de mangue e quais os avanços esta abordagem traz para a temática de estimativa de biomassa,

- Analisar o uso de sensores SAR multifrequência e multipolarização através de técnicas de aprendizado de máquina para a produção de mapas temáticos,

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada na forma de capítulos, onde cada capítulo responde a uma pergunta científica, exceto os capítulos iniciais (Cap. 1, 2 e 3), que correspondem à introdução, fundamentação teórica e abordagem da pesquisa, respectivamente. O conteúdo de cada capítulo é descrito a seguir.

No capítulo 1, “Introdução e significância da tese”, contextualizo a tese apresentando a problemática e as lacunas do conhecimento bem como os objetivos definidos para preencher estas lacunas. No capítulo 2, “Fundamentação teórica”, apresento uma fundamentação teórica dos dois temas centrais da tese, sensoriamento SAR e floresta de manguezal. Esta etapa também conhecida como abordagem teórica visa apresentar uma revisão dos conceitos de cada tema abordado ao longo da tese. O capítulo 3, “Abordagem da pesquisa” objetiva descrever de forma mais detalhada a área de estudo, as imagens e os dados da vegetação que foram analisados nos capítulos 4, 5 e 6. A metodologia e os respectivos processamentos efetuados em cada conjunto de dados será apresentado nos capítulos dos resultados da tese (Cap. 4, 5 e 6).

O capítulo 4, “A polarimetria SAR banda C e sua relação com a estrutura da vegetação do manguezal”, responde à pergunta “visto que os gêneros apresentam estruturas florestais diferentes é possível separar estes alvos através de informações polarimétricas?”. Para tal, foi verificada a potencialidade das decomposições da matriz de espalhamento e respostas polarimétricas na diferenciação dos bosques de manguezal formados pelos gêneros dominantes na área de estudo. O capítulo 5, “Série temporal Sentinel-1A no estudo das florestas de mangue do litoral Amazônico”, responde à pergunta “o comportamento do retroespalhamento ao longo de uma série temporal no manguezal configura uma assinatura temporal deste ambiente?”. Neste capítulo é apresentada a primeira série temporal do retroespalhamento sobre a vegetação de mangue e discutida quais características do ambiente

interferem no comportamento deste. O capítulo 6, “O uso de imagens SAR multifrequência na classificação de manguezais através de classificador Random Forest” tem como objetivo analisar os potenciais, vantagens e desvantagens da utilização de imagens SAR em multifrequência para a classificação do ecossistema manguezal em ambiente de aprendizado de máquina.

No Capítulo 7, apresento as conclusões gerais da tese abordando os objetivos definidos para os capítulos 4, 5 e 6 e como os mesmos foram alcançados. Apresento os avanços na temática que esta tese contribuiu e as perspectivas de pesquisa.

2 CAPÍTULO FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo abordaremos os dois eixos principais desta tese, mangue e imagens SAR, através de uma revisão dos conceitos que serão abordados nos capítulos 4, 5 e 6.

2.1 ECOSSISTEMA MANGUEZAL

Os manguezais, no sentido mais limitado da palavra, podem ser definidos como árvores tropicais restritas a comunidades entremarés e adjacentes, ou sujeitas à influência indireta das marés (Tomlinson 2016). Este ecossistema se desenvolve, preferencialmente, em regiões costeiras abrigadas como os deltas, estuários, lagunas e margens de recifes de coral (Duke *et al.* 1998). A combinação de águas rasas, elevados níveis de nutrientes e alta produtividade primária faz com que essas áreas sejam ideais para apoiar teias alimentares complexas (Twilley & Rivera-Monroy 2005) enriquecendo águas adjacentes e proporcionando um ambiente ideal para habitat de peixes, crustáceos, aves entre outros.

Este ambiente possui muitas funções importantes para a região costeira, dentre elas, trapear sedimento devido à concentração de raízes, pneumatóforos e árvores o que promove acreção vertical de sedimentos clásticos e materiais orgânicos através da redução na velocidade das correntes (Ellison 2008), em muitos casos favorecendo a progradação em direção ao mar. Devido este processo de retenção auxiliam também na qualidade da água costeira (Ellison *et al.* 1999). Além das funções ambientais vários autores relatam a importância dos manguezais como um produtor de bens e serviços que são utilizados pelas comunidades locais (Lugo & Snedaker 1974, Lara 2003, Spalding *et al.* 2010).

Devido a sua localização na costa, estão constantemente expostos a grandes variações de salinidade e inundações frequentes, o que requer adaptações fisiológicas e morfológicas e garante a não competição com plantas de água doce (Ellison 2008).

De acordo com Tomlinson (2016), o alcance geográfico das espécies é ainda incompleto, o autor menciona o trabalho desenvolvido por Spalding *et al.* (2010) como a mais completa referência com relação a esta temática. Já com relação à área global ocupada pelos manguezais alguns trabalhos possuem estimativas, 152.000 km² relativo a 123 países

(Spalding *et al.* 2010) e 137.760 km² dentro do limite latitudinal de 5°N e 5°S (Giri *et al.* 2011).

2.1.1 Distribuição Global

Os manguezais estão presentes em 123 países e territórios, em sua maioria entre as latitudes 30°N e 30°S. Este limite de ocorrência estende-se ao Norte no Japão (31°22'N) e Bermudas (32°20'N) e ao Sul na Nova Zelândia (38°03' S) Austrália (38° 45' S) e África do Sul (32°59' S) (Spalding, 2010).

De acordo com Duke (1998), as espécies de mangue são primeiramente distribuídas em dois hemisférios, o Pacífico Atlântico Leste – Zona Atlântica (PLA), e o Pacífico Indo – Oeste – Zona Indo – Pacífica (PIO), sendo que a diversidade de espécies é maior na zona indo pacífica, com um total de 58 espécies enquanto a zona Atlântica apresenta apenas 13 espécies de ocorrência natural. O mapa (Figura 2.1.1) de distribuição proposto por (2013) mostra os dois hemisférios e a subdivisão em seis regiões biogeográficas.

Figura 2.1.1 - Distribuição global dos manguezais mostrando as seis regiões biogeográficas e dos dois hemisférios. (Duke 1993).

A diferença de distribuição entre a costa leste e oeste das Américas e África, com maior

e menor intervalo, respectivamente, pode ser atribuída às correntes oceânicas quentes e frias presentes nestas regiões (Duke, 1998) fato corroborado por Soares *et al.* (2012) que mostrou que o limite sul dos manguezais do Brasil, na região de Laguna – SC, está relacionado aos eventos de geada nesta região.

Em escala global, um dos fatores determinantes do alcance das espécies é a temperatura do ar e do mar, principalmente se existem condições de temperaturas extremas, pois a maioria das espécies de mangue não resiste a condições de congelamento (Blasco *et al.* 1998, Spalding, 1997). Devido à pouca tolerância fisiológica a baixas temperaturas, os mangues são geralmente restritos a áreas onde a temperatura mínima do ar é de 20°C nos meses mais frios, e sazonalmente a variação não passa de 10°C (Duke, 1998).

Outro fator que tem forte influência na distribuição global dos manguezais é a precipitação, principalmente por diminuir a salinidade em ambientes altamente salinos (Spalding, 1997). Quando altas taxas de precipitação somam-se a grande aporte fluvial, as árvores de mangue apresentam maior desenvolvimento e crescimento do que áreas com pouca pluviosidade e escoamento fluvial (Duke 1998, Spalding 1997). Isto ocorre porque quando o ambiente encontra-se com elevada salinidade as árvores de mangue gastam muita energia para manter o equilíbrio e a concentração da água, em vez de utilizá-la para crescimento e produção primária (Kathiresan 2005). Muitos fatores influenciam na distribuição a nível nacional e local, incluindo solos, marés, geomorfologia, topografia, disponibilidade de minerais, aeração do solo, ventos, correntes e ação das ondas (Spalding *et al.* 1997).

2.1.2 Adaptações do Manguezal

As árvores de mangue apresentam adaptações morfológicas e fisiológicas para que possam sobreviver na região de variação da maré, dentre as mais relevantes estão adaptações à salinidade e inundação.

A salinidade do ambiente entremarés é determinada pela hidrologia local, sendo a entrada de água salgada vinda das marés e, de água doce, vinda dos rios, chuvas, águas subterrâneas e do escoamento. Devido à alta evapotranspiração na região dos trópicos, a salinidade intersticial pode aumentar. Desta forma, a maioria das espécies de mangue desenvolveram mecanismos de evasão e regulação do sal, com mecanismos de tolerância,

porém em graus diferentes. As estratégias de resistência incluem a exclusão do sal, extrusão, armazenamento, suculência, compartimentação e osmorregulação (Alongi 2008).

A alta frequência de inundação em alguns casos pode levar a anoxia do solo do manguezal, prejudicando as raízes das plantas que necessitam de oxigênio para seu metabolismo. Para lidar com esta falta de oxigênio no solo as árvores de mangue desenvolveram algumas adaptações morfológicas como raízes superficiais. Como resultado, a maior parte da biomassa das raízes se encontra acima da profundidade do solo de 70 cm (Jimenez *et al.* 1985). Alguns gêneros como *Avicennia* e *Laguncularia* desenvolvem suas raízes em forma de extensas redes próximas à superfície do solo, outras como a *Rhizophora*, formam extensas raízes aéreas que auxiliam na estabilidade da árvore em solos inconsolidados, desta forma, é possível transportar oxigênio da atmosfera para o sistema radicular (Kathiresan 2005).

2.1.3 Produtividade do Ecossistema Manguezal

Os manguezais está entre os ecossistemas mais produtivos do mundo, produzindo carbono orgânico bem acima dos requisitos do ecossistema e contribuindo significativamente para ciclo global de carbono, (Kathiresan & Bingham 2001). Como todos os ecossistemas florestais, a produção das árvores de mangue é ligada à energia da luz solar através da fotossíntese. Esta energia flui para fora do ecossistema também, em forma de calor e em outras formas transformadas ou processadas, tais como detritos. Os fatores ambientes (maré e mudanças na concentração de sal) e seus gradientes através do tempo e do espaço são forçantes importantes que regem e regulam o ecossistema manguezal, somado aos elementos essenciais e compostos e suas taxas de liberação, a radiação solar, e as mudanças na luz do dia, temperatura e condições climáticas (Alongi 2002).

A alta produtividade do manguezal é um dos fatores que confere a este ambiente tamanha importância em regiões costeiras tropicais e subtropicais e pode ser avaliada pelo monitoramento das taxas de fixação e liberação de carbono. Estudos que envolvem a produtividade através de estimativas de biomassa, estoque e sequestro de carbono, auxiliam a melhorar a compreensão da dinâmica da ciclagem do carbono no manguezal e também podem explicar o funcionamento e a evolução do ecossistema florestal (Lugo & Snedaker, 1997,

Soares & Schaeffer-Novelli 2005). Recentemente Hamilton *et al.* (2018), calcularam que os manguezais armazenaram globalmente 4,19 Pg de carbono em 2012, sendo 2,96 Pg no solo e 1,23 Pg na biomassa viva, com a Indonésia, Brasil, Malásia e Papua Nova Guiné respondendo por mais de 50% do estoque global.

No entanto, as perdas em áreas de mangue são preocupantes e as taxas continuam crescendo em todos os países em desenvolvimento, onde mais de 90% dos manguezais estão presentes, o que pode significar um mundo privado dos serviços oferecidos pelos ecossistemas manguezais, talvez nos próximos 100 anos (Duke *et al.* 2007). Além das perdas para áreas de aquacultura, conversão agrícola, crescimento demográfico em cidades costeiras entre outras, existe uma perda indireta do ecossistema relacionada a alterações humanas nas bacias hidrográficas causando desvios de água doce (barragens e canais) e deterioração da qualidade da água (nutrientes, metais pesados, derramamentos de óleo, pesticidas) (Twilley & Rivera-Monroy 2005). De acordo com Hamilton *et al.* (2018), as taxas de perda de carbono entre 2000 – 2013 foram em média de 0,17%, porém em algumas regiões como o Sudeste Asiático esta taxa pode chegar a 7,9% ao ano.

2.1.4 Dinâmica do Ecossistema Manguezal

Em geral, a dinâmica da floresta de mangue é refletida pela variação no tempo e no espaço de parâmetros estruturais do dossel, que incluem medidas como composição de espécies, diversidade, altura e densidade do caule, diâmetro do tronco, área basal, padrões de distribuição espacial das espécies, biomassa, massa superficial foliar, índice de área foliar (Alongi 2002, Smith III *et al.* 1989). Alguns destes parâmetros tem maior influência na dinâmica anual e outros na sazonal e, devido a todos estes parâmetros apresentarem diversas mudanças ao longo do tempo, este ecossistema pode ser considerado altamente dinâmico.

Dois tipos de sistema de classificação foram propostos para compreender os fatores que controlam estes parâmetros supracitados e consequentemente a estrutura dos manguezais: o sistema de classificação ecológica e o sistema de classificação geomorfológico.

A classificação fisiográfica sugerida por Lugo & Snedaker (1974) baseada na classificação por “assinatura energética” proposta por (Odum 1967) e tem os seguintes tipos fisiográficos: floresta ilhote, ribeirão, de franja, de bacia, arbustivo e anão. A abordagem

geomorfológica proposta por (Thom *et al.* 1975) considera a fisiografia um dos fatores mais importantes para explicar os diversos modelos de desenvolvimento das zonas úmidas costeiras, com base nisto propôs oito cenários (*settings*) caracterizados em função da influência de fatores como marés, ondas e energia dos rios. No entanto, alguns manguezais não se encaixam nestes sistemas de classificação como é o caso das florestas de mangue da região norte do Brasil.

Os ciclos sazonais nas plantas, principalmente os relacionados às folhas e às partes reprodutivas, são chamados de fenologia e possuem grande influência na adaptação, sobrevivência e distribuição das espécies (Duke, 2002). Os manguezais apresentam padrões fenológicos com ciclos que dependem de vários fatores sazonais, das condições ambientais, que diferem regionalmente e por esta razão não se pode generalizar tais padrões fenológicos sem especificar espécies e localização (Fernandes 1999, Mehlig 2006). De fato, o estudo da fenologia pode indicar um padrão de crescimento de determinada espécie, de uma única árvore ou de uma floresta e tais padrões de crescimento podem depender de fatores externos, fatores abióticos como a precipitação (Menezes 2006).

Um estudo que compilou os trabalhos feitos nos manguezais do norte do Brasil (Menezes *et al.* 2008) mostrou que as variações sazonais da precipitação e salinidade influenciam a fenologia das espécies e a queda das folhas. Especialmente na península de Ajuruteua os estudos apontam que, de maneira geral, os períodos de maior produção de serrapilheira, ou seja, quando o dossel possui menos folhas, são relacionados à época seca na região (Fernandes *et al.* 2007, Mehlig, 2006, Menezes, 2006).

2.2 SENSORIAMENTO REMOTO E IMAGENS SAR

RADAR é um acrônimo de *Radio Detection And Ranging*, estes sensores remotos operam na faixa das micro-ondas, entre 1 cm e 1 m de comprimento de onda e são capazes de detectar um alvo pela sua distância. O funcionamento se dá em três etapas (Figura 2.2.1): transmite sinais de micro-ondas em direção ao alvo na superfície da Terra, recebe parte da energia transmitida que é retroespalhada pelo alvo e registra a intensidade e a defasagem (distância) dos sinais de retorno (CCRS 2012, Lee & Pottier 2009).

Quando se trabalha com a região de micro-ondas do espectro eletromagnético diferente

da utilizada por outras regiões espectrais ganha-se capacidade de complementar informações do alvo como a geometria, forma, propriedades dielétricas e conteúdo de umidade (Woodhouse 2005). A faixa das micro-ondas tem ainda a vantagem da não atenuação da atmosfera.

Figura 2.2.1 - Funcionamento do RADAR. Os pulsos emitidos (A) em direção a superfície da Terra através do feixe do RADAR (B) interagem com o alvo retroespalhando (C) o sinal transmitido pela antena, captado pelo sensor. CCRS (2015)

2.2.1 Radar de abertura sintética

O sistema SAR (“*Synthetic Aperture Radar*”) de geração de imagens é um sistema de radar ativo operando no micro-ondas região do espectro eletromagnético (EM), entre a banda P e a banda Ka (Figura 2.2.2), montado em uma plataforma móvel (avião, ônibus espacial ou satélite) e opera em uma geometria de visada lateral com iluminação perpendicular à direção da linha de voo (Lee & Pottier 2009).

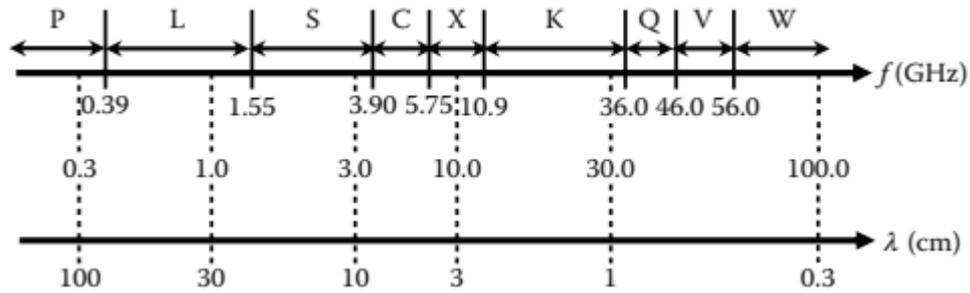


Figura 2.2.2 - Faixa das micro-ondas do espectro eletromagnético. Lee e Pottier (2009).

O sistema opera através de pulsos, um pacote de energia é transmitido pela antena em um intervalo de tempo curto, com determinada frequência de repetição que é controlado para que o retroespalhamento da cena retorne antes do próximo pulso ser transmitido (Lusch, 1999). Assim, é possível medir a distância entre o radar e o alvo, calculando o tempo de atraso entre a transmissão do pulso e a recepção do sinal retroespalhado pelos diferentes alvos (CCRS 2012). O pulso tem duração e comprimento de onda específico, os comprimentos de onda e suas respectivas frequências estão descritos na figura acima.

A polarização é a orientação segundo a qual oscila, no tempo, o vetor campo elétrico da onda eletromagnética. Devido o radar ser um sensor remoto ativo é possível controlar a orientação da energia eletromagnética transmitida e recebida (Lusch 1999). Esta orientação pode ser vertical (V) ou horizontal (H) sendo assim, existem quatro polarizações possíveis: HH, VV, HV e VH, as duas primeiras são denominadas polarização linear (co-pol) e as duas últimas são chamadas de polarização cruzada (cross-pol), onde a primeira letra designa a polarização da energia transmitida e a segunda, da energia recebida.

A geometria de imageamento de um SAR monoestático (a mesma antena emite e recebe o sinal) é apresentada na figura 2.2.3.

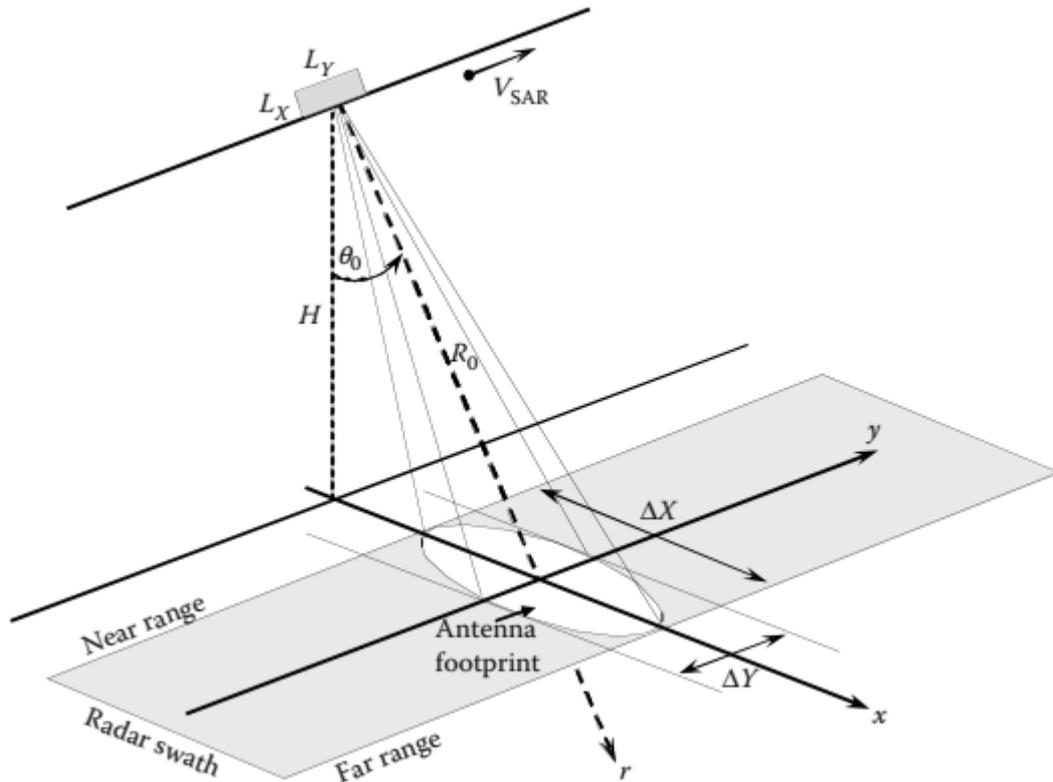


Figura 2.2.3 - Geometria de imageamento SAR. Lee & Pottier (2009).

A visada lateral confere toda a particularidade de imageamento SAR. A figura 2.2.3 mostra a antena perpendicular a direção de voo, direção de azimute, indicada por y e o feixe da antena é direcionado ao solo em um ângulo de incidência θ_0 , que aumenta da direção *near range* para *far range*. O eixo radial (r) é chamado de *slant range* e a área do feixe que cobre o solo (x) é denominada *ground range*. Conforme a plataforma se movimenta na direção de voo (y), uma faixa do solo (*antenna footprint*) é varrida e a abertura da antena define o tamanho da área que será imageada (CCRS 2012, Lee & Pottier 2009).

Para descrever as relações entre as características do sistema radar, do alvo e do sinal que foi transmitido pela antena, interagiu com o alvo e retornou, foi definida a equação de radar (Henderson & Lewis 2008):

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G_0^2 \sigma_o}{(4\pi)^3 R_0^4}$$

onde P_r é a potência média recebida pela antena, P_t é a potência transmitida, λ é o comprimento de onda, G_0 o ganho máximo da antena, R_0 é a distância entre a antena e o alvo

(Figura 2.2.1.2), e σ° é o coeficiente de retroespalhamento. A potência recebida pela antena é diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento, que é o único parâmetro relacionado ao alvo, os demais parâmetros da equação podem ser reunidos, caracterizando o sistema de radar (Ulaby & Dobson 1989).

A forma como a onda interage com o alvo então depende de características do sensor e do alvo. A seguir iremos nos concentrar na interação do σ° com os alvos florestais como manguezal.

Para entender o espalhamento em coberturas de vegetação complexa, é necessário avaliar os diferentes níveis do dossel que afetam a assinatura do radar. Para estas áreas considera-se três níveis (Figura 2.2.4): 1) nível que consiste de pequenos galhos e folhagens, 2) nível que consiste de grandes galhos e troncos, 3) nível superficial que pode ou não estar coberto por água (Kasischke & Bourgeau-Chavez 1997).

Figura 2.2.4 - Principais fontes de espalhamento em um dossel de vegetação arbórea (adaptado de Lang *et al.* 2008).

O coeficiente de retroespalhamento nestes casos é dado por:

$$\sigma_w^\circ = \sigma_c^\circ + \tau_c^2 + \tau_t^2 (\sigma_m^\circ + \sigma_t^\circ + \sigma_s^\circ + \sigma_d^\circ) \quad \text{onde,}$$

σ_c° = retroespalhamento da camada do dossel constituída pelos galhos menores e

folhagens (espalhamento superficial),

τ_c^2 = coeficiente de transmissão do dossel da vegetação,

τ_t^2 = coeficiente de transmissão da camada dos troncos,

σ_m° = espalhamento por múltiplas reflexões entre o solo e a camada do dossel,

σ_i° = retroespalhamento superficial direto dos troncos das árvores,

σ_s° = retroespalhamento superficial direto do solo e

σ_d° = espalhamento em *double-bounce* entre tronco e solo.

Os termos que compõem a equação são dependentes: do tipo de vegetação presente, comprimento de onda, ângulo de incidência, polarização, constante dielétrica da vegetação e da superfície do terreno. O comprimento de onda influencia na penetração da energia incidente no dossel, sendo diretamente proporcionais (van der Sanden 1997). Quando comparados os quatro comprimentos de onda mais utilizados, banda X, C, L e P incidindo sobre um mesmo dossel florestal a energia do menor comprimento de onda X (3 cm) é atenuada pelo espalhamento superficial no topo do dossel (folhas e galhos menores), a energia da banda C (5,6 cm) tem maior capacidade de penetração no dossel ocasionando um espalhamento volumétrico, dentro do dossel a energia interage com folhas e ramos secundários pequenos. Na banda L (23 cm) a energia tem maior penetrabilidade no dossel, sofre espalhamento volumétrico e despolarização da energia causada pelos galhos, ramos e troncos, a capacidade de penetrar no dossel aumenta na banda P (68 cm), a energia com este comprimento de onda sofre atenuação por parte de hastes maiores e da superfície do solo (Leckie & Ranson 1998, Waring *et al.* 1995).

Outro fator que influencia a penetração da energia no dossel é o ângulo de incidência que varia entre 20° a 60°, denominados ângulo pequeno e ângulo raso, respectivamente. Quando o ângulo de incidência é menor a rota percorrida pela energia incidente no dossel é menor, aumentando a transmissividade na copa das árvores e levando mais energia para interagir com os troncos e superfície (Lang *et al.* 2009).

Na camada do dossel o teor de umidade (constante dielétrica) presente na vegetação é responsável por influenciar o espalhamento sendo diretamente proporcional a constante dielétrica. No caso dos manguezais, a onda incidente propaga-se através da copa e atinge uma superfície altamente refletora, resultando no aumento do retroespalhamento, principalmente nas co-polarizações (HH e VV) (Proisy *et al.* 2000). Este aumento pode ser devido ao

aumento do espalhamento do tipo *double-bounce* e *multi-path* (Kasischke & Borgeau-Chaves, 1997). Florestas inundadas apresentam coeficiente de retroespalhamento normalmente maiores que as florestas não inundadas, principalmente em polarizações HH (Wang *et al.* 1995).

2.2.2 Polarimetria

A polarimetria é um conceito baseado na utilização das informações de fase da onda, normalmente os radares representam uma cena através da medida da amplitude, devido a antena de recepção ser a mesma da transmissão tendo a polarização fixa. Assim, para garantir que toda a informação da onda espalhada seja mantida, sua polarização deve ser medida através de uma representação vetorial. Com a utilização de radares imageadores polarimétricos é possível medir a amplitude e a fase relativa de todas as configurações das antenas de transmissão e recepção, para todos os elementos de resolução de uma cena (Ulaby & Elachi 1990).

Uma vez que a polarização é dada pela maneira que o campo elétrico vibra e, este oscila em função do tempo, conforme o tempo muda, a ponta do vetor campo elétrico traça uma curva no plano perpendicular à direção da propagação. A natureza dessa curva pode ser definida por meio do ângulo de elipticidade (χ) e ângulo de orientação (ψ) da chamada elipse de polarização (Figura 2.2.5) (van der Sanden 1997).

A curva pode assumir três formas: linha reta, quando é linearmente polarizada, circular, quando é polarizada circularmente e na forma de elipse, quando a onda é elipticamente polarizada. Através dos parâmetros da elipse de polarização (χ e ψ) é possível descrever todas as polarizações possíveis sabendo que, χ varia entre -45° a 45° e representa a razão entre o eixo maior (**a**) e o eixo menor (**b**) e os valores de ψ podem variar de 0° a 180° e correspondem ao ângulo entre **a** e a direção H (van der Sanden 1997). Outros conceitos que envolvem o campo da polarimetria SAR, como o vetor de Stokes, vetor de Jones e vetor de espalhamento para a representação do campo elétrico são descritos em (Lee & Pottier 2009, Ulaby & Elachi 1990,) e não serão detalhados neste trabalho. Assim, focaremos em duas formas de descrever e analisar os mecanismos de espalhamento de um alvo: as respostas polarimétricas e os teoremas de decomposição de alvos.

O método de respostas polarimétricas foi proposto por van Zyl (1987) no qual o σ° de determinado alvo é plotado em um gráfico tridimensional (Figura 2.2.6) em função dos ângulos da elipse de polarização: ângulo de elipticidade (χ) e orientação (ψ) (Santos & Gonçalves 2009). Quando a mesma polarização é utilizada para transmitir e receber a energia, a assinatura é co-polarizada e quando as polarizações são ortogonais então a resposta é cross-polarizada. A resposta polarimétrica é a soma das assinaturas das polarizações medidas individualmente para um alvo. Se muitos mecanismos de espalhamento estão presentes então a resposta polarimétrica não será idêntica e casos nulos podem ocorrer em diferentes polarizações, ou seja, valores igual a zero podem aparecer em polarizações diferentes (van Zyl *et al.* 1987). Os gráficos são avaliados visualmente e comparados às descrições do alvo como dados estruturais e/ou sucessionais da vegetação, visto que alguns parâmetros do gráfico podem indicar estados da vegetação como é o caso da altura de pedestal, que reflete a despolarização da onda. Além da altura de pedestal van Zyl *et al.* (1987) propuseram o coeficiente de variação (v) que é a medida de quanto as propriedades de espalhamento variam dentro de um elemento de resolução, sendo equivalente ao parâmetro altura de pedestal. No entanto, o coeficiente de variação mais efetivo do que a altura de pedestal, pois não é limitado à polarização cruzada ou linear (Touzi *et al.* 2004).

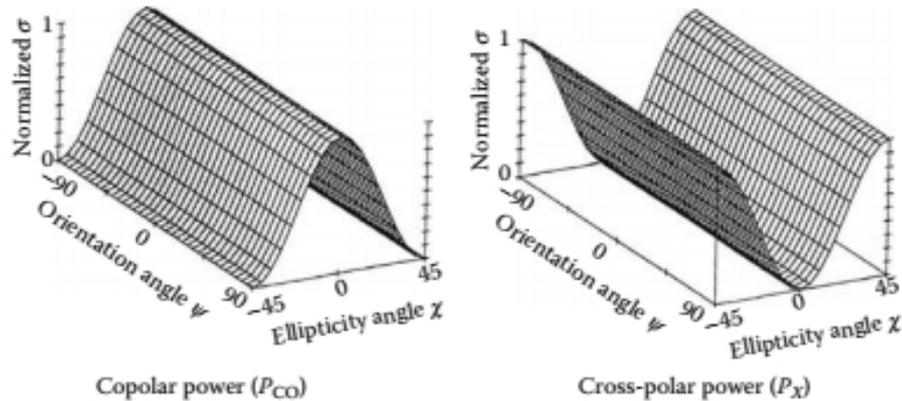


Figura 2.2.6 - Respostas polarimétricas para um alvo teórico em co-polarização (esquerda) e de polarização cruzada (direita). Lee & Pottier (2009)

O objetivo da decomposição de alvos incoerentes é expressar o mecanismo de espalhamento médio como a soma dos elementos independentes a fim de associar um mecanismo físico a cada componente (Cloude & Pottier 1996, Touzi 2007). Neste trabalho, as informações contidas nas matrizes de segunda ordem serão trabalhadas de duas formas, com a matriz de coerência $[T]$ através das decomposições por autovalores e autovetores propostas por (Cloude & Pottier 1997) e a matriz de covariância $[C]$ através das decomposições de (Freeman & Durden 1998).

Cloude & Pottier (1997) desenvolveram um modelo estatístico alternativo que tem como pressuposto o fato de que sempre haverá um mecanismo de espalhamento dominante médio em cada célula e assim propõem os parâmetros que compõem este espalhamento médio, que são: entropia, anisotropia e ângulo alfa.

A entropia (H) é uma medida que varia entre $0 < H < 1$ e indica o número de mecanismos dominantes presentes na célula de resolução da cena, ou seja, o grau de aleatoriedade do processo de espalhamento. Valores baixos de entropia ($H \sim 0$) indicam um sistema com baixa despolarização que pode representar mecanismo de espalhamento único (totalmente polarizado), valores médios de entropia ($0 < H < 1$) indicam mais de um processo de espalhamento e quando a entropia é alta ($H \sim 1$) indica um alvo com alta despolarização (Cloude & Pottier 1996). Interessante ponto é que o conceito de entropia é amplamente utilizado como medida de complexidade (ciências biológicas, químicas e da informação) e dentro das teorias de informação podem explicar a formação da imagem como um processo estocástico, ou seja, imagens produzidas com alto valor de entropia revelam uma imagem com

maior riqueza de detalhes (Bispo 2012). A anisotropia (A) é um parâmetro complementar à entropia indicando a importância relativa dos mecanismos secundários de espalhamento.

O ângulo alfa (α) indica o tipo de mecanismo de espalhamento médio presente na interação da onda com o alvo, onde $\alpha = 0^\circ$ (espalhamento superficial), $\alpha = 45^\circ$ (espalhamento volumétrico) e $\alpha = 90^\circ$ (espalhamento *double-bounce*). Para avaliar estes parâmetros normalmente é utilizado o plano formado pela relação do parâmetro H e α (Figura 2.2.7) proposto por Cloude & Pottier (1997). Neste plano cada pixel da cena irá se posicionar em uma das 9 zonas, no qual a entropia é a medida de aleatoriedade dos mecanismos de espalhamento e o ângulo alfa caracteriza o mecanismo de dispersão. As zonas são descritas a seguir de acordo com Lee & Pottier (2009):

Figura 2.2.7-Zonas admissíveis no plano H- α . Fonte: (Silva 2010), modificado de Lee & Pottier (2009).

- Z1: alta entropia – espalhamento múltiplo: nesta região é possível identificar mecanismo *double-bounce* em um ambiente de alta entropia ($H > 0,90$). Tais mecanismos podem ser observados em floresta ou vegetação que apresente copa e ramos bem estruturados.

- Z2: alta entropia – espalhamento da vegetação: espalhamento volumétrico em ambiente de alta entropia ($H > 0,90$) surge para espalhamento simples irradiado de uma nuvem de partículas aciculares anisotrópicas ou para espalhamento múltiplo a partir de uma nuvem de partículas de baixa perda simétrica (*low loss symmetric particles*). Isto pode ser associado à

espalhamento produzido por dossel de floresta ou de alguns tipos de superfície vegetadas com elementos de espalhamento anisotrópico altamente aleatório.

- Z3: alta entropia – espalhamento superficial: esta zona é considerada inválida por ser impossível distinguir espalhamento superficial em ambiente de alta entropia $H > 0.90$.

- Z4: média entropia – espalhamento múltiplo: esta zona descreve espalhamento diedral em ambiente de média entropia e isto ocorre, por exemplo, em aplicações florestais, onde mecanismo *double-bounce* ocorre nas bandas P e L pela maior propagação da onda através do dossel. O dossel atua aumentando a entropia do processo de espalhamento.

- Z5: média entropia – espalhamento em vegetação: nesta zona predomina moderada entropia associada com um dominante mecanismo de espalhamento do tipo dipolo. O aumento da entropia H é devido a uma distribuição estatística central do ângulo de orientação. Esta zona pode incluir espalhamento de superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos e moderada correlação com a orientação dos espalhadores.

- Z6: média entropia – espalhamento superficial: esta zona reflete um aumento na entropia por conta do aumento da rugosidade e devido a efeitos da propagação da onda no dossel. Quando a relação a rugosidade-comprimento de uma superfície muda, sua entropia H vai aumentar. Além disso, uma cobertura de superfície compreendendo dispersores elipsoidais achatados nas pontas (folhas, por exemplo) gerará uma entropia $0,6 < H < 0,7$.

- Z7: baixa entropia – eventos de múltiplos espalhamentos: esta zona corresponde ao domínio de baixa entropia associada a mecanismos do tipo simples (*even*) ou duplo salto (*double-bounce*), tais como aqueles gerados por espalhadores dielétricos isolados e diedros metálicos.

- Z8: baixa entropia – espalhamento modelado por dipolo: nesta zona ocorrem fortes mecanismos correlacionados que possuem grande desequilíbrio entre S_{hh} e S_{vv} em amplitude. Um espalhador dipolo isolado poderia responder por este comportamento, bem como o espalhamento poderia derivar de vegetação com orientação fortemente correlacionada de elementos de espalhamento anisotrópicos.

- Z9: baixa entropia – espalhamento superficial: esta zona é modelada por espalhamento superficial do tipo Bragg e especular os quais não envolvem inversão de fase de 180 entre S_{HH} e S_{VV} . Superfícies físicas tais como água nas bandas L e P, gelo na banda L ou muito lisas caem dentro desta zona.

A decomposição proposta por Freeman & Durden (1998) assume que o espalhamento

total de um alvo, por exemplo uma floresta, é a combinação do espalhamento difuso do volume da vegetação com o espalhamento *double-bounce* e o espalhamento superficial. Desta forma, a matriz de covariância [C] é modelada nos três mecanismos de espalhamento assim descritos pelos autores: espalhamento do dossel (ou volumétrico) para o qual se assume que a energia retorna para o radar como uma nuvem orientada aleatoriamente por espalhadores, como cilindros muito finos, que se assemelham ao dossel de uma floresta. O componente do espalhamento *double-bounce* é modelado pelo espalhamento de um refletor de canto do tipo diedro como o que acontece, por exemplo, na interação tronco-solo na floresta. O espalhamento superficial é representado pelo modelo de espalhamento Bragg que como descrito por Silva (2010), ocorre em superfícies ligeiramente rugosas contendo estruturas geométricas alinhadas e com uma distância entre as cristas igual à metade do comprimento de onda projetada sobre a superfície como pode ocorrer, por exemplo, na superfície do mar. Freeman & Durden (1998) destacam que o modelo é inicialmente utilizado para determinar qual o mecanismo de espalhamento é dominante mas também auxilia na determinação do estado da cobertura superficial como áreas inundadas e não inundadas.

3 CAPÍTULO ABORDAGEM DA PESQUISA

Este capítulo descreve a área geográfica na qual a pesquisa foi desenvolvida, o conjunto de dados de sensores remotos e os dados da estrutura da vegetação de mangue. A metodologia e os respectivos processamentos efetuados em cada conjunto de dados será apresentado em maior detalhe em cada capítulo que apresenta os resultados desta tese (Cap. 4, 5 e 6).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O litoral da costa norte do Brasil é extremamente irregular e com reentrâncias, abrigando 23 estuários e 30 áreas de captação que drenam uma área de 330 mil km² (Martins *et al.* 2006). A península de Ajuruteua, área de estudo deste trabalho, está inserida neste litoral e possui aproximadamente 30 km de extensão, onde os manguezais cobrem uma área de aproximadamente 16.464,50 ha, com árvores atingindo até 25 m de altura (Gardunho 2017). A península é limitada pelos estuários dos rios Taperaçu a oeste e Caeté a leste (Figura 3.1.1).

3.1.1 Clima

A região apresenta duas estações: a estação chuvosa, bem definida, entre janeiro e abril, quando ocorrem 73% da precipitação anual e a estação seca entre setembro e novembro na qual a precipitação média é de aproximadamente zero (Souza-Filho *et al.* 2009) e temperatura anual média de aproximadamente 26° C (Monteiro *et al.* 2009). Um período de transição entre as estações foi constatado por Monteiro *et al.* (2009), entre maio e julho (período chuvoso para seco) e entre dezembro e fevereiro (período seco para chuvoso), que pode variar entre os anos.

O regime de ventos apresenta variação sazonal com ventos de nordeste predominantes entre Novembro/Dezembro e Abril e ventos de leste de maio a novembro. Ventos constantes e fortes são registrados durante o período chuvoso e as médias de velocidade atingem os maiores valores durante a estação seca, entre setembro e dezembro (Monteiro *et al.* 2009).

Figura 3.1.1 - Mapa da área de estudo.

3.1.2 Geologia e Geomorfologia

A região costeira do Pará se estende por 300 km e é dividida em dois setores: Setor 1 que vai da Baía do Marajó a baía do Pirabas, onde as baías cortam falésias ativas (relevo alto formado pelos sedimentos do terciário), os depósitos costeiros são restritos a canais estuarinos, e o Setor 2, bacia costeira Bragança-Viséu (Gorini & Bryan 1976), que se estende da baía do Pirabas ao rio Gurupi, onde os planaltos costeiros estendem-se para o sul e mantêm falésias inativas. O Setor 2, onde está inserida a área de estudo, representa uma costa de subsidência, funcionando como um sumidouro de sedimento (Souza Filho, 2000).

A península apresenta três ambientes geomorfológicos: planície aluvial, planície estuarina e planície costeira (Souza-Filho & El-Robrini 2000) dominados por planícies de maré lamosas (manguezais) com estuários, bancos de areia, restingas, cheniers, dunas, praias

e depósitos de sobrelavagem associados (Souza Filho & El-Robrini 1996). Neste setor, segundo Souza Filho (2000), o planalto costeiro é mais interno e a zona costeira ampla (cerca de 30 km de largura), topograficamente baixa e conseqüentemente mais influenciada pela ação das marés. Caracterizada ainda como uma região sedimentar ativa que se desenvolveu amplamente a partir do nível de mar mais alto do Holoceno (Souza Filho *et al.* 2009).

Souza Filho & Paradella (2002) detalharam cada um dos ambientes geomorfológicos e reconheceram 19 unidades geobotânicas (Figura 3.1.2) e morfológicas através de fusão de dados de sensores ópticos e SAR. As principais formas ocorrentes na planície costeira de Bragança são: manguezal, pântano, cordões de areia cheniers, cordões praias, planície de maré arenosa e delta de maré vazante. Dentre as unidades geobotânicas está o ecossistema de manguezal que ocorre sobre extensas planícies lamosas de até 20 km de largura entre os níveis altos da maré de sizígia e a média das marés. Esse ecossistema foi subdividido em manguezais de entremarés e de supramaré de acordo com a altura da vegetação e a topografia local. Os manguezais de entremarés ocorrem em topografia mais baixa, sujeitos a processos de progradação e erosão (ação diária da energia da maré) e os de supramaré são topograficamente mais altos, com árvores menores e alcançados pela maré somente durante a maré de sizígia (Souza Filho & El-Robrini 2000). Estes são também encontrados na literatura descritos como mangue anão (*dwarf mangrove*), que ocorrem em áreas hipersalinas com pouca frequência de inundação (Santos *et al.* 2007 apud Menezes e Mehlig (2010)).

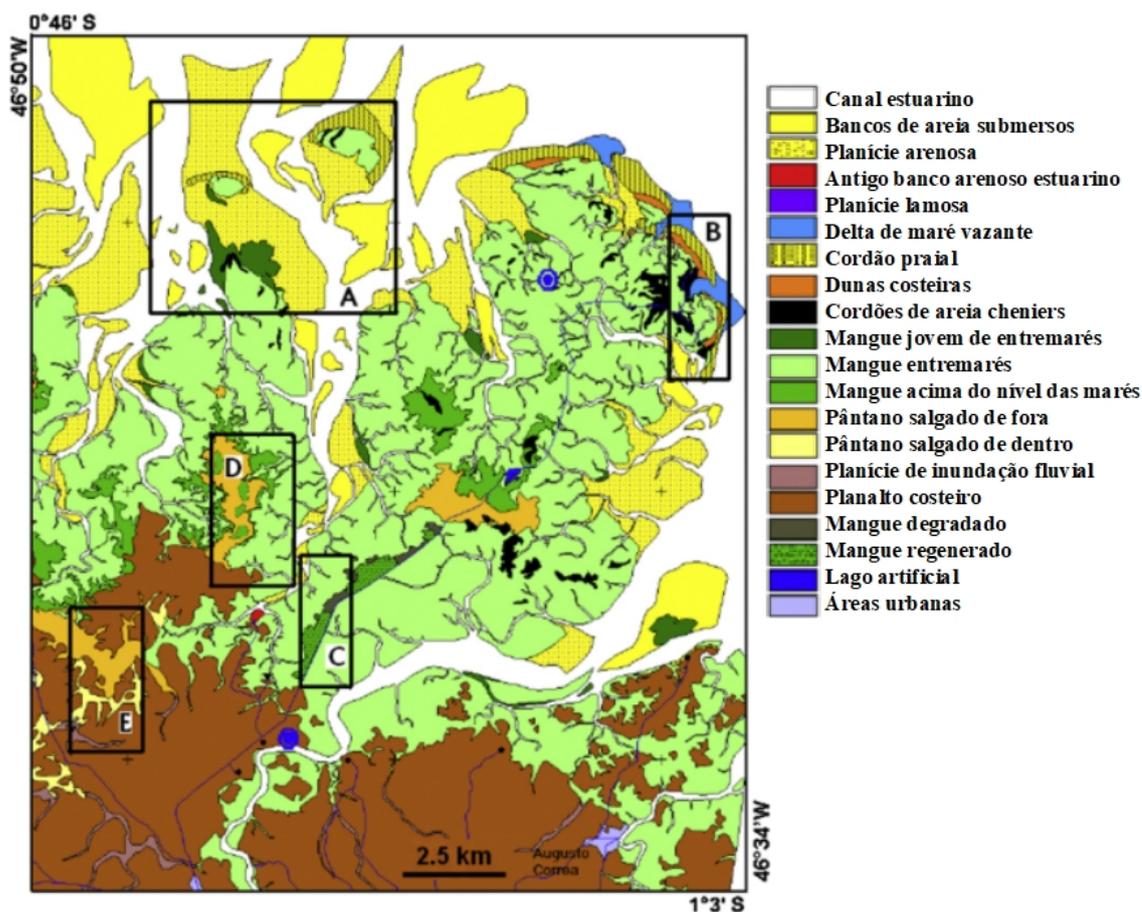


Figura 3.1.2 - Mapa das unidades geomorfológicas descritas em Souza Filho e Paradella (2002). Modificado de Souza Filho *et al.* (2011).

Os pântanos salinos estão sob influência do domínio de supramaré e encaixados em uma rede de drenagem colmatada, alimentada principalmente por sedimentos finos fluviais e oriundos da planície de maré. São subdivididos entre pântanos salinos internos, alagados durante o período chuvoso e seco durante o período de estiagem, e pântanos salinos externos situados no limite do Planalto Costeiro com a floresta secundária, e da planície costeira lamosa com a vegetação de mangue (Souza Filho & El-Robrini 1996).

De acordo com Mendes (2003), os manguezais da costa paraense encontram-se conservados, apesar do regime de macromarés semidiurnas, sendo protegidos por restingas e abrigados no interior dos estuários, apresentando maior permanência de condições no tempo e no espaço. Além de estarem em contato direto com taludes dos baixos planaltos costeiros, com formações eólicas na linha de costa ou em espaços palustres de águas salobras ou doces como as lagoas, várzeas e pântanos salinos.

3.1.3 Aspectos oceanográficos

A região apresenta regime de macromarés semidiurnas, com marés de sizígia que podem atingir 6 m de variação nos estuários e de 4 a 5 m ao longo da costa (Souza Filho *et al.* 2006).

Os estuários que limitam a península (Figura 3.1.1) apresentam características hidrodinâmicas diferentes, sendo comprovada por Araújo *et al.* (2013) a comunicação hidrodinâmica sentido Caeté-Taperaçu pelo canal do Taici. No estuário Taperaçu, a descarga fluvial é considerada insignificante, com dominância das marés de inundação principalmente em época seca, apresentando variação sazonal de salinidade relacionada a vazão dos rios vizinhos e do rio Amazonas (Asp *et al.* 2013).

O estuário do rio Caeté se encaixa na classificação de Dalrymple *et al.* (1992) como um estuário de macromaré. De acordo com Asp *et al.* (2013), este estuário apresenta uma assimetria esperada com valores de descarga fluvial máxima em maré vazante 17% maior no período chuvoso (1.670 m³/s) comparada ao período seco (1.400 m³/s), enquanto em maré de enchente os valores são iguais entre estações. A assimetria de maré neste estuário foi documentada em Gomes *et al.* (2013), maiores valores de velocidade de corrente durante as marés de vazante (situação de maré de sizígia na estação chuvosa), sendo que as velocidades de enchente só superam as de corrente de vazante durante a estação seca em marés de quadratura.

A planície costeira de Bragança evoluiu de um ambiente ribeirinho para uma área lamosa entremarés acompanhando o último aumento do nível do mar eustático. A deposição de fácies marinha/estuarina ocorreu em associação com três gerações de ilhas barreiras, as duas últimas gerações aparentemente relacionadas a pelo menos dois pequenos episódios de subsidência nos últimos 3.000 anos. A ausência de depósitos de mangue com idades entre 5.913 e 2.800 anos de idade, bem como uma diminuição geral do pólen de mangue em toda a região, sugere que uma queda no nível do mar precedeu o desenvolvimento da segunda lha barreira. Um nível do mar relativamente mais estável, nos últimos 2.000 anos, parece ter sido propício para a fase de progradação mais significativa, quando os manguezais progrediram mais de 20 km (Souza-Filho *et al.* 2006, Souza-Filho *et al.* 2009).

3.1.4 Vegetação

A península está inserida na maior faixa de manguezais contínuos do planeta, denominada Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA), compreendida entre a Baía do Marajó e a Baía de São José e que corresponde a 56,6% dos manguezais do Brasil (Nascimento *et al.* 2013, Souza Filho 2005) (Figura 3.1.1).

Os manguezais nesta região não se encaixam nas classificações fisiográficas (franja, bacia e transição) propostas por Lugo & Snedaker (1974), sendo necessária uma análise de dados estruturais da floresta para fins de reclassificação desta fisiografia de acordo com Menezes & Mehlig (2010). São descritos quatro tipos de floresta na península de Ajuruteua, com base em dados de levantamento da vegetação e dados de inundação: floresta anã de *Avicennia germinans*, floresta baixa de *A. germinans*, florestas altas mistas dominadas por *A. germinans* e florestas altas mistas de *R. mangle* e *A. germinans* sendo que estas florestas em condições de salinidade menor (entre 10 a 17) ocorrem um maior número de subespécies associadas, estas florestas ocupam partes internas do estuário com maior influência da água doce (Menezes & Mehlig 2010).

Na região são encontradas quatro espécies de mangue, *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (L.) Stearn, *Avicennia schaueriana* Stapf and Leechman (Acanthaceae-Avicennioideae) e *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn (Combretaceae). A espécie *Rhizophora mangle* é descrita como a espécie dominante na região (Menezes *et al.* 2008, Gardunho 2017), enquanto a *Avicennia germinans* apresenta os indivíduos com maior altura e diâmetro à altura do peito (DAP), sendo a segunda espécie mais comum na região (Gardunho 2017). A espécie que apresenta maiores valores de biomassa é a *A. germinans*, 129,3 Mg.ha⁻¹, seguida da *R. mangle* com 120,1 Mg.ha⁻¹ e *L. racemosa* com 6,7 Mg.ha⁻¹ (Gardunho 2017).

Na parte central da península (Figura 3.1.3) uma grande área é ocupada por pântanos salgados dominados por *Cyperaceae* e *Sporobolus virginicus* (Poaceae) (Mehlig *et al.* 2010). Estas áreas ocorrem na região topograficamente mais elevada da península e são alcançados somente pelas marés de equinócio (Krause & Bock 2010, Souza Filho & El-Robrini 1996). Próximo a esta região, encontram-se os manguezais em regeneração, assim denominados em virtude de sofrerem modificações nos últimos 40 anos devido a construção de uma rodovia ligando a cidade de Bragança à praia de Ajuruteua. Esta rodovia teve o intuito de facilitar o

acesso da população local aos recursos costeiros e permitir o transporte de produtos do mangue para os mercados locais (Lara *et al.* 2002). No entanto, foi feita sobre extensos depósitos da planície de entremarés lamosa, densamente colonizada por mangue, seccionando deste modo, 25 km de manguezais. Após a morte da vegetação de mangue por distúrbios no regime hidrológico, esta área foi totalmente desmatada. Atualmente, parte desta área degradada mostra uma incipiente regeneração natural (Cougo *et al.* 2015, Souza Filho 2000).

3.2 DADOS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE

Nos capítulos 4, 5 e 6, onde são apresentados os resultados da tese, utilizamos dados da estrutura do manguezal da área de estudo de diferentes formas. No capítulo 4 a dominância relativa (DoR) de cada espécie presente na região foi utilizada, bem como a localização das parcelas que apresentaram DoR maiores que 80%. Para o capítulo 5, os dados de localização, espécie e diâmetro à altura do peito (DAP), altura e densidade da madeira foram utilizados para calcular a biomassa por indivíduo e por parcela. Por fim, no capítulo 6, apenas a localização das parcelas foi utilizada tendo como alvo a classe mangue.

Todos os dados da vegetação supracitados fazem parte de um levantamento feito pelo Laboratório de Ecologia de Manguezal (LAMA), do Instituto de Estudos Costeiros (IECOS) da Universidade Federal do Pará (UFPA) e a metodologia é descrita em Gardunho (2017). Os valores de densidade de madeira e as equações alométricas utilizadas para o cálculo da biomassa fazem parte da mesma pesquisa desenvolvida por Gardunho (2017) para os manguezais da região. Na figura 3.2.1 são apresentados os valores de biomassa em relação à densidade de árvores (número de indivíduos por hectare) e a altura média.

Figura 3.2.1 - Valores de biomassa em relação a densidade de árvores por hectare, com os valores de altura média.

Além destes dados, utilizamos dados de localização de 17 parcelas da vegetação de mangue em regeneração no capítulo 6. A metodologia utilizada para este levantamento consta em Cougo *et al.*(2015).

3.3. DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

As imagens utilizadas nesta tese compreendem três frequências (X, C e L) de quatro sensores remotos SAR. O capítulo 4 é baseado em uma imagem Radarsat2 polarimétrica, o capítulo 5 fundamentado em uma série temporal de imagens Sentinel-1A, e finalmente, o capítulo 6 integra imagens dos satélites TerraSAR-X (TS-X), Radarsat-2 (RST-2), Sentinel-1A e 1B (S-1A e S-1B) e ALOS1/2-PALSAR1/2 (PALSAR). A seguir uma descrição de cada sensor e das imagens utilizadas.

O satélite TerraSAR – X foi lançado em junho de 2007 através de uma parceria público-privada entre o Ministério Alemão de Educação e Ciência representado pelo Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a empresa espacial europeia EADS Austrium GmbH (Werninghaus & Buckreuss 2010). As imagens provenientes deste sensor SAR de frequência de 9,65 GHz (3 cm de comprimento de onda – banda X) fornecem informações da superfície dos alvos, que para a vegetação seria a interação com os menores elementos estruturais, como folhas, galhos e pequenos ramos (Leckie & Ranson 1998). Neste trabalho foram utilizadas imagens adquiridas no modo Strip Map (Dual Pol) em quatro datas e nas quatro polarizações.

A Agência Espacial Canadense (CSA) é responsável pelo satélite Radarsat-2 que foi lançado em dezembro de 2007 através de uma colaboração público-privada com a empresa *MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.* (MDA 2011). Este sensor opera na frequência de 5.405 GHz (5,6 cm de comprimento de onda – banda C), cuja a energia tem maior capacidade de penetração no dossel ocasionando um espalhamento volumétrico. Dentro do dossel a energia interage com folhas e ramos secundários pequenos (Leckie & Ranson 1998). A imagem Radarsat-2 *Single Look Complex* (SLC) utilizada foi adquirida em 11 de junho de 2010 no modo Fine Quad-Pol com órbita descendente, ângulo de incidência 23°–25° e resolução espacial de aproximadamente 10 metros.

As imagens Sentinel-1 (banda C) são adquiridas através de dois satélites (1A e 1B), lançados em 2014 e 2016, respectivamente. Este satélite faz parte da constelação de satélites

Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA) que também possui satélites operando na região visível do espectro, disponibilizando sem custos para o usuário, imageamento contínuo do globo. A configuração de constelação, na qual os dois satélites possuem a mesma órbita, resulta em uma revisita de 12 dias na área de estudo e uma direção de órbita, região norte órbita descendente e restante do país órbita ascendente pelo satélite Sentinel-1A. Em outras regiões do globo, como na Europa, esta revisita cai para 6 dias.

Os dados na banda L (1,27 GHz) que serão utilizadas são mosaicos globais anuais construídos a partir de imagens de dois sensores: ALOS-PALSAR e ALOS2-PALSAR2. A missão ALOS é um esforço da Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA). Os mosaicos do período de 2007 a 2010 são baseados em imagens adquiridas entre junho e outubro, dos respectivos anos, pelo sensor PALSAR (Shimada *et al.* 2014) e os mosaicos de 2015 a 2017 que foram construídos a partir de imagens do sensor PALSAR-2.

4 CAPÍTULO A POLARIMETRIA SAR BANDA C E SUA RELAÇÃO COM A ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO DE MANGUE

4.1 INTRODUÇÃO

As florestas de mangue são ecossistemas localizados em regiões costeiras tropicais e subtropicais, onde exercem funções ambientais e socioeconômicas importantes. As regiões costeiras são majoritariamente as mais populosas no mundo e conseqüentemente este ecossistema está em constante pressão antrópica (Kathiresan & Bingham 2001, Spalding *et al.* 2010, Tomlinson 1994). Ao longo das últimas quatro décadas imagens de satélite são amplamente utilizadas para mapeamento, análises de mudança, caracterização deste ambiente, entre outros. Neste trabalho investigaremos uma imagem polarimétrica de radar de abertura sintética (SAR) na banda C. As informações contidas em um dado polarimétrico permitem diversas formas de avaliação do alvo sendo utilizadas em investigações florestais, principalmente para melhor compreensão dos mecanismos de espalhamento dominante neste alvo. Em ambientes como as florestas de mangue, é esperado que a resposta polarimétrica diferencie-se das demais com facilidade. Como descrito por Proisy *et al.* (2000), a onda incidente propaga-se através da copa e atinge uma superfície altamente refletora, resultando no aumento do retroespalhamento, principalmente nas co-polarizações (HH e VV).

Os primeiros trabalhos que abordaram a resposta polarimétrica no manguezal foram de Proisy *et al.* (2000) que descreveram respostas polarimétricas diferentes para dois estágios da vegetação de mangue na Guiana Francesa, pioneiro e em declínio, através de modelo de transferência radiativa. Posteriormente, Proisy *et al.* (2002) utilizando as mesmas parcelas constataram maior contribuição do espalhamento volumétrico no mangue pioneiro e para a parcela em declínio alta contribuição do espalhamento de interação e da superfície no espalhamento em VV e HH porém, em HV o volumétrico dominou. Held *et al.* (2003) mapearam espécies de mangue de um estuário na Austrália através de esforço integrando dados ópticos “Compact Airborne Spectrographic Imager” (CASI) e dados polarimétricos AIRSAR nas frequências L e P e dados interferométricos em banda C. Recentemente, Zhen *et al.* (2018) obtiveram alta acurácia integrando dados ópticos (Landsat-8) e polarimétricos (Radarsat-2) para mapeamento de região de manguezais em um estuário na China.

Dois fatos fazem da temática da polarimetria um campo ainda não esgotado para investigações com relação aos manguezais: a carência de levantamento de campo nos estudos que foi citada em Proisy *et al.* (2000 e 2002) como uma lacuna e, a particularidade de cada região pois, no caso do mapeamento de espécies na China e/ou Austrália, as relações encontradas não poderão ser aplicadas em manguezais do Brasil.

A proposta deste trabalho é utilizar um levantamento da vegetação de mangue na área de estudo que apresenta parcelas com dominância dos principais gêneros, para abordar as respostas polarimétricas e analisar a contribuição de cada mecanismo de espalhamento no valor de retroespalhamento total. O objetivo deste capítulo é distinguir os gêneros dominantes do manguezal na península de Ajuruteua pela sua resposta polarimétrica e pela análise das decomposições polarimétricas. Como forma de atingir este objetivo geral alguns objetivos específicos são listados:

- Definir respostas polarimétricas para parcelas com dominância dos principais gêneros presentes na área de estudo,
- Utilizar parâmetros quantitativos como a altura de pedestal e/ou coeficiente de variação para diferenciar as classes,
- Identificar os mecanismos de espalhamento de cada classe e qual difere os bosques das demais classes presentes na região,

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma na figura 4.2.2 apresenta a abordagem metodológica adotada para este capítulo. Na seção 4.2.2 constam os processamentos adotados para os dados da vegetação e na seção 4.2.3 serão apresentados os detalhes metodológicos da imagem SAR, as etapas de pré-processamento, processamento e análise dos produtos finais.

4.2.1 Área de estudo

A área de investigação é a península de Ajuruteua localizada no litoral nordeste do estado do Pará, distante aproximadamente 380 km a sudeste da foz do rio Amazonas (Figura 4.2.1). A península está inserida na Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia

(CMMA) que é considerada a maior faixa de manguezais contínuos do planeta e corresponde a 56,6% dos manguezais do Brasil (Nascimento Jr. *et al.* 2013, Souza Filho 2005).

A região apresenta regime de macromarés semidiurnas com 6 m de variação de maré, clima quente e úmido com duas estações: estação chuvosa (janeiro a abril) com média da precipitação acima de 2000 mm e estação seca (setembro a novembro) com média de precipitação acima de 20 mm e temperatura anual média de aproximadamente 26° C (Fisch *et al.* 1998, Monteiro *et al.* 2009, Souza Filho *et al.* 2009).

Figura 4.2.1 - Mapa da área de estudo com as classes utilizadas neste capítulo.

Dentre as unidades geobotânicas descritas por Souza Filho & Paradella (2002) presentes na península de Ajuruteua, está o ecossistema de manguezal que ocorre sobre extensas planícies lamosas de até 20 km de largura entre os níveis altos da maré de sizígia e a média das marés. Esse ecossistema foi subdividido em manguezais de intermaré e de supramaré de acordo com a altura da vegetação e a topografia local. Os manguezais de intermaré ocorrem

Figura 4.2.2: Fluxograma apresentando os passos efetuados para a metodologia do trabalho.

em topografia mais baixa, sujeitos a processos de progradação e erosão (ação diária da energia da maré) e os de supramaré são topograficamente mais altos, com árvores menores e alcançados pela maré somente durante a maré de sizígia (Souza Filho & El-Robrini 2000).

Na parte central da península uma grande área é ocupada por pântanos salinos dominados por *Cyperaceae* e *Sporobolus virginicus* (Poaceae) (Mehlig, 2010). Estas áreas são denominadas por Souza Filho e El Robrini (1996) de pântano salino externo (*outer salt marshes*), ocorrem na região topograficamente mais elevada da península e são alcançados somente pelas marés de equinócio (Krause & Bock 2010, Souza Filho & El-Robrini 1996).

Na região são encontradas quatro espécies de mangue, *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (L.) Stearn, *Avicennia schaueriana* Stapf and Leechman (Acanthaceae-Avicennioideae) e *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn (Combretaceae). A espécie *Rhizophora mangle* é descrita como a espécie dominante na região (Menezes *et al.* 2008, Gardunho 2017), enquanto a *Avicennia germinans* apresenta os indivíduos com maior altura e diâmetro à altura do peito (DAP), sendo a segunda espécie com maior dominância na região (Gardunho 2017).

4.2.2 Dados de estrutura da vegetação de mangue

Os dados de estrutura da vegetação de mangue, como circunferência à altura do peito (CAP), altura e determinação da espécie vegetal fazem parte de um levantamento feito pelo Laboratório de Ecologia de Manguezal – IECOS/UFPA, cuja metodologia é descrita em Gardunho (2017). No total, 237 parcelas de 625 m² foram medidas ao longo da península de Ajuruteua e localizadas com GPS entre os anos de 2013 e 2014. A dominância relativa (DoR) foi calculada através das informações de espécie e área basal de cada parcela. Como critério para a verificação das respostas polarimétricas dos gêneros de mangue dominantes, *R. mangle* e *A. germinans*, definimos a utilização de parcelas com DoR acima da 80%. Para a classe mangue em regeneração utilizamos um levantamento de 17 parcelas feito em 2012, para o qual a metodologia é descrita em Cougo *et al.* (2015). Seleccionamos ainda amostras para outros ambientes presentes na península, campos e praia/duna a fim de verificar a diferença entre ambientes da península além da diferença entre os gêneros dominantes de mangue. A seleção de amostras destas classes foi baseada no mapa geomorfológico da península (Souza

Filho & Paradella 2002) (seção 3.1.2 Figura 3.1.2) e imagens Google Earth Pro, onde definimos 17 amostras para a classe campos e 11 para a classe praia/duna. Na etapa de decomposição as mesmas classes foram analisadas. Na tabela a seguir são descritas e apresentadas as classes definidas.

Tabela 4.2.2.1 - Descrição das classes utilizadas nas análises polarimétricas.

Classe	Fotos de campo	Descrição
<i>R. mangle</i> (RZ100, RZ90)		Bosque de <i>Rizophora mangle</i> . Espécie dominante no manguezal da região. Altura média 12 m e 13,4 m.
<i>A. germinans</i> (AV90, AV80)		Bosque de <i>Avicennia germinans</i> . Segunda espécie com maior dominância na região apresenta os indivíduos com maior altura e DAP. Altura média 8,5 m e 9,1 m.
Campos		Pântanos salgados (campos), parte central da península ocupadas por gramíneas altas. Região topograficamente mais elevada sendo alcançados somente pelas marés de equinócio.
Praia/duna		Classe formada pelos cordões praias, dunas costeiras e planície de maré arenosa.
MangReg		Mangue em regeneração, árvores com alturas variando entre 1 a 7 m, sem formar dossel. <i>A. germinans</i> é a espécie dominante nessa região.

4.2.3 Dados SAR

A imagem Radarsat-2 *Single Look Complex* (RSAT-2 SLC) foi adquirida em 11 de junho de 2010, no modo Fine Quad-Pol, em órbita descendente, ângulo de incidência 23°–25° e resolução espacial de aproximadamente 10 metros. Para descrever e analisar o espalhamento da energia da onda incidente trabalhamos de duas formas: o dado polarimétrico através das respostas polarimétricas e os teoremas de decomposição do alvo. O método utilizado para as

respostas polarimétricas foi proposto por van Zyl (1987), no qual o retroespalhamento (σ°) do alvo é plotado em um gráfico tridimensional (seção 2.3. Figura 2.2.6) em função dos ângulos da elipse de polarização: ângulo de elipticidade (χ) e orientação (ψ) (Santos *et al.* 2009). Na etapa de processamento (Figura 4.2.2), para cada classe uma ROI de 30 x 30 m foi definida sobre a imagem SLC no módulo SPTA do software PCI Geomatica. Os gráficos RP resultantes, em retroespalhamento sigma linear co-polarizado, foram avaliados visualmente e o valor de altura de pedestal por classe foram plotados em gráficos boxplot para a comparação das médias e suas variâncias. Os valores do coeficiente de variação (v) também foram recuperados para análise das RP.

Na decomposição de alvos utilizamos técnicas para alvos incoerentes através de análise das informações contidas nas matrizes de segunda ordem: matriz de coerência [T] através das decomposições por autovalores e autovetores propostas por Cloude & Pottier (1997) e a matriz de covariância [C] através das decomposições de Freeman & Durden (1998). A etapa de pré-processamento da imagem (Figura 4.2.2) compreendeu, a calibração em σ_0 , a transformação da matriz S em [T] e [C], utilização do filtro Lee para redução do ruído *speckle*. Na etapa de processamento, efetuadas as decomposições e a ortoretificação todas as imagens foram exportadas a fim de acessar os valores de cada decomposição por classe. O plano entropia – ângulo alpha (H-Alpha) foi construído de duas maneiras: a partir dos valores de todos os pixels da imagem e dos valores extraídos para cada classe. Os valores derivados das decomposições de Freeman-Durden foram plotados em gráficos de barra, a fim de analisar a contribuição de cada tipo de espalhamento no retroespalhamento total das classes. Todos os processamentos foram efetuados no software SNAP exceto a etapa de acesso aos valores das decomposições que foi feita através da rotina *zonal_stat* desenvolvida para ambiente Python.

Por fim, o teste ANOVA-um fator foi aplicada para verificar a diferença entre as médias dos parâmetros utilizados e, no caso de diferença significativa, o teste *post hoc* de Tukey apontou as variáveis responsáveis por essa diferença

4.3 RESULTADOS

Das 237 parcelas, 40 parcelas apresentam DoR acima de 80% para a espécie *R. mangle* e

28 parcelas apresentaram DoR acima de 80% para *A. Germinans*. Para facilitar a comparação visual das respostas polarimétricas foram utilizadas apenas 28 parcelas para cada espécie dominante, separadas em escala de 10%. Desta forma, a *R. mangle* resultou em 11 parcelas de 100% e 17 parcelas de 90% de DoR e para a *A. germinans* 9 parcelas com 90% e 19 parcelas com 80% de DoR. Para a espécie *L. racemosa* nenhuma parcela apresentou valor acima do critério adotado (DoR acima de 80%), apresentando apenas 2 parcelas com DoR de 70%, por esta razão tal espécie não entrou nas análises.

As respostas polarimétricas em sigma linear co-polarizadas (APÊNDICES 6A) para as espécies *R. mangle* e *A. germinans* apresentam comportamento diverso. As respostas polarimétricas preferenciais foram as que apresentaram maiores valores de retroespalhamento em polarização linear ($\chi = 0^\circ$) com orientação preferencial vertical ($\psi = \pm 90^\circ$) como, por exemplo, na parcela S01P11 da classe RZ100 (Figura 4.3.1a) e aquelas com orientação preferencial horizontal ($\psi = 0^\circ$) e polarização linear ($\chi = 0^\circ$), como na S11P16 (Figura 4.3.1b) da mesma classe. Estes dois comportamentos de respostas polarimétricas descritos são os principais nas demais classes de espécie (RZ90, AV90, AV80). Entre as classes mangue em regeneração, campos e praia/duna, as duas primeiras apresentaram alguma similaridade de respostas polarimétricas dentro da classe, com os valores de retroespalhamento maiores com orientação horizontal ($\psi = 0^\circ$) e polarização linear ($\chi = 0^\circ$) (Figura 4.3.2 e 4.3.3), enquanto a classe praia/duna foi a única que apresentou respostas polarimétricas sem nenhuma similaridade (4.3.4).

Figura 4.3.1 - Principais respostas polarimétricas encontradas para as classes de gêneros estudadas: RZ100, RZ90, AV90, AV80. Nesta figura constam duas RPs de parcelas de *R. mangle* com 100% de DoR.

Figura 4.3.2 - Principais respostas polarimétricas para a classe Mangue em regeneração (MangReg).

Figura 4.3.3 - Principais respostas polarimétricas para a classe campos, similar a uma das RPs preferenciais das classes da vegetação de mangue nas figuras 4.3.1 e 4.3.2.

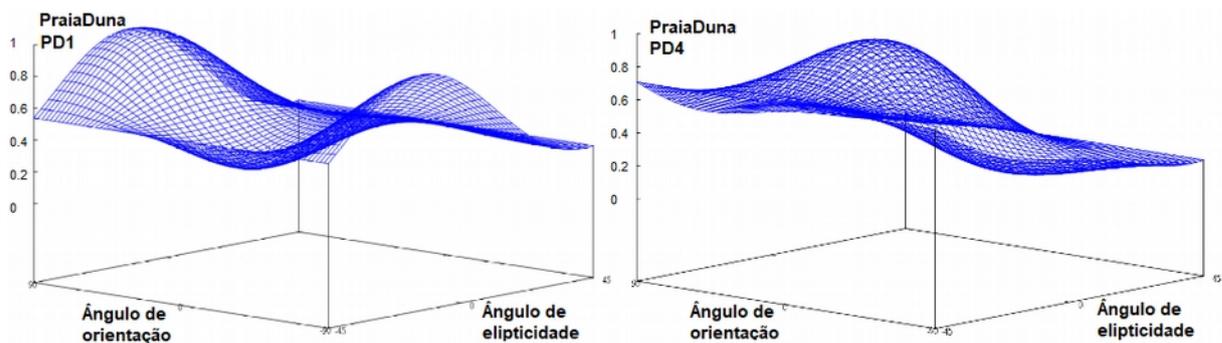


Figura 4.3.4 - Respostas polarimétricas para duas parcelas da classe Praia/duna, que apresentou RP diferentes para todas as parcelas.

No boxplot dos valores de altura de pedestal por classe (Figura 4.3.5), as médias deste parâmetro apresentam valores similares para a maioria das classes e para algumas pode ser considerado igual como entre as parcelas de *A. germinans* (Av90), campos (campo) e mangue em regeneração (MangReg) e entre as parcelas de *R. mangle* (RZ100 e RZ90). Esta

similaridade foi confirmada pelo teste ANOVA que apresentou p-value de 0,314, não significativo ao nível de confiança de 95%. O coeficiente de variação apresentou valores mais elevados para RZ100 e RZ90, $0,16 \pm 0,25$ e $0,10 \pm 0,05$, respectivamente. Os valores de v para as classes Av90, MangReg e PraiaDuna foram de 0,07 enquanto as classes Av80 teve $v = 0,08 \pm 0,04$ e a classe campos apresentou $v = 0,06 \pm 0,03$.

Figura 4.3.5 - Boxplot dos valores de altura de pedestal por classe. A escala desse parâmetro é de 0-1 porém, optamos por apresentar uma escala menor para uma melhor visualização.

O plano H-Alpha para toda a imagem resultante da decomposição de Cloudie-Pottier é apresentado na figura 4.3.6. Três zonas apresentaram alta concentração de pixels, descritos em porcentagem: Zona 9 – espalhamento superficial (38,5%), Zona 6 – superfície aleatória (33,9%) e Zona 5 – partículas anisotrópicas (18,9%) cada uma das zonas restantes obteve menos de 8% dos pixels. No Plano H-Alpha por classe (Figura 4.3.7) a maioria das classes ficaram nas Zonas 5 e 6, sem discriminação visual para somente uma zona. A classe campo se destaca das demais por apresentar parcelas distribuídas entre a Zona 5 e 8.

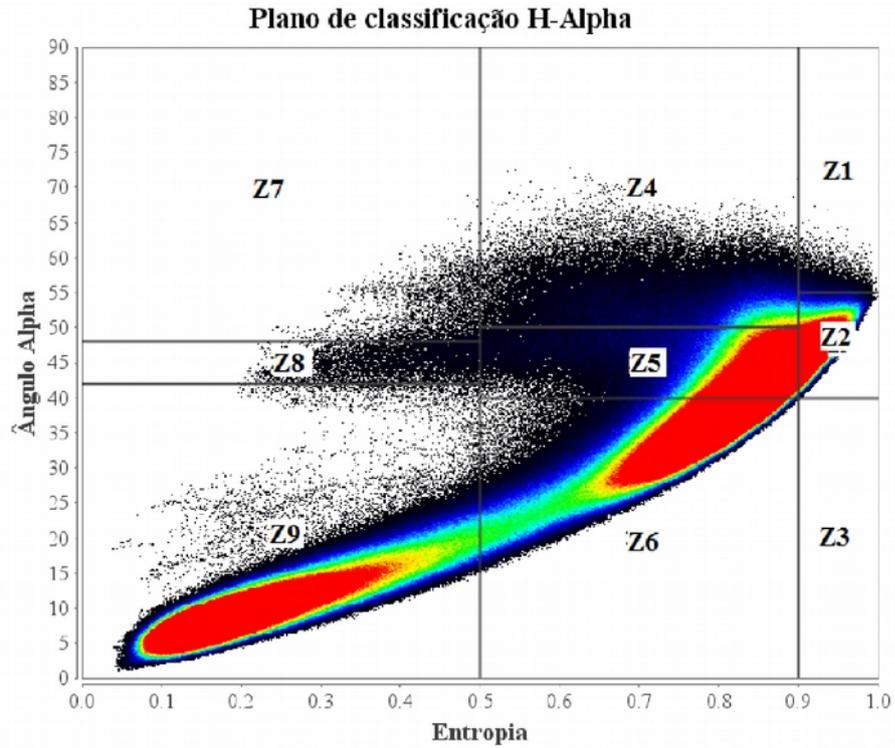


Figura 4.3.6 - Planos de classificação H-Ângulo Alpha para todos os pixels presentes na imagem.

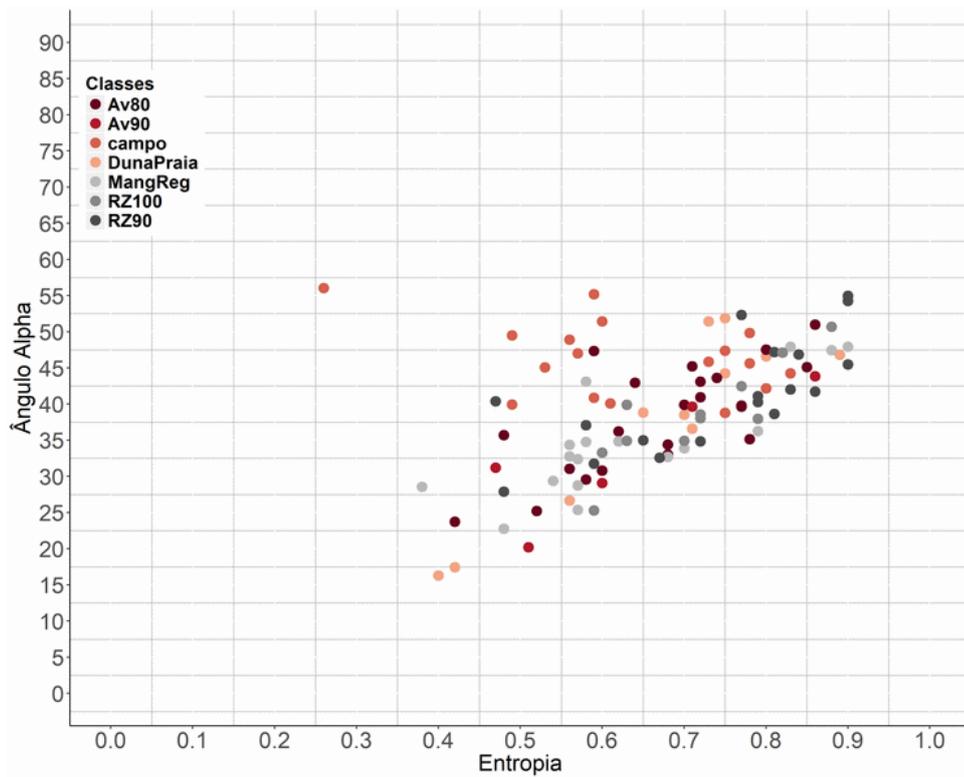


Figura 4.3.7 - Planos de classificação H-Ângulo Alpha os pixels por classe.

O resultado das decomposições de Freeman-Durden é apresentado na figura 4.3.8 em barras empilhadas representando a porcentagem que cada mecanismo de espalhamento tem no espalhamento total para cada classe. O espalhamento que mais contribui em todas as classes é o volumétrico seguido do *double-bounce*. Enquanto o espalhamento superficial é o que apresenta menor contribuição para o espalhamento total, exceto para a classe campos. A alta contribuição do espalhamento volumétrico, principalmente para as classes de vegetação arbórea, está relacionada ao comprimento de onda utilizado, banda C. O teste ANOVA mostrou que a diferença entre as classes é significativa ao nível de confiança de 95% com p-value de 0,002, porém, quando verificada a diferença entre os pares com o teste de Tukey nenhum apresentou diferença significativa.

Figura 4.3.8 - Porcentagem de cada parâmetro da decomposição de Freeman-Durden para as classes.

4.4 DISCUSSÃO

De maneira geral, as RP para as classes de espécie de mangue apresentaram comportamentos diversos, isto indica a grande variação estrutural natural do alvo que apresenta muitos mecanismos de espalhamento. Apesar disso podemos observar dois tipos de RP que mais ocorreram nas quatro classes (RZ100, RZ90, AV90 e AV80). A RP da polarização VV ($\psi = \pm 90^\circ$, $\chi = 0^\circ$) (Figura 4.3.1) que, é associada por Bispo (2012) à resposta

de elementos espalhadores de menores dimensões do que o comprimento de onda, sugerindo que os pequenos galhos verticais do dossel são os principais responsáveis pelo espalhamento nessa parcela. A segunda RP é aquela que possui os maiores valores de retroespalhamento em HH ($\psi = 0^\circ$, $\chi = 0^\circ$) (Figura 4.3.1). Este tipo de RP é mais associada a dosséis com certa homogeneidade em que a maioria dos elementos do dossel possuem orientação horizontal, como descrito por Gonçalves (2007). Os dois tipos de RP que foram mais frequentes estão de acordo com o fato da energia neste comprimento de onda interagir com folhas e ramos secundários pequenos do dossel (Leckie & Ranson 1998) na banda C. No entanto, a alta similaridade entre as RP destas classes não permite definir uma RP para cada espécie *A. germinans* e *R. mangle* como suposto. Isto pode ser explicado pelos maiores valores de retroespalhamento nestes modelos estarem relacionados aos componentes do dossel. Apesar das espécies dominantes apresentarem diferenças estruturais em todos os componentes da vegetação (forma e tamanho das folhas, profundidade do dossel, relação alométrica DAP x altura e forma das raízes) tais discrepâncias, principalmente as ligadas ao dossel, não foram suficientes para a separabilidade pelo parâmetro RP.

As classes MangReg e campo apresentaram como resposta preferencial a relacionada à polarização HH, com os maiores valores de σ° com ângulo de orientação $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 0^\circ$ (Figuras 4.3.2 e 4.3.3). Para a primeira classe as razões são similares às abordadas para os gêneros e, para a classe campos que é composta por vegetação gramínea alta (Tabela 4.2.2.1) com a maioria dos componentes da vegetação em orientação vertical, esperava-se maior retorno da polarização VV como descrito por (Le Toan *et al.* 1984). No entanto, a presença de água, comum nesta classe considerando a data do imageamento, fim da época de chuva, associada a maior penetração da onda com orientação horizontal resulta em maior retroespalhamento nesta direção. A não similaridade encontrada nas RP da classe PraiaDuna pode estar relacionada à variação entre amostras com relação ao grau de umidade do alvo (Figura 4.3.4). Os principais fatores que influenciam os alvos a não apresentarem RP única são: composição estrutural da floresta, densidade, distribuição espacial das árvores, DAP, densidade de galhos, teor de umidade nas folhas e no solo (Santos *et al.* 2009).

Pelos valores de altura de pedestal, constatamos que nenhuma das classes apresentam médias significativamente diferentes. Somado a isso, todas as RP apresentaram valores baixos ($< 0,1$) neste parâmetro, resultado inesperado visto que para regiões vegetadas, que possuem muitos espalhadores é esperado valor alto de altura de pedestal. O parâmetro coeficiente de

variação, apesar de ser equivalente à altura de pedestal, apresentou valores diferentes entre as classes, sendo alto para as classes de RZ100 e RZ90 e baixo para as outras classes. Podemos dizer que para estas classes o resultado se mostrou coerente, pois reflete a variação que pode ocorrer em um elemento de resolução. Por outro lado, os valores baixos são relacionados a alvos com poucos elementos espalhadores, ou seja, com retorno de energia altamente polarizado (van Zyl *et al.* 1987) o que não é o caso de alvos como parcelas da espécie *A. germinans* (AV90 e AV80), mangue em regeneração ou campos. Os resultados para este parâmetro se mostraram coerentes com a constatação de Touzi *et al.* (2004) que descrevem o coeficiente de variação mais efetivo do que a altura de pedestal, pois não é limitado à polarização cruzada ou linear.

Na análise da decomposição de Cloudie & Pottier (1997), as zonas 6 e 9 concentram aproximadamente 73% dos pixels da imagem (Figura 4.3.6). O oceano foi classificado na Z9 que refere-se ao espalhamento superficial característico de corpos d'água, as áreas vegetadas em sua maioria foram classificadas na Z6, zona de média entropia e espalhamento superficial. Os alvos classificados nesta zona apresentam aumento da rugosidade pelos efeitos da propagação da onda no dossel. Na zona 6 estão inseridas a maioria das classes RZ100, RZ90, AV90, AV80 e MangReg como apresentado na figura (4.3.7). Estas classes de vegetação também apresentaram parcelas classificadas na Z5, região também de média entropia e médio espalhamento em vegetação. Assim, é natural que as parcelas de vegetação tenham sido classificadas nesta zona. Parte da classe campo foi classificada nesta zona, principalmente pelo espalhamento do tipo dipolo da vegetação gramínea, fato confirmado pela classificação das demais parcelas na zona 8, zona de baixa entropia com espalhamento modelado por dipolos. A classificação pelo Plano H-Alpha apresentou a mesma dificuldade em separar as classes de vegetação que apresentaram diferenças estruturais, principalmente entre as classes de espécie e a classe formada por árvores com menor desenvolvimento estrutural presentes na classe MangReg.

O resultado da decomposição de Freeman-Durden mostra coerência entre o comprimento de onda utilizado (banda C) e a maior porcentagem do espalhamento ser classificado como volumétrico para as parcelas de vegetação. Este resultado corrobora o estudo feito por Proisy *et al.* (2002) em que parcelas de mangue com dossel fechado o espalhamento volumétrico domina. A alta contribuição (> 40%) do espalhamento do tipo *double-bounce* na classe AV90 pode ser explicada pela abertura do dossel. A contribuição de

aproximadamente 30% do espalhamento superficial para a classe campo corrobora o resultado da RP para esta classe. Apesar do teste ANOVA atestar diferença significativa entre as médias ao nível de confiança de 95% não seria possível utilizar estes parâmetros para diferenciar tais classes se considerarmos o resultado do teste de Tukey.

4.5 CONCLUSÃO

A análise polarimétrica na banda C foi realizada com o intuito de separar gêneros de mangue e/ou classes de vegetação deste ecossistema, bem como diferentes ambientes presentes na área de estudo. As respostas polarimétricas co-polarizadas não apresentaram potencial de distinção entre gêneros uma vez que as RP mostraram similaridades entre todas as classes de vegetação arbórea. Estes resultados estão ligados a alta variabilidade estrutural nas classes e alta similaridade entre classes, esta última associada ao comprimento de onda.

Nas classificações por decomposição polarimétrica os resultados não são animadores, uma vez que no Plano H-Alpha apenas a classe campo apresentou valores de H que a diferenciaram das demais classes. O mesmo foi observado para os valores de espalhamento volumétrico, *double-bounce* e superficial para os quais as parcelas de vegetação apresentaram valores coerentes com o comprimento de onda, com alto valor de espalhamento volumétrico, porém, nenhuma classe apresentou médias com variâncias significativamente diferentes.

Com base no exposto, o mais indicado seria trabalhar com dados de abertura de dossel e estágios de vegetação sucessional. Estes talvez apresentariam maior distinção através das classificações por decomposição polarimétrica além de imagens em menor frequência como a banda L. Já a metodologia de resposta polarimétrica como é empregada possui natureza subjetiva por ser baseada em interpretação visual de gráficos tridimensionais. Isto gera incerteza e variações de interpretações. Neste caso, a utilização dos parâmetros altura de pedestal e/ou coeficiente de variação seriam os mais indicados, pois geram resultados quantitativos permanentes.

5 CAPÍTULO SÉRIE TEMPORAL SENTINEL-1 NO ESTUDO DAS FLORESTAS DE MANGUE DO LITORAL AMAZÔNICO.

5.1 INTRODUÇÃO

A alta produtividade do manguezal é um dos fatores que confere a este ambiente tamanha importância em regiões costeiras tropicais e subtropicais. Estudos que envolvem a produtividade através de estimativas de biomassa, estoque e sequestro de carbono, auxiliam a melhorar a compreensão da dinâmica da ciclagem do carbono no manguezal (Lugo & Snedaker 1997, Soares & Schaeffer-Novelli 2005). As imagens de sensores remotos são uma alternativa a levantamentos neste ambiente, que são dificultados por se tratar de regiões lamosas coberta por raízes. Estes tipos de dados apresentam cada vez mais capacidade de monitoramento devido a constante atualização tecnológica e aos acervos históricos existentes de imagens, como por exemplo as imagens Landsat (USGS) disponíveis desde 1973, que permitem análises importantes para o monitoramento dos manguezais.

No entanto, a alta cobertura de nuvens é um obstáculo para as imagens ópticas. É neste contexto que as imagens dos radares de abertura sintética (SAR) ganham espaço e não apenas por não serem atenuadas pela atmosfera mas, também, por oferecerem informações complementares às imagens ópticas como a interação da energia incidente com os componentes estruturais da vegetação. Para as florestas de manguezal este potencial das imagens SAR é explorado na estimativa de atributos da vegetação e de biomassa total (Cougo *et al.* 2015, Kovacs *et al.* 2006, 2013, Mougin *et al.* 1999, Pereira *et al.* 2016, Proisy *et al.* 2002, Simard *et al.* 2006, 2008). Além disso, para regiões alagáveis como regiões de várzea, pântano e manguezais os dados SAR são excelentes na detecção de áreas de inundação devido à sensibilidade ao teor de umidade (Lang *et al.* 2008, Townsend 2002, Wang & Imhoff 1993, Wang 1995).

Apesar de não serem vegetações decíduais os manguezais apresentam ciclo fenológico, bem documentado para a península de Ajuruteua (Fernandes *et al.* 2007, Menezes 2006, Mehlig 2010). Até o presente momento não existem relatos deste ciclo para as florestas de mangue através de dados de sensores remotos que podem ser abordados por dados dos satélites Sentinel-1. Os satélites Sentinel-1A e 1B, banda C, fazem parte da missão Copernicus da Agência Espacial Europeia (ESA) e representam uma nova realidade para

análises do comportamento de florestas com imagens SAR. Estas imagens possuem resolução temporal de 6 a 12 dias e resolução espacial de até 20 m. Por se tratar da banda C (5,6 cm), é esperado que a energia interaja com os componentes pequenos da vegetação sendo sensível a mudanças sazonais como descrito anteriormente.

Neste trabalho investigamos o potencial das imagens Sentinel-1A na definição de uma assinatura temporal de floresta de mangue e seu o auxílio na estimativa da biomassa. Para alcançar tal objetivo estabelecemos os seguintes objetivos específicos:

- Recuperar os valores de retroespalhamento médio para cada parcela,
- Analisar as possíveis transformações dos valores de retroespalhamento na série temporal,
- Analisar dados temporais de precipitação e maré para a interpretação da série temporal.

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo é a península de Ajuruteua, localizada no setor leste da Zona Costeira Amazônica (Figura 5.2.1). A área apresenta aproximadamente 30 km de extensão sendo que os manguezais cobrem uma área de aproximadamente 16.464,50 ha, com árvores atingindo até 25 m de altura (Gardunho 2017). A região apresenta regime de macromarés semidiurnas, com marés de sizígia que podem atingir 6 m de variação nos estuários e de 4 a 5 m ao longo da linha de costa (Souza Filho *et al.* 2003). Apresenta duas estações bem definidas, a estação chuvosa entre janeiro e abril, quando ocorre 73% da precipitação anual, e a estação seca, entre setembro e novembro, na qual a precipitação média é de aproximadamente zero (Souza Filho *et al.* 2009).

Os manguezais nesta região não se encaixam nas classificações fisiográficas (franja, bacia e transição) propostas por Lugo & Snedaker (1974). Análises de dados estruturais da floresta são necessários para uma melhor classificação fisiográfica dos manguezais da Amazônia de acordo com Menezes & Mehlig (2010). Estes autores diferem quatro tipos de floresta na península de Ajuruteua com base em uma série de dados provindos de levantamento da vegetação e dados de inundação (descritos no citado trabalho): floresta anã

de *Avicennia germinans*, floresta baixa de *A. germinans*, florestas altas mistas dominadas por *A. germinans* e florestas altas mistas de *R. mangle* e *A. germinans*. Nas florestas em condições de salinidade mais baixa (entre 10 a 17) ocorrem um maior número de subespécies associadas, localizadas nas partes internas do estuário com maior influência da água doce.

Figura 5.2.1-Mapa da área de estudo com as parcelas e os 12 sítios (I a XII) que foram utilizados no estudo.

A composição florística da vegetação de mangue na região, de acordo com os estes autores, é constituída por quatro espécies de mangue, *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (L.) Stearn, *Avicennia schaueriana* Stapf and

Leechman (Acanthaceae-Avicennioideae) e *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn (Combretaceae). A espécie *Rhizophora mangle* é descrita como a espécie dominante na região (Gardunho 2017, Menezes *et al.* 2008), enquanto a *Avicennia germinans* apresenta os indivíduos com maior altura e diâmetro à altura do peito (DAP), sendo a segunda espécie com maior dominância na região (Gardunho 2017).

5.2.2 Conjunto de dados de campo

Os dados da vegetação de mangue, como altura, diâmetro à altura do peito (DAP) e espécie, foram medidos em 237 parcelas de mangue com estágios de desenvolvimento diferentes, fornecidos pelo Laboratório de Ecologia de Manguezal – IECOS/UFPA. Neste levantamento a península de Ajuruteua foi dividida em 12 sítios como mostrado no mapa da figura 5.2.1, todos os dados serão apresentados de acordo com esta divisão. Os dados foram tratados no software R, onde inicialmente foram descartadas as parcelas nas bordas de canal de maré ou estuários, por produzirem efeitos *double-bounce* entre as árvores e a superfície da água. Para cada uma das 212 parcelas resultantes foi calculada a área basal, altura média, altura mediana, altura de Lorey e a biomassa através da equação alométrica desenvolvida por Gardunho (2017) para os manguezais da região.

5.2.3 Dados SAR

As imagens Sentinel-1 são adquiridas através de dois satélites (1A e 1B) com órbita circular (*near-polar*), lançados em 2014 e 2016, respectivamente (ESA, 2013). A constelação Sentinel-1 traz um avanço na cobertura geográfica da Terra com imagens SAR. Juntos, os dois satélites cobrem a superfície terrestre em 6 dias. No Brasil, esta cobertura ainda se limita ao satélite Sentinel-1A com revisita de 12 dias e uma direção de órbita, sendo a região norte coberta pela órbita descendente e restante do país pela órbita ascendente.

A calibração e ortoretificação das imagens Sentinel-1A foram processadas pela cadeia de tratamento *s1tiling* (<http://tully.ups-tlse.fr/koleckt/s1tiling>) desenvolvida pelo CNES (*Centre National d'Études Spatiales*). Para todas as imagens foi aplicado um filtro de redução do ruído *speckle* Lee multi-temporal, com tamanho de janela 5x5. Na tabela 5.2.3.1 são apresentadas as

características das 32 imagens utilizadas, para o período de 01/10/2016 a 18/10/2017 com resolução temporal de 12 dias. Os valores de retroespalhamento sigma zero (σ^0) para cada parcela foram acessados através da criação de uma região de interesse (*Region Of Interest - ROI*) circular de 12,5 m de raio a partir da plotagem da coordenada do ponto central da parcela utilizando a rotina `zonal_stat` para ambiente Python. A média e o desvio padrão de cada ROI foi calculada para os pixels que foram cobertos por pelo menos 50% do ROIs.

Tabela 5.2.3.1- Características das imagens Sentinel-1A utilizadas.

SENTINEL 1 – A	
Comprimento de Onda	5,6 cm
Polarização	VH, VV
Modo de Aquisição	<i>Interferometric Wide</i>
Nível de Processamento	SLC
Resolução nominal	10 x 10 m
Espaçamento em Pixel ¹	5 x 20 m
Órbita de Aquisição	Descendente
Hora de Aquisição	05:49:00
Ângulo de Incidência	37° - 38°

¹ rg x az.

* slant

Dados de precipitação e maré para o período investigado foram descarregados do site GSMMap (*Global Satellite Mapping of Precipitation – JAXA*) e adquiridos junto ao BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos) da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), da Marinha do Brasil. Os dados GSMMap são adquiridos através de um sensor orbital que possui resolução de 10 km e a busca para a região de interesse é feita através das coordenadas da mesma e o período desejado. Os dados de precipitação foram tratados e o acúmulo de precipitação por dia foi calculado para todo o período de imageamento, sendo analisados cinco dias antes do primeiro dia de imageamento 01/10/2016. Os dados de baixa-mar e preamar diários fornecidos pelo BNDO foram processados e a altura da maré estimada para o horário de imageamento (05:49:00) através do método dos doze avos (Vuarnesson 1992). Ambos dados foram tratados no programa R (www.rstudio.com).

5.3 RESULTADOS

A figura Erro: Origem da referência não encontrada apresenta a série temporal do σ^0 por

parcela em cada um dos doze sítios, bem como os valores de biomassa total. A média da biomassa por parcela variou entre 60 t.ha⁻¹ e 500 t.ha⁻¹(seção 3.2 Figura 3.2.1), com algumas parcelas apresentando valores maiores que este último. De maneira geral o σ° de todas as parcelas que compõem cada sítio, de 16 a 23 parcelas, apresentam o mesmo comportamento independente dos valores de biomassa, com os valores de σ° aumentando no meio de dezembro, mostrando certa estabilidade entre meados de março e agosto, diminuindo em outubro. Analisando os valores de σ° nas diferentes polarizações, observa-se pouca variação, com a polarização VV apresentando oscilações maiores nos meses fevereiro e março. As variações da média do σ° para ambas polarizações em todas as parcelas por sítio são apresentados nos boxplots das figuras 5.3.2 e 5.3.3. Nestes gráficos, fica clara a variação do retroespalhamento ao longo da série temporal como descrito anteriormente. É possível perceber também a grande variação em alguns períodos de 12 dias como, por exemplo, entre os dias 10/02/17 e 22/02/17 (destacado nos sítios 8, 10, 11 e 12 na figura 5.3.2).

Os valores de precipitação e de maré para o período analisado são apresentados na figura 5.4.1. A precipitação foi plotada como o acumulado do dia e apresentou as estações chuvosa e seca como descrito na literatura para esta região. A maré é apresentada de duas maneiras: a oscilação ao longo do ano (linha azul), ou seja, valores máximos e mínimos por ciclo de maré e, a altura do nível da água estimada para o momento do imageamento (pontos vermelhos). Foram plotadas ainda as máximas de sizígia e quadratura ao longo do período. As linhas preta e laranja, respectivamente, que apresentaram nos meses de fevereiro e março níveis de oscilação próximos, com níveis para a sizígia mais baixos que os registros restantes e para a quadratura mais altos. Além disso, neste gráfico (Figura 5.4.1) constam as séries temporais da média do σ° de todas as parcelas e da razão de polarização VH/VV para qual a série temporal apresentou comportamento contrário ao da série temporal do σ° , com ligeira diminuição dos valores entre janeiro e abril.

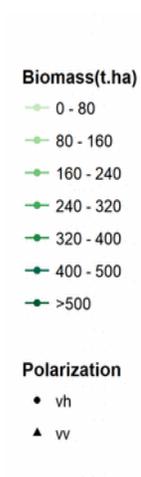


Figura 5.3.1-Série temporal dos valores de retroespalhamento por parcela nos 12 sítios apresentados na figura (5.2.1). As cores das linhas representam a biomassa total de cada parcela como descrito na legenda.

Figura 5.3.2-Série temporal variação dos valores de retroespalhamento na polarização VV por sítio. Para cada sítio foram utilizados os valores de todas as parcelas. Os detalhes em vermelho nos sítios 8, 10,11,12 mostram oscilações de valores em curto período de tempo.

Figura 5.3.3-Série temporal variação dos valores de retroespalhamento na polarização VH por sítio. Para cada sítio foram utilizados os valores de todas as parcelas.

5.4 DISCUSSÃO

O comportamento do σ° similar para as parcelas em todos os sítios ao longo da série temporal está relacionado ao nível de saturação na banda C, principalmente para a polarização VH, que foi definido com valor entre 20 – 30 t.ha⁻¹ (Imhoff 1995) e até 70 t.ha⁻¹ (Proisy *et al.* 2002). Praticamente todas as parcelas estão acima do nível de saturação dificultando uma diferenciação entre as mesmas que permitisse separar o comportamento ao longo da série temporal para, assim, definir alguma assinatura relacionada à estrutura vegetal do mangue. A variação dos valores de σ° ao longo do ano em parte está relacionada às variáveis ambientais, principalmente para a polarização VV, que pode apresentar sensibilidade à superfície inundada, teor de água e rugosidade da superfície (Kasischke & Bourgeau-Chavez, 1997, Laurin *et al.* 2018). Neste caso, o teor de umidade do alvo aumenta devido à maré e à precipitação e resulta em aumento do coeficiente de retroespalhamento. Proisy *et al.* (2002) demonstraram que em locais que apresentam o dossel mais aberto, a maior interação com a superfície leva a um aumento do σ° por vários decibéis em comparação com florestas com a copa mais densa e fechada. Apesar da diferença entre os sítios serem pequenas ao longo das séries temporais é possível perceber que alguns sítios apresentaram variação de σ° pronunciada em uma escala curta de tempo, como é o caso dos sítios 8, 10, 11 e 12 que apresentaram variação maior que 2 dB entre a imagem do dia 10/02 e 18/03 (Figura 5.3.2). Dentre estes, apenas o sítio 11 não está na margem do rio Caeté.

Este período marcado por oscilações e aumento do σ° , de janeiro ao fim de abril (destaque em lilás na Figura 5.4.1), coincidem com os meses de maior precipitação. No entanto, não foi verificada relação direta entre os valores de precipitação e os valores de σ° , $r = -0,16$ e $r = -0,12$ para σ°_{vh} e σ°_{vv} , respectivamente. Assim, os valores mais altos de retroespalhamento possivelmente estão relacionados ao teor de umidade do sistema, com maior precipitação (período chuvoso) somada ao nível de água das marés. Durante o período chuvoso a descarga fluvial máxima em maré vazante é 17% maior que no período seco (Asp *et al.* 2013). A diferença de comportamento entre VV e VH se dá pelo fato da co-polarização ser mais sensível aos teores de água como mencionado e, por outro lado, a polarização cruzada ser rapidamente atenuada pelo espalhamento volumétrico do dossel. Desta forma, a razão de polarização $\sigma^\circ_{vh/vv}$ diminui os efeitos do espalhamento da superfície e do teor de

umidade das folhas representando mais a resposta do dossel (Laurin *et al.* 2018).

Figura 5.4.1-Séries temporais de $\sigma^{\circ}vv$ e $\sigma^{\circ}vh$ e da razão $\sigma^{\circ}vh/\sigma^{\circ}vv$. Dados de preamar e baixa-mar para todo o período e as alturas de maré para cada dia do imageamento e o acumulado por dia da precipitação. O detalhe em lilás mostra o período em que os valores de retroespalhamento aumentam como resultado do aumento do teor de umidade devido as marés e a época chuvosa.

Um dos fatores que confirmam a interferência da superfície nos valores de retroespalhamento apresentado é o ângulo de incidência que para as imagens utilizadas neste

trabalho varia entre $37^\circ - 38^\circ$ (Tabela 5.2.3.1). Este ângulo de incidência é considerado médio ou intermediário, uma vez que os ângulos de incidência podem variar entre $\sim 10^\circ$ a $\sim 65^\circ$, ângulo íngreme (baixo) e ângulo raso (alto), respectivamente (Lang *et al.* 2008). O ângulo de incidência atua na profundidade de penetração da onda. Assim, quanto menor o ângulo de incidência, maior a influência do solo (Towsend 2002, van der Sandem 1997, Wang 1995), enquanto que ângulos médios entre 27° a 39° foram descritos como os mais sensíveis à estrutura do dossel, se este é fechado ou aberto (Lang *et al.* 2008). Neste sentido, acredita-se que o ângulo intermediário das imagens utilizadas e as características do dossel, por vezes menos denso e, conseqüentemente, com maior transmitividade da energia, influenciam nos valores de retroespalhamento apresentados.

Além da estrutura da floresta (abertura do dossel e fenologia), a interferência da superfície varia ainda de acordo com as características do solo, incluindo rugosidade superficial, umidade do solo e presença/ausência de água parada (Lang *et al.* 2008, Wang *et al.* 1995,). No caso dos manguezais a superfície é formada por um solo com elevado teor de matéria orgânica e umidade e que muitas vezes apresenta salinidade alta. Estas características de superfície subjacente podem ter influenciado para os valores de σ° se manterem altos na época seca e sem folhas, como descrito por Proisy *et al.* (2000), pois em um dossel com poucas folhas há uma forte contribuição do solo, resultando em aumento do espalhamento do tipo *double-bounce* (Kasischke & Borgeau-Chaves 1997).

Com relação a atividade foliar, estudos da fenologia do manguezal na península de Ajuruteua mostram de maneira geral, que os períodos de maior produção de serrapilheira, ou seja, quando o dossel possui menos folhas, são relacionados à época seca, de maio a novembro (Fernandes *et al.* 1999 Fernandes *et al.* 2007, Mehlig 2006, Menezes 2006). De fato, as variações sazonais da precipitação e salinidade influenciam a fenologia e a queda das folhas (Menezes *et al.* 2008). No período de maio a setembro, os valores da razão de polarização $\sigma^\circ_{\text{VH}}/\sigma^\circ_{\text{VV}}$ se mantiveram mais baixos (Figura 5.4.1), o que representa uma influência do período com menos folhas no dossel aos valores de retroespalhamento, a partir de setembro os valores voltam a aumentar. É importante enfatizar que na banda C, um dossel com menos folhas apresenta menos elementos para a dispersão múltipla da radiação dentro do dossel, aumentando a quantidade de energia que alcança a superfície (Kasischke & Borgeau-Chaves 1997, Townsend 2002) e a razão de polarização visa reduzir os efeitos da superfície. Tais resultados corroboram o trabalho de Frison *et al.* (2018) para florestas decíduais, no qual

o comportamento sazonal da razão de polarização $\sigma^{\circ}_{VV}/\sigma^{\circ}_{VH}$ Sentinel-1A e 1B apresentou alta correlação com valores de NDVI mostrando o potencial dos dados Sentinel-1 para monitorar a vegetação. Apesar da alta complexidade do ecossistema manguezal os resultados aqui apresentados são animadores e apresentam sazonalidade na utilização da razão de polarização, porém a indisponibilidade de dados de NDVI compromete tal afirmação.

5.5 CONCLUSÃO

Uma série temporal do σ° na banda C proveniente do sensor Sentinel-1A em ecossistema manguezal na Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA). O comportamento do σ° nas polarizações VV e VH foi similar e não apresentou diferenças com relação a valores de biomassa total, resultado da saturação na banda C. As variações dos valores de retroespalhamento ao longo do ano foram relacionados às condições ambientais (precipitação e maré), alterações no dossel (fenologia) e ao ângulo de incidência. Estas variações no σ° podem ser divididas em três períodos: o primeiro de janeiro a abril, período com alta taxa de precipitação e maiores variações de maré que são refletidos no aumento dos valores de σ° , com maiores oscilações em VV, o segundo período estende-se de meados de abril a agosto, período de transição que coincide com a época de alta produção de serrapilheira. Assim, com menor quantidade de folhas no dossel há maior interação da radiação com o solo, gerando altos valores de σ° , tais valores começam a baixar no terceiro período, de setembro a dezembro marcado pelo fim da estação seca e início da estação chuvosa. Com a razão de polarização $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ foi possível observar uma diminuição nas influências da superfície adjacentes à resposta da floresta de mangue, resultando em um comportamento com diminuição dos valores da $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ do mês de maio ao mês de setembro, reflexo da dinâmica do dossel dos manguezais da região, apesar da modesta oscilação (1,5 dB).

Ao fim da série temporal, os valores de retroespalhamento apresentaram aumento da ordem de 0,1 a 0,4 dB, sendo um resultado inesperado pelo valor reduzido que pode estar relacionado somente a variações no satélite. Com relação ao ângulo de incidência, é esperado que em locais onde o ângulo de incidência é maior do que 40° (satélites Sentinel-1 variam de 29° – 46°), este comportamento oscilatório dos valores de retroespalhamento diminua devido à menor influência da superfície.

De maneira geral, as imagens SAR Sentinel-1A são promissoras para o monitoramento da vegetação de mangue visto sua sensibilidade a mudanças no dossel. Trabalhos futuros visam a verificação do comportamento em regiões com ângulos de incidência maiores e a relação da série temporal da razão de polarização com dados de NDVI.

6 CAPÍTULO O USO DE IMAGENS SAR MULTIFREQUÊNCIA NA CLASSIFICAÇÃO DE MANGUEZAIS ATRAVÉS DO CLASSIFICADOR RANDOM FOREST

6.1 INTRODUÇÃO

O manguezal é um ecossistema presente na transição entre o ambiente marinho e o terrestre em regiões tropicais e que desempenha múltiplas funções que lhe conferem elevada importância ecológica na zona costeira. O Brasil possui a terceira maior área de manguezal do mundo e 7% da área global. Porém, nas últimas três décadas, apresentou uma perda de cerca de 50.000 ha de floresta de mangue, correspondente a 4% da área total de manguezal no país (Alongi 2002, Ferreira & Lacerda 2016, Giri *et al.* 2011). Esta perda do ecossistema é decorrente de exploração de produtos florestais, expansão da população, alguns processos naturais como subida do nível do mar, mudanças na hidrodinâmica dos estuários (Alongi 2002), além da conversão do ambiente em viveiros para aquicultura (Tenório *et al.* 2015.). No litoral norte do Brasil, este é o ecossistema predominante e corresponde a 80% da vegetação de mangue presente no país (Diniz *et al.* 2019, Nascimento *et al.* 2013, Souza-Filho 2005). Nesta região, os manguezais aparentam relativa preservação garantindo os bens e serviços deste ambiente para as comunidades locais, pois preserva a diversidade e riqueza dos recursos pesqueiros, visto que o manguezal é exportador de matéria orgânica para as águas adjacentes (Voivodic *et al.* 2003). O uso de informações atualizadas e detalhadas é a melhor maneira de compreender, monitorar e conservar este ecossistema.

A espacialização de dados de vegetação em forma de mapa é uma ferramenta indispensável em pesquisas como: monitoramento, gestão ambiental, estimativa de biomassa florestal entre outras e é a forma mais difundida para se obter informações deste ambiente que é considerado de difícil acesso. Apesar de haver informações disponíveis baseadas em dados de sensores remotos, informações precisas, confiáveis e em tempo útil da distribuição e dinâmica das florestas de mangue do mundo, estas não estão prontamente disponíveis (Giri 2016). Para os manguezais do litoral brasileiro, investigações que envolvam mapeamento da distribuição da vegetação em escala local ainda são escassas. Um dos fatores que dificulta o mapeamento deste ambiente é a presença de nuvens que afeta as imagens ópticas, tipo de sensor muito utilizado com fins de mapeamento. Neste sentido, as imagens de sensores de

abertura sintética (SAR) são uma alternativa no mapeamento deste ambiente pela vantagem de não serem afetadas pela cobertura de nuvens, condição normal em regiões tropicais e subtropicais, e são independentes da luz solar.

No mapeamento dos ambientes costeiros da região amazônica brasileira, alguns estudos que envolvem dados SAR através de fusão com sensores ópticos foram desenvolvidos. Souza Filho & Paradella (2002) utilizaram fusão através da técnica SPC-SAR para distinguir unidades geobotânicas e obtiveram um produto com capacidade de diferenciar tipos de manguezal (intermaré e supramaré). Posteriormente, através da mesma técnica, Souza-Filho e Paradella (2005) mapearam unidades geomorfológicas obtendo ótimas distinções entre os ambientes. Rodrigues & Souza-Filho (2011) classificaram os ambientes costeiros entre o litoral do Pará e Maranhão e compararam o resultado das classificações de imagens Landsat ETM, Radarsat-1 Fine Mode e fusão multissensor SPS-SAR de forma independente e obtiveram acurácia elevada para o dado fusionado, seguido pela imagem Landsat e, por fim, a imagem Radarsat-1. Para a península de Ajuruteua existem dois mapas de distribuição das espécies de mangue desenvolvidos por Menezes & Mehlig (2010) e Krause & Bock (2010) (seção 3.1.4 Figura 3.1.3), elaborados a partir da interpretação visual e classificação baseada em pixel de imagens Ikonos, respectivamente.

Na última década, com a maior disponibilidade de dados SAR, como os mosaicos globais anuais em banda L fornecidos pela JAXA e a constelação de satélites na banda C Sentinel-1A e 1B, ambos com livre acesso às imagens, aumentou a possibilidade de mapeamentos em escalas espacial e temporal baseado em sensores deste tipo. A tecnologia de processamento destes dados acompanha avanços com maior número de algoritmos robustos de classificação. O Random Forest (RF) está entre os métodos mais utilizados atualmente para classificação e regressão baseado em aprendizado de máquina. Segundo Breiman (2001), este algoritmo apresenta vantagens como: ser robusto com outliers e *missing values*, não paramétrico, processamento rápido, não existe excesso de ajuste dos dados (*overfitting*), fornece estimativas internas úteis de erro, força, correlação e importância da variável e é considerado simples. Como classificador, o RF consegue lidar com grande número de conjunto de dados, ideal para abordagens multissensor e multifrequência.

Neste trabalho, o potencial de dados SAR multifrequência emultipolarização será avaliado em uma abordagem de classificação Random Forest do manguezal da península de Ajuruteua. Com este propósito alguns objetivos específicos são propostos:

- Analisar o uso de séries temporais no sucesso das classificações,
- Analisar quais as classes apresentam maior desafio para este tipo de abordagem e se a classe mangue, principal interesse, pode ser definida com acurácia.
- Discutir a acurácia e a aplicabilidade do modelo definido,
- Analisar o classificador Random Forest para este tipo de abordagem.

6.2 MATERIAIS E MÉTODOS

6.2.1 Área de estudo

A área de estudo é a península de Ajuruteua, localizada no litoral norte do Brasil a sudeste da foz do rio Amazonas (Figura 6.2.1). Esta península possui aproximadamente 30 km de extensão e 8 km de largura, dominada por floresta de mangue. A região apresenta regime de macromarés semidiurnas com 6 m de variação. As espécies de mangue encontradas na região são: *Rhizophora mangle* L. (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (L.) Stearn, *Avicennia schaueriana* Stapf and Leechman (Acanthaceae-Avicennioideae) e *Laguncularia racemosa* (L.) C. F. Gaertn (Combretaceae).

6.2.2 Dados SAR

O conjunto de imagens SAR utilizado para o mapeamento é descrito a seguir e tem suas principais características apresentadas na tabela 6.2.2.1. O satélite TerraSAR – X (TS-X) foi lançado em junho de 2007, seu sensor opera na banda X (9,65 GHz) e nas quatro polarizações. Neste trabalho foram utilizadas imagens adquiridas no modo Strip Map (Dual Pol) em quatro datas e nas quatro polarizações.

O satélite Radarsat-2 (RST-2) foi lançado em dezembro de 2007 e seu sensor opera na frequência de 5.4 GHz (banda C). A imagem utilizada nesta pesquisa é multipolarizada e adquirida no modo Fine-beam. As imagens Sentinel-1A e 1B (S-1A e S-1B) (banda C) são adquiridas através de dois satélites, lançados em 2014 e 2016, respectivamente. A configuração de imageamento contínuo do globo resulta em uma revisita de 12 dias na área de estudo, pelo satélite Sentinel-1A. A série temporal utilizada no estudo corresponde ao período

de um ano, um total de 32 imagens.

Figura 6.2.1-Mapa da área de estudo com as classes estudadas e algumas das amostras de treinamento, que serão detalhadas ao longo desta seção do capítulo.

Os mosaicos globais anuais construídos a partir de imagens de sensores na banda L (1,27 GHz) são de dois períodos, o período de 2007 a 2010, baseado em imagens adquiridas entre junho e outubro pelo sensor PALSAR (Shimada *et al.* 2014) e os mosaicos de 2015 a 2017 que foram construídos a partir de imagens do sensor PALSAR-2. As imagens que compõem

os mosaicos do segundo período, sobre a área de estudo, foram adquiridas entre julho e setembro do respectivo ano.

Tabela 6.2.2.1- Características das imagens SAR utilizadas na classificação RF.

	TerraSAR – X	RADARSAT 2	SENTINEL 1 – A	ALOS PALSAR
Comprimento de Onda	3 cm	5,6 cm	5,55 cm	23,5 cm
Polarização	HH, HV VV, VH	HH, HV, VH, VV	VH, VV	HH, HV
Modo de Aquisição	StripMap Dual-Pol	Fine Quad-Pol	Interferometric Wide	-
Nível de Processamento	SSC	SLC	SLC	Global 25m mosaik
Resolução nominal	3 x 3 m	11 x 9 m	10 x 10 m	~25 x 25 m
Espaçamento em Pixel ¹	0,90* x 2,44	4,73 x 4,98*	5 x 20 m	20 x 36 m
Órbita de Aquisição	Ascendente	Descendente	Descendente	Ascendente
Data de Aquisição	10/02/2010 15/03/2010 21/02/2010 26/03/2010	11/06/2010	10/2016 – 10/2017	2007 – 2010 2015 – 2017
Hora de Aquisição	18:22:57	05:55:58	05:49:00	-
Ângulo de Incidência	42,6° - 43,8°	23,39°-25,28°	37° - 38°	37° - 38°; 32° -33°

¹ rg x az.

* slant

A metodologia utilizada para desenvolver a pesquisa proposta foi sintetizada no fluxograma da figura 6.2.2. Na etapa de pré-processamento as imagens TS-X e RST-2 foram calibradas para obter os valores de retroespalhamento em γ^0 (dB). O ruído *speckle*, inerente às imagens SAR, foi reduzido através de um filtro Boxcar com janela 3 x 3 e logo após a correção de terreno, processada com dados SRTM. As imagens S-1A foram processadas pela rotina de tratamento *s1tiling* (<http://tully.ups-tlse.fr/koleckt/s1tiling>) desenvolvida pelo CNES, que automatiza o download, a calibração e ortorretificação das imagens, neste caso uma série temporal de um ano. Além disso, foi aplicado um filtro *speckle* Lee multi-temporal com tamanho de janela 5 x 5. A série temporal foi reduzida a 4 imagens de média de 3 meses para cada polarização, resultando em 8 imagens. Os quatro períodos são: 01/10/2016 a 24/12/2016, 05/01/2017 a 30/03/2017, 11/04/2017 a 04/07/2017 e 16/07/2017 a 08/10/2017 e serão denominados como períodos de 1 a 4 na sequência apresentada. Os períodos 2 e 3 apresentam média de retroespalhamento maior que os períodos 1 e 4, resultado da influência das condições ambientais e do padrão fenológico (capítulo 5).

As imagens PALSAR são disponibilizadas ortorretificadas e com correção do *slope*, causados por efeitos da topografia na imagem. As imagens foram calibradas de acordo com a expressão definida por Shimada *et al.* (2009): $\gamma^0 = 10 * \log_{10}(\text{DN}^2) - \text{CF}$ [dB], onde CF é o fator de conversão definido pelos autores para tais imagens. O filtro *speckle* multi-temporal

Refined Lee foi aplicado nas imagens empilhadas. Apesar de ortorretificadas as imagens PALSAR apresentaram um deslocamento com relação às demais imagens utilizadas, que foi corrigido por um processo de registro utilizando como base as imagens S-1A e RST-2.

Figura 6.2.2-Fluxograma com as principais etapas da metodologia

Na etapa seguinte, as imagens processadas foram utilizadas para calcular as imagens derivadas (Tabela 6.2.2.2), através de transformações aritméticas, que diferem de acordo com a polarização disponível para cada sensor.

Tabela 6.2.2.2-Imagens derivadas calculadas através das polarizações iniciais de cada sensor.

	TerraSAR – X	RADARSAT 2	SENTINEL1-A	ALOSI/2 PALSARI/2
Polarizações	HH, HV, VV,HH	HH, HV, VH, VV	VH, VV	HH, HV
Razão de Polarização	HV/HH VH/VV	HV/HH VH/VV VV/HH VV/HH+VV ¹ HV/HV+BMI ²	VH/VV VV/VH	HV/HH HH/HV HH-HV/HH+HV ⁴ HH*HV/HH+HV ⁵
Média da Polarização	(HH + HV)/2 (VV + VH)/2	(HH + VV)/2 ³ (HH + HV)/2 (VV + VH)/2	(VV+VH)/2	(HH+HV)/2

Os processamentos de calibração, transformações aritméticas e a classificação Random Forest foram feitos no software R, sendo somente as amostras de treinamento criadas no QGIS. A etapa de filtragem do ruído *speckle* foi executada no software SNAP. O registro das imagens PALSAR foi executado no software ENVI.

Quando trabalhamos com imagens de sensores SAR é sempre importante verificar as condições do alvo que podem afetar o retroespalhamento do radar como, por exemplo, a umidade. Desta forma, dados de precipitação e condições de maré, foram processados para o período de aquisição de cada imagem. Os dados de precipitação (mm/dia) foram fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e os dados de maré foram adquiridos junto ao BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos). A partir das alturas e horários de preamar e baixa-mar e do horário de aquisição das imagens foi estimada a altura de maré no momento do imageamento através do método dos doze avos. Todos os conjuntos de dados foram processados no software R.

Para as imagens S-1A, como estamos trabalhando com médias trimestrais, e para as imagens PALSAR, que são mosaicos, assumimos que não é necessária a apresentação de dados de precipitação e maré. Porém, é importante salientar que as médias trimestrais das imagens S-1A cobrem a variação sazonal anual de precipitação.

Os valores de maré foram considerados baixos para influenciarem no retroespalhamento, principalmente para as imagens TS-X (Figura 6.2.3 a), que devido ao comprimento de onda

pequeno, a energia incidente é atenuada pelos primeiros e menores elementos do dossel (folhas e pequenos galhos). Apesar da presença de precipitação nos dias 10/02 e 26/03 das imagens TS-X, a mesma não ultrapassa os 10 mm, porém este dado é o acumulado até as 12h00. Desta forma, é possível que a precipitação tenha colaborado para o aumento da constante dielétrica devido à precipitação após este horário e que foi contabilizada no dia 11/02. (Figura 6.2.3b).

Figura 6.2.3-Precipitação nos dias que antecedem à aquisição das imagens TerraSAR-X (a) e Radarsat-2 (b). Em vermelho a altura de maré (m) estimada para o horário do imageamento.

6.2.3 Conjunto de dados de campo

As classes definidas para a classificação do ambiente foram: mangue, mangue anão, água, campos, planície hipersalina e outros (que corresponde a dunas costeiras e cordões praias). Os dados da vegetação de mangue foram medidos e fornecidos pelo Laboratório de

Ecologia de Manguezal – IECOS/UFPA. Um total de 327 parcelas foram medidas ao longo da península de Ajuruteua, das quais 237 são de mangue e 90 de mangue anão, as metodologias dos levantamentos são descritas em Gardunho (2017) e Silva (2017). As demais classes foram definidas e as amostras de treinamento coletadas a partir de imagens no Google Earth Pro e imagens SAR utilizadas na classificação. A tabela 6.2.3.1 apresenta a descrição das classes mapeadas neste trabalho.

Tabela 6.2.3.1-Descrição das classes definidas para o mapeamento.

Classe	Fotos de campo	Descrição
Mangue		Ecossistema prevalecente na área de estudo. Com a espécie <i>R. mangle</i> dominante e a espécie <i>A. germinans</i> com os indivíduos com maior altura e DAP. Altura das árvores de até 25 m.
Mangue anão		Bosques monoespecíficos de <i>A. germinans</i> formado por árvores com altura de até 6 m. Ocorre em região topograficamente mais alta e com baixa frequência de inundação.
Campos		Pântanos salgados (campos), parte central da península ocupadas por gramíneas altas. Região topograficamente mais elevada sendo alcançados somente pelas marés de equinócio.
Outros		Classe formada pelos cordões praias, dunas costeiras e planície de maré arenosa.
Planície hipersalina		Região topograficamente alta inundadas somente pelas marés de equinócio, com alta salinidade e com vegetação herbácea.
Água		Corpos d'água presentes na península, como o lago artificial na parte central, canais de maré, estuários e o oceano.

A amostra de treinamento da classe manguezal foi filtrada para suprimir algumas parcelas nas bordas de canal ou do rio, por produzirem efeito *double-bounce* entre as raízes das árvores e a água, causado principalmente pelo ângulo de incidência do satélite e que aumentaria a confusão das classes. Desta forma, trabalhamos com 212 parcelas da classe

manguezal, 90 parcelas da classe mangue anão, 13 de planície hipersalina, 49 da classe água, 21 da classe campos e 21 da classe outros. É importante enfatizar que o número de amostras de treinamento é proporcional à área que cada classe representa na região estudada quando se trabalha com o classificador Random Forest (Belgiu & Drăguț 2016).

6.2.4 Classificação Random Forest

O Random Forest é uma técnica de aprendizado de máquina que utiliza randomicamente subconjuntos de amostras na construção de árvores de decisão e, que pode ser usada para classificação ou regressão. A decisão final é baseada no voto da classe mais popular entre as n árvores de decisão criadas (Breiman 2001). Por esta razão, o Random Forest é considerado um método em conjunto. Os subconjuntos de amostras são criados pela abordagem de ensacamento (*bagging*) a partir da escolha de uma porcentagem do conjunto de dados para o treinamento do modelo (amostras no saco) e o restante das amostras (amostras fora do saco) como conjunto de dados para validação. O erro gerado na etapa de validação recebe o nome de erro OOB (“*Out Of Bag*”).

Neste trabalho o conjunto de dados foi dividido randomicamente em 75% de amostras de treinamento, 159 parcelas da classe manguezal, 67 parcelas da classe mangue anão, 10 de planície hipersalina, 37 da classe água, 16 da classe campos e 16 da classe outros e 25% de amostras de teste, 53 parcelas da classe manguezal, 23 parcelas da classe mangue anão, 3 de planície hipersalina, 12 da classe água, 5 da classe campos e 5 da classe outros. O valor de *n*tree (número de árvores criadas) foi configurado em 500 para todos os modelos. Para o parâmetro *m*try, que define o número de variáveis para dividir em cada nó, foi configurado inicialmente o valor padrão de raiz quadrada de p , sendo p o número de variáveis preditoras. Porém, para todos os modelos foram testados outros valores de *m*try até que o valor de OOB encontrasse estabilidade, como indica Breiman (https://www.stat.berkeley.edu/users/breiman/RandomForests/cc_manual.htm).

A abordagem adotada na execução da classificação RF foi de modelos mais simples para mais complexos, sendo os modelos simples aqueles com apenas as imagens processadas de cada sensor, ou seja, sem as imagens derivadas. No passo seguinte, os modelos foram construídos com as variáveis das imagens derivadas adicionadas. Além disso, foram testados

modelos que incluíram somente as imagens S-1A e PALSAR, com o intuito de explorar a disponibilidade e potencialidade dos dados multi-temporais. Por fim, modelos com todas as variáveis de todos os sensores.

Para cada modelo rodado a decisão do melhor conjunto de variáveis foi tomada a partir do gráfico de *Variable Importance* gerado pelo algoritmo RF. Este gráfico apresenta as variáveis mais importantes para a construção do modelo de duas formas: as mais importantes para a acurácia e a mais importante para a etapa de divisão em cada nó da árvore. Com base neste gráfico, escolhendo as variáveis mais importantes, um novo modelo era rodado. Este passo foi repetido até que o modelo apresentou menor valor de OOB. A multicolinearidade entre as variáveis foi testada antes da geração de cada modelo e as variáveis, detectadas como colineares, excluídas do modelo. Na etapa de validação dos modelos, a matriz de confusão foi utilizada para os cálculos do índice Kappa e da Discordância Global, erro de quantidade e erro de alocação, propostos por Pontius & Millones (2011).

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No total 131 variáveis foram testadas em 25 modelos de classificação dos ambientes na área de estudo. A figura 6.3.1 mostra os valores do erro OOB para cada modelo e a quantidade de variáveis utilizada. A diferença no número de imagens disponíveis por sensor teve um grande impacto na qualidade dos modelos. Os modelos gerados a partir da imagem RST-2 apresentou o menor desempenho com valores de OOB entre 34,8% a 37%, seguido dos modelos baseados nas imagens TS-X que tiveram erros entre 19,5% a 24,5%. Com 8 imagens em quatro datas diferentes, os modelos *tsx* resultaram em erros quase duas vezes menores que os modelos *rdst*, apesar da disponibilidade de quatro polarizações da imagem RST-2. Os modelos com todas as variáveis de todos os sensores apresentaram os menores erros OOB. Porém, em sua maioria foram baseados em elevado número de variáveis como é o caso do modelo com menor OOB, *all_3* que utilizou 46 variáveis, o que implica em mais pré-processamento além de tempo de processamento do algoritmo RF. Na tabela 6.3.1 são apresentados os modelos com valores de OOB menor que 14% e número de variáveis menor que 10.

Figura 6.3.1-Erro OOB e número de variáveis (valor acima de cada barra) dos modelos gerados. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, rdst = imagens Radarsat-2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2 e tsx = imagens TerraSAR-X. Cada número após as siglas no eixo x corresponde a uma seleção diferente de variáveis de entrada do mesmo conjunto.

Os modelos apresentaram valores de erro semelhantes, assim a acurácia global e o índice Kappa para todos os modelos apresentaram qualidade de classificação boa. As imagens S-1A estiveram presentes como variáveis importantes nos 6 modelos selecionados (*all_5*, *all_2*, *s1a_plsr_2*, *s1a_1*, *s1a_2*, *s1a_4*), sendo que 3 modelos são formados apenas por imagens deste sensor (*s1a_1*, *s1a_2*, *s1a_4*). As imagens PALSAR foram selecionadas em 3 dos 6 modelos (*all_5*, *all_2*, *s1a_plsr_2*).

As imagens TS-X foram incluídas como variáveis importantes na construção de apenas um modelo (*all_2*). Apesar da imagem RST-2 ser em banda C, como as imagens S1-A, o número de imagens disponíveis e conseqüentemente a inserção da variável tempo, pode ser o que causou a diferença de importância entre estas variáveis, conforme mencionado. Nas séries temporais (modelos *s1a* e *plsr*), o ruído *speckle* foi reduzido através de filtros multi-temporais

que torna a filtragem mais efetiva pela filtragem temporal além da filtragem espacial, enquanto o filtro *speckle* de data única, aplicado nas imagens TS-X e RST-2, corrige espacialmente e resulta em textura suavizada e bordas não preservadas.

Tabela 6.3.1-Variáveis e índices de acurácia para os modelos que correspondem à seleção. Os nomes dos modelos é explicado na figura 6.3.1. As siglas das variáveis são formadas por: sensor, polarização e data, sendo que as razões de polarização $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ são indicadas por: rpol.

Modelo	Variáveis	Número de Variáveis	OOB (%)	Kappa	Acurácia Global
all_5	plsr_17_HV; s1_vh_1; s1_vv_3; s1_vv_4; s1.rpol	5	10,8	53	89,2
all_2	plsr_07_HV; plsr_15_HV; plsr_17_HV; s1_vh_1; s1_vv_1; s1_vv_3; s1_vv_4; tsx_0210_hh; tsx_0221_vv	9	11,4	52,6	88,6
s1a_plsr_2	plsr_07_HV; plsr_17_HV; s1_vh_1; s1_vv_3; s1_vv_4	5	11,6	53,7	88,4
s1a_2	s1_vh_2; s1_vv_3; s1_vv_4	3	12,1	53,1	87,9
s1a_1	s1_vh_1; s1_vh_2; s1_vv_1; s1_vv_2; s1_vv_3; s1_vv_4	6	13,3	51,5	86,7
s1a_4	s1_vh_2; s1_vv_4; s1.rpol_	3	13,5	51,6	86,4

As variáveis s1a_vv_3 e s1a_vv_4, que são as médias trimestrais das polarizações VV, foram selecionadas como variáveis importantes em todos os modelos, sendo que no modelo s1a_4 a variável do período 3 é representada pela $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$. Esta polarização na banda C é mais suscetível à superfície subjacente, no período 3 (s1a_vv_3) os alvos vegetais apresentam maior presença de espalhadores (folhas) no fim do período chuvoso, o que eleva os valores de retroespalhamento. Já a variável do período 4 (s1a_vv_4), período seco, apresenta espalhamento especular em regiões com vegetação rasteira, como planícies hipersalinas e diminuição do retroespalhamento nas regiões de vegetação esparsa como mangue anão, pela perda do volume do dossel (sem folhas). Em ambas variáveis, a classe mangue apresenta elevado σ° , devido, ou à presença de espalhadores do dossel ou à interação com a superfície como descrito no capítulo 5 (seção 5.4.). Como consequência estes alvos apresentaram respostas distintas, auxiliando na classificação. Esta polarização mostrou-se efetiva em separar as florestas de mangue densas de outras vegetações esparsas, contudo entre o mangue anão e a planície hipersalina não houve diferenciação pronunciada pelo retroespalhamento.

Para a polarização VH a média trimestral do período 2 (*sla_vh_2*), período chuvoso, foi selecionada no modelo que incluiu somente imagens S-1A, nos outros a incluída foi a variável do período 1 (*sla_vh_1*). Nesta polarização, a onda sofre rápida atenuação do dossel, somado a isso o teor de umidade do sistema é maior fazendo com que o retroespalhamento aumente, principalmente para *sla_vh_2*. A distinção das classes de vegetação fica dificultada, porém o delineamento de corpos d'água e do mar é destacado.

A inclusão de imagens das duas estações no mesmo comprimento de onda fornecem informações diferentes sobre os alvos e auxiliam na classificação, aumentando a possibilidade de separação de classes semelhantes, por representar a variação fenológica da vegetação como destacado por Rodriguez-Galiano *et al.* (2012) em imagens ópticas. Esta informação temporal é usada na árvore de decisão para a identificação de áreas que estão sujeitas à inundação (Simard *et al.* 2000).

Na banda L, somente a polarização HV foi selecionada. Neste comprimento de onda a energia reflete os maiores componentes da vegetação. Quando a vegetação é menos desenvolvida, as microondas penetram através do volume do dossel da floresta e a superfície subjacente contribui para o σ° como função do teor de umidade e rugosidade do solo (Lucas *et al.* 2007) ou ainda causando efeito *double-bounce*. Outro fator que contribui para o aumento σ° é a presença de matéria morta e raízes-escora na superfície como descrito por Lucas *et al.* (2007). Já os campos são alvos em que a vegetação apresenta tamanho menor que o comprimento de onda na banda L (23,5 cm), ou seja, com pouca rugosidade em que pode ocorrer espalhamento especular. Assim, as variáveis em banda L auxiliaram na distinção das classes e estão presentes no três modelos com melhor acurácia global (*all_5*, *all_2*, *sla_plsr_2*).

Algumas questões importantes precisam ser abordadas. A presença da variável *sla_rpol* ($\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$) única variável derivada selecionada para os modelos, quando no modelo *all_5* aumentou a acurácia, diminuiu o OOB, além de utilizar 4 variáveis a menos que o modelo *all_2* que utiliza só as imagens não derivadas de cada sensor. No modelo *sla_4* esta variável não teve o mesmo efeito apresentando um modelo com valores de OOB e acurácia piores do que os modelos *sla_1* e *sla_2*, formados pelas imagens não derivadas. A diferença entre estes modelos foi a variável na banda L (*plsr_17_HV*). Isto pode indicar que apesar desta variável não ter sido a mais importante para estes modelos, ela contribui para a separação das classes, o mesmo acontece com a presença da variável no ano de 2007 no modelo *sla_plsr_2*

conforme descrito anteriormente.

A baixa contribuição das variáveis PALSAR nas classificações em parte pode estar associada ao tipo de filtro multi-temporal utilizado. De acordo com Yuan *et al.* (2018), este tipo de filtro assume que o mesmo bloco de pixels não sofre alteração ao longo do tempo, o que os torna adequados para imagens multi-data de curto prazo com áreas homogêneas. Porém, em séries longas como a utilizada nesta pesquisa, para as imagens PALSAR (2007-2010 e 2015-2017) este filtro pode suavizar demais a textura da imagem, causando perda de informação. A multicolinearidade entre a maioria das imagens da série temporal, que resultou em exclusão das variáveis entre 2008 – 2010 e 2016, pode estar relacionada à suavização causada pelo filtro utilizado.

Na figura 6.3.2 são apresentadas as classificações resultantes dos seis modelos apresentados na tabela 6.3.1. A análise de acurácia, os valores de Kappa por classe para cada uma das classificações constam na figura 6.3.3. As classes mangue e água tiveram todas as classificações com valor maior que 0,90. As classes mangue anão e campos apresentaram valores acima de 0,70 e as classes Outros e planície hipersalina com valores abaixo de 0,50 e menores que 0,20, respectivamente, sendo que em duas classificações a classe planície hipersalina apresentou valor 0.

Figura 6.3.3-Kappa por classe para as 6 classificações analisadas. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, sla = imagens Sentinel-1A, sla_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2.

Os tipos de alvos que formam as classes outros (praia, duna e planície arenosa) e a classe p. hipersalina são alvos que sofrem mudanças com escala temporal pequena, como já descrito no capítulo 4. Tais mudanças estão relacionadas, principalmente, ao teor de umidade e no caso especial da classe outros, ao deslocamento e podem ocasionar a dificuldade de classificação confirmada pelos valores de acurácia do usuário para todas as classificações sendo menor que 0,20 e 0,52, para p. hipersalina e outros, respectivamente. A confusão entre classes também pode ter influenciado este resultado principalmente para a classe planície hipersalina com a classe mangue anão. Estes erros foram analisados de forma detalhada através do gráfico de Discordância Global (Pontius & Millones 2011) no qual os mesmos são divididos em erros de quantidade e erros de alocação (permuta e mudança) por classe (Figura 6.3.4).

Figura 6.3.4-Erro de discordância global (quantidade, permuta e mudança) por classe para os seis modelos analisados. As classes são enumeradas como segue: 1 – Mangue, 2 – M. anão, 3 – Planície hipersalina , 4 – Água, 5 – Campos e 6 – Outros. As siglas correspondem a tipos diferentes de recursos de entrada dos modelos: all = todos os sensores, plsr = imagens PALSAR1/2, s1a = imagens Sentinel-1A, s1a_plsr = imagens Sentinel-1A e PALSAR1/2

De maneira geral, a classe mangue anão apresentou os maiores valores de discordância global, seguido das classes mangue, outros e planície hipersalina. Os erros em sua maioria são associados ao tipo permuta, caso em que acontece troca das amostras. Ou seja, A é classificada como B e vice-versa. Para verificar entre quais classes houve este erro, as matrizes de confusão (Anexo 6.5) foram consultadas e constatado que o erro ocorreu principalmente entre a classe mangue anão e as classes mangue, outros e planície hipersalina, sendo que com a classe planície hipersalina prevaleceu o erro de quantidade. Tal erro para a classe planície hipersalina confirma o baixo valor de Kappa da classe (Figura 6.3.3) e a hipótese de este estar relacionado à confusão, pois neste tipo de erro amostras da classe são classificadas como outras classes ocasionando, por exemplo, valores de Kappa zero. Já para a classe outros houve alguns erros de mudança contudo, a maioria dos erros de quantidade ocorrem com a classe mangue anão. É importante salientar que nenhuma classe apresentou erro de discordância global superior a 10%.

O erro de discordância global para a classe mangue anão pode estar relacionada à forma de amostragem, visto que para esta classe há uma malha de pontos muito concentrada, o que pode causar redundância e afetar o desempenho da classificação. Além da similaridade em termos de retroespalhamento. A classe mangue anão com os bosques de mangue menos desenvolvidos. O resultado com relação à classe planície hipersalina que teve erros de quantidade associado à classe mangue anão e com a classe outros, é inesperado, porém, pode demonstrar alguma similaridade das classes com relação ao conteúdo de mistura do solo como demonstrado por Wang (1995), todavia tal fato não foi elucidado.

Com relação ao método de classificação RF, este se mostrou eficiente e poderoso para lidar com alto número de variáveis. A facilidade da formulação com poucos parâmetros a serem definidos também faz deste um método com elevada qualidade.

Diante do exposto, a classificação baseada nas variáveis S-1A e PALSAR1/2, *s1a_plsr_2*, seria a mais indicada entre as seis analisadas, visto que obteve o maior índice Kappa, as acurácias por classe tiveram valores altos (acima de 0,80) para quase todas as classes além da questão da parcimônia deste em relação aos modelos com maior acurácia global (*all_2* e *all_5*) e menor Kappa.

6.4 CONCLUSÃO

As imagens TS-X e RST-2 e suas derivadas foram as variáveis que resultaram em modelos com maiores erros quando utilizadas sozinhas. Quando em conjunto com outras imagens com frequências diferentes tiveram sempre os menores valores de importância para os modelos. Este baixo desempenho pode estar relacionado a não disponibilidade da variável temporal que constitui uma variável importante na distinção das classes. As imagens PALSAR apresentaram a segunda maior importância nos modelos, auxiliando na distinção das classes, sendo a variável na polarização HV a que esteve presente nos três modelos com melhor acurácia global. No entanto, o filtro multi-temporal aplicado pode ter prejudicado o desempenho destas imagens, com excesso de suavização e conseqüente multicolinearidade.

As imagens S-1A estiveram presentes como variáveis mais importantes em todos os modelos em que foram inseridas. A utilização das médias trimestrais ao longo de um ano influenciou no potencial destas variáveis, bem como a resolução espacial de 10 m que oferece maior detalhe quando comparada à resolução das imagens PALSAR. A adição de imagens da mesma banda em diferentes estações do ano apresentou também um bom potencial para a separação da vegetação de gramínea (campos). Além disso, foi possível diferenciar o papel das polarizações: a polarização VV se destacou por distinguir diferentes tipos de vegetação e a polarização VH, os corpos d'água. Sendo assim, apesar dos bons valores de índice Kappa, este sensor apresentou alto potencial para o mapeamento, principalmente por disponibilizar imagens com resolução temporal de 12 dias, de forma contínua e de livre acesso.

Com relação às classes com maiores erros, a classe mangue anão apresentou discordância global (até 10%) mais alta que as demais, principalmente no tipo permuta com as classes mangue, planície hipersalina e outros, sendo que as duas últimas tiveram os menores índices Kappa por classe em todas as classificações. Por outro lado, a classe mangue apresentou discordância global de, no máximo, 5% e índice Kappa maior que 0,90 em todas as classificações. Por fim, o modelo *s1a_plsr_2*, baseado nas variáveis S-1A e PALSAR é o mais indicado entre o resultado das seis classificações analisadas, visto que obteve o maior índice Kappa, as acurácias por classe tiveram valores altos (acima de 0,80) para quase todas as classes além da questão da parcimônia deste em relação aos modelos com maior acurácia global (*all_2* e *all_5*) e menor Kappa.

7 CAPÍTULO CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Neste capítulo abordaremos os objetivos definidos para os capítulos 4, 5 e 6 e como os mesmos foram alcançados. Na sequência, apresentamos os avanços temáticos fruto do desenvolvimento desta tese. Por fim, apresentamos algumas perspectivas referentes as aplicações de imagens SAR para o estudo dos manguezais.

No **capítulo 4**, a proposta focou na utilização de dados polarimétricos com o objetivo geral: *“Distinguir os gêneros dominantes do manguezal na península de Ajuruteua pela sua resposta polarimétrica e pela análise das decomposições polarimétricas.”* A seguir os objetivos específicos:

- Definir respostas polarimétricas para os ambientes presentes na área de estudo,

As respostas polarimétricas co-polarizadas não apresentaram potencial de distinção entre gêneros pois, apresentaram similaridades entre todas as classes de vegetação arbórea. Estes resultados estão ligados à alta variabilidade estrutural nas classes e alta similaridade entre classes, esta última associada ao comprimento de onda.

- Utilizar parâmetros quantitativos como a altura de pedestal e/ou coeficiente de variação para diferenciar as classes,

Apenas o coeficiente das classes formadas por R. mangle apresentaram valores coerentes com o esperado. No entanto, todos os valores de altura de pedestal e coeficiente de variação não foram estatisticamente significativos.

- Identificar os mecanismos de espalhamento de cada classe e qual difere os bosques das demais classes presentes na região,

No Plano H-Alpha apenas a classe campo apresentou valores de H que a diferenciaram das demais classes. No caso dos valores de espalhamento volumétrico, *double-bounce* e superficial, as parcelas de vegetação apresentaram valores coerentes com o comprimento de onda, com alto valor de espalhamento volumétrico, porém, nenhuma classe apresentou médias com variâncias significativamente diferentes.

Na banda C, o mais indicado seria trabalhar com dados de abertura de dossel e estágios

de vegetação. Estes talvez apresentariam maior distinção através das classificações por decomposição polarimétrica, além de imagens em maior comprimento de onda como na banda L.

No **capítulo 5** investigamos “*O potencial das imagens Sentinel-1A na definição de uma assinatura temporal de floresta de mangue e seu o auxílio na estimativa da biomassa*”. Para alcançar tal objetivo estabelecemos os seguintes objetivos específicos:

- Recuperar os valores de retroespalhamento médio para cada parcela,

O comportamento do σ° nas duas polarizações foi similar e não apresentou diferenças com relação a valores de biomassa total, resultado da saturação na banda C.

- Analisar dados temporais de precipitação e maré para a interpretação da série temporal,

Os valores de retroespalhamento apresentaram grande influência das condições ambientais pelo teor de umidade na época chuvosa e maré de equinócio (março) e indiretamente pela ação da precipitação no ciclo fenológico da vegetação de mangue.

- Analisar as possíveis transformações dos valores de retroespalhamento na série temporal,

Com a razão de polarização $\sigma^\circ_{VH}/\sigma^\circ_{VV}$ foi possível diminuir as influências da superfície adjacente resultando em um comportamento que pode ser reflexo da dinâmica do dossel dos manguezais da região, apesar da oscilação pequena (1,5 dB).

De maneira geral, as imagens SAR Sentinel-1A são promissoras para o monitoramento da vegetação de mangue visto sua sensibilidade a mudanças no dossel. Trabalhos futuros visam a verificação do comportamento em regiões com ângulos de incidência maiores e a relação da série temporal da razão de polarização com dados de NDVI.

No **capítulo 6** trabalhamos com “*O uso imagens de SAR multifrequência e multipolarização na classificação de manguezais através de classificador Random Forest*”. Este capítulo teve como objetivos específicos:

- Analisar o uso de séries temporais no sucesso das classificações,

As médias trimestrais de imagens Sentinel-1A ao longo de um ano foram selecionadas nos 6 melhores modelos e nestes sempre foram as variáveis mais importantes. A adição de imagens da mesma banda em estações diferentes apresentou potencial para a separação dos tipos de vegetação. Foi possível diferenciar o papel das polarizações, a polarização VV se destacou por diferenciar os tipos de vegetação e a polarização VH, por discriminar os corpos d'água. As imagens PALSAR apresentaram a segunda maior importância nos modelos, auxiliando na distinção das classes.

- Analisar quais as classes apresentam maior desafio para este tipo de abordagem e se a classe mangue, principal interesse, pode ser definida com acurácia.

A classe mangue não apresentou os maiores erros de discordância global (até 10%), principalmente no tipo permuta com as classes mangue, planície hipersalina e outros, sendo que as duas últimas tiveram os menores índices Kappa por classe em todas as classificações.

Por outro lado, a classe mangue apresentou discordância global de, no máximo, 5% e índice Kappa maior que 0,90 em todas as classificações.

- Analisar o classificador Random Forest para este tipo de abordagem.

O classificador RF se mostrou eficiente e poderoso para lidar com alto número de variáveis e, principalmente, de formulação amigável com poucos parâmetros a serem definidos.

- Discutir a acurácia e a aplicabilidade do modelo definido,

O modelo selecionado *s1a_plsr_2* para a classificação obteve o maior índice Kappa (53,7). O kappa por classe teve valores acima de 0,80 exceto para as classes outros e planície hipersalina. Além disso, considerando a parcimônia do modelo, este possui menos variáveis e tempo de processamento em relação aos modelos *all_2* e *all_5*, com maior acurácia global e menor Kappa.

Com base nos objetivos e os resultados acima expostos pontuamos a seguir os seguintes **avanços na temática:**

A abordagem por gênero de mangue, mesmo com elevado n amostral, não produz

diferenças significativas para a distinção dos gêneros através de técnicas polarimétricas, quer seja resposta polarimétrica ou técnicas de decomposição.

Com relação ao potencial das imagens Sentinel-1A no estudo dos manguezais dois avanços podem ser ressaltados: definição de uma assinatura temporal para os manguezais baseada na razão de polarização $\sigma^{\circ}_{VH}/\sigma^{\circ}_{VV}$ e o uso de imagens trimestrais de estações diferentes para a classificação das florestas de mangue.

Quanto a temática de estimativa de biomassa, através de relações σ° -estrutura da vegetação, podemos concluir que uma abordagem direta com os valores de σ° das imagens Sentinel-1A é comprometida mesmo para bosques homogêneos e com valores de biomassa abaixo do nível de saturação visto a relação com o ciclo sazonal e variações derivadas das condições ambientais.

Finalmente, foi reconhecido o potencial de uso das imagens SAR para o mapeamento das florestas de mangue principalmente quando utilizadas séries temporais de sensores nas bandas C e L através de técnicas de aprendizado de máquina.

As **perspectivas** envolvem algumas análises que auxiliariam na discussão das respostas encontradas neste trabalho, como: dados de abertura do dossel para a análise da decomposição polarimétrica, série temporal do NDVI na análise da assinatura temporal da floresta de mangue. Além de verificar a assinatura em imagens com ângulos de incidência diferentes, sobretudo os maiores. Nas classificações, visando maior acurácia, explorar dados de textura das imagens SAR.

Além destas análises ligadas diretamente aos resultados aqui apresentados, a perspectiva de acesso a dados em banda P é promissora para o avanço dos estudos das florestas, principalmente em temáticas de estimativa de biomassa. O satélite na banda P será lançado em 2022 no âmbito da missão BIOMASS (ESA) e de acordo com Le Toan *et al.* (2011) visa medir a biomassa florestal global para melhor entender a ciclagem do carbono terrestre através de dados polarimétricos na banda P que proverão: medidas da biomassa acima do solo das florestas tropicais do mundo pela combinação de técnicas de medidas SAR complementares, produtos geofísicos e cobertura global da floresta que vai possibilitar, além do mapeamento da biomassa, detectar as mudanças na biomassa florestal.

REFERÊNCIAS

- Alongi, D.M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, **29**, <https://doi.org/10.1017/S0376892902000231>.
- Alongi, D.M. 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **76**, 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>.
- Asp, N.E., Freitas, P.T.A. de, Gomes, V.J.C. & Gomes, J.D. 2013. Hydrodynamic overview and seasonal variation of estuaries at the eastern sector of the Amazonian coast. *Journal of Coastal Research*, **165**, 1092–1097, <https://doi.org/10.2112/SI65-185.1>.
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C. & Silliman, B.R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, **81**, 169–193.
- Belgiu, M. & Drăguț, L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **114**, 24–31, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- Bispo, P.C. 2012. *Efeitos de Geomorfometria Na Caracterização Florístico-Estrutural Da Floresta Tropical Na Região Do Tapájos Com Dados SRTM e PALSAR*. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Blasco, F., Gauquelin, T., Rasolofoharino, M., Denis, J., Aizpuru, M. & Caldirou, V. 1998. Recent advances in mangrove studies using remote sensing data. *Marine and Freshwater Research*, **49**, 287–296.
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning*, **45**, 5–32, <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- CCRS, N.R. 2012. Educational Resources <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/9271>.
- Cloude, S.R. & Pottier, E. 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **34**, 498–518, <https://doi.org/10.1109/36.485127>.
- Cloude, S.R. & Pottier, E. 1997. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **35**, 68–78.
- Cougo, M., Souza-Filho, P., et al. 2015. Radarsat-2 Backscattering for the Modeling of Biophysical Parameters of Regenerating Mangrove Forests. *Remote Sensing*, **7**, 17097–17112, <https://doi.org/10.3390/rs71215873>.

- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A. & Boyd, R. 1992. Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Research*, **62**, 1130–1146, <https://doi.org/10.1306/D4267A69-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M. & Souza-Filho, P.W.M. 2019. Brazilian Mangrove Status: Three Decades of Satellite Data Analysis. *Remote Sensing*, **11**, 808, <https://doi.org/10.3390/rs11070808>.
- Dittmar, T., Hertkorn, N., Kattner, G. & Lara, R.J. 2006. Mangroves, a major source of dissolved organic carbon to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, **20**, n/a-n/a, <https://doi.org/10.1029/2005GB002570>.
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. & Kanninen, M. 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, **4**, 293–297, <https://doi.org/10.1038/ngeo1123>.
- Duke, N.C. 2013. Mangrove Floristics and Biogeography. In: *Tropical Mangrove Ecosystems*. American Geophysical Union (AGU), 63–100., <https://doi.org/10.1029/CE041p0063>.
- Duke, N.C., Ball, M. & Ellison, joana. 1998. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecology & Biogeography Letters*, **7**, 27–47.
- Duke, N.C., Meynecke, J.-O., et al. 2007. A World Without Mangroves? *Science*, **317**, 41–42, <https://doi.org/10.1126/science.317.5834.41b>.
- Ellison, A.M., Farnsworth, E.J. & Merkt, R.E. 1999. Origins of mangrove ecosystems and the mangrove biodiversity anomaly. *Global Ecology and Biogeography*, **8**, 95–115, <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.1999.00126.x>.
- Ellison, J.C. 2008. Long-term retrospection on mangrove development using sediment cores and pollen analysis: A review. *Aquatic Botany*, **2**, 93–104, <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.02.007>.
- Fernandes, M.E.B. 1999. Phenological patterns of *Rhizophora* L., *Avicennia* L. and *Laguncularia* Gaertn. f. in Amazonian mangrove swamps. *Hydrobiologia*, **413**, 53–62, <https://doi.org/10.1023/A:1003866108086>.
- Fernandes, M.E.B., Nascimento, A.A.M. do & Carvalho, M.L. 2007. Estimativa da produção anual de serapilheira dos bosques de mangue no Furo Grande, Bragança-Pará. *Revista Árvore*, **31**, 949–958, <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000500019>.
- Ferreira, A.C. & Lacerda, L.D. 2016. Degradation and conservation of Brazilian mangroves, status and perspectives. *Ocean & Coastal Management*, **125**, 38–46, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.03.011>.
- Fisch, G., Marengo, J.A. & Nobre, C.A. 1998. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *ACTA AMAZONICA*, 101–126.

- Freeman, A. & Durden, S.L. 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 963–973.
- Frison, P.-L., Fruneau, B., et al. 2018. Potential of Sentinel-1 Data for Monitoring Temperate Mixed Forest Phenology. *Remote Sensing*, **10**, 2049, <https://doi.org/10.3390/rs10122049>.
- Gardunho, D. 2017. *Equações Alométricas Para Estimativa de Biomassa Nas Espécies Arbóreas Da Península de Ajuruteua*. Doutorado.
- Giri, C. 2016. Observation and Monitoring of Mangrove Forests Using Remote Sensing: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*, **8**, 783, <https://doi.org/10.3390/rs8090783>.
- Giri, C., Ochieng, E., et al. 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data: Status and distributions of global mangroves. *Global Ecology and Biogeography*, **20**, 154–159, <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>.
- Gomes, V.J.C., Freitas, P.T.A. & Asp, N.E. 2013. Dynamics and seasonality of the middle sector of a macrotidal estuary. *Journal of Coastal Research*, **165**, 1140–1145, <https://doi.org/10.2112/SI65-193.1>.
- Gonçalves, F.G. 2007. *Avaliação de Dados SAR Polimétricos Para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais*. Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Gorini, M.A. & Bryan, G.M. 1976. The tectonic fabric of the Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to northeastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **48**, 101–119.
- Hamilton, S.E. & Friess, D.A. 2018. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, **8**, 240, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>.
- Held, A., Ticehurst, C., Lymburner, L. & Williams, N. 2003. High resolution mapping of tropical mangrove ecosystems using hyperspectral and radar remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, **24**, 2739–2759, <https://doi.org/10.1080/0143116031000066323>.
- Henderson, F.M. & Lewis, A.J. 2008. Radar detection of wetland ecosystems: a review. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 5809–5835, <https://doi.org/10.1080/01431160801958405>.
- Hogarth, P.J. 1999. *The Biology of Mangroves and Seagrasses*. Oxford University Press, New York.
- Imhoff, M.L. 1995. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, **33**, 511–518, <https://doi.org/10.1109/36.377953>.

- Jimenez, J.A., Lugo, A.E. & Cintron, G. 1985. Tree mortality in mangrove forests. *Biotropica*, 177–185.
- Kasischke & Bourgeau-Chavez, L. 1997. Monitoring South Florida wetlands using ERS-1 SAR imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, [https://doi.org/0099-1112/97/6303-281\\$3.00/](https://doi.org/0099-1112/97/6303-281$3.00/).
- Kathiresan, K. 2005. 3. Mangrove Ecosystems 3.1. Distribution of Mangroves. *K. Kathiresan Biodiversity of Mangrove Ecosystems/K. Kathiresan and SZ Qasim. New Delhi, Hindustan Pub.,, xii.*
- Kathiresan, K. & Bingham, B.L. 2001. Biology of Mangroves. *In: Advances in Marine Biology*. University of New Hampshire, Durham, M. Lesser.
- Kovacs, J.M., Vandenberg, C.V. & Flores-Verdugo, F. 2006. Assessing fine beam RADARSAT-1 backscatter from a white mangrove (*Laguncularia racemosa* (Gaertner)) canopy. *Wetlands Ecology and Management*, **14**, 401–408, <https://doi.org/10.1007/s11273-005-6237-x>.
- Kovacs, J.M., Jiao, X., Flores-de-Santiago, F., Zhang, C. & Flores-Verdugo, F. 2013. Assessing relationships between Radarsat-2 C-band and structural parameters of a degraded mangrove forest. *International Journal of Remote Sensing*, **34**, 7002–7019, <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.813090>.
- Krause, G. & Bock, M. 2010. Synoptic Analysis of Mangroves for Coastal Zone Management. *In: Mangrove Dynamics and Management in North Brazil*. U. Saint-Paul and H. Schneider, 153–167.
- Lang, S., Schöpfer, E. & Langanke, T. 2009. Combined object-based classification and manual interpretation—synergies for a quantitative assessment of parcels and biotopes. *Geocarto International*, **24**, 99–114, <https://doi.org/10.1080/10106040802121093>.
- Lara, R.J. 2003. Amazonian mangroves—a multidisciplinary case study in Pará State, North Brazil: Introduction. *Wetlands ecology and management*, **11**, 217–221.
- Lara, R.J., Szlafsztein, C., Cohen, M.C.L., Berger, U. & Glaser, M. 2002. Implications of mangrove dynamics for private and use in bragança, north Brazil: a case study. *Journal of Coastal Conservation*, **8**, 97–102.
- Laurin, G.V., Balling, J., et al. 2018. Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. **12**, 016008, <https://doi.org/10.1117/1.jrs.12.016008>.
- Le Toan, T., Lopes, A. & Huet, M. 1984. On the Relationship between Radar Backscattering Coefficient and Vegetation Canopy Characteristics. *In: Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. ESA, 155-160.

- Leckie, D.G. & Ranson, K.J. 1998. Forestry applications using imaging radar. *In: Principles and Applications of Imaging Radar*. Henderson, F. M.; Lewis, A. J, 435–509.
- Lee, J.S. & Pottier, E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. Boca Ratón.
- 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, <https://doi.org/10.1002/aqc.833>.
- Lugo, A.E. & Snedaker, S.C. 1974. The Ecology of Mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **5**, 39–64, <https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.000351>.
- Lusch, D.P. 1999. Introduction to Microwave Remote Sensing.
- Martins, E. do S., Souza Filho, P.W., Costa, F.R. & Alves, P.J.O. 2006. Extração automatizada e caracterização da rede de drenagem e das bacias hidrográficas do nordeste do Pará ao noroeste do Maranhão a partir de imagens SRTM. *In: Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, INPE.
- MDA. 2011. RADARSAT-2 Product Description.
- Mehlig, U. 2006. Phenology of the red mangrove, *Rhizophora mangle* L., in the Caeté Estuary, Pará, equatorial Brazil. *Aquatic Botany*, **84**, 158–164.
- Mehlig, U., Menezes, M.P.M. de, Reise, A., Schories, D. & Medina, E. 2010. Mangrove vegetation of the Caeté estuary. *In: Mangrove Dynamics and Management in North Brazil*. Ulrich Saint-Paul and Horacio Schneider.
- Mendes, A.C. 2003. Geomorfologia e Sedimentologia. *In: Fernandes, M. (ed.) Os Manguezais Da Costa Norte*.
- Menezes, M.P.M. de. 2006. *Investigations of Mangrove Forest Dynamics in Amazonia, North Brazil*. University of Bremen.
- Menezes, M.P.M. de & Mehlig, U. 2010. Floristics and forest structure - mangrove vegetation of the Caeté Estuary. *In: Mangrove Dynamics and Management in North Brazil*. U. Saint-Paul and H. Schneider.
- Menezes, M.P.M. de, Berger, U. & Mehlig, U. 2008. Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil. *Acta Amazonica*, **38**, 403–420.
- Monteiro, M.C., Pereira, L.C.C. & Oliveira, S.M.O. 2009. Morphodynamic changes of a macrotidal sand beach in the brazilian Amazon coast (Ajuruteua-Pará). *Journal of Coastal Research(Special Issue 56)*, **SI 56**, 103–107.

- Mougin, E., Proisy, C., Marty, F., Fromard, F., Puig, H., Betoulle, J.L. & Rudant, J.P. 1999. Multifrequency and multipolarization radar backscattering from mangrove forests. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **37**, 94-102.
- Nagelkerken, I., Blaber, S.J.M., et al. 2008. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany*, **89**, 155–185, <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.007>.
- Nascimento, W.R., Souza-Filho, P.W.M., Proisy, C., Lucas, R.M. & Rosenqvist, A. 2013. Mapping changes in the largest continuous Amazonian mangrove belt using object-based classification of multisensor satellite imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **117**, 83–93, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.10.005>.
- Odum, E.P. 1967. *Fundamentals of Ecology*. Saunders.
- Oliveira-Filho, R.R. de, Rovai, A.S., Menghini, R.P., Coelho Júnior, C., Schaeffer Novelli, Y. & Cintrón, G. 2016. On the impact of the Brazilian Forest Code on mangroves: A comment to Ferreira and Lacerda (2016). *Ocean & Coastal Management*, **132**, 36–37, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.002>.
- Pereira, F.R. de S., Kampel, M. & Cunha-Lignon, M. 2016. Mangrove vegetation structure in Southeast Brazil from phased array L-band synthetic aperture radar data. *Journal of Applied Remote Sensing*, **10**, 036021, <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.036021>.
- Pontius, R.G. jr & Millones, M. 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **32**, 4407–4429, <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>.
- Proisy, C., Mougin, E. & 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**, 4197–4210, <https://doi.org/10.1080/01431160110107725>.
- Rodrigues, S.W.P. & Souza-Filho, P.W.M. 2011. Use of Multi-Sensor Data to Identify and Map Tropical Coastal Wetlands in the Amazon of Northern Brazil. *Wetlands*, **31**, 11–23, <https://doi.org/10.1007/s13157-010-0135-6>.
- Rodriguez-Galiano, V.F., Chica-Olmo, M., Abarca-Hernandez, F., Atkinson, P.M. & Jeganathan, C. 2012. Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. *Remote Sensing of Environment*, **121**, 93–107, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.003>.
- Santos, J.R. dos & Gonçalves, F.G. 2009. Polarimetric Responses Patterns and scattering mechanisms of Forest targets from L-Band Radar. *Revista brasileira de Cartografia*.

- Shimada, M., Isoguchi, O., Tadono, T. & Isono, K. 2009. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **47**, 3915–3932, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2023909>.
- Shimada, M., Itoh, T., Motooka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Thapa, R. & Lucas, R. 2014. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010). *Remote Sensing of Environment*, **155**, 13–31, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014>.
- Silva, A. 2010. *Avaliação de Imagens SAR No Mapeamento de Crostas Laterítica Do Depósito N1, Província Mineral de Carajás, Pará*. Doutorado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Silva, D.N.C. 2017. *Estimativa Da Biomassa Acima Do Solo de Uma Floresta Anã de Avicennia Germinans (L.) L. Na Península de Ajuruteua, Bragança, Costa Amazônica Brasileira*. Mestrado, Universidade Federal do Pará.
- Simard, M., Saatchi, S.S. & Grandi, G.D. 2000. The use of decision tree and multiscale texture for classification of JERS-1 SAR data over tropical forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 2310–2321, <https://doi.org/10.1109/36.868888>.
- Simard, M., Zhang, K., et al. 2006. Mapping height and biomass of mangrove forests in everglades National Park with SRTM elevation data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **72**, 299–311.
- Simard, M., Rivera-Monroy, V.H., Mancera-Pineda, J.E., Castañeda-Moya, E. & Twilley, R.R. 2008. A systematic method for 3D mapping of mangrove forests based on Shuttle Radar Topography Mission elevation data, ICESat/GLAS waveforms and field data: Application to Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 2131–2144, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.012>.
- Smith III, T.J., Chan, H.T., McIvor, C.C. & Robblee, M.B. 1989. Comparisons of seed predation in tropical, tidal forests from three continents. *Ecology*, 146–151.
- Soares, M.L.G. & Schaeffer-Novelli, Y. 2005. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **65**, 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.05.001>.
- Soares, M.L.G., Estrada, G.C.D., Fernandez, V. & Tognella, M.M.P. 2012. Southern limit of the Western South Atlantic mangroves: Assessment of the potential effects of global warming from a biogeographical perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **101**, 44–53, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.02.018>.
- Souza Filho. 2000. Tectonic control on the coastal zone geomorphology of the northeastern Pará State. *Brazilian Journal of Geology*, **30**, 527–530.
- Souza Filho, Cohen, M.C.L., Lara, R.J., Lessa, G.C., Koch, B. & Behling, H. 2006. Holocene coastal evolution and facies model of the Bragança macrotidal flat on the Amazon Mangrove Coast, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research*, 306–310.

- Souza Filho, P.W.M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 427–435.
- Souza Filho, P.W.M. & El-Robrini, M. 1996. Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da Planície Costeira Bragantina, Nordeste do Pará, Brasil. *Revista Geonomos*, 4.
- Souza Filho, P.W.M. & Paradella, W.R. 2002. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. *Wetlands Ecology and Management*, 10, 121–130.
- Souza Filho, P.W.M. & Paradella, W.R. 2005. Use of RADARSAT-1 fine mode and Landsat-5 TM selective principal component analysis for geomorphological mapping in a macrotidal mangrove coast in the Amazon Region. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 31, 214–224.
- Souza-Filho, P.W.M. & El-Robrini, M. 2000. Geomorphology of the Bragança Coastal zone, northeastern Pará State. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 518–522.
- Souza-Filho, P.W.M., Lessa, G.C., Cohen, M.C., Costa, F.R. & Lara, R.J. 2009. The Subsiding Macrotidal Barrier Estuarine System of the Eastern Amazon Coast, Northern Brazil. *In: Geology of Brazilian Coastal Barriers*. Springer-Verlag, New York, S.F. Dillenburg and P.A. Hesp, 220.
- 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*, 95, 88–98, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.08.011>.
- Spalding, M., Blasco, F., Field, C.D., International Society for Mangrove Ecosystems, World Conservation Monitoring Centre & International Tropical Timber Organization. 1997. *World Mangrove Atlas*. [Tresaith, Cardigan], International Society for Mangrove Ecosystems.
- Tenório, G.S., Souza-Filho, P.W.M., Ramos, E.M.L.S. & Alves, P.J.O. 2015. Mangrove shrimp farm mapping and productivity on the Brazilian Amazon coast: Environmental and economic reasons for coastal conservation. *Ocean & Coastal Management*, 104, 65–77, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.12.006>.
- Thom, B.G., Wright, L.D. & Coleman, J.M. 1975. Mangrove Ecology and Deltaic-Estuarine Geomorphology: Cambridge Gulf-Ord River, Western Australia. *Journal of Ecology*, 63, 203–232, <https://doi.org/10.2307/2258851>.
- Tomlinson, P.B. 2016. The botany of mangroves. *The botany of mangroves*.
- Touzi, R. 2007. Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 73–84, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176>.

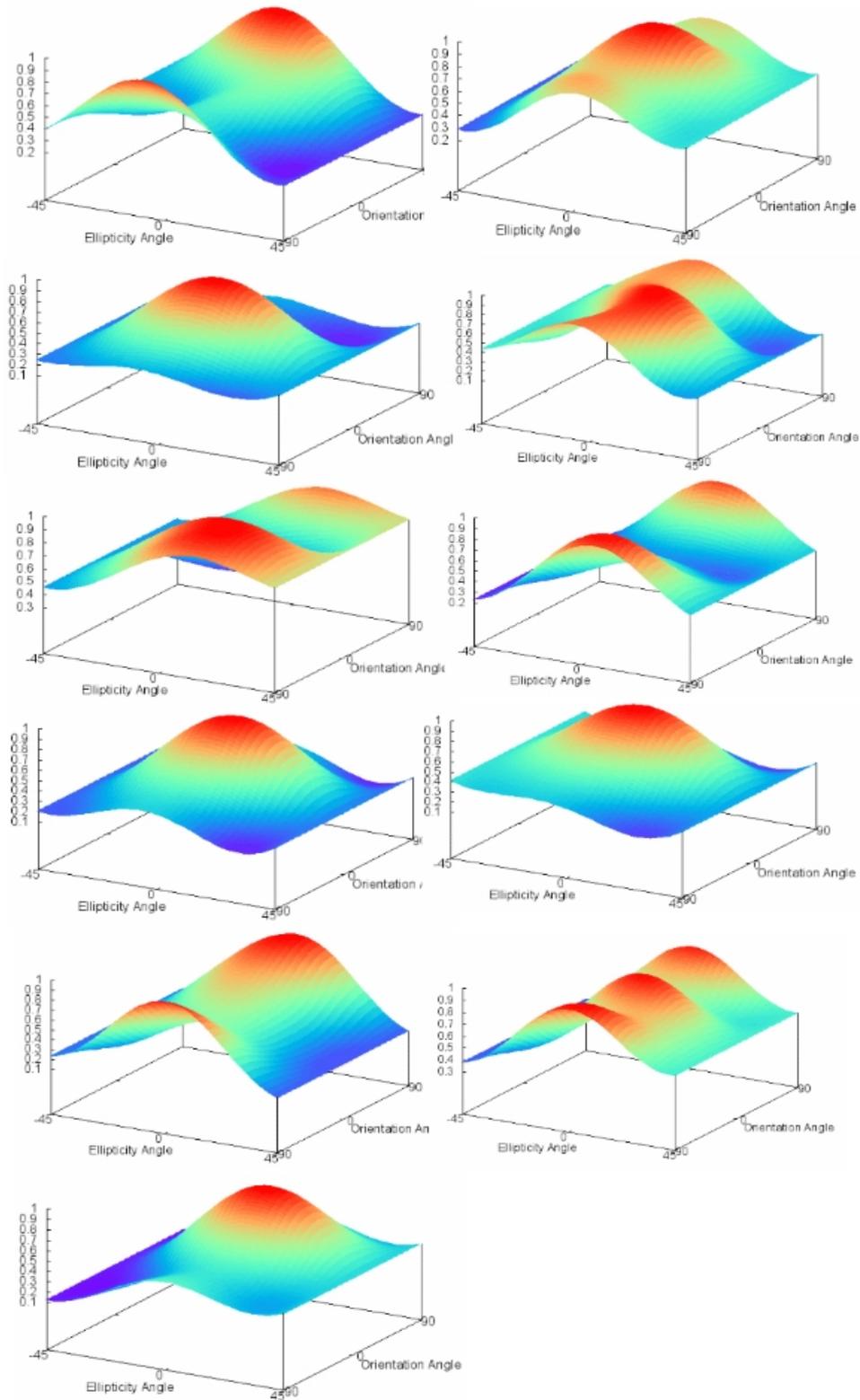
- Touzi, R., Boerner, W.M., Lee, J.S. & Lueneburg, E. 2004. A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **30**, 380–407.
- Townsend, P.A. 2002. Estimating forest structure in wetlands using multitemporal SAR. *Remote Sensing of Environment*, **79**, 288–304, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00280-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00280-2).
- Twilley, R.R. & Rivera-Monroy, V.H. 2005. Developing Performance Measures of Mangrove Wetlands Using Simulation Models of Hydrology, Nutrient Biogeochemistry, and Community Dynamics. *Journal of Coastal Research*, 79–93.
- Ulaby, F.T. & Dobson, M.C. 1989. *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*. Norwood, MA : Artech House.
- van der Sanden, J.J. 1997. *Radar Remote Sensing to Support Tropical Forest Management*. Georgetown, Guyana, Tropenbos- Guyana Programme, Tropenbos Guyana series, **5**.
- Van Zyl, J.J., Zebker, H.A. & Elachi, C. 1987. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. *Radio Science*, **22**, 529–543.
- Voivodic, R.A., Rosa, H.C.M., Gomes, M.T. & Nunes, F.S.B. 2003. Planejamento e Gestão Ambiental na Zona Costeira Brasileira – Uma defesa da escala local. *In: II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas*.
- Vuarnesson, B. 1992. Process and apparatus for representing tidal movement.
- Walters, B.B., Rönnbäck, P., et al. 2008. Ethnobiology, socio-economics and management of mangrove forests: A review. *Aquatic Botany*, **89**, 220–236, <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.02.009>.
- Wang, Y. & Imhoff, M.L. 1993. Simulated and observed L-HH radar backscatter from tropical mangrove forests. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 2819–2828, <https://doi.org/10.1080/01431169308904311>.
- Wang, Y., Hess, L.L., Filoso, 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, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00140-9](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00140-9).
- Werninghaus, R. & Buckreuss, S. 2010. The TerraSAR-X Mission and System Design. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **48**, 606–614, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031062>.
- Woodhouse, I. 2005. *Introduction to Microwave Remote Sensing*, 1st ed. London, UK, Taylor & Francis.

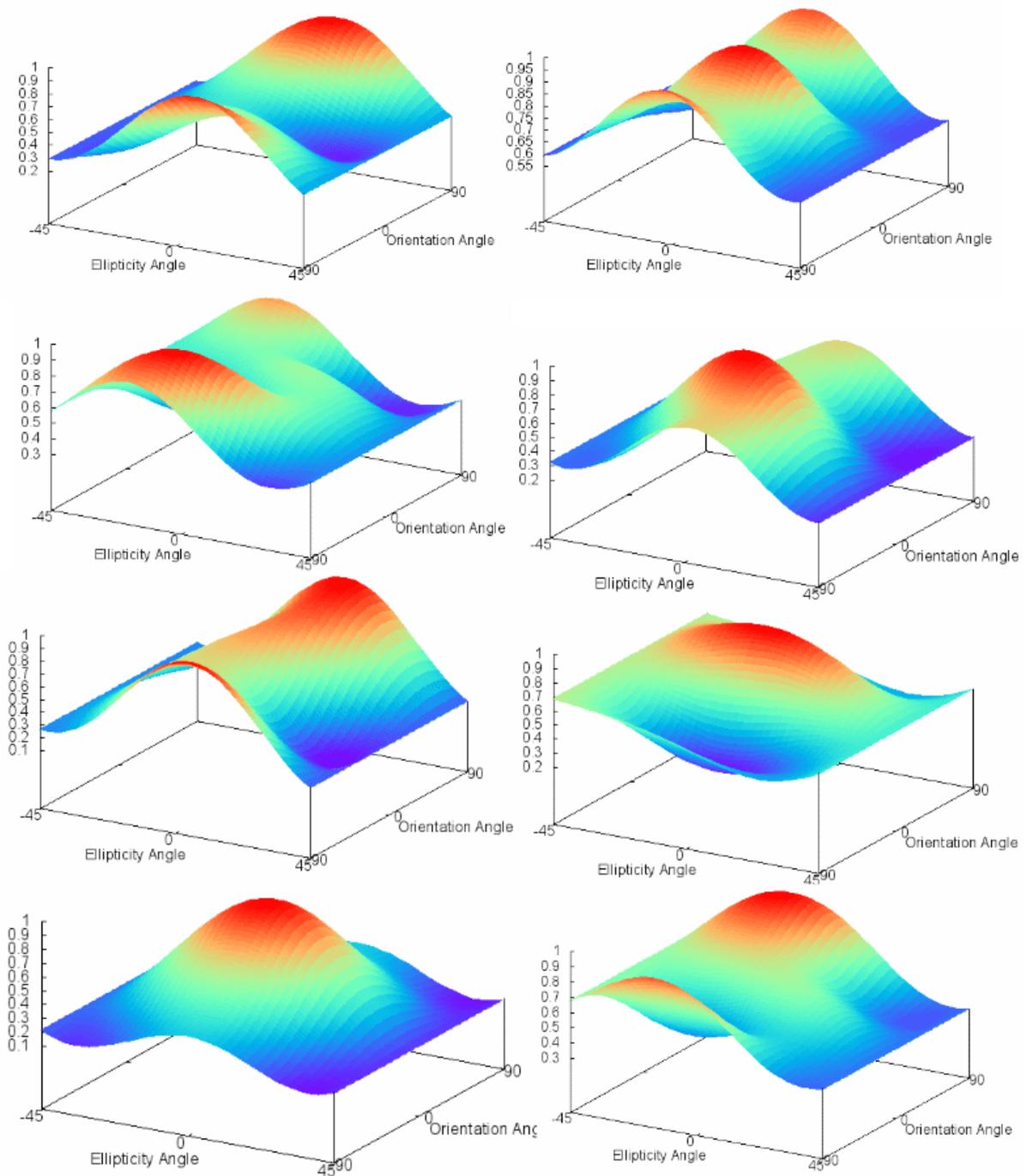
Yuan, J., Lv, X. & Li, R. 2018. A Speckle Filtering Method Based on Hypothesis Testing for Time-Series SAR Images. *Remote Sensing*, **10**, 1383, <https://doi.org/10.3390/rs10091383>.

Zhen, J., Liao, J. & Shen, G. 2018. Mapping Mangrove Forests of Dongzhaigang Nature Reserve in China Using Landsat 8 and Radarsat-2 Polarimetric SAR Data. *Sensors*, **18**, 4012, <https://doi.org/10.3390/s18114012>.

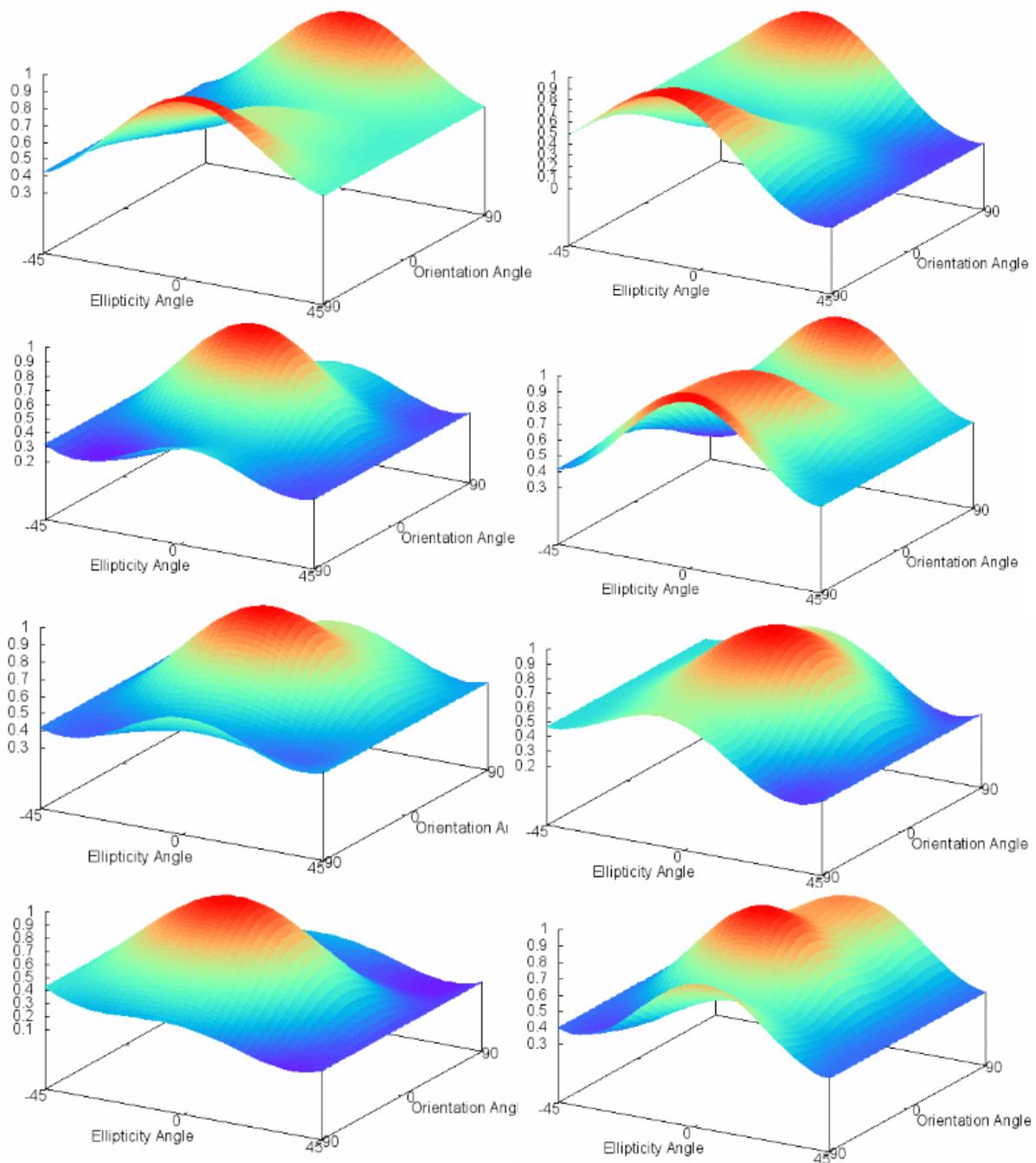
APÊNDICES

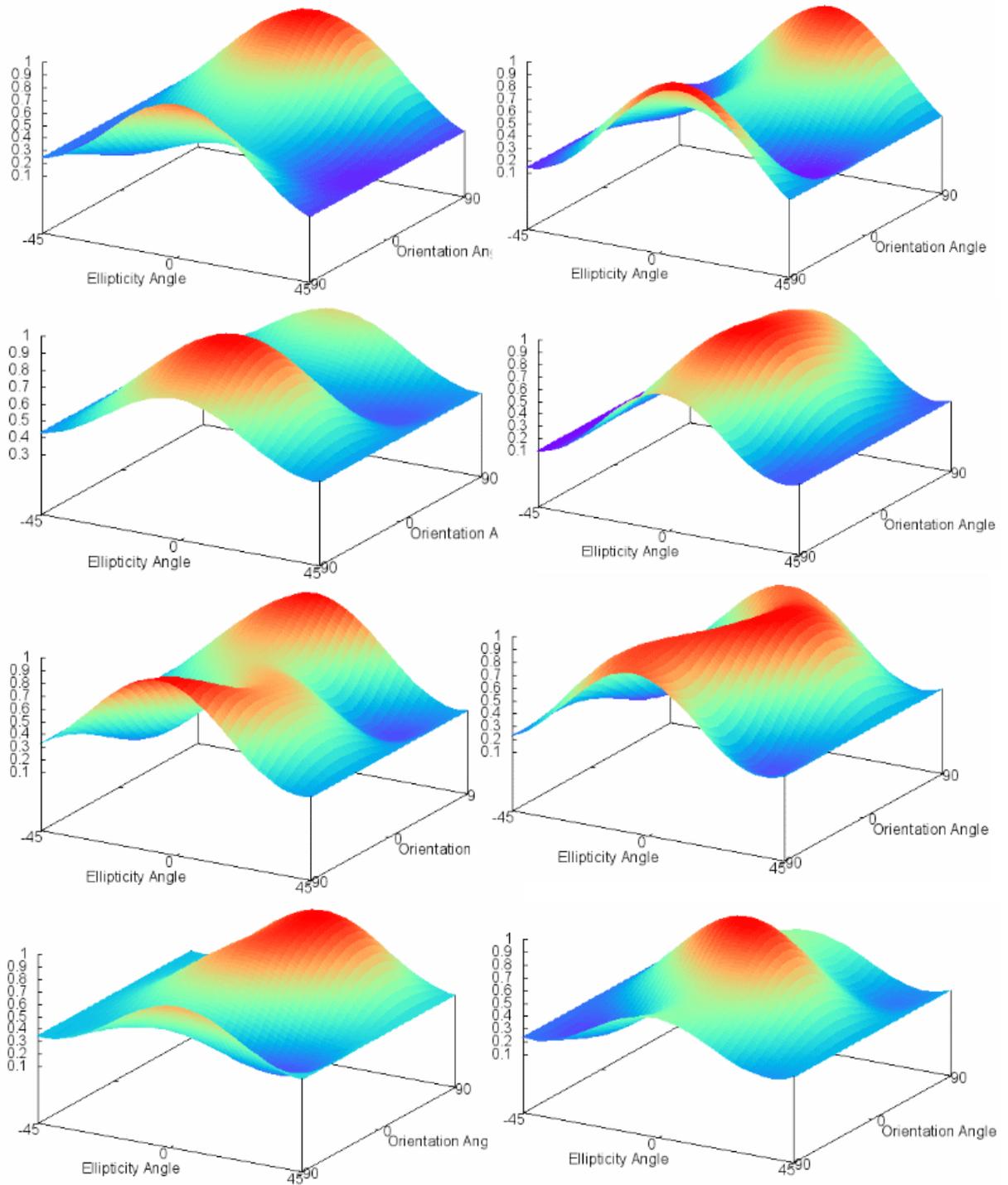
APÊNDICE 4 A – RESPOSTAS POLARIMÉTRICAS

1 – RP da espécie *R. mangle* com DoR 100%.

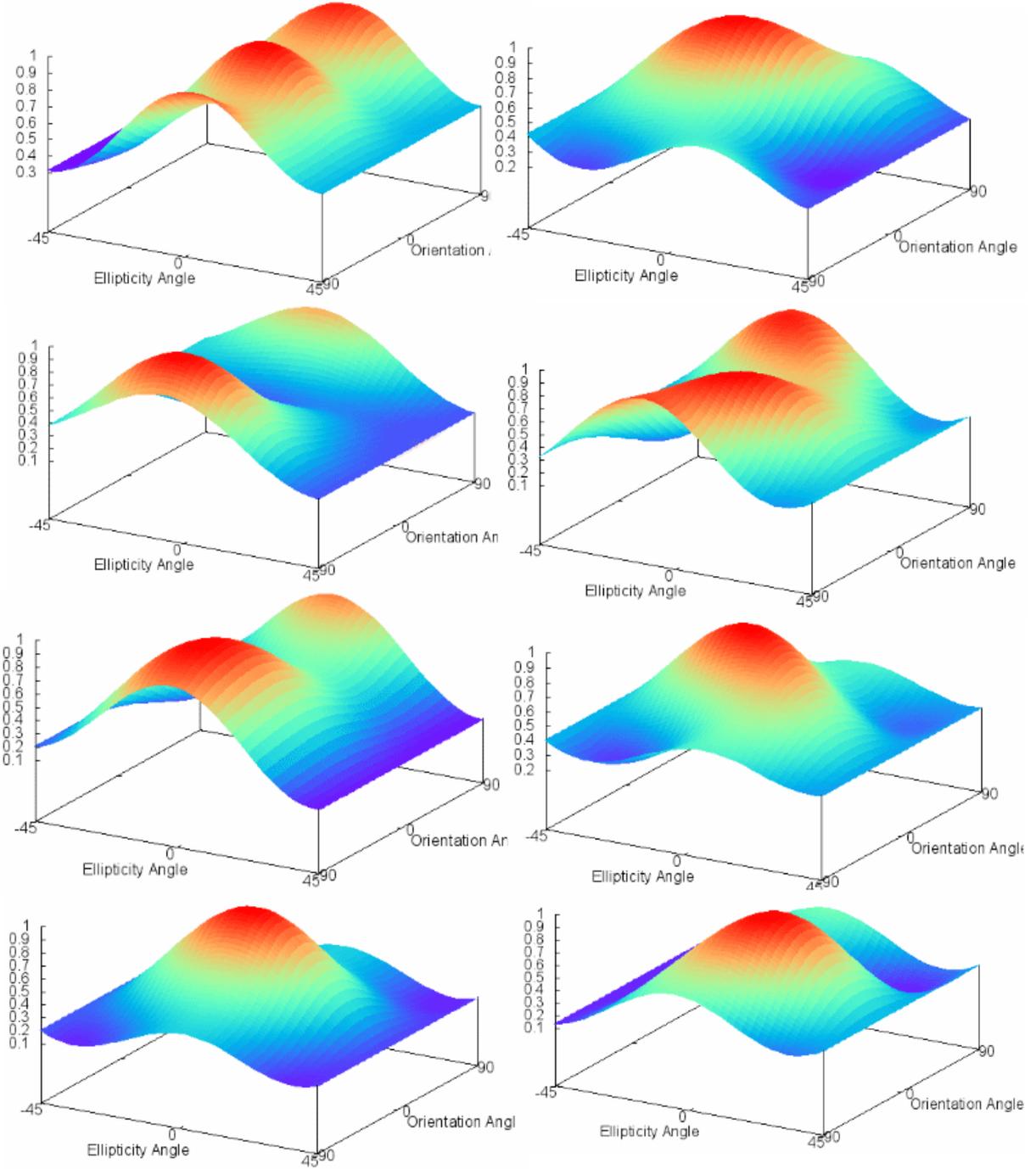
2 – RP da espécie *R. mangle* com DoR 90%.

continua

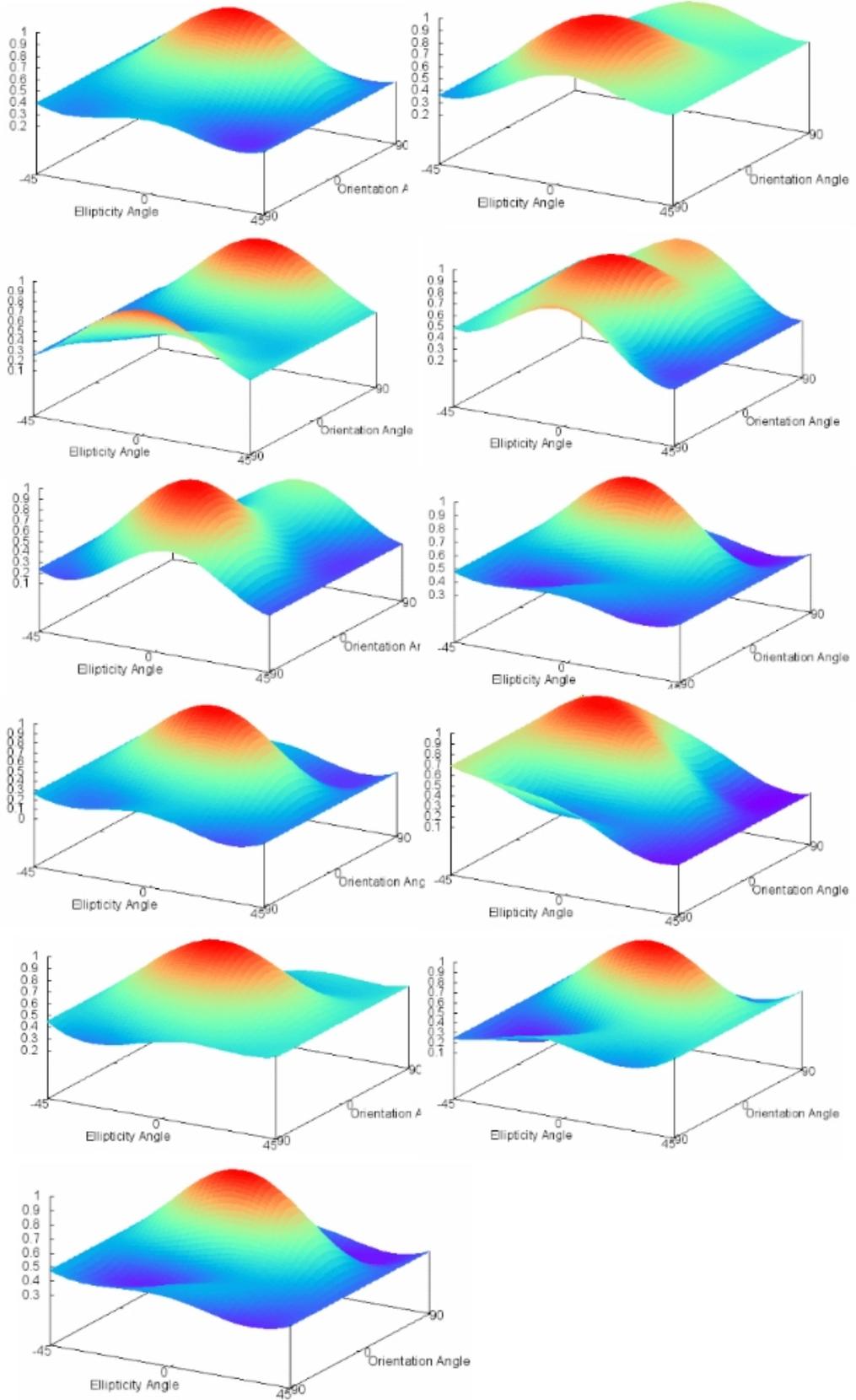


3 – RP da espécie *A. germinans* DoR 90%

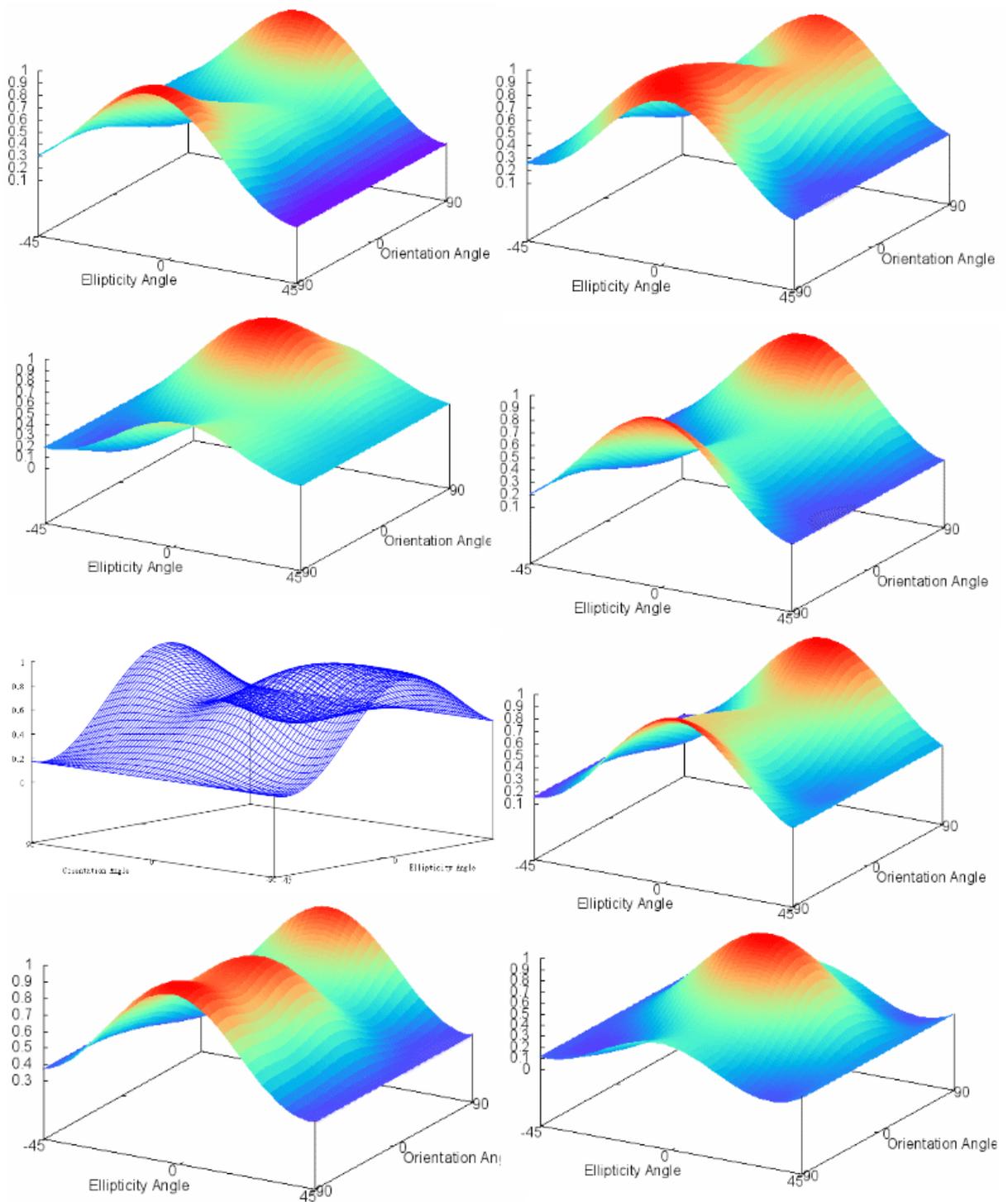
4 – RP da espécie *A. germinans* DoR 80%

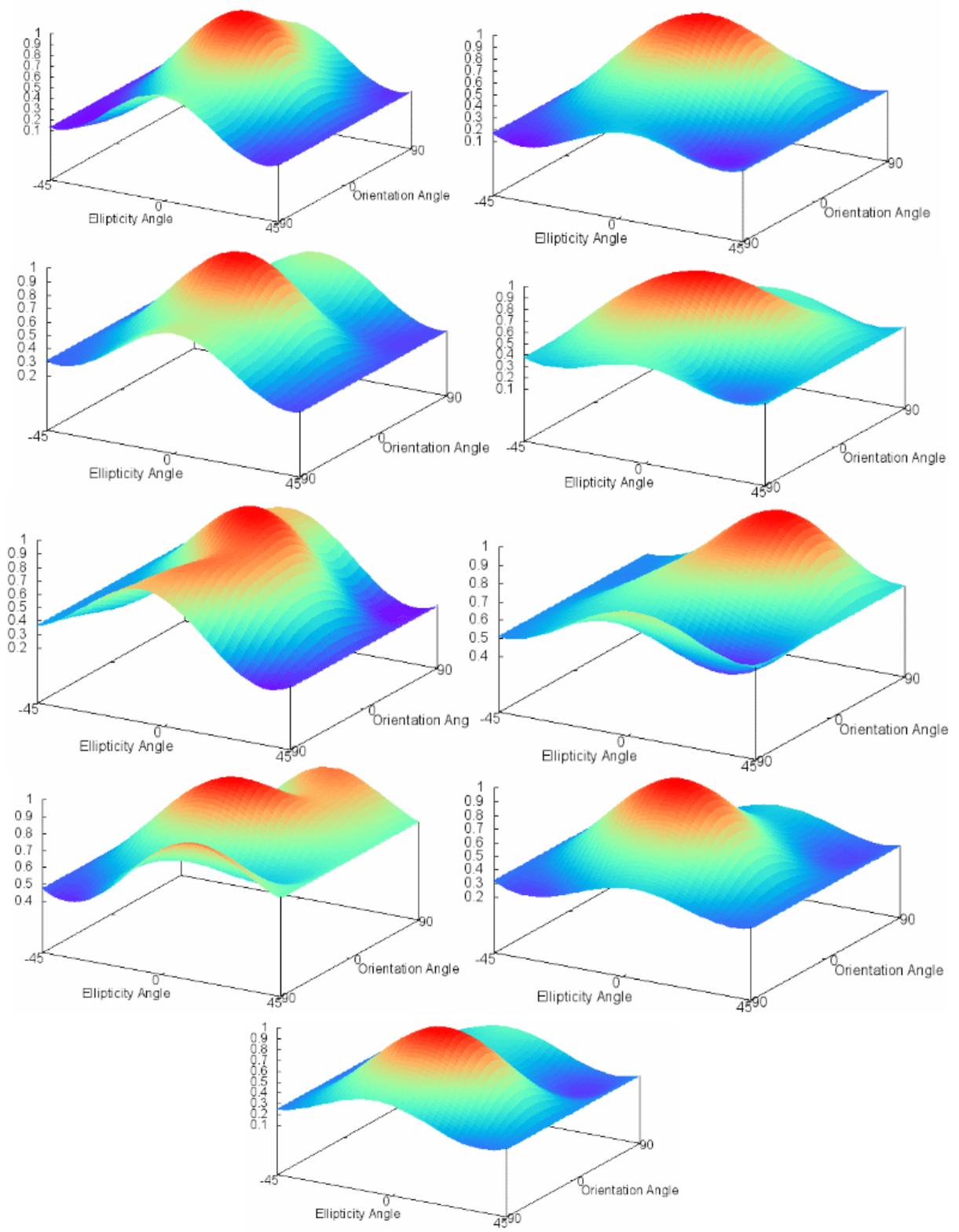


continua

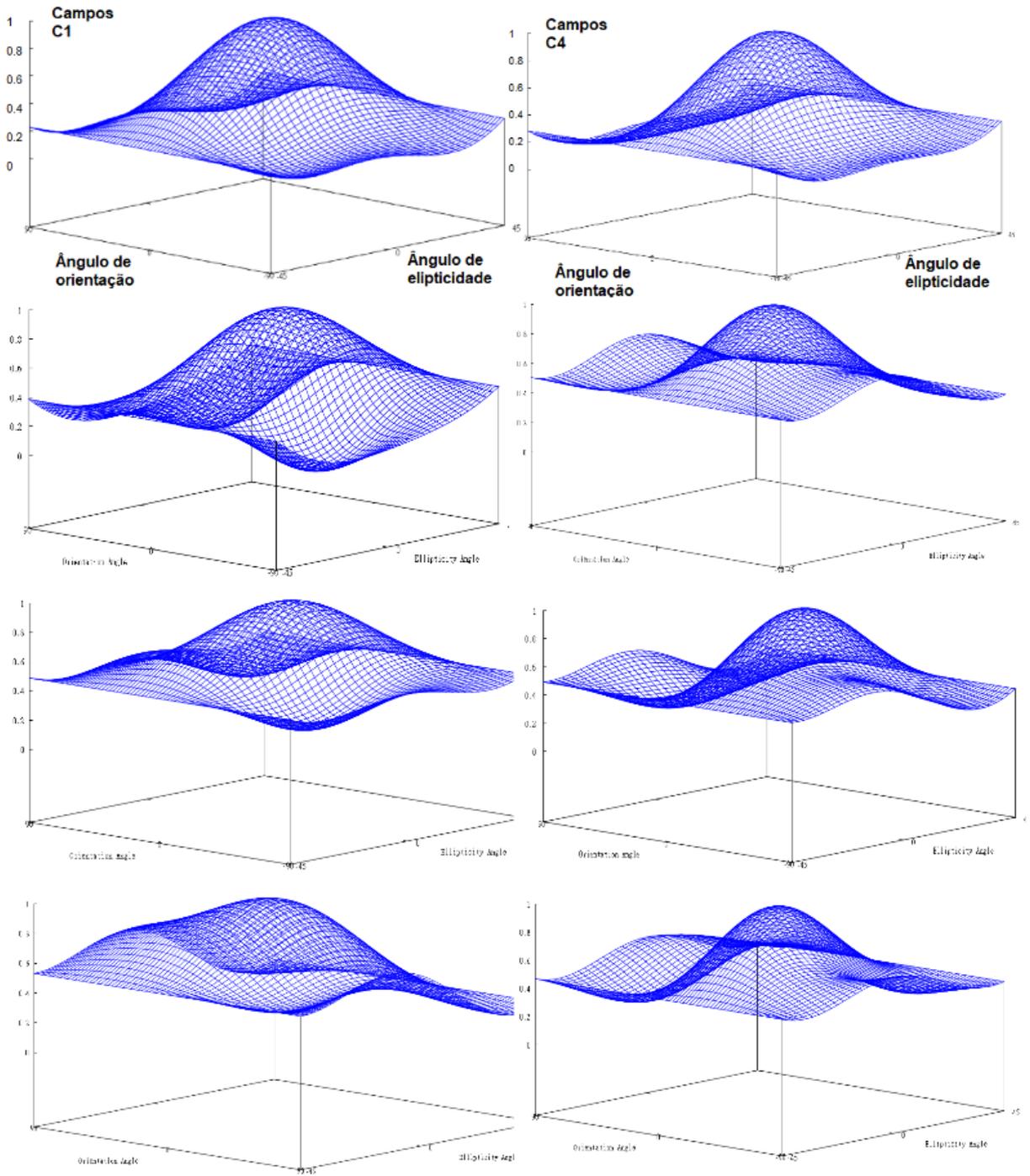


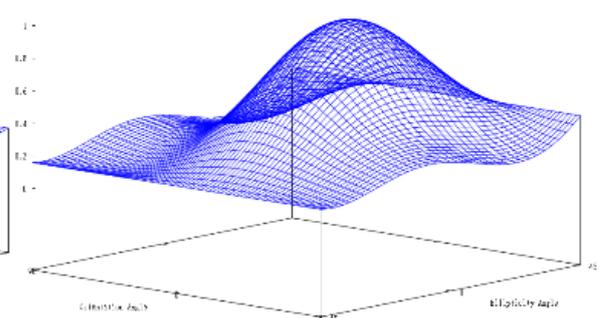
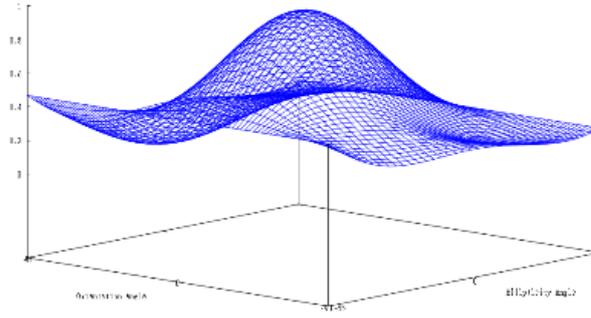
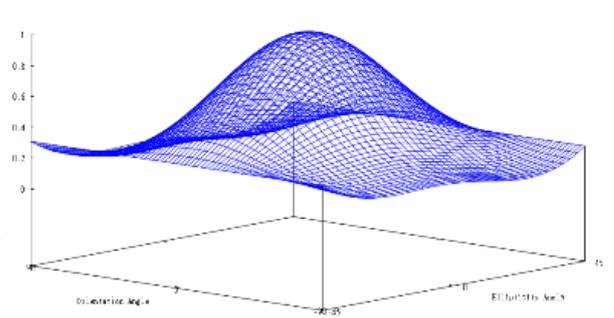
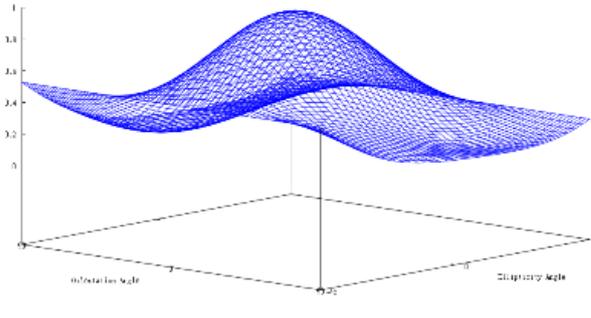
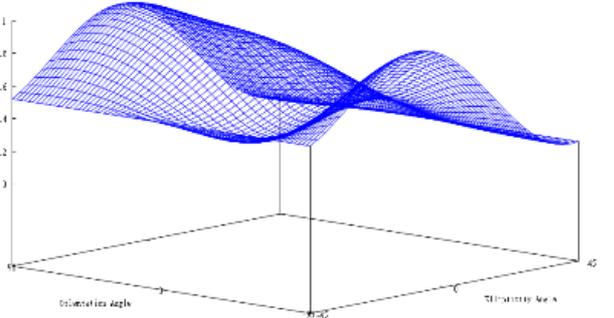
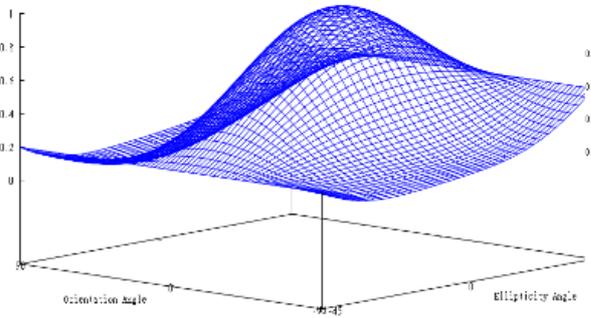
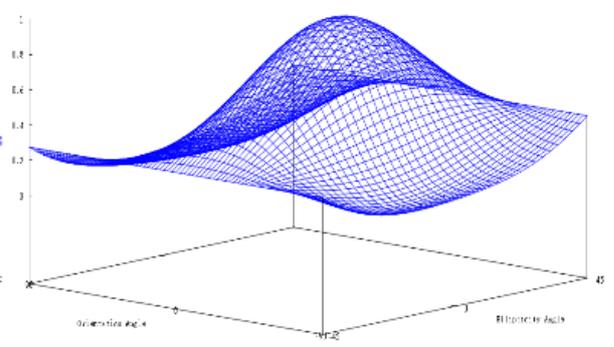
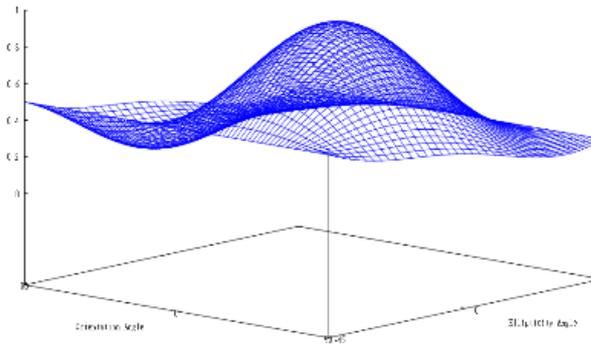
5 – RP da classe Mangue em regeneração



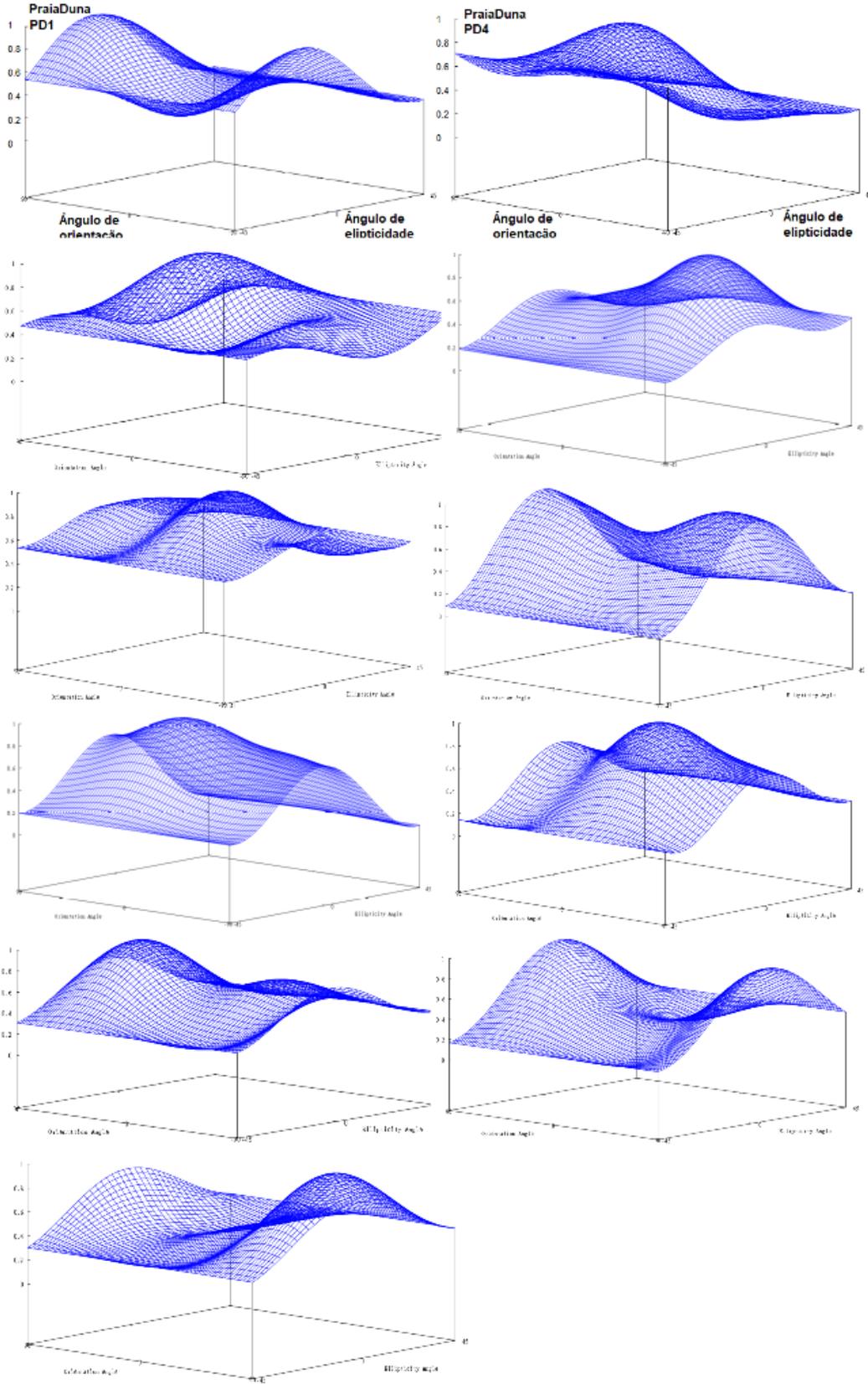


6 – RPs da classe Campos





7 – RPs da classe Praia/duna





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 MICHELE FERREIRA COUGO

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **MICHELE FERREIRA COUGO** orientanda do Prof. Dr. Pedro Walfir Martins e Souza Filho (UFPA), composta pelos professores doutores João Roberto dos Santos (INPE), Moirah Paula Machado de Menezes (UFPA), Nils Edvin Asp Neto (UFPA) e Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada "**O POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO SAR NO MAPEAMENTO, DISCRIMINAÇÃO DE GÊNEROS E ESTUDO DA DINÂMICA DE FLORESTA DE MANGUE NA REGIÃO AMAZÔNICA**", emite o seguinte parecer:

A candidata realizou sua apresentação de forma clara, bem organizada e segura. Na arguição mostrou domínio no processamento e análise de imagens de radar voltadas para o estudo dos manguezais e respondeu perguntas formuladas pela banca. O trabalho escrito foi apresentado na forma tradicional e atende as exigências para uma tese de doutorado.

Finalmente, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 26 de abril de 2019.

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

Prof. Dr. João Roberto dos Santos (INPE)

Prof.^a Dr.^a Moirah Paula Machado de Menezes (UFPA)

Prof. Dr. Nils Edvin Asp Neto (UFPA)

Prof. Dr. Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA)