



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 427

**A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA
VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO NO
RETROESPELHAMENTO DE IMAGENS RADARSAT-2
MULTIPOLARIZADA NA AMAZÔNIA, BRASIL.**

Dissertação apresentada por:

MICHELE FERREIRA COUGO

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

Coorientador: Prof. Arnaldo de Queiroz da Silva (UFPA)

**BELÉM
2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Cougo, Michele Ferreira, 1986-

A influência dos parâmetros biofísicos da vegetação de mangue em regeneração no retroespalhamento de imagens radarsat-2 multipolarizada na Amazônia, Brasil / Michele Ferreira Cougo. - 2013.

Orientador: Pedro Walfir Martins e Souza Filho;

Coorientador: Arnaldo de Queiroz da Silva.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2013.

1. Radar de abertura sintética. 2. Ecologia dos manguezais - Amazônia. 3. Biomassa - Amazônia. I. Título.

CDD 22. ed. 621.3678



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

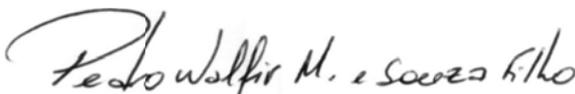
**A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA VEGETAÇÃO
DE MANGUE EM REGENERAÇÃO NO RETROESPELHAMENTO DE
IMAGENS RADARSAT-2 MULTIPOLARIZADA NA AMAZÔNIA,
BRASIL.**

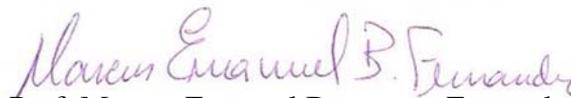
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
MICHELE FERREIRA COUGO

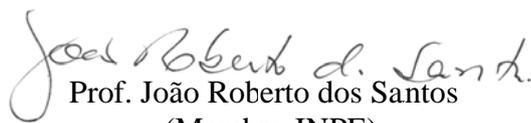
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA.**

Data de Aprovação: 05 / 09 / 2013

Banca Examinadora:


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


Prof. Marcus Emanuel Barroncas Fernandes
(Membro-UFPA)


Prof. João Roberto dos Santos
(Membro-INPE)

Aos meus pais Valmir e Nazionélia.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica – Instituto de Geociências e a Universidade Federal do Pará pela oportunidade de desenvolvimento do mestrado.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Ao projeto “Estudo oceanográfico dos manguezais brasileiros e a formação de recursos humanos qualificados”, financiado pela CAPES, pelo apoio financeiro no desenvolvimento dos trabalhos em campo.

Ao Professor Pedro Walfir por aceitar orientar esta “estranha no ninho” e me receber em seu grupo de pesquisa, por repassar seu conhecimento de maneira elucidativa, pelas conversas sempre esclarecedoras e tranquilizadoras a cerca da pesquisa, pelas oportunidades de crescimento na formação acadêmica e pela compreensão nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Arnaldo de Queiroz pelos ensinamentos sobre RADAR e por todas as orientações, explicações e conversas sempre com paciência.

Ao Professor Marcus pela transferência de conhecimento deste importante ecossistema que é o manguezal, pelas diversas oportunidades de vivenciar o manguezal e também por me acolher junto ao seu grupo de pesquisa no Laboratório de Ecologia de Manguezal (LAMA) durante algumas estadas em Bragança. Agradeço por sua participação em alguns trabalhos de campo e também por aceitar fazer parte da banca examinadora do trabalho. Além de ser grata pelos sempre importantes momentos de descontração.

Ao Professor João Roberto dos Santos por aceitar ser membro da banca examinadora.

Ao Professor Edson Marcos Leal Soares Ramos por todo o apoio e aprendizado com relação às análises estatísticas juntamente com a equipe do Laboratório de Sistema de Informação e Georreferenciamento (LASIG).

Aos colegas e agora amigos do Laboratório de Análise de Imagens do Trópico Úmido-LAIT: Suzan, Diogo, Francisco, Camila, Paulo e Márcio. Em especial aos amigos: Wilson, Edson, Afonso e Kandido que aguentaram as batalhas contra o calor, mosquitos e mutucas no campo e pela ajuda no processamento dos dados que sem o Edson, Wilson e Lourival não seria possível. A todos agradeço pelos momentos de descontração, conversas sobre a vida, risadas e ajuda em várias situações.

A Glenda, querida amiga, parceira e impulsionadora, pelos cafés que salvaram minhas tardes e as conversas também.

A Rafinha pela grande amizade e parceria que firmamos, tanto para pesquisar quanto para desabafar, pelo apoio para seguir em frente apesar de todas as coisas da vida. Pelas risadas em momentos que só caberia choro, por todas as horas de estudos e divagações e principalmente por ser tão diferente de mim, me fazendo praticar o amor, a tolerância e a paciência. Não esquecendo de agradecer a todo apoio nas saídas de campo!

As lindas amigas que o Pará me presenteou e que de alguma forma em algum momento me apoiaram durante o desenvolvimento do trabalho: Iasminy, Sandro, Thiely, Anne, Glaucy, Yuri, Amintas, Dalva. Em especial, a Luiza que no período mais difícil deste fim de jornada aguentou firme e forte e a Denise pelo amor, carinho, atenção e disposição no momento que mais fiquei sem rumo em Belém e também por todos os cafezinhos e risadas gostosas!

As amigas do sul que mesmo longe se fizeram presentes para que eu não perdesse o foco: Amanda, Cris e Gabi.

Aos meus pais, Valmir e Nazionélia, pela compreensão da distância, apoio e respeito a minha decisão, primeiro de ir e depois de permanecer, mesmo não concordando muito. A eles e meus irmãos, Caroline, Lorena e Felipe, sou eternamente grata pelo amor e carinho que mesmo do outro lado do país nunca deixei de sentir.

A minha sobrinha Catarina por me fazer ampliar a visão e me proporcionar alguns dos momentos mais lindos e encantadores durante este período, por me dar fôlego e me fazer ver a vida de maneira mais leve e colorida.

A Divindade maior, por me abençoar e iluminar meu caminho até o outro lado do país em busca de conhecimento profissional e pessoal, e por em momento algum durante este percurso ter me deixado sentir sozinha.

*“Diante da tarefa que se te reserva,
é justo respeitar o que os outros
dizem, no campo da crítica;
entretanto, é forçoso não paralisar o
serviço e nem prejudicar o serviço,
em virtude daquilo que os outros
possam dizer. Guardar a
consciência tranquila e seguir
adiante.”*

Emmanuel

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi compreender a relação entre o retroespalhamento (σ° , β° e γ) de uma imagem multipolarizada Radarsat-2 Fine Beam, banda C, com parâmetros biofísicos de uma vegetação de mangue em regeneração. A pesquisa foi conduzida na região de mangue em regeneração na Península de Bragança (nordeste do Pará) a aproximadamente 380 km a sudeste da Foz do Rio Amazonas. A construção de uma rodovia nesta região a cerca de 30 anos, ocasionou distúrbios no regime hidrológico causando a morte da vegetação, que posteriormente foi desmatada e atualmente apresenta incipiente regeneração natural. A obtenção dos dados de campo foi efetuada em 17 parcelas de 10 x 10m, delimitadas e posicionadas com auxílio de DGPS (*Differential Global Position System*) e estação total. A caracterização estrutural destas unidades amostrais foi feita através da aquisição dos seguintes dados: CAP (circunferência à altura do peito), altura e espécie, totalizando 3090 indivíduos medidos. Os valores do diâmetro à altura do peito (DAP) e área basal (AB) foram estimados. Uma análise de agrupamento das unidades amostrais resultou em quatro grupos em distintos estágios de regeneração: estágio pioneiro, regeneração inicial, regeneração intermediária e regeneração avançada. A biomassa individual foi calculada através das equações de Fromard *et al.* (1998). A imagem multipolarizada SLC utilizada foi obtida em 11/06/2010, através do sensor Radarsat-2. Os valores de retroespalhamento da imagem SAR (Synthetic Aperture Radar) foram obtidos através do aplicativo VIMAGE/Focus/PCI, utilizando como base o limite das parcelas. Modelos estatísticos de regressão simples e múltipla foram efetuados para analisar a relação entre a estrutura da vegetação e os valores de retroespalhamento da imagem SAR. Os resultados mostraram que o retroespalhamento sigma linear na polarização cruzada VH apresentou as relações mais fortes com as estruturas vegetais investigadas. A função de regressão linear múltipla com as polarizações HH, VH e VV obteve os melhores ajustes com os parâmetros biofísicos altura média, DAP e Biomassa ($R^2 = 0,81, 0,79, \text{ e } 0,79$ respectivamente). Os valores de retroespalhamento foram utilizados para gerar através das funções ajustadas os mapas para estas três variáveis biofísicas, estes apresentaram coerência com os dados coletados em campo, principalmente os mapas de altura média e DAP. O mapa de biomassa resultou em baixa amplitude de variação sugerindo a saturação do sinal, em manguezais em regeneração, abaixo do indicado na literatura para a banda C em manguezais homogêneos.

Palavras-chave: SAR. Manguezal em regeneração. Biomassa. Amazônia.

ABSTRACT

The main goal of this work is to understand the relationship between backscattering (σ° , β° e γ) of a multipolarized Radarsat-2 Fine Beam band C image with biophysical parameters of mangrove vegetation in regeneration. The study site was the Bragança peninsula (northeast of Pará State) far from the Amazon River mouth about 380 km (southeast). 30 years ago it was built a highway causing disturbances in the hydrological regimes and vegetation death, then it was deforested and currently the natural regeneration is incipient. Field data was taken in 17 stands of 10 square meters and it was delimited and positioned with a DGPS (Differential Global Positioning System) and a total station. Structural characterization of the sampling units was made with the following field data: CBH (circumference at breast height), height and specie in 3090 specimen and then it were estimated values of DBH (diameter at breast height) and BA (basal area). A cluster analysis of the sample units has defined four groups of vegetation in different regeneration stages: pioneer stage, initial regeneration, intermediate regeneration and advanced regeneration. Fromard *et al.* (1998) equation was used to biomass estimation. It was used a SLC (Single Look Complex) multipolarized image (Radarsat-2) from June 11th, 2010. VIMAGE/Focus/PCI software was used to retrieve backscattering values of SAR (Synthetic Aperture Radar) image, using as reference the limits of the parcels. Statistical models of simple and multiple regressions were used in the analysis of the relationship between vegetation structure and backscattering values of the SAR image. Results shown that linear sigma backscattering with cross-polarization (VH) had the strongest relationship with all vegetation structure analyzed. Although the function of multiple linear regression with HH, VH and VV polarization got the best adjustments with the biophysical parameters mean height, DBH and Biomass (R^2 values were respectively 0,81, 0,79 and 0,79). Backscattering values of the image with adjusted functions were used to generate maps of these three biophysical variables and it was coherence with field data, mainly mean height and DBH maps. Biomass map got a low amplitude variation suggesting saturation of the sign, in mangroves in regeneration, less than indicated in the literature to band C in homogeneous mangrove areas.

Keywords: SAR. Mangrove in regeneration. Biomass. Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo.	6
Figura 2 – Fluxograma com os principais passos do processamento digital da imagem Radarsat-2 e desenvolvimento do modelo para estimativa de DAP e biomassa a partir de imagens SAR.	7
Figura 3 – Parâmetros de refletividade.	10
Figura 4 – Precipitação diária para os dias que antecedem a aquisição da imagem RADARSAT2.	11
Figura 5 – Imagem Radarsat-2 nas quatro polarizações. Os pontos em amarelo indicam a localização das parcelas.	20
Figura 6 – Média da altura e do DAP, desvio padrão e intervalo de 2 desvios padrões das 17 parcelas estudadas.	21
Figura 7 – Valor de Importância de todas as unidades amostrais. FR = Frequência Relativa; DR = Densidade Relativa; DoR = Dominância Relativa.	22
Figura 8 – Análise de agrupamento através da distância Euclidiana (da média) com os parâmetros biofísicos altura média, DAP médio, área basal.	23
Figura 9 – Média, erro padrão e desvio padrão dos parâmetros estruturais da vegetação para os 4 grupos.	24
Figura 10 – Biomassa de cada árvore por espécie contra os valores de DAP dos respectivos indivíduos.	30
Figura 11 – Valores de retroespalhamento sigma linear por parcela nas polarizações HH, VH e VV contra os valores de biomassa total.	31
Figura 12 - Gráficos dos valores dos resíduos contra os valores preditos mostrando a disposição aleatória dos dados, o que indica uma variância constante, com ressalvas aos modelos de altura. A variável dependente utilizada no modelo foi o retroespalhamento sigma linear na polarização VH.	38
Figura 13 – Gráficos dos valores observados contra os valores preditos, com respectivos valores de RMSE e Coeficiente de determinação (r^2), linha de ajuste ao nível de confiança de 95%.	40
Figura 14 – Gráficos dos resíduos contra os valores preditos de cada modelo de regressão linear múltipla.	45

Figura 15 – Gráficos dos valores observados contra os valores preditos para os seis diferentes modelos, com os respectivos valores r^2 (coeficiente de determinação) do modelo e RMSE (erro médio quadrático).	49
Figura 16 – Mapa de estimativa: A) DAP médio (cm) e B) Altura média (m), com base nos valores de retroespalhamento através das respectivas funções de regressão múltipla.....	50
Figura 17 – Mapa de Biomassa total (Kg) calculado a partir da função de regressão ajustada para o conjunto de dados, com base nos valores de retroespalhamento da imagem Radarsat-2.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da imagem SAR utilizada na investigação.	8
Tabela 2 - Valores da raiz do erro médio quadrático referente ao processo de validação da imagem RADARSAT2, nos três modos de normalização investigados.	9
Tabela 3 – Condição da maré no dia 11/06/2010.	11
Tabela 4 – Valores médios de retroespalhamento em σ° , β° e γ extraídos para cada unidade amostral (P).	18
Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros estruturais considerando os quatro grupos formados na análise de agrupamento das parcelas, ao nível de confiança de 95%.	23
Tabela 6 – Teste <i>post hoc</i> de <i>Tukey</i> dos parâmetros biofísicos considerando os quatro grupos formados.	23
Tabela 7 – Parâmetros biofísicos das 17 parcelas estudadas, evidenciando os quatro grupos formados. Desvio padrão para DAP e altura.	25
Tabela 8 - Valores de Biomassa ($t\cdot ha^{-1}$) por espécie por parcela, total de cada espécie e total de cada parcela.	27
Tabela 9 – Coeficiente de correlação entre os parâmetros biofísicos. Destacadas as correlações com valores mais altos e significativos (nível de significância de 95%).	32
Tabela 10 – Valor de <i>p</i> para teste da normalidade da variável Y.	33
Tabela 11 – Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 5x5. Destacados os valores de correlação altos e significativos.	34
Tabela 12 – Modelos que apresentaram maior valor de r^2 nas três normalizações e nos três tamanhos de filtro, com a polarização VH como variável explicativa.	35
Tabela 13 – Valores referentes aos modelos de regressão linear simples para os parâmetros estruturais da vegetação.	36
Tabela 14 – Valores do teste de normalidade dos resíduos para cada modelo.	37
Tabela 15 – <i>Outliers</i> em X e Y, distância de Cook e a porcentagem em relação ao teste F de cada modelo para decisão da influência dos pontos.	37
Tabela 16 – Valor PRESS e SQR dos modelos de regressão e a porcentagem da diferença entre eles.	41
Tabela 17 – Variáveis independentes selecionadas pelos critérios utilizados no método <i>Best Subset</i> . Identificação das variáveis: 1-HH, 2-HV, 3-VH e 4-VV.	42

Tabela 18 – Parâmetros dos modelos de regressão múltipla, retroespalhamento sigma nas polarizações HH, VH e VV compõem as variáveis independentes.	43
Tabela 19 – Modelo para altura máxima envolvendo as polarizações HH e VH como variáveis explicativas.	43
Tabela 20 – Valores do teste de normalidade dos resíduos de cada modelo, nível de significância 95%.	44
Tabela 21 – Distância Cook para pontos candidatos a <i>outliers</i> em Y, e a porcentagem em relação ao teste F de cada modelo para decisão da influência dos pontos. Pontos em itálico representam os identificados somente por análise gráfica.	46
Tabela 22 – Valores do método de validação PRESS e a porcentagem da diferença do SQR.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 HIPÓTESE E OBJETIVO	3
2 ÁREA DE ESTUDO	4
3 MATERIAIS E MÉTODOS	7
3.1 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO	8
3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS SAR.....	8
3.3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS ESTRUTURAIIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO....	11
3.4 ESTIMATIVA DE BIOMASSA A PARTIR DOS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA VEGETAÇÃO.....	14
3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E MODELAGEM DOS DADOS ESTRUTURAIIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO A PARTIR DE DADOS SAR	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 DADOS SAR.....	18
4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO.....	21
4.3 CÁLCULO DA BIOMASSA DE MANGUEZAIS EM REGENERAÇÃO ATRAVÉS DE EQUAÇÃO ALOMÉTRICA.....	27
4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E MODELAGEM DOS DADOS ESTRUTURAIIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO A PARTIR DE DADOS SAR	33
4.4.1 Modelos de regressão linear simples	36
4.4.2 Modelos de regressão linear múltipla.....	42
5 CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53
APÊNDICES	57
APÊNDICE A - Tabela com parâmetros biofísicos de cada parcela, sendo o DAP e a densidade em classe diamétrica conforme utilizada no cálculo de biomassa.....	58
APÊNDICE B – Parâmetros biofísicos por espécie das 17 parcelas estudadas.....	59
APÊNDICE C – Características estruturais por espécie das 17 parcelas estudadas.....	60

APÊNDICE D – Diagrama de dispersão entre o retroespalhamento em (a) β° (dB), (b) σ° (dB), (c) γ (dB) nas quatro polarizações e os parâmetros biofísicos.....61

APÊNDICE E – Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 3x3. Destacados os valores de correlação altos e significativos (com 95% de confiança).....62

APÊNDICE F - Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 7x7. Destacados os valores de correlação altos e significativos (com 95% de confiança).....63

1 INTRODUÇÃO

Os manguezais constituem um dos ecossistemas mais produtivos do mundo (Khatiresan e Bingham, 2001). Essa produtividade está ligada diretamente à biomassa, sendo a estimativa desta muito importante para o melhor entendimento da dinâmica da ciclagem da matéria orgânica no manguezal (Soares e Schaeffer-Novelli, 2005). A biomassa pode ser estimada a partir dos parâmetros estruturais da vegetação através de funções alométricas. Medir estes parâmetros por meio não destrutivo é um desafio. Devido ao grande estoque de C, o ecossistema manguezal representa uma fonte de nutrientes e matéria orgânica para as águas e ambientes costeiros adjacentes, favorecendo a criação de uma teia alimentar aquática complexa (Spalding *et al.*, 1997; Khatiresan e Bingham, 2001). Além disso, os manguezais protegem e estabilizam a costa, são viveiros e criadouros de inúmeras espécies da fauna, geram bens e serviços formando assim um ecossistema com grande importância ecológica e econômica (Lugo e Snedaker, 1974; Schaeffer-Novelli, 1991; Khatiresan e Bingham, 2001; Alongi, 2002).

Diante da tamanha importância deste ecossistema, muitos esforços são feitos no sentido de produção de inventários e meios de monitoramento e preservação do manguezal. Entretanto, estas tarefas, muitas vezes, são dificultadas por estes locais serem normalmente inacessíveis, com dificuldade de locomoção devido ao labirinto de raízes e caules espessos, ao substrato inconsolidado e inundações de marés (Henderson e Lewis, 2008; Kovacs *et al.*, 2008). Neste sentido, os sensores remotos permitem a aquisição de dados periodicamente e por grandes áreas geográficas e tem sido usado em vários estudos para compreender as florestas de mangue (Simard *et al.*, 2006). Dentre os tipos de sensores existentes, particularmente o radar de abertura sintética (SAR) é o mais indicado para investigações em baixas latitudes por ser independente de condições atmosféricas e fonte solar, ou seja, não sofre atenuação na presença de chuvas, nuvens e fumaça presentes nesta região (Mougin *et al.*, 1999; Paradella *et al.*, 2005).

Os dados provenientes do SAR permitem relacionar os parâmetros estruturais da vegetação com a energia retroespalhada do radar, pois a energia de micro-ondas, dependendo de seu comprimento de onda, pode penetrar no dossel interagindo com os maiores componentes da vegetação (ramos, galhos e troncos) sendo principalmente relacionada com a biomassa em pé (Ranson e Sun, 1994; Van Der Sanden, 1997). Alguns estudos relacionam o retroespalhamento do radar com os parâmetros estruturais da vegetação (Mougin *et al.*, 1999; Proisy *et al.*, 2002; Kovacs *et al.*, 2006; Simard *et al.*, 2006; 2008), em sua grande maioria visando a estimativa da

biomassa. Não obstante, estas pesquisas foram direcionadas a dosséis florestais homogêneos não havendo estudos focados em áreas degradadas ou em regeneração como é o caso da região em investigação.

A área selecionada para o estudo está inserida na Península Costeira de Bragança (costa nordeste do Pará) que tem sofrido nos últimos 30 anos pressão antrópica devido à construção de uma rodovia, ligando a cidade de Bragança à praia de Ajuruteua. A construção visou 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, esta rodovia cortou extensos depósitos da planície lamosa de entremarés, densamente colonizada por mangue, ao longo de sua extensão de cerca de 25 km. Os distúrbios no regime hidrológico recorrente desta construção ocasionaram a morte da vegetação, que posteriormente foi desmatada. Atualmente, parte desta área degradada mostra uma incipiente regeneração natural (Souza Filho, 2000; Souza Filho e Paradella, 2002).

O presente trabalho pretende compreender a influência da estrutura da vegetação de mangue em regeneração no sinal de retorno do radar investigando a relação entre estes parâmetros através de modelos estatísticos de regressão, visando à estimativa de atributos desta tipologia de vegetação através dos valores de retroespalhamento de imagens Radarsat-2.

1.1 HIPÓTESE E OBJETIVO

Hipótese: É possível estimar parâmetros biofísicos de uma vegetação de mangue em regeneração a partir do retroespalhamento medido na banda C. Desta forma, é possível estimar o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura e a biomassa da vegetação de mangue em regeneração a partir de imagens multipolarizadas do Radarsat-2.

Objetivo: Compreender a relação entre o retroespalhamento (σ° , β° e γ) da radiação eletromagnética no comprimento de onda da banda C (5,6 cm) nas diferentes polarizações (HH, VV, HV e VH) com parâmetros biofísicos de uma vegetação de mangue em regeneração através de modelagem estatística e posteriormente, gerar mapas das estruturas vegetais na região de estudo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Inventariar e analisar a composição florística e estrutural das unidades amostrais de manguezais em processo de regeneração;
- Analisar a correlação dos atributos-radar (σ° , β° e γ) derivados das imagens multipolarizadas do Radarsat-2 (banda C) com parâmetros estruturais da vegetação.
- Modelar a estimativa dos parâmetros biofísicos da vegetação de mangue a partir de atributos-radar, estabelecendo através de técnicas estatísticas o nível de desempenho desta relação;
- Gerar mapas mostrando a distribuição espacial dos parâmetros estruturais da tipologia sob investigação derivado da modelagem.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no nordeste do Pará a aproximadamente 380 km a sudeste da foz do rio Amazonas (Figura 1), inserida na maior faixa de manguezais contínuos do planeta (Souza Filho, 2005).

O clima na região é classificado como quente e úmido (Fisch *et al.*, 1998) com duas estações principais: a estação chuvosa que se estende de janeiro/fevereiro a maio/julho e é caracterizada pela média da precipitação acima de 2000 mm e estação seca que começa em junho/agosto e vai até janeiro/fevereiro, com a taxa de precipitação média abaixo de 20 mm (Monteiro *et al.*, 2009). A temperatura média anual é de aproximadamente 26° C (Moraes *et al.*, 2005).

A região possui regime de macromaré semidiurno, que de acordo com registros de maré ao longo de um ano na localidade de Bacuriteua, localizada a aproximadamente 7 km da área de estudo, apresentaram variações mínimas de 1,76 m e máximas de 5,37 m. Nesta mesma localidade as variações sazonais do nível do mar podem ser superiores a 20 cm, com níveis mais elevados em abril (período de maiores descargas fluviais) e setembro (época dos ventos de E-NE mais fortes) (Souza Filho *et al.*, 2009).

Souza Filho e Paradella (2002) mapearam a península bragantina por meio de sensores orbitais. De acordo com a geomorfologia e a vegetação local, reconheceram dezenove unidades geobotânicas: canais estuarinos, bancos de areia submersos, areais, antigos bancos de areia estuarinos, planície de maré, delta de maré vazante, barreira de cordão arenoso, dunas costeiras, cordões arenosos *chenier*, manguezal de intermaré jovem, manguezal de intermaré e supramaré, pântano interno e externo, planície de inundação fluvial, planalto costeiro, mangue degradado e regenerado e uma lagoa artificial. O ecossistema de manguezal ocorre sobre extensas planícies lamosas de até 20 km de largura, densamente cobertos por árvores de mangue, situados entre os níveis altos da maré de sizígia e a média das marés, ocupando uma área de cerca de 466,8 km (Souza Filho e El-Robrini, 1995). Esse ecossistema foi subdividido em manguezais de intermaré e de supramaré de acordo com a altura da vegetação e da topografia do local, que segundo Souza Filho e El-Robrini (2000) é o principal controlador da distribuição das planícies de maré. Os manguezais de supramaré são descritos como topograficamente mais altos, com árvores menores e alcançados pela maré somente durante a maré de sizígia. Já os manguezais de intermaré ocorrem em topografia mais baixa, sujeitos a processos de progradação e erosão.

A área de estudo compreende parte das unidades geobotânicas “mangue degradado” e “regenerado”. As áreas desflorestadas, denominadas mangue degradado, apresentam um solo úmido exposto, que proporcionam a perda do sinal por reflexão especular, gerando como resposta pixels com baixo retroespalhamento. Entretanto, o mangue regenerado apresenta retroespalhamento múltiplos, formando uma imagem com textura rugosa devido à presença de vegetação baixa e esparsa distribuída em uma superfície plana (Souza-Filho e Paradella, 2002).

A composição florística da vegetação de mangue na região da península bragantina, de acordo com Menezes e Mehlig (2010), 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), sendo a espécie *R. mangle* predominante no estuário do Rio Caeté. Apesar da baixa riqueza de espécies, há uma grande quantidade de variação na estrutura da floresta de mangue, devido à topografia e as condições hidrológicas locais (Menezes, 2006).

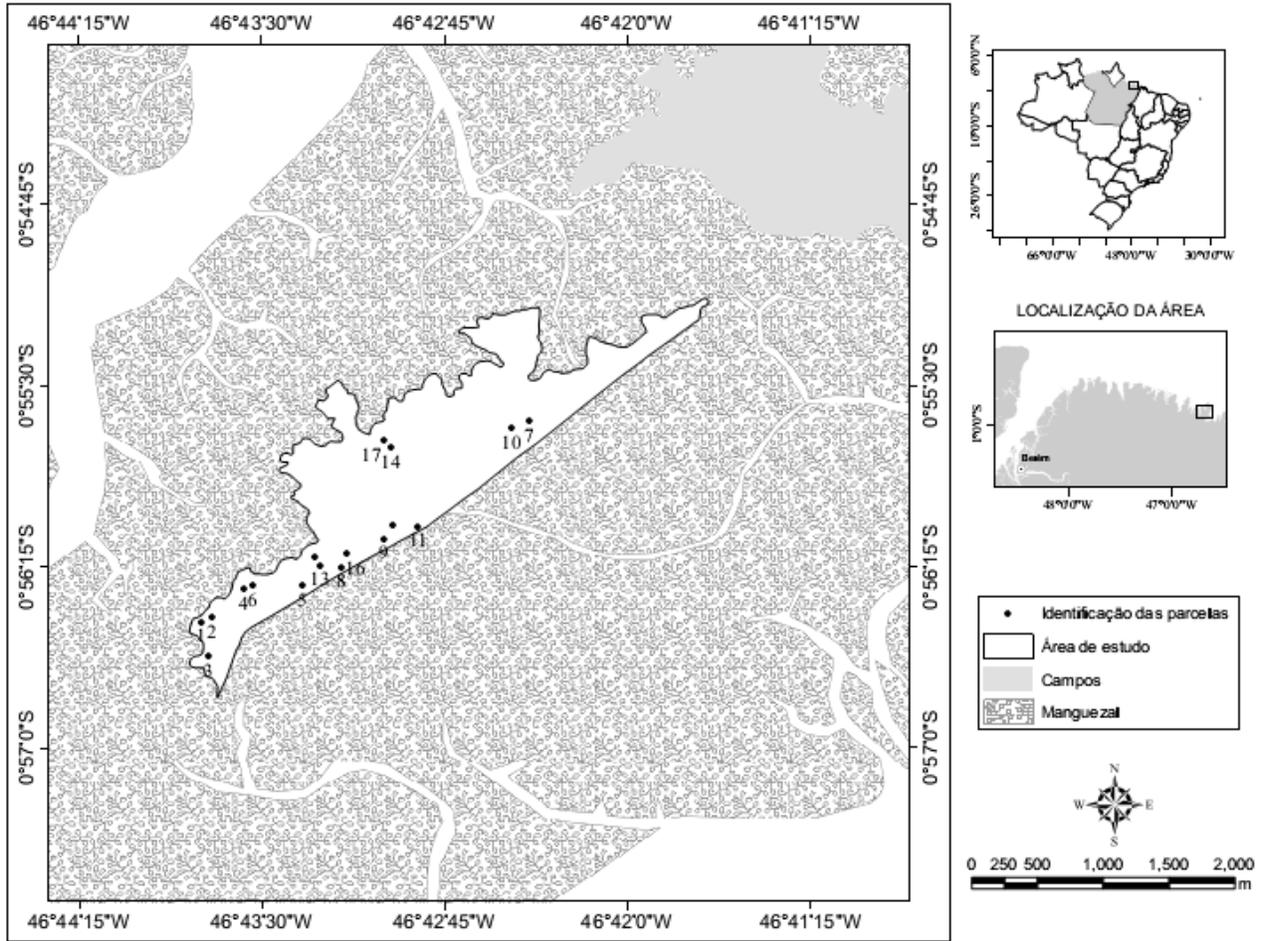


Figura 1 – Localização da área de estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma geral das atividades desenvolvidas no decorrer do estudo para atingir os objetivos definidos é apresentado na Figura 2. Inicialmente os dois grupos de variáveis, uma relacionada ao retroespalhamento do SAR e outra às características biofísicas da vegetação, foram adquiridos, processados e analisados separadamente. Posteriormente, foi investigada a relação entre estes dois grupos através do desenvolvimento de modelos estatísticos. O detalhamento de cada etapa é apresentado no decorrer do texto.

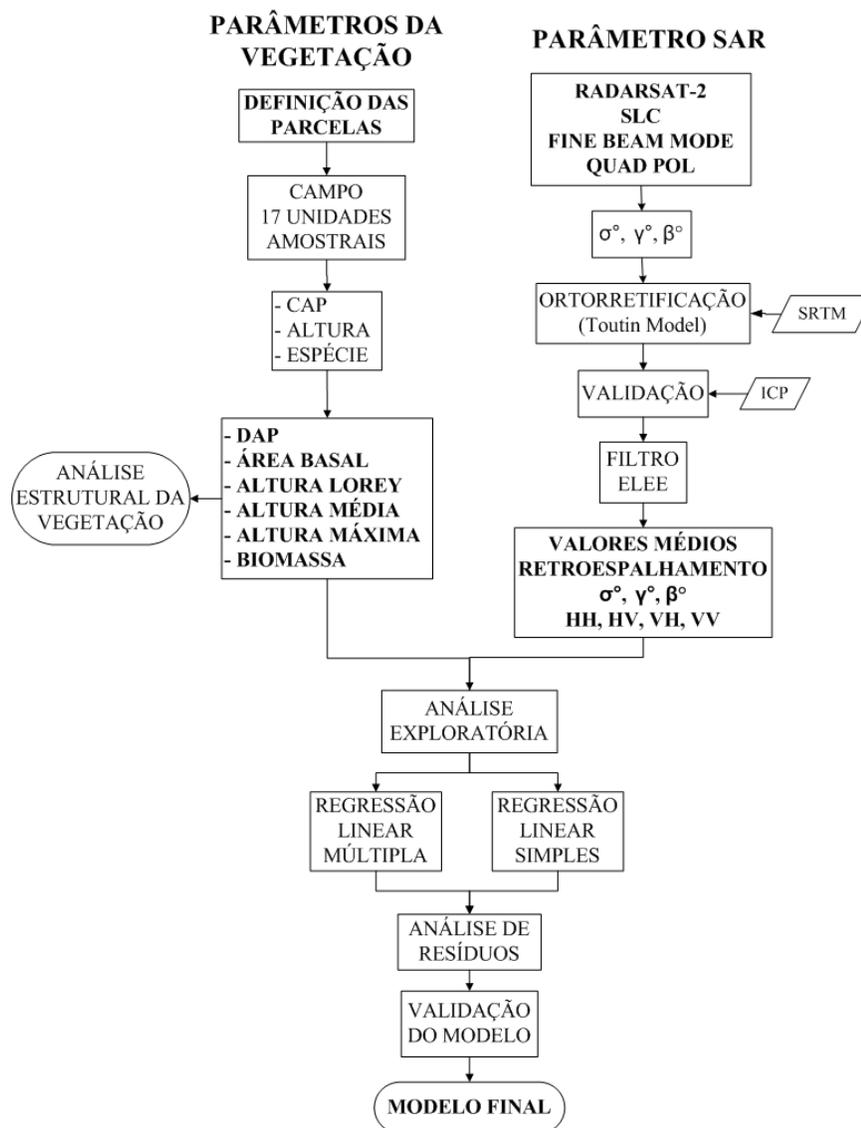


Figura 2 – Fluxograma com os principais passos do processamento digital da imagem Radarsat-2 e desenvolvimento do modelo para estimativa de DAP e biomassa a partir de imagens SAR.

3.1 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

O dado SAR (*Synthetic Aperture Radar*) utilizado nesta investigação é uma imagem polarimétrica proveniente do sensor Radarsat-2 obtida no modo *Fine Beam Mode* (FQ5). As especificações da imagem constam na Tabela 1. A imagem foi adquirida junto a Agência Espacial Canadense no âmbito do projeto “*Science and Operational Application Research* (SOAR)”.

Tabela 1 – Características da imagem SAR utilizada na investigação.

Sensor	RADARSAT2
Frequência GHz (Banda)	5,40 (C)
Comprimento de Onda	5,6cm
Polarização	HH/HV/VH/VV
Modo de Aquisição	Fine Quad-Pol
Nível de Processamento	SLC
Tipo de Dado (n de looks)	Polarimétrico (1)
Resolução nominal	11x9m
Espaçamento em Pixel ¹	4,73x4,98 (slant)
Órbita de Aquisição	Descendente
Data de Aquisição	11/06/2010
Hora de Aquisição	08:55:58
Ângulo de Incidência	23,39°-25,28°

¹ rg x az.

Uma imagem óptica, obtida pelo sensor REIS, presente na constelação de satélites RapidEye, adquirida em 18/07/2011, foi utilizada para facilitar a definição das parcelas a serem estudadas no campo. Este dado foi cedido pela empresa Santiago & Cintra no âmbito do projeto “Índice de sensibilidade ambiental (ISA) a partir do processamento de imagens RapidEye para o nordeste do Pará (Curuçá, Bragança, Soure - Pa, Brasil)”.

3.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS SAR

Todos os processamentos da imagem SAR polarimétrica RADARSAT-2 foram realizados no software PCI Geomatics v. 2012 e serão descritos a seguir.

A etapa de correção geométrica consistiu na ortorretificação da imagem em que foi utilizado o modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e pontos de controle de campo (GCP – *Ground Control Point*). Neste processamento foi aplicado o modelo matemático *Toutin Radargrammetric* (Toutin, 1995) implementado no aplicativo *Orthoengine/PCI*.

A validação da ortorretificação teve como base o cálculo da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE - *Root Mean Square Error*) utilizando pontos independentes de checagem (ICP – *Independent Check Point*). A Tabela 2 apresenta o número de GCP e ICP e os valores de RMSE obtidos na validação.

O ruído *speckle* foi reduzido pela aplicação do filtro Enhanced (Lee *et al.*, 1999). Foram utilizados três tamanhos de janela 3x3, 5x5 e 7x7 com a finalidade de averiguar qual se adequaria melhor ao presente estudo, pois apesar da filtragem aumentar a interpretabilidade do dado por suavizar o aspecto ruidoso da imagem pode degradar a radiometria da imagem. O tamanho de 5x5 apresentou melhor desempenho no julgamento visual bem como na análise das relações com os parâmetros biofísicos.

Todos os processamentos descritos acima foram efetuados para os três parâmetros de refletividade (σ° , β° e γ). De acordo com (Henderson e Lewis, 1998) o parâmetro sigma zero (σ°) representa a média da refletividade de uma amostra do alvo, normalizada pela unidade de área no plano horizontal ao solo; o parâmetro gamma (γ) é medido no plano da frente de onda incidente sobre o alvo e por fim o parâmetro brilho ou beta (β°) é definido como a refletividade projetada no plano *slant range* e representa a única normalização que não depende do ângulo de incidência local (Figura 3).

Após estes processamentos os valores lineares médios dos parâmetros de refletividade (normalização), foram extraídos para cada unidade amostral investigada, através do aplicativo VIMAGE/Focus/PCI.

Tabela 2 - Valores da raiz do erro médio quadrático referente ao processo de validação da imagem RADARSAT2, nos três modos de normalização investigados.

Normalização	RMSE (E)	RMSE (N)	RMSE (TOTAL)	N° GCP's	N° ICP's
σ°	10,95	5,38	12,2	8	11
β°	10,94	5,36	12,19	8	11
γ°	10,92	6,24	12,58	8	11

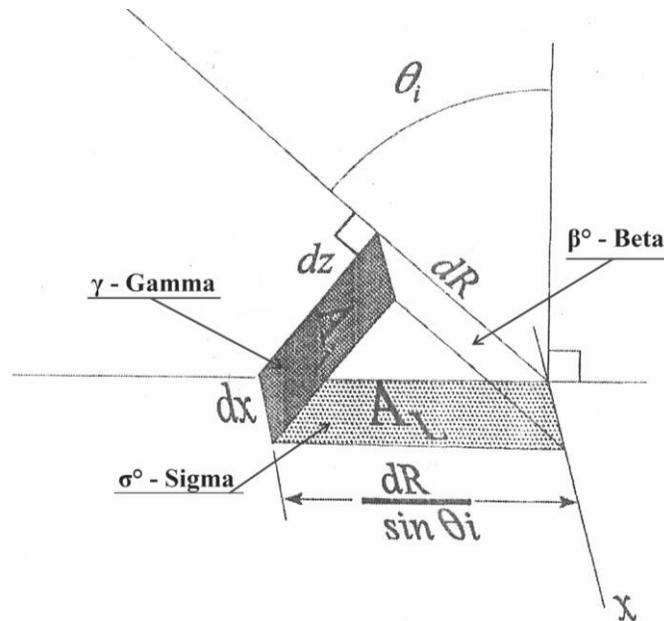


Figura 3 – Parâmetros de refletividade. Modificado de Henderson e Lewis (1998).

Devido ao valor de retroespalhamento ser afetado pelas propriedades dielétricas do alvo é importante avaliar as condições meteorológicas durante o período de imageamento. De acordo com dados da rede INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) a precipitação foi considerada normal nos meses de maio-julho de 2010, referente ao início da estação seca, apresentando valores entre 50-100 mm. A Figura 4 apresenta dados mais detalhados da precipitação diária no mês de aquisição da imagem Radarsat-2 para a estação de Tracuateua (INMET), distante aproximadamente 12,5 km da área de estudo. Destaque para o dia da aquisição da imagem que não apresentou precipitação, bem como o dia que o antecede (10/06/2010). Com base nestes dados é esperado que a constante dielétrica não interfira nos valores de retroespalhamento provenientes dos alvos, visto que o último dia com grande acúmulo de precipitação aconteceu 6 dias antes do dia de imageamento.

As condições de maré também foram verificadas, pois estas podem afetar a interação da energia incidente com os alvos produzindo efeitos como *double-bounce* e também elevando a constante dielétrica do solo. A tábua de maré (DHN) para o dia de imageamento consta na Tabela 3. No horário de aquisição da imagem Radarsat-2 (08:55:58) a condição foi de maré vazante o que poderia configurar alguma influência nos valores de retroespalhamento do alvo em termos da

constante dielétrica devido a umidade do solo nas regiões com menor cobertura de vegetação, o que foi descartado devido estas regiões apresentarem tons escuros na imagem, que provavelmente é resultante do espalhamento especular causado pela baixa rugosidade deste tipo de solo. A ausência da lâmina de água sugere que o espalhamento do tipo *double-bounce* não ocorreu, além disso por se tratar de imagem na banda C diminui a probabilidade da energia incidente atingir o solo

Tabela 3 – Condição da maré no dia 11/06/2010.

Hora	00:24	06:04	13:02	18:53
Altura (m)	0.9	4.7	0.6	4.5

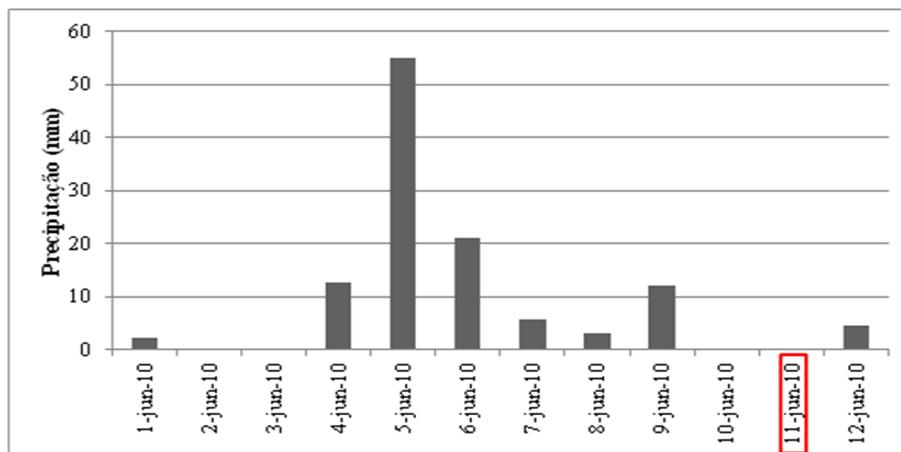


Figura 4 – Precipitação diária para os dias que antecedem a aquisição da imagem RADARSAT2.

3.3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS ESTRUTURAIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO

Os dados de campo foram adquiridos em duas campanhas, a primeira realizada no período de 24 a 28 de agosto e a segunda entre os dias 8 e 14 de dezembro, todas no ano de 2012.

A definição das unidades amostrais da vegetação foi feita inicialmente em uma imagem óptica RapidEye, sobre a qual foram delimitadas 134 parcelas medindo cada uma 10 x 10 m, visando abranger classes visualmente distinguíveis na imagem. Posteriormente, uma análise de

agrupamento baseada no valor médio de sigma zero extraído da imagem Radarsat-2 para cada parcela, possibilitou diminuir o número de parcelas para 30.

Com base nas análises prévias dos dados do primeiro campo e visando uma melhor diferenciação entre os diferentes estágios de regeneração foi efetuada uma classificação orientada a objeto, com base nas imagens: Radarsat-2 e RapidEye, que auxiliou na escolha das parcelas da segunda campanha. Foram diferenciadas seis classes de regeneração, seguindo um gradiente desde a ausência de vegetação até totalmente vegetado, nas quais foram definidas 14 parcelas (unidades amostrais).

A coordenada geográfica central de cada unidade amostral foi adquirida sobre a imagem RapidEye para a devida localização em campo. Depois de localizada a parcela a delimitação da mesma foi feita com auxílio de trena métrica. Posteriormente, a coordenada central e dos cantos, com precisão decimétrica, foram adquiridas através da estação total TOPCON modelo GTS 210 amparada pelo sistema de posicionamento global diferencial DGPS realizada com o equipamento ASTECH Z-Xtreme™. Do mesmo modo foi obtida a posição de cada árvore e arbusto presente na parcela. Cabe ressaltar que o tamanho das parcelas (10 x 10 m) foi definido considerando a resolução nominal (11 x 9 m) da imagem Radarsat-2, além de ser o tamanho sugerido na literatura para estudos da vegetação em locais com alta densidade, garantindo a representatividade amostral da unidade em questão (Schaeffer-Novelli e Cintrón, 1986).

Em cada parcela foram registrados ou medidos os seguintes parâmetros biofísicos da vegetação: espécie das árvores, circunferência à altura do peito (CAP), altura e as coordenadas geográficas de todos os indivíduos. A medida da circunferência da árvore à altura do peito (CAP) foi feita a 1,3m acima do solo. Entretanto, a grande quantidade de indivíduos com altura menor que 1 metro, ocasionou, nestes casos, a substituição da medida da CAP pela circunferência abaixo da primeira ramificação do arbusto como proposto por Soares (1999). Após a coleta de dados em campo foi possível derivar os valores do diâmetro à altura do peito (DAP), área basal (AB), altura média e densidade. A metodologia adotada para a coleta dos dados de estrutura, bem como a derivação dos dados acima citados, foi baseada em Schaeffer Novelli e Cintrón (1986).

Além da altura média, outras duas medidas de altura foram utilizadas, a altura máxima que representa o indivíduo com maior altura na parcela e a altura de Lorey, que é definida como a altura média ponderada pela área basal (3.3.1), que permite que as árvores maiores contribuam mais na média da altura (Schreuder *et al.*, 1993).

$$\text{Alt. Lorey} = \frac{\sum(\text{AB} * \text{ALT})}{\sum \text{AB}} \quad (3.3.1)$$

Para descrever e analisar a estrutura horizontal da vegetação nas unidades amostradas foram calculados os parâmetros densidade (DR), dominância (DoR) e frequência relativas (FR) para cada espécie (Mueller-Dombois e Ellenberg, 1974), como segue:

$$\text{DR} = \frac{n_s}{n_t} \times 100 \quad (3.3.2)$$

$$\text{DoR} = \frac{\sum \text{AB}_s}{\sum \text{AB}_t} \times 100 \quad (3.3.3)$$

$$\text{FR} = \frac{F_s}{\sum F_t} \times 100 \quad (3.3.4)$$

Sendo n_s = número de indivíduos da espécie s ; n_t = número total de indivíduos na área estudada; $\sum \text{AB}_s$ = somatório da área basal (dominância) da espécie s ; $\sum \text{AB}_t$ = somatório da área basal de todos os indivíduos na área estudada; F_s = frequência da espécie s ; $\sum F_t$ = somatório das frequências de todas as espécies na área estudada.

Posteriormente, o valor de importância (VI) proposto por Curtis e McIntosh (1951) foi calculado pelo somatório dos três parâmetros descritos acima. De acordo com estes autores, a amplitude deste parâmetro é um excelente indicativo da importância de uma espécie dentro de um bosque, além de ser mais claramente expresso quando comparado ao uso de somente um parâmetro.

Em seguida, foram efetuadas análises de agrupamento para associar as unidades semelhantes visando à compreensão dos dados coletados em termos de desenvolvimento estrutural da vegetação. Os dados de altura média, DAP e área basal serviram de base para o processamento da análise efetuado através do método de distância Euclidiana. O parâmetro densidade não apresentou a tendência esperada, inversamente proporcional ao DAP, desta forma quando adicionado não auxiliou na formação dos grupos sendo excluído da análise. Este fato foi registrado também por Soares (1999), que não obteve resultados satisfatórios utilizando a

densidade como parâmetro para a distinção de grupos de vegetação de mangue antropizado. Cabe salientar que antes desta análise as parcelas foram organizadas e enumeradas em ordem crescente do valor de biomassa total.

Um teste de análise de variância (ANOVA) foi aplicado nos grupos formados, com a finalidade de investigar diferenças significativas na distribuição dos parâmetros estruturais. Em seguida, o teste *post-hoc* de Tukey investigou as diferenças dentro dos grupos, através de comparação múltipla dos grupos pareados.

3.4 ESTIMATIVA DE BIOMASSA A PARTIR DOS PARÂMETROS BIOFÍSICOS DA VEGETAÇÃO.

A carência de equações alométricas para os manguezais da península de Bragança, assim como para a Costa de Manguezais de Macromaré da Amazônia (CMMA), impulsionou a escolha das equações publicadas por Fromard *et al.* (1998) para os manguezais da Guiana Francesa que de acordo com Soares e Schaeffer-Novelli (2005) são os mais similares às florestas de mangue do Brasil. Este autores salientam que a escassez de estudos específicos de biomassa para os manguezais brasileiros justifica estudos deste tipo em diferentes áreas da costa brasileira, especialmente se considerar sua extensão e amplitude latitudinal.

As equações propostas por Fromard *et al.* (1998) para a estimativa da biomassa por espécie de cada indivíduo presente nas parcelas são descritas a seguir:

$$\text{- } Avicennia \text{ germinans: } \quad 1\text{cm} < \text{DAP} < 4\text{cm:} \quad y = 200,4 \text{ DAP}^{2,1} \text{ (g)} \quad (3.4.1)$$

$$\text{DAP} > 4 \text{ cm:} \quad y = 0,14 \text{ DAP}^{2,4} \text{ (Kg)} \quad (3.4.2)$$

$$\text{- } Laguncularia \text{ racemosa:} \quad y = 102,3 \text{ DAP}^{2,5} \text{ (g)} \quad (3.4.3)$$

$$\text{- } Rhizophora \text{ spp.:} \quad y = 128,2 \text{ DAP}^{2,6} \text{ (g)} \quad (3.4.4)$$

O valor de biomassa total por unidade amostral é alcançado pelo somatório da biomassa individual por espécie. No desenvolvimento destas equações, Fromard *et al.* (1998) mencionam que utilizaram a variável independente DAP por ser um parâmetro que pode ser mensurado para todos os indivíduos de forma mais acurada que a altura. Além do mais, os componentes horizontais da vegetação, como a área basal que é derivada do DAP, possuem alta relação com a biomassa (Schaeffer-Novelli e Cintrón, 1986).

3.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E MODELAGEM DOS DADOS ESTRUTURAIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO A PARTIR DE DADOS SAR

A análise da relação entre a estrutura da vegetação e os valores de retroespalhamento multipolarizado da imagem Radarsat-2 foi avaliada através do método estatístico de regressão linear, no qual uma variável é capaz de prever a outra através de uma equação definida. De maneira geral, a regressão linear simples é expressa como segue:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (3.2.1)$$

onde Y_i é o valor da variável dependente na i -ésima observação; β_0, β_1 são os valores dos parâmetros (ou coeficientes) do modelo; X_i é o i -ésimo valor da variável independente e ε_i é o termo de erro aleatório com média zero $E\{\varepsilon_i\} = 0$ e variância constante $\sigma^2\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$.

O desenvolvimento dos modelos seguiu a metodologia descrita por Neter *et al.* (1996), e teve como variável independente X os valores de retroespalhamento multipolarizado e a variável a ser predita Y os valores dos parâmetros biofísicos: altura média, altura máxima, altura de Lorey, DAP, AB e Biomassa total. Os valores médios de retroespalhamento nos modos de normalização σ° , γ e β° foram extraídos da imagem Radarsat-2 nos três tamanhos de filtro, como descrito na seção 3.2.1, com o intuito de avaliar quantitativamente estas configurações e auxiliar na decisão de qual seria mais adequada. Desse universo de dados havia 6 variáveis preditivas candidatas e 36 explicativas, possibilitando combinar 216 equações. Diferentes modelos matemáticos foram avaliados no ajuste dos dados experimentais: linear, logaritmo, polinomial de 2° ordem, polinomial de 3° ordem, potência e exponencial.

Na etapa de análise exploratória, na qual foi verificada a normalidade das variáveis dependentes, os diagramas de dispersão e a matriz de correlação entre os grupos de variáveis, auxiliou na avaliação inicial das relações e a adequação do conjunto de dados.

Efetuada os modelos e verificada a significância dos seus coeficientes (β 's) e a variância global do mesmo (teste F), os valores dos erros aleatórios foram avaliados na etapa de análise dos resíduos. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de *Shapiro-Wilk*, a

homocedasticidade e linearidade dos modelos foram avaliadas pela análise dos gráficos dos valores preditos contra os resíduos e pelo teste formal de *Levene*. Através dos valores de *Leverage* e dos resíduos excluídos padronizados foram identificados os *outliers* em X e em Y, respectivamente. Foram considerados *outliers*, em X os pontos que ultrapassaram o valor de *Leverage* de $2p/n$ (sendo p = número de preditores e n = observações) e em Y as observações com valores maiores que ± 2 de desvio padrão. A influência destes pontos foi avaliada pela porcentagem da distância de Cook dos valores do teste F de cada modelo, sendo o limite para esta porcentagem de 20%.

A validação dos modelos desenvolvidos foi efetuada por dois métodos. O primeiro baseado no valor de PRESS, que representa a soma dos quadrados da predição, e é obtido estimando as variáveis dependentes (parâmetros estruturais da vegetação) a partir de uma função ajustada mediante a supressão da i -ésima observação. De acordo com Neter *et al.* (1996), este critério é mais indicado quando o modelo envolve número reduzido de amostras. O valor de PRESS deve ser próximo ao valor de SQR (Soma dos Quadrados dos Resíduos) para que o modelo seja considerado adequado. Entretanto, Neter *et al.* (1996) não estipularam um limiar de proximidade entre os valores. Rencher e Schaalje (2007) salientaram que quando comparados dois modelos alternativos com objetivo de predição, a escolha deve ser pelo que apresentar menor valor de PRESS. O segundo método foi baseado no valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), que é o cálculo da diferença entre os valores observados e os valores preditos, agregando todos os resíduos em uma única medida de poder de predição. Desta forma o modelo mais ajustado é aquele que apresenta o menor valor de RMSE.

O modelo de regressão linear múltipla foi desenvolvido no intuito de investigar a contribuição das demais polarizações quando incorporadas como variáveis explicativas. A etapa da seleção das variáveis foi baseada no método regressivo *Best subset* (Neter *et al.*, 1996), que retorna todas as regressões possíveis com as variáveis explicativas disponibilizadas. Através dos critérios de decisão (r^2 , r^2_{ajustado} e C_p Mallow) o melhor ajuste com o menor número de variáveis explicativas possíveis é identificado.

O valor do coeficiente de determinação aumenta conforme são adicionadas variáveis explicativas ao modelo. Desta forma, neste critério (r^2) o subconjunto de variáveis a partir do qual não há um aumento substancial no valor de r^2 , é considerado o modelo mais adequado. Entretanto, somente este critério não é suficiente para a escolha das variáveis explicativas.

Quando o intuito é comparar modelos, o valor de r^2_{ajustado} é indicado, por levar em conta o número de variáveis explicativas em relação ao número de observações. O valor de r^2_{ajustado} aumentará se a variável adicionada for suficientemente explicativa, sendo o modelo ideal neste critério aquele que apresenta o maior valor de r^2_{ajustado} . No critério Cp Mallow a escolha do melhor subconjunto de variáveis é baseada na análise gráfica e quantitativa do ajuste dos pontos, sendo o subconjunto mais adequado aquele localizado sobre a reta e que apresenta menor escore.

As variáveis eleitas para regressão múltipla foram incorporadas de acordo com a equação descrita abaixo:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} \dots + \varepsilon_i \quad (3.2.2)$$

onde Y_i é o valor da variável dependente na i -ésima observação; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{p-1}$ é o valor dos parâmetros (ou coeficientes) do modelo; $X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \dots, X_{i,p-1}$ é o valor das $p-1$ variáveis explicativas na i -ésima observação e ε_i é o termo de erro aleatório com média zero $E\{\varepsilon_i\} = 0$ e variância constante $\sigma^2\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$.

A multicolinearidade das variáveis explicativas foi verificada pelo valor de inflação de variância (VIF), sendo 10 o valor limite mencionado por Neter *et al.* (1996).

As etapas de análise de resíduos e validação de cada modelo segue a mesma metodologia citada anteriormente para os modelos de regressão linear simples.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DADOS SAR

Os valores médios de retroespalhamento, em escala linear, extraídos da imagem Radarsat-2 para cada uma das parcelas estudadas em campo, devidamente ortorretificada (seção 3.2.1) e com ruído *speckle* reduzido através do filtro Enhanced Lee com janela 5x5, são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4 – Valores médios de retroespalhamento em σ° , β° e γ° extraídos para cada unidade amostral (P).

P	σ°_{HH}	σ°_{HV}	σ°_{VH}	σ°_{VV}	β°_{HH}	β°_{HV}	β°_{VH}	β°_{VV}	γ°_{HH}	γ°_{HV}	γ°_{VH}	γ°_{VV}
1	0,117	0,009	0,011	0,242	0,145	0,025	0,022	0,556	0,181	0,011	0,015	0,26
2	0,131	0,002	0,001	0,065	0,28	0,012	0,01	0,215	0,16	0,017	0,007	0,165
3	0,148	0,029	0,03	0,077	0,415	0,123	0,098	0,299	0,164	0,041	0,041	0,149
4	0,018	0,006	0,006	0,109	0,071	0,019	0,015	0,209	0,069	0,009	0,006	0,173
5	0,045	0,028	0,039	0,301	0,298	0,057	0,085	0,284	0,189	0,027	0,048	0,133
6	0,319	0,033	0,03	0,696	1,242	0,101	0,104	2,355	0,082	0,037	0,029	0,522
7	0,104	0,027	0,023	0,088	0,535	0,092	0,05	0,411	0,175	0,015	0,015	0,087
8	0,241	0,002	0,005	0,063	0,447	0,02	0,006	0,214	0,352	0,032	0,024	0,502
9	0,496	0,033	0,028	0,436	3,295	0,084	0,078	0,856	0,565	0,05	0,052	0,384
10	0,222	0,024	0,028	0,205	0,833	0,054	0,064	0,695	1,199	0,028	0,03	0,193
11	0,073	0,007	0,008	0,042	1,096	0,013	0,024	0,503	0,165	0,019	0,022	0,072
12	0,259	0,009	0,015	0,198	0,589	0,093	0,077	0,17	0,064	0,046	0,046	0,073
13	0,092	0,085	0,078	0,11	0,295	0,211	0,191	0,174	0,167	0,084	0,077	0,224
14	0,145	0,077	0,073	0,117	0,104	0,141	0,14	0,094	0,198	0,076	0,077	0,232
15	0,3	0,029	0,032	0,126	0,999	0,069	0,083	0,256	0,133	0,056	0,059	0,306
16	0,346	0,071	0,049	0,069	0,935	0,179	0,098	0,356	0,345	0,043	0,033	0,114
17	0,493	0,039	0,09	0,276	1,132	0,164	0,222	0,645	0,364	0,028	0,06	0,274

A imagem Radarsat-2 FQ5, utilizada nesta investigação é apresentada na Figura 5 com as parcelas plotadas. O padrão de tonalidade para as áreas com presença de vegetação em diferentes etapas de desenvolvimento (áreas em regeneração) e com total ou parcial ausência de vegetação (área degradada) nas polarizações cruzadas seguiu o descrito por Souza-Filho e Paradella (2002), que afirmam que locais com presença de vegetação apresentam tons claros pelo predomínio do espalhamento volumétrico, pois os componentes do dossel despolarizam o sinal do radar, já as regiões da imagem sem vegetação aparecem em tons mais escuros, sugerindo espalhamento especular. Kovacs *et al.* (2008) mencionam que a ausência de copa nos manguezais degradados diminui a despolarização do sinal da polarização cruzada e resulta em menor retroespalhamento.

O contraste do retroespalhamento observado nas polarizações cruzadas, entre as regiões em regeneração e degradadas resulta da diferenciação na estrutura da vegetação, como tamanho das folhas e galhos e arquitetura das árvores, que influenciam nos valores de retroespalhamento das imagens Radarsat-2, visto que os componentes estruturais da vegetação na região apresentam tamanhos próximos ao comprimento de onda (banda C - 5,6 cm) influenciando a intensidade do espalhamento volumétrico. Ranson e Sun (1994) afirmam que o espalhamento nas polarizações cruzadas é mais sensível à biomassa da vegetação e é pouco influenciado pelas condições do solo da floresta. Além disso, a banda C possui grande sensibilidade à heterogeneidade do dossel (Mougin *et al.*, 1999) saturando quando a biomassa atinge níveis mais elevados e sendo mais eficiente na discriminação entre as categorias de menor biomassa (Ranson e Sun, 1994).

As imagens copolarizadas apresentaram menor distinção entre os tipos de vegetação, que ficou mais evidenciada pela tonalidade quase homogênea na polarização paralela vertical (VV). Kovacs *et al.* (2008) relatou esta inabilidade do espalhamento copolarizado de distinguir manguezais saudáveis de degradados, pois a ausência do retroespalhamento que aconteceria na presença das folhas e do volume da copa é compensada pela alta interação tronco-solo. Os autores ressaltam a dificuldade de explicar esta inabilidade pelo fato das interações do retroespalhamento com o manguezal acontecerem de maneira muito complexa.

O predomínio de maior retorno do sinal na parte central das imagens em todas as polarizações sugere maior presença de vegetação, já que anteriormente foram descartadas as influências no retroespalhamento provenientes da precipitação e das condições de maré e também por se tratar de imagem na banda C, que apresenta maior sensibilidade aos componentes do dossel, pois estes aumentam substancialmente o espalhamento superficial e volumétrico. Com relação ao ângulo de incidência baixo (23-25°), van der Sandem (1997) descreve que o processo de interação da energia dos sistemas com comprimentos de onda curtos, caso da banda C, apresentam pouca dependência do ângulo de incidência.

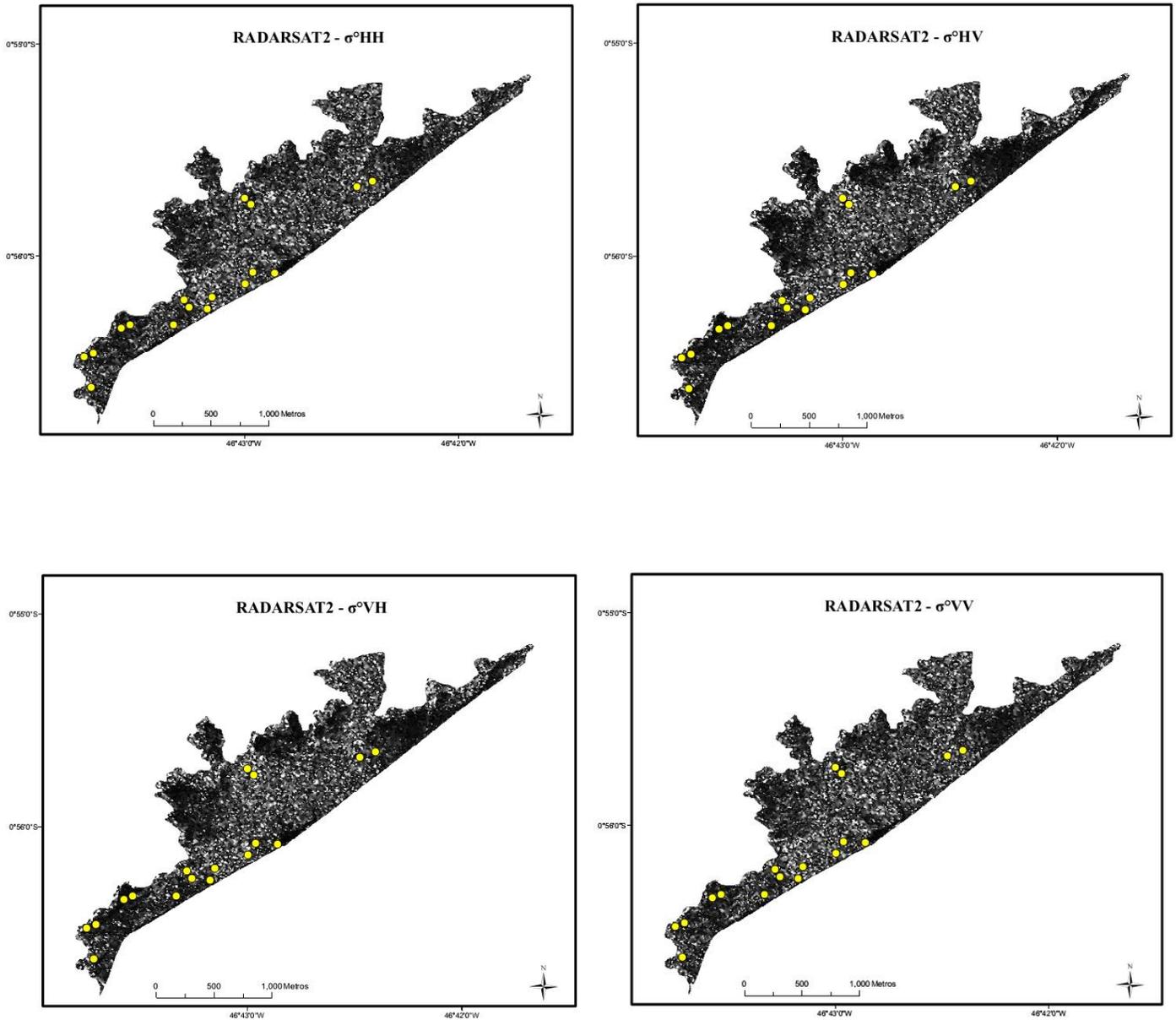


Figura 5 – Imagem Radarsat-2 nas quatro polarizações. Os pontos em amarelo indicam a localização das parcelas.

4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO

A área total detalhada foi de 1700 m², onde foram medidos 2510 indivíduos vivos de *Avicennia germinans*, 261 de *Laguncularia racemosa* e 30 de *Rhizophora mangle* (Apêndice B), além de 289 indivíduos mortos.

Os gráficos presentes na Figura 6 apresentam as médias e desvio padrão da altura e DAP, respectivamente. É evidente a heterogeneidade estrutural das parcelas, sugerindo a formação de alguns grupos. Resultado semelhante foi encontrado por Soares (1999) na investigação sobre o grau de perturbação de manguezais. De acordo com este autor esta heterogeneidade estrutural é um forte indicador de área alterada.

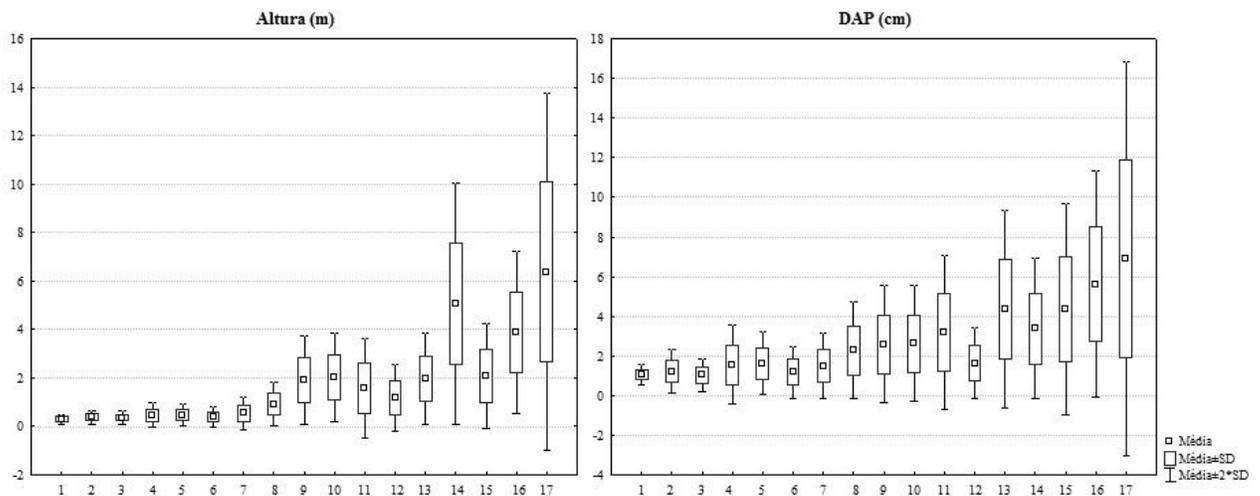


Figura 6 – Média da altura e do DAP, desvio padrão e intervalo de 2 desvios padrões das 17 parcelas estudadas.

Tal heterogeneidade não foi encontrada na ocorrência das espécies, apresentando somente uma parcela com ocorrência das três espécies (parcela 14, Apêndice C) e nove com ocorrência de pelo menos duas espécies, sendo a *A. germinans* presente em todas as unidades. A predominância florística da *A. germinans* fica evidente no Valor de Importância (Figura 7) e pode ser entendida como parte do processo sucessional no qual esta espécie juntamente com a *L. racemosa* são descritas como pioneiras, por serem espécies heliófilas, já a espécie *R. mangle* passa a ocorrer somente quando o ambiente oferece mais umidade e sombra (Chen e Twilley, 1998). Além disso, a espécie *A. germinans* possui alta relação com locais de topografia mais elevada, capacidade de sobreviver em áreas pouco inundadas e com salinidade elevada (Matni *et al.*, 2006; Menezes *et*

al., 2008), condições similares a encontrada na região em questão favorecendo a dominância desta espécie.

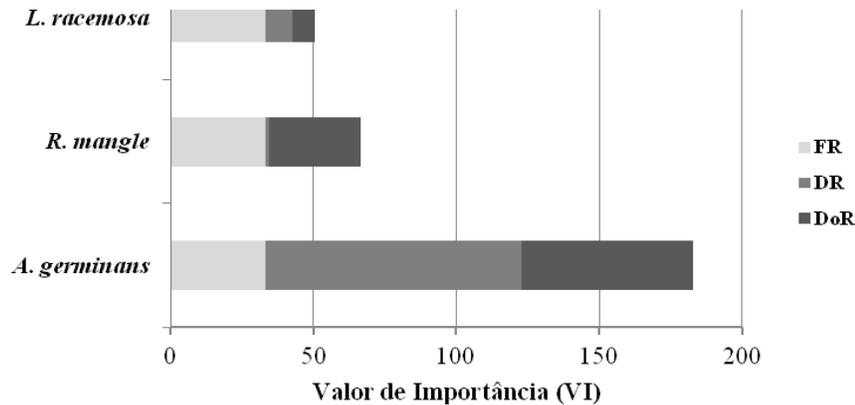


Figura 7 – Valor de Importância de todas as unidades amostrais. FR = Frequência Relativa; DR = Densidade Relativa; DoR = Dominância Relativa.

A Figura 8 apresenta o dendograma resultante da análise de agrupamento que possibilitou distinguir quatro grupos, na linha de corte ~5, que serão descritos posteriormente. O valor médio, erro padrão e desvio padrão da média de cada parâmetro por grupo é apresentado na Figura 9. Para verificar se estas distribuições são significativamente diferentes; a análise de variância ANOVA foi aplicada e apresentou apenas a variável densidade com diferença não significativa entre as distribuições dos quatro grupos (Tabela 5). O teste *post hoc* de Tukey mostrou que a área basal e a biomassa apresentaram diferenças significativas entre os quatro grupos (Tabela 6).

O fato de a variável área basal apresentar diferença significativa entre os quatro grupos é um forte indício de que podem ser considerados separadamente, pois de acordo com Schaeffer Novelli & Cintrón (1986), esta variável é um excelente índice do grau de desenvolvimento do bosque, por estar intimamente relacionada com o volume de madeira. Quando observa-se os valores médios por grupo (Tabela 7) é considerável a diferença entre estes, com alguns valores destacados que representam médias próximas. Além disso, uma vez detalhados os valores de todos os parâmetros estruturais utilizados por parcela mostrados na Tabela 6 e no Apêndice A fica evidente que os três primeiros grupos (parcelas 1 a 13) apresentam relevantes diferenças de desenvolvimento estrutural e, por esta razão, foram considerados separadamente resultando nos quatro grupos, descritos a seguir:

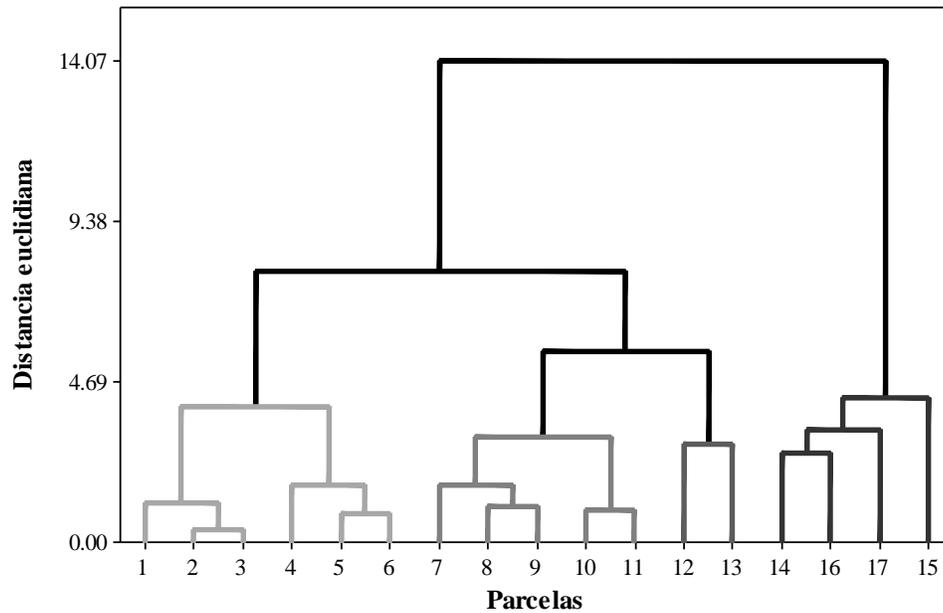


Figura 8 – Análise de agrupamento através da distância Euclidiana (da média) com os parâmetros biofísicos altura média, DAP médio, área basal.

Tabela 5 – Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros estruturais considerando os quatro grupos formados na análise de agrupamento das parcelas, ao nível de confiança de 95%.

	Alt. Lorey		Alt. Média		Alt. Máxima		DAP		AB		Biomassa		Densidade	
	F	p valor	F	p valor	F	p valor	F	p valor	F	p valor	F	p valor	F	p valor
Intercepto	43,6397	0,0000	57,8874	0,0000	58,7973	0,0000	128,5013	0,0000	612,1687	0,0000	188,3453	0,0000	26,1716	0,0002
Grupo	11,0652	0,0007	14,1051	0,0002	10,2756	0,0010	12,0889	0,0005	80,2152	0,0000	36,4730	0,0000	1,0950	*0,3861

*não significativo p=0.05

Tabela 6 – Teste *post hoc* de Tukey dos parâmetros biofísicos considerando os quatro grupos formados.

	A. Lorey	A. Média	A. Máxima	DAP	AB	Densidade	Biomassa
I	0,55 a	0,39 a	1,21 a	1,28 a	2,87 a	163,67 a	79,22 a
II	2,02 a	1,39 a	3,95 a	2,44 a	9,02 b	167,60 a	291,68 b
III	2,19 a	1,57 a	4,07 a	2,98 a	14,34 c	304,50 a	488,92 c
IV	6,40 b	4,36 b	9,44 b	5,07 b	20,11 d	93,00 a	865,82 d

Teste de Tukey: letras iguais indicam que os grupos não são distintos ao nível de confiança de 95%.

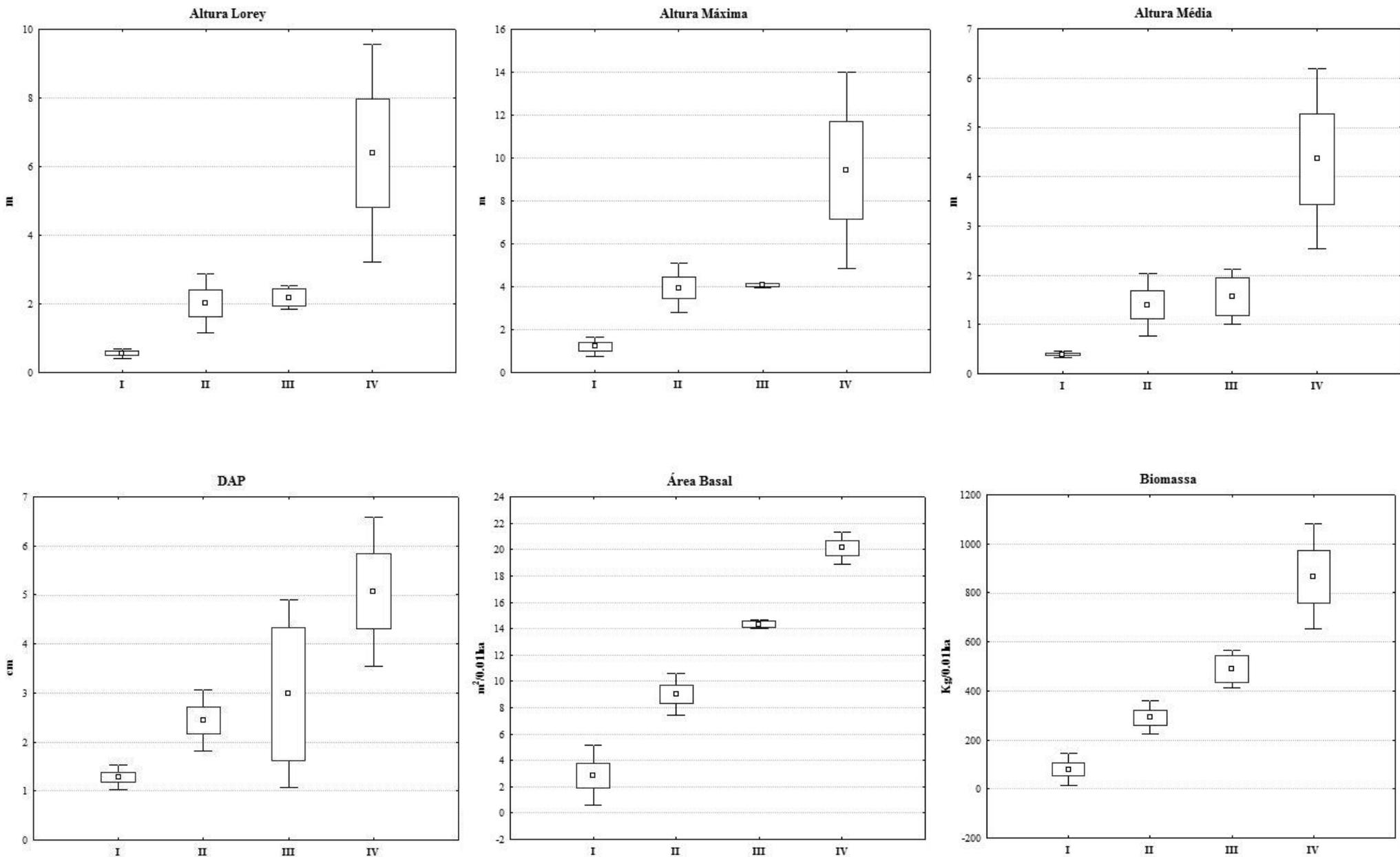


Figura 9 – Média, erro padrão e desvio padrão dos parâmetros estruturais da vegetação para os 4 grupos.

□ Média
 □ Média±SE
 | Média±SD

Tabela 7 – Parâmetros biofísicos das 17 parcelas estudadas, evidenciando os quatro grupos formados. Desvio padrão para DAP e altura.

P	Grupos	Espécie Dominante	Densidade (N.ha ⁻¹)	Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	DAP (cm)	Altura (m)	Biomassa Total (kg.m ⁻²)
1	I	<i>Avicennia</i>	1600	0,15	1,06 ± 0,3	0,3 ± 0,1	3,17
2			8100	1,13	1,21 ± 0,5	0,37 ± 0,1	27,56
3			14800	1,45	1,04 ± 0,4	0,37 ± 0,1	31,53
4			13900	3,72	1,55 ± 1	0,46 ± 0,3	109,35
5			19500	5,04	1,63 ± 0,8	0,47 ± 0,2	143,22
6			40300	5,75	1,18 ± 0,6	0,38 ± 0,2	160,47
7	II	<i>Avicennia</i>	31500	7,26	1,5 ± 0,8	0,55 ± 0,3	209,83
8			15800	8,31	2,28 ± 1,2	0,93 ± 0,5	261,98
9			11700	8,11	2,58 ± 1,5	1,91 ± 0,9	269,43
10			14800	10,43	2,62 ± 1,5	2,03 ± 0,9	335,62
11			10000	10,98	3,2 ± 1,9	1,57 ± 1	381,53
12	III	<i>Avicennia</i>	53700	14,56	1,63 ± 0,9	1,18 ± 0,7	435,13
13			7200	14,11	4,34 ± 2,5	1,96 ± 0,9	542,71
14	IV	<i>Avicennia</i>	17800	20,42	3,38 ± 1,8	5,08 ± 2,5	650,09
15			9000	18,34	4,35 ± 2,7	2,09 ± 1,1	735,74
16			6700	20,89	5,63 ± 2,9	3,88 ± 1,7	953,27
17			3700	20,78	6,9 ± 5	6,39 ± 3,7	1124,19

P representa a identificação de cada parcela.

O Grupo I engloba o intervalo da parcela 1 a 6, que apresentam área basal variando entre 0,15 - 5,75 m².ha⁻¹, valores baixos que sugerem que este possa ser um estágio recente de vegetação (Tabela 7). Este grupo apresentou dois subgrupos, o primeiro formado pelas parcelas 1, 2 e 3 nas quais há a ausência de indivíduos com DAP > 4 cm (Apêndice 1) e o maior valor da altura de Lorey atingida foi de 0,5 m, sendo menos desenvolvido que o segundo subgrupo, que apresenta indivíduos com o DAP superior a 4 cm e a maior altura de Lorey igual a 0,75 m. Em termos de densidade a variação dentro deste grupo foi elevada (de 16 a 403 indivíduos), diretamente proporcional ao desenvolvimento estrutural.

O Grupo II englobou o intervalo das parcelas 7 a 11, que apresentaram valores de área basal superiores aos do Grupo I (estágio recente), sendo o valor máximo aproximadamente o dobro do correspondente no Grupo I (7,2 - 10,9 m².ha⁻¹), representando um estágio de regeneração inicial. Dois subgrupos foram identificados, o primeiro formado pelas parcelas 7, 8 e 9 e o segundo pelas parcelas 10 e 11, porém com distinção pequena e somente para a área basal, sendo as outras variáveis com valores não ordenados. A variação da altura de Lorey deste grupo foi de 0,85 m a 2,81 m.

O Grupo III é o mais restrito, somente com as parcelas 12 e 13, sendo a estrutura horizontal deste grupo o parâmetro que o distingue dos demais, principalmente a variável área basal, muito semelhante dentro do grupo e distinta dos demais (Tabela 7 e Figura 9). A densidade da parcela 12 foi a mais elevada entre todas as parcelas investigadas, apresentando 537 indivíduos, dentre os quais somente 12 apresentaram DAP > 4cm. A parcela 13 obteve baixa densidade, com 72 indivíduos, que mostram certa proporcionalidade no número de indivíduos com DAP > e < que 4cm (Apêndice 1). As alturas de Lorey tiveram valores relativamente aproximados 1,95 m para a parcela 12 e 2,43 m para a parcela 13. Entre estas parcelas é evidenciada a proporcionalidade inversa das variáveis: densidade e DAP (Tabela 7), sendo este grupo denominado de regeneração intermediária.

O Grupo IV composto pelas parcelas 14, 15, 16 e 17 representa o grupo com maior desenvolvimento estrutural, com valores de área basal variando entre 18,3 e 20,89 m²·ha⁻¹, ampla variação de altura, cuja altura de Lorey variou de 3,1 a 10,5 m e com altura máxima de 15,15 m, sendo denominado de regeneração avançada. Este grupo apresentou a maior diversidade florística, sendo o único a apresentar uma parcela com as três espécies encontradas (Parcela 14, Apêndice C). Outro fato peculiar a este grupo é a dominância da espécie *L. racemosa* na parcela 14, pois de acordo com Menezes e Berger (2008) não há registro de dominância desta espécie na região. Esta unidade se diferenciou ainda por ser a única com dominância da espécie *R. mangle*.

Entre todas as parcelas investigadas, a única que a relação entre o DAP e altura foi elevada como descrito na literatura foi a Parcela 17, presente no Grupo IV. A baixa relação entres estes parâmetros para as demais parcelas pode estar relacionada ao descrito por Fromard *et al.* (1998) para a espécie *A. germinans* pois, de acordo com estes autores frequentemente a ponta do arbusto quebra e este perde a relação biológica DAP/altura existente pois o crescimento apical é substituído por um ramo auxiliar.

4.3 CÁLCULO DA BIOMASSA DE MANGUEZAIS EM REGENERAÇÃO ATRAVÉS DE EQUAÇÃO ALOMÉTRICA

A relação alométrica baseada na proposta de Fromard *et al.* (1998) para o desenvolvimento das equações de cálculo de biomassa é apresentada na Figura 10, onde foi plotado os valores de biomassa por espécie para cada indivíduo e os respectivos valores de DAP. Para a espécie *A. germinans* foram separados os indivíduos conforme a classe diamétrica utilizada na equação 3.4.1 e 3.4.2. Os valores de r^2 são apresentados conjuntamente. Os indivíduos da espécie *A. germinans* com DAP < 4 cm obtiveram os maiores valores de r^2 , sendo superior ao valor encontrado por Mougín *et al.* (1999). A outra classe diamétrica da mesma espécie (DAP > 4 cm), bem como as outras espécies, apresentaram valores igualmente elevados, porém inferiores aos calculados por Mougín *et al.* (op. cit.). Na Tabela 8 constam os valores de biomassa calculados por espécie dentro de cada unidade, o total para cada parcela e para cada espécie.

Tabela 8 - Valores de Biomassa (t ha^{-1}) por espécie por parcela, total de cada espécie e total de cada parcela.

Parcela	Grupos				Biomassa Total
		<i>A. germinans</i>	<i>R. mangle</i>	<i>L. racemosa</i>	(por parcela)
1	I	0,23131559		0,085980878	0,317296468
2		2,290539392		0,465403775	2,755943166
3		1,997803471		1,154972669	3,15277614
4		10,78342835		0,151695767	10,93512412
5		14,32239106			14,32239106
6		16,04711476			16,04711476
7	II	20,98314415			20,98314415
8		26,19789303			26,19789303
9		26,18791921		0,755361755	26,94328096
10		33,56180721			33,56180721
11		37,26769301		0,885134827	38,15282783
12	III	42,45199441		1,060669954	43,51266436
13		54,2711084			54,2711084
14	IV	22,26549536	36,95022273	5,792941318	65,0086594
15		73,57389806			73,57389806
16		66,18894378	29,13794431		95,32688809
17		79,44708974	32,97175703		112,4188468
Biomassa Total (espécie)		528,069579	99,05992407	10,35216094	

A biomassa total variou significativamente entre as unidades amostrais, sendo as parcelas que tiveram menor valor de biomassa total pertencem ao estágio recente, as quais apresentam a maioria dos indivíduos com DAP < 4 cm. As parcelas com maior biomassa total foram aquelas pertencentes ao estágio de regeneração avançada, o que condiz com o desenvolvimento estrutural dos bosques, acrescido da presença da espécie *R. mangle* que só ocorreu neste grupo e apresenta biomassa superior a das outras espécies devido ao grande volume de raízes aéreas.

As parcelas 10, 15 e 16 apresentaram valores de biomassa próximos aos valores encontrados por Mougín *et al.* (1999) e Proisy *et al.* (2002) para os manguezais da Guiana Francesa. A parcela 10, no estágio de regeneração inicial, é composta exclusivamente por árvores da espécie *A. germinans* e obteve biomassa de 33,5 t ha⁻¹ valor aproximado ao da biomassa de uma parcela do estágio pioneiro de Mougín *et al.* (op. cit.) que apresentou 31,5 t ha⁻¹. Já a parcela 16 presente no estágio de regeneração avançada é composta por indivíduos da espécie *A. germinans* e *R. mangle* e obteve biomassa de 95,3 t ha⁻¹ comparada a biomassa de 92,9 t ha⁻¹ de outra parcela do estágio pioneiro de Mougín *et al.* (op. cit.).

A parcela 15 também presente no estágio de regeneração avançada e composta exclusivamente por árvores da espécie *A. germinans*, totalizou 73,5 t ha⁻¹ de biomassa, este mesmo valor foi encontrado por Proisy *et al.* (op. cit.) para uma parcela em fase de dossel aberto em declínio, esta é comparada em termos de biomassa a uma parcela em estágio recente da investigação, que apresentou biomassa de 71,9 t ha⁻¹.

Proisy *et al.* (op. cit.) salientam que estas parcelas, dossel aberto em declínio e dossel homogêneo, apesar de apresentarem valores considerados iguais de biomassa possuem diferenças estruturais, que resultam em respostas distintas a energia do SAR, o que levou os autores a concluir que a relação retroespalhamento e biomassa está restrita a dosséis homogêneos.

Entretanto, apesar de ocorrer diferença estrutural entre as parcelas do presente estudo e as parcelas relatadas por Mougín *et al.* (1999) e Proisy *et al.* (2002) que tiveram valores de biomassa aproximados, quando analisadas somente as parcelas desta investigação e plotados os valores de biomassa frente aos respectivos valores de retroespalhamento (Figura 10) observa-se de maneira geral uma tendência. As parcelas dos estágios menos regenerados, com menor biomassa, apresentam realmente valores menores de retroespalhamento e o aumento da biomassa

é acompanhado por um aumento no valor de retroespalhamento. Este padrão é mais evidente a partir do estágio intermediário de regeneração (parcelas 12 e 13), sendo que dentre os dois primeiros estágios as parcelas apresentam menor ajuste a este padrão, o que pode ser ocasionado por diferentes fontes de espalhamento como a influência do solo, a disposição dos arbustos dentro da parcela e a presença de indivíduos/troncos mortos.

Com relação às diferenças entre as polarizações observa-se claramente que a polarização cruzada VH apresenta valores menores de retroespalhamento que nas imagens copolarizadas ocasionado pela atenuação do sinal devido o espalhamento volumétrico. Dentre as imagens copolarizadas a polarização VV apresentou maior aleatoriedade dos pontos.

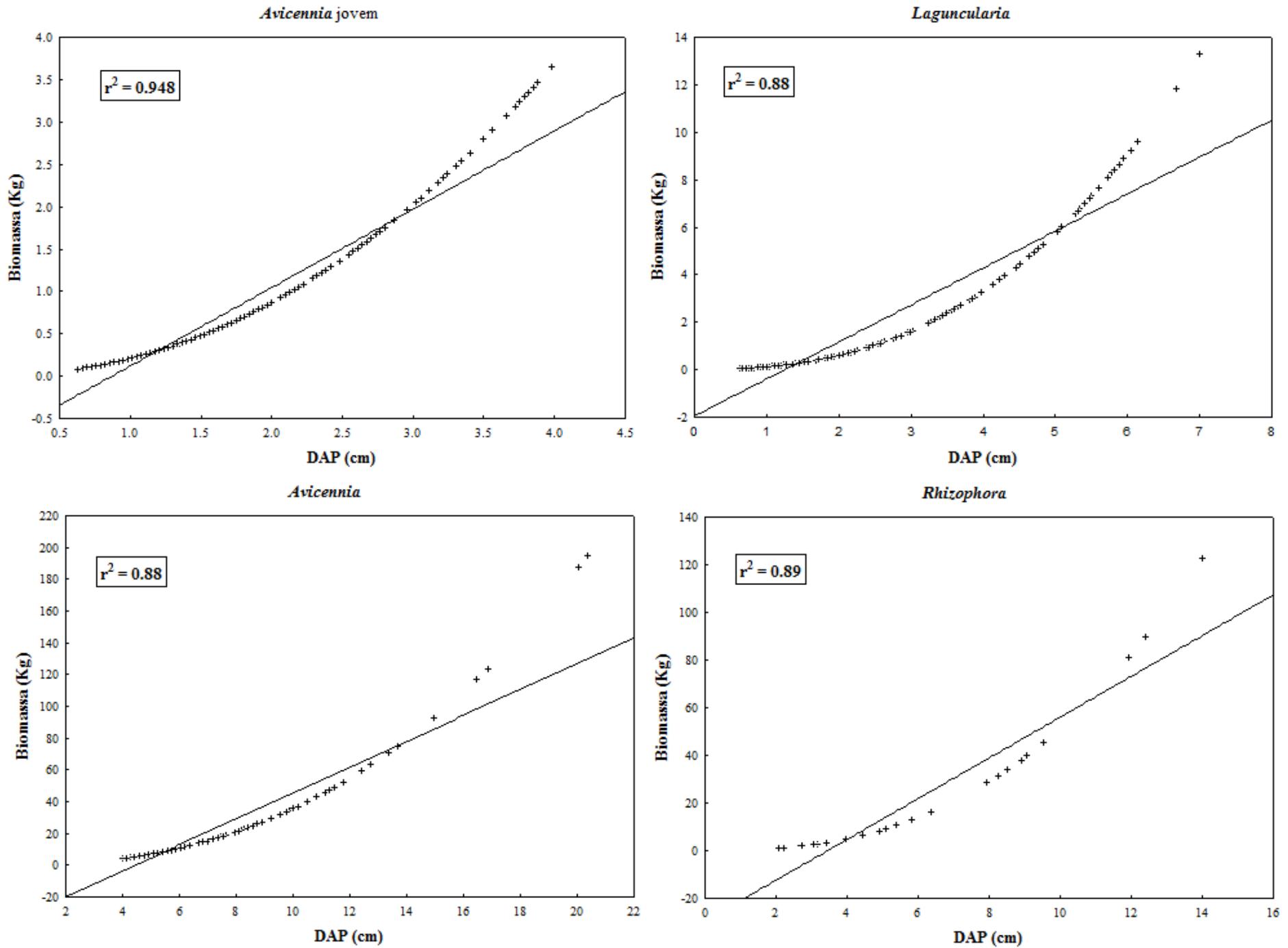


Figura 10 – Biomassa de cada árvore por espécie contra os valores de DAP dos respectivos indivíduos.

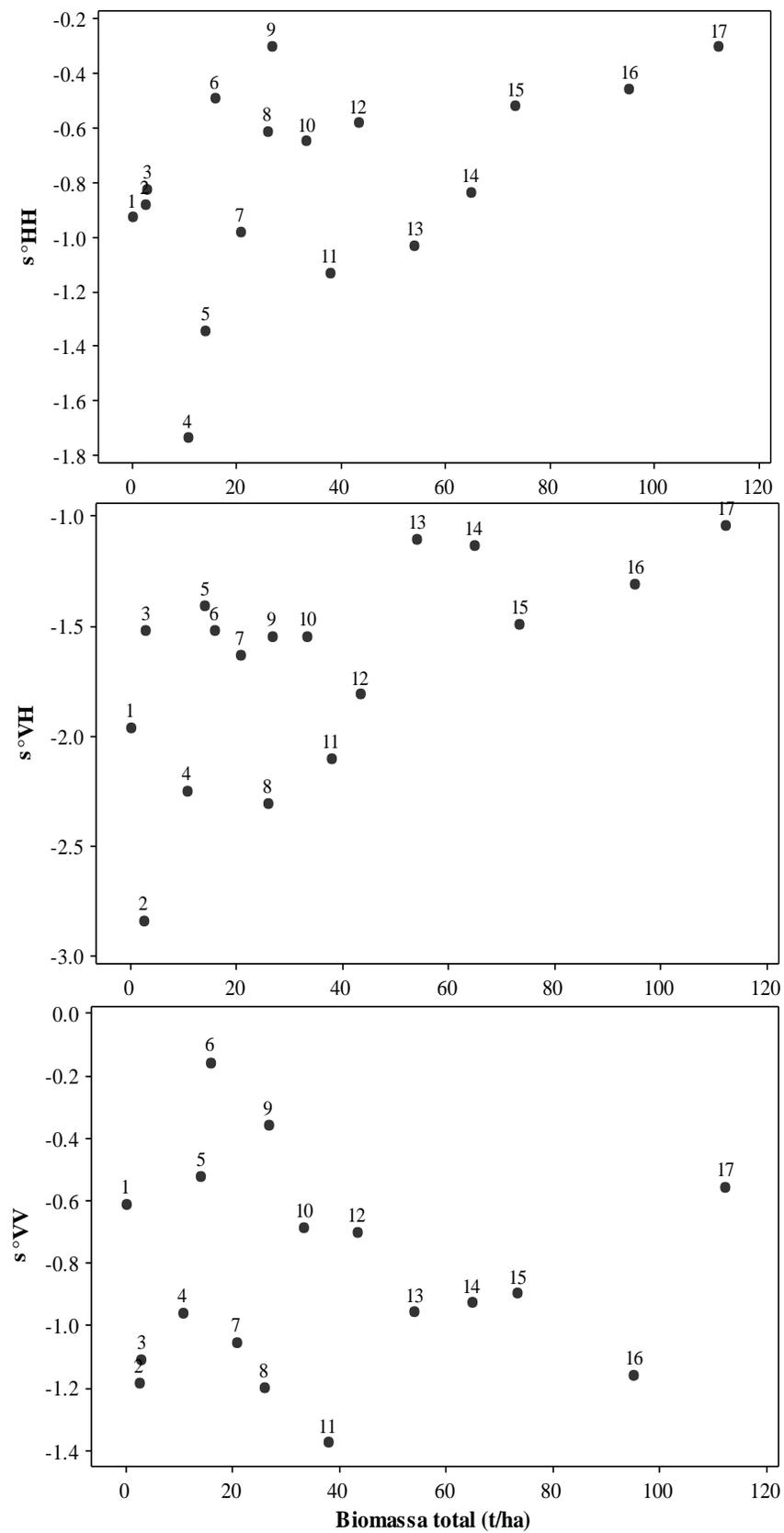


Figura 11 – Valores de retrospalhamento sigma linear por parcela nas polarizações HH, VH e VV contra os valores de biomassa total.

A tabela abaixo apresenta os valores de correlação entre os parâmetros estruturais da vegetação. Destaca-se a correlação entre a biomassa e os demais parâmetros estruturais, além da alta intercorrelação entre todos os parâmetros, exceto a densidade que apresentou correlação baixa e negativa.

Tabela 9 – Coeficiente de correlação entre os parâmetros biofísicos. Destacadas as correlações com valores mais altos e significativos (nível de significância de 95%).

	Altura Lorey (m)	Altura Média (m)	Altura Máxima (m)	DAP Médio (cm)	Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	Densidade (N.ha ⁻¹)
Altura Média (m)	0,989 0,000					
Altura Máxima (m)	0,993 0,000	0,982 0,000				
DAP Médio (cm)	0,862 0,000	0,870 0,000	0,835 0,000			
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	0,824 0,000	0,853 0,000	0,836 0,000	0,850 0,000		
Densidade (N.ha ⁻¹)	-0,277 0,282	-0,301 0,241	-0,203 0,434	-0,442 0,076	-0,042 0,874	
Biomassa total (kg.m ⁻²)	0,888 0,000	0,897 0,000	0,876 0,000	0,955 0,000	0,954 0,000	-0,208 0,424

4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS E MODELAGEM DOS DADOS ESTRUTURAIS DA VEGETAÇÃO DE MANGUE EM REGENERAÇÃO A PARTIR DE DADOS SAR

Na etapa de análise exploratória dos dados de entrada dos modelos foi verificada a distribuição das variáveis com relação à normalidade através do método Shapiro-Wilk (W). A um nível de 95% de confiança as variáveis, área basal e biomassa apresentaram distribuição normal. As demais variáveis não obtiveram valor de p necessário para esta afirmação (Tabela 10). A não transformação das variáveis foi baseada no Teorema do Limite Central, que sugere que a distribuição amostral de variáveis providas de populações com $n > 30$ aproxima-se de uma distribuição normal, além do fato da busca por relações simplificadas.

Tabela 10 – Valor de p para teste da normalidade da variável Y.

X	W	valor p
Altura Lorey	0,087	0,010
Altura Média	0,885	0,010
Altura Máxima	0,896	0,010
DAP	0,932	0,031
Área Basal	0,974	0,100
Densidade	0,902	0,010
Biomassa total	0,955	0,100

O padrão de dispersão das variáveis biofísicas frente às variáveis do SAR (nas quatro polarizações e para os três parâmetros de refletividade) foi verificado através dos diagramas de dispersão que constam no Apêndice D. Nestes diagramas a reta representa o ajustamento ao padrão linear que foi mais pronunciado com as polarizações cruzadas. Entre as variáveis biofísicas somente a densidade não demonstrou ajuste ao padrão linear.

Em seguida são apresentados os valores do coeficiente de correlação (Tabela 11) quando utilizado o filtro Enhanced Lee com janela 5 x 5, sendo os demais presentes em Apêndice (E e F). Os valores confirmaram o padrão de dispersão nos quais a polarização VH apresentou valores de correlação superior às demais, variando o r entre 10 a 25% a mais, seguida da polarização HV. A polarização VV obteve correlação baixa e negativa. O parâmetro σ° obteve entre os coeficientes de calibração os valores mais elevados de correlação.

Tabela 11 – Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 5x5. Destacados os valores de correlação altos e significativos.

FELEE 5X5						
	Altura Lorey	Altura Média	Altura Máxima	DAP	Área Basal	Biomassa total
	(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /ha)	(Kg/0.01ha)
β°_{HH}	0,196	0,172	0,220	0,217	0,151	0,175
	0,452	0,509	0,397	0,403	0,563	0,501
β°_{HV}	0,557	0,600	0,543	0,605	0,618	0,639
	0,020	0,011	0,024	0,010	0,008	0,006
β°_{VH}	0,705	0,702	0,691	0,666	0,622	0,675
	0,002	0,002	0,002	0,003	0,008	0,003
β°_{VV}	-0,735	-0,119	-0,076	-0,144	-0,172	-0,134
	0,735	0,648	0,773	0,581	0,508	0,609
σ°_{HH}	0,562	0,528	0,564	0,517	0,467	0,552
	0,019	0,029	0,018	0,034	0,059	0,022
σ°_{HV}	0,507	0,595	0,492	0,576	0,616	0,579
	0,038	0,012	0,045	0,016	0,008	0,015
σ°_{VH}	0,770	0,792	0,753	0,729	0,681	0,723
	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,001
σ°_{VV}	-.029	-0,067	-0,018	-0,156	-0,143	-0,122
	0,911	0,797	0,944	0,550	0,583	0,641
γ°_{HH}	0,204	0,235	0,227	0,186	0,119	0,121
	0,443	0,365	0,380	0,474	0,648	0,644
γ°_{HV}	0,349	0,416	0,365	0,396	0,587	0,453
	0,170	0,097	0,150	0,116	0,013	0,068
γ°_{VH}	0,581	0,606	0,589	0,551	0,662	0,592
	0,014	0,010	0,013	0,022	0,004	0,012
γ°_{VV}	0,030	0,006	0,036	0,000	-0,053	-0,035
	0,909	0,981	0,890	0,999	0,840	0,894

Para o conjunto de variáveis com coeficiente de correlação significativo, em destaque na Tabela 11, foram investigados diferentes ajustes para as funções de regressão, conforme descrito na seção 3.5. Na tabela abaixo constam apenas os modelos que apresentaram o maior valor de r^2 com nível de confiança de 95%.

Tabela 12 – Modelos que apresentaram maior valor de r^2 nas três normalizações e nos três tamanhos de filtro, com a polarização VH como variável explicativa.

		FELEE 3X3			FELEE 5X5			FELEE 7X7		
		σ°_{VH}	β°_{VH}	γ°_{VH}	σ°_{VH}	β°_{VH}	γ°_{VH}	σ°_{VH}	β°_{VH}	γ°_{VH}
		LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	POT
A. Lorey	r^2	0,55	0,37	0,45	0,59	0,50	0,41	0,40	0,35	0,33
	β_1 (p)	0,001	0,009	0,003	0,000	0,002	0,006	0,007	0,013	0,016
	F	18,315	8,924	12,291	21,909	14,795	10,265	9,924	7,926	7,354
	p	0,001	0,009	0,003	0,000	0,002	0,006	0,007	0,013	0,016
		LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP
A. Média	r^2	0,58	0,34	0,48	0,63	0,49	0,43	0,46	0,32	0,36
	β_1 (p)	0,000	0,014	0,002	0,000	0,002	0,004	0,003	0,018	0,012
	F	20,693	7,83	13,907	25,237	14,612	11,415	12,669	7,09	8,261
	p	0,000	0,014	0,002	0,000	0,002	0,004	0,003	0,018	0,012
		LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	POT
A. Máx.	r^2	0,52	0,37	0,41	0,57	0,48	0,37	0,39	0,33	0,32
	β_1 (p)	0,001	0,010	0,005	0,000	0,002	0,009	0,008	0,016	0,019
	F	16,376	8,666	10,508	19,587	13,681	8,958	9,450	7,381	6,894
	p	0,001	0,010	0,005	0,000	0,002	0,009	0,008	0,016	0,019
		LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP
DAP	r^2	0,49	0,31	0,45	0,53	0,44	0,35	0,36	0,35	0,31
	β_1 (p)	0,002	0,02	0,003	0,001	0,003	0,013	0,011	0,013	0,021
	F	14,543	6,761	12,282	16,979	11,987	7,944	8,444	7,973	6,593
	p	0,002	0,02	0,003	0,001	0,003	0,013	0,011	0,013	0,021
		LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	EXP	LIN	LIN	LIN
AB	r^2	0,42	*	0,50	0,46	0,39	0,44	0,38	*	0,36
	β_1 (p)	0,005		0,001	0,003	0,008	0,014	0,008		0,011
	F	10,895		15,150	12,950	9,466	11,671	9,172		8,33
	p	0,005		0,001	0,003	0,008	0,004	0,008		0,011
		LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN	LIN
Biomassa	r^2	0,48	0,30	0,47	0,52	0,46	0,35	0,36	0,32	0,29
	β_1 (p)	0,002	0,023	0,003	0,001	0,003	0,012	0,011	0,018	0,027
	F	13,699	6,457	13,022	16,430	12,572	8,073	8,376	7,029	5,977
	p	0,002	0,023	0,003	0,001	0,003	0,012	0,011	0,018	0,027

Fica evidente que o ajuste mais adequado da função de regressão entre as variáveis é linear, utilizando o parâmetro de refletividade sigma linear com aplicação do filtro ELEE com janela 5 x 5 na polarização VH, com exceção da variável AB, que resultou em valor superior de r^2 quando relacionada com o parâmetro de refletividade gamma (γ) com filtro ELEE com janela 3 x 3.

FELEE - Filtro Enhanced Lee

LIN - Ajuste linear da equação de regressão

EXP - Ajuste exponencial da equação de regressão

POT - Ajuste potência da equação de regressão

4.4.1 Modelos de regressão linear simples

Os modelos de regressão linear simples seguiram a equação 3.2.1 sendo a variável independente a polarização VH e o parâmetro de refletividade sigma linear (σ°) como variável dependente, com exceção à variável AB como citado anteriormente.

A Tabela 13 apresenta os valores dos parâmetros da função de regressão β_0 e β_1 , o intercepto e o coeficiente da regressão, respectivamente, além do erro padrão, coeficiente de determinação e os valores do teste F de cada modelo. O parâmetro β_1 obteve significância em todos os modelos (95% de confiança), bem como o teste F de variância global de cada modelo.

Tabela 13 – Valores referentes aos modelos de regressão linear simples para os parâmetros estruturais da vegetação.

Parâmetro	β_0	β_1	ϵ	r^2	F
Altura Lorey	0,020	0,770	1,7894	0,59	21,909
p	-	0,000			0,000
Altura Média	0,049	0,792	1,1248	0,63	25,237
p	-	0,000			0,000
Altura Máxima	0,817	0,753	2,5923	0,57	19,587
p	-	0,000			0,000
DAP	0,473	0,729	1,2193	0,53	16,979
p	-	0,001			0,001
AB σ°_{VH} (5x5)	0,021	0,681	0,05339	0,46	12,950
p	-	0,003			0,003
AB γ°_{VH} (3x3)	0,007	0,614	0,0514	0,50	15,150
p		0,001			0,001
Biomassa Total	87,056	0,723	234,83	0,52	16,430
p	-	0,001			0,001

A análise da distribuição dos resíduos quanto à normalidade foi conferida através do teste de normalidade *Shapiro-Wilk* (nível de confiança de 95%). Com base nos valores de p (Tabela 14) não há evidências para rejeitar a hipótese de normalidade.

Tabela 14 – Valores do teste de normalidade dos resíduos para cada modelo.

X	W	valor p
Altura Lorey	0,970	0,100
Altura Média	0,972	0,100
Altura Máxima	0,986	0,100
DAP	0,972	0,100
AB σ°_{vH} (5x5)	0,984	0,100
AB γ°_{vH} (3x3)	0,977	0,100
Biomassa Total	0,978	0,100

Os gráficos dos resíduos contra os valores preditos permitem observar que os modelos de estimativa do DAP, área basal e biomassa apresentaram os pontos aleatoriamente distribuídos entre o intervalo de dois desvios padrões conforme recomendado. As funções de regressão da altura máxima exibiu aleatoriedade, porém com dois pontos fora do intervalo (parcelas 13 e 17), sendo considerados *outliers*. Entretanto, os modelos para a altura média e altura de Lorey apresentaram assimetria nos valores em torno do zero, além de apresentarem pontos fora do intervalo, parcelas 13 e 17 para os modelos de altura de Lorey e parcela 13 para o modelo altura média. A verificação da constância da variância dos resíduos foi efetuada pelo teste de *Levene* que indicou a homocedasticidade dos modelos, em nível de confiança de 95%.

Através dos valores de *Leverage* e dos resíduos padronizados foram verificados os pontos candidatos a *outliers* em X e em Y (Tabela 15), respectivamente, que coincidiram com os pontos apontados nos gráficos da Figura 12. Com base nos valores da porcentagem da distância de Cook (Tabela 15) sobre os valores de F dos respectivos modelos, todos os pontos ficaram distantes do limiar de influência de 20%, sendo assim não foram excluídos das análises.

Tabela 15 – *Outliers* em X e Y, distância de Cook e a porcentagem em relação ao teste F de cada modelo para decisão da influência dos pontos.

	X	Y	Cook	%
Altura Lorey	17	13	0,93403	4,26
	-	17	1,57435	7,19
Altura Média	17	13	0,84811	3,36
	-	-	0,814751	3,23
Altura Máxima	17	13	0,87285	4,46
	-	17	1,35142	6,90
DAP	17	-	0,606958	3,57
AB σ°_{vH} (5x5)	17	-	0,001111	0,01
AB γ°_{vH} (3x3)	-	-	-	-
Biomassa Total	17	-	0,928006	5,65

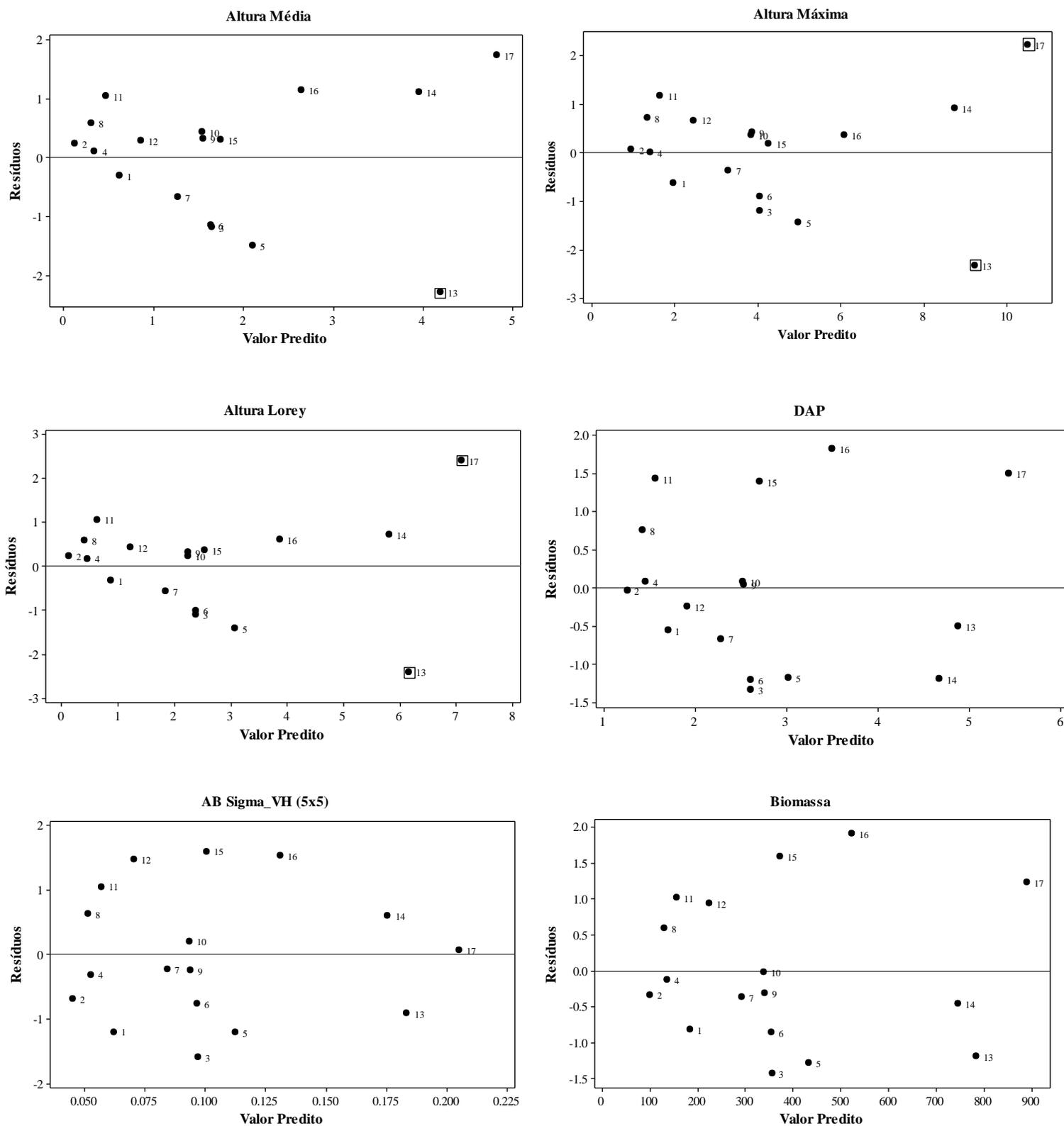


Figura 12 - Gráficos dos valores dos resíduos contra os valores preditos mostrando a disposição aleatória dos dados, o que indica uma variância constante, com ressalvas aos modelos de altura. A variável dependente utilizada no modelo foi o retroespalhamento sigma linear na polarização VH.

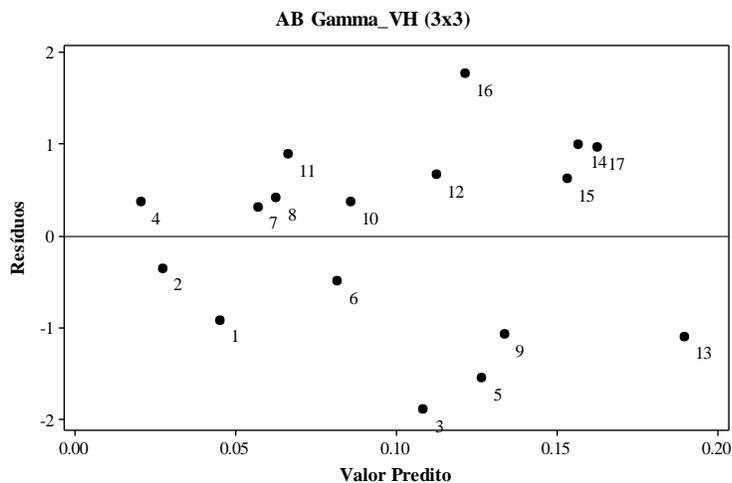


Figura 12 – Continuação

Os gráficos dos valores observados contra os valores preditos de cada modelo (Figura 13) permitem analisar visualmente a adequabilidade dos mesmos. A linha central corresponde à linha de tendência linear e as linhas tracejadas marcam o nível de confiança a 95%. Foram incluídos ainda os valores do erro médio quadrático (RMSE) e do coeficiente de determinação (r^2) de cada modelo. Considerando os valores do coeficiente de determinação, a polarização VH teve maior poder explicativo nas funções de regressão relacionadas à altura, sendo mais adequada para a altura média, que apresentou o menor valor de RMSE. Entretanto, todos os valores das discrepâncias para altura foram considerados elevados, visto a faixa de altura mensurada nesta investigação. Comparando os valores de coeficiente de determinação, entre os modelos para estrutura horizontal, o melhor explicado pela polarização VH foi o modelo de DAP. Contudo, o valor de RMSE foi considerado elevado quando observada a amplitude de variação desta estrutura na área de estudo. Quanto aos dois modelos para a variável AB, apesar do retroespalhamento γ_{VH} (3x3) apresentar maior poder explicativo ($r^2 = 50\%$) quando comparados os valores de RMSE com o modelo σ°_{VH} (5x5), este apresenta discrepâncias consideravelmente menores que a função envolvendo γ_{VH} (3x3). Para o ajuste da função de regressão relacionada à biomassa, a polarização VH foi igualmente explicativa e o valor de RMSE ($0,22 \text{ kg m}^{-2}$) considerado excelente quando comparado ao valor total de biomassa calculado no presente estudo ($11,24 \text{ kg m}^{-2}$).

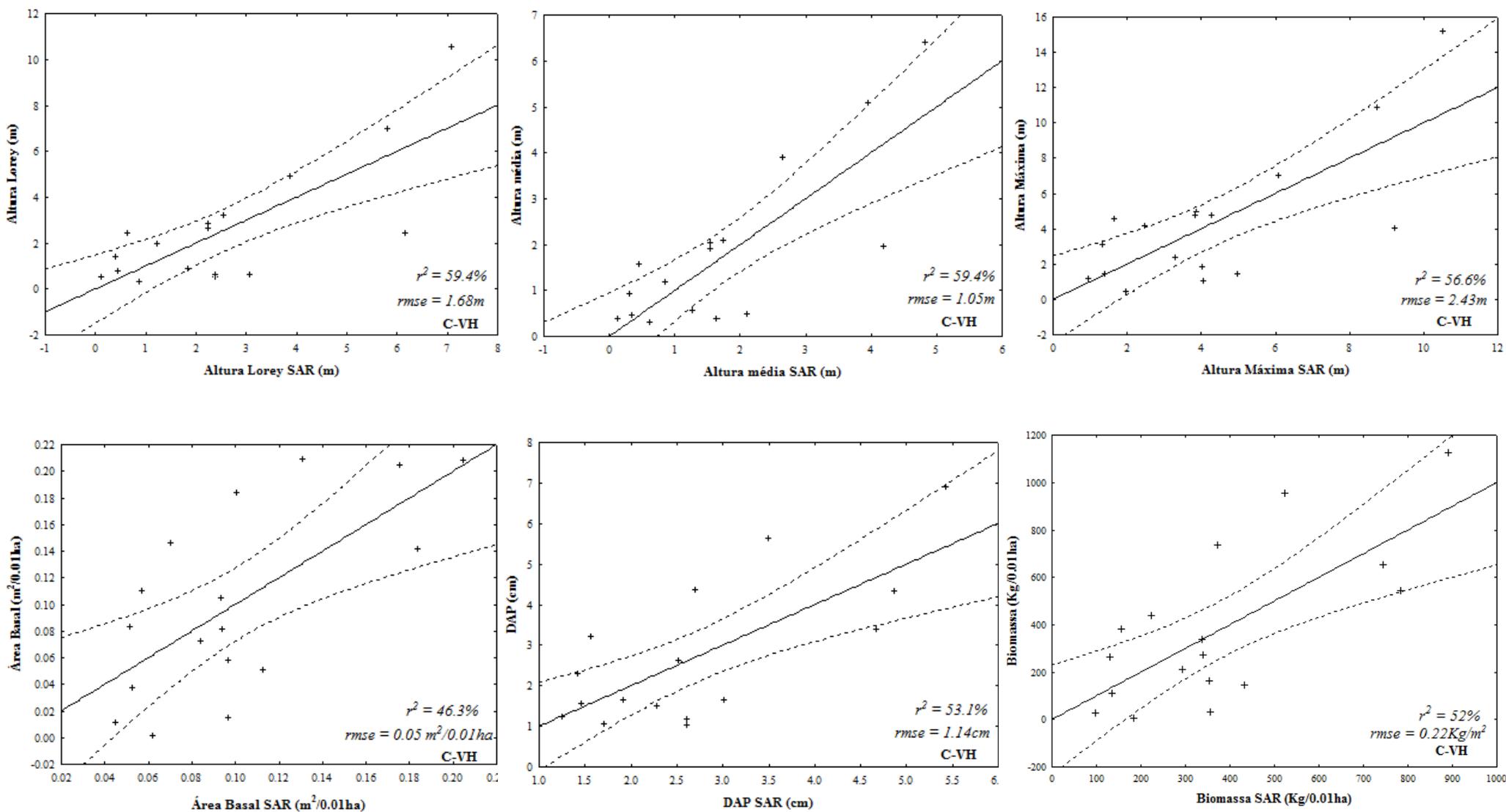


Figura 13 – Gráficos dos valores observados contra os valores preditos, com respectivos valores de RMSE e Coeficiente de determinação (r^2), linha de ajuste ao nível de confiança de 95%.

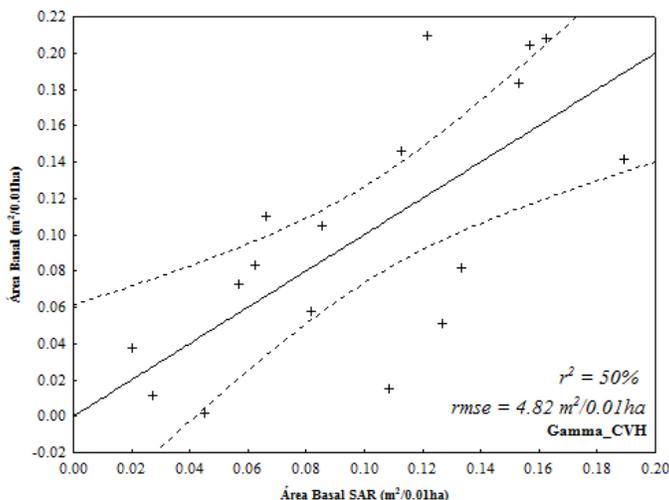


Figura 13 - continuação

A outra forma de validação, baseada nos valores de PRESS comparados à porcentagem da diferença dos valores da SQR (Soma dos Quadrados dos Resíduos) estão presentes na Tabela 16. Destaque para os modelos da estrutura horizontal da vegetação que resultaram em valores mais aproximados, representando melhor capacidade preditiva da função de regressão ajustada, apesar de obterem os menores valores de r^2 como apresentado anteriormente. A função de regressão ajustada para a variável altura média obteve a menor diferença dentre os modelos de estrutura vertical, indo ao encontro do menor valor de discrepância (RMSE) que este modelo obteve.

O modelo para AB que envolve a variável explicativa σ°_{VH} (5x5) obteve a menor diferença quando comparado ao γ_{VH} (3x3), o que está de acordo com o cálculo das discrepâncias dos modelos (RMSE). Além disso, a diferença entre os valores de PRESS dos dois modelos não foi suficiente para preterir o modelo σ°_{VH} (5x5) como sugerido por Rencher e Schaalje (2007). Com base nos valores apresentados não houve indícios para a não validação dos modelos.

Tabela 16 – Valor PRESS e SQR dos modelos de regressão e a porcentagem da diferença entre eles.

MODELO	PRESS	SQR	%
Altura Lorey	79,47	48,03	39,56
Altura Média	28,61	18,98	33,68
Altura Máxima	162,38	100,80	37,92
DAP	29,69	22,30	24,89
AB σ°_{VH} (5x5)	0,052	0,043	17,47
AB γ°_{VH} (3x3)	0,049	0,040	19,26
Biomassa Total	1072887	827197	22,90

4.4.2 Modelos de regressão linear múltipla

O desenvolvimento dos modelos de regressão linear múltipla seguiu a metodologia descrita na seção 3.2.3. Na etapa da seleção de variáveis, com base nos três critérios analisados, foram selecionadas para compor cada modelo as variáveis explicativas apresentadas na Tabela 17. Nos modelos da altura Lorey e altura máxima todas as variáveis independentes foram selecionadas diferindo dos demais. A possibilidade da colinearidade entre as polarizações cruzadas somado ao fato da busca por relações mais simplificadas (parcimônia do modelo) estimulou a retirada da variável polarização HV destes modelos, além desta não apresentar grande acréscimo dos valores de r^2 e r^2_{ajustado} quando adicionada. Desta forma, todos os modelos de regressão múltipla seguiram a equação 3.2.

Tabela 17 – Variáveis independentes selecionadas pelos critérios utilizados no método *Best Subset*.

	r^2	r^2_{ajustado}	Cp
Altura Lorey	1, 2, 3 e 4	1, 2, 3 e 4	1, 2, 3 e 4
Altura Média	1, 3 e 4	1, 3 e 4	1, 3 e 4
Altura Máxima	1, 2, 3 e 4	1, 2, 3 e 4	1, 2, 3 e 4
DAP	1, 3 e 4	1, 3 e 4	1, 3 e 4
Área Basal	1, 3 e 4	1, 3 e 4	1, 3 e 4
Biomassa	1, 3 e 4	1, 3 e 4	1, 3 e 4

Por se tratar do mesmo grupo de variáveis, a etapa de análise exploratória corresponde àquela empregada para os modelos de regressão linear simples (seção 4.4.1). Sendo assim, a Tabela 18 apresenta os parâmetros das regressões, o erro padrão, coeficiente de determinação e os valores do teste de variância global (F) dos modelos. A multicolinearidade entre as variáveis independentes foi checada pelo VIF (valor de inflação de variância) que resultou em valores de 1.41, 1.13 e 1.27 para HH, VH e VV, respectivamente. Valores que foram muito inferiores ao valor limite de 10 mencionado por Neter *et al.* (1996) para esta verificação.

Tabela 18 – Parâmetros dos modelos de regressão múltipla, retroespalhamento sigma nas polarizações HH, VH e VV compõem as variáveis independentes.

Modelo	β_0	$\beta_1 (\sigma^{VV})$	$\beta_2 (\sigma^{VH})$	$\beta_3 (\sigma^{VV})$	ϵ	r^2	F
Altura Lorey	-0,515	0,502	0,641	-0,329	1,396	0,79	15,869
<i>p</i>	-	0,006	0,000	0,040			0,000
Altura Média	-0,191	0,468	0,677	-0,356	0,870	0,81	18,087
<i>p</i>	-	0,007	0,000	0,022			0,000
Altura Máxima	0,010	0,505	0,621	-0,318	2,082	0,76	13,541
<i>p</i>	-	0,008	0,001	0,059			0,000
DAP	1,033	0,531	0,604	-0,465	0,882	0,79	16,033
<i>p</i>	-	0,004	0,001	0,007			0,000
Área Basal	0,038	0,472	0,571	-0,422	0,045	0,67	8,788
<i>p</i>	-	0,027	0,005	0,035			0,002
Biomassa Total	39,009	0,562	0,586	-0,444	168,110	0,79	16,109
<i>p</i>	-	0,003	0,001	0,009			0,000

Com relação ao teste t para os coeficientes de regressão de cada variável independente, somente a altura máxima não obteve significância para o coeficiente relacionado à variável VV (β_3) com valor acima do permitido ($p = 0,05$). Isto indica que a variável sigma zero na polarização VV não possui poder explicativo suficiente para compor o modelo e deve ser retirada. Por se tratar de vegetação em regeneração é possível que os componentes verticais não estejam suficientemente desenvolvidos para que haja forte correlação como esperado. Visto a relação do retroespalhamento na polarização VV estar interligada aos componentes verticais da vegetação (van der Sanden, 1997). Efetuou-se a função de regressão para tal parâmetro sem incluir a variável explicativa VV, a tabela abaixo apresenta os valores do referido modelo.

Tabela 19 – Modelo para altura máxima envolvendo as polarizações HH e VH como variáveis explicativas.

Parâmetro	β_0	$\beta_1 (\sigma^{VV})$	$\beta_2 (\sigma^{VH})$	ϵ	r^2	F
Altura Máxima	-0,593	0,636	4,323	2,312	0,68	14,743
<i>p</i>	-	0,001	0,045	-	-	0,000

O teste de *Shapiro Wilk* para a normalidade dos resíduos é apresentado na Tabela 20, onde os resíduos de todos os modelos apresentaram valores de p que permitem afirmar que a distribuição não difere da normal.

Tabela 20 – Valores do teste de normalidade dos resíduos de cada modelo, nível de significância 95%.

X	W	valor p
Altura Lorey	0,971	0,100
Altura Média	0,984	0,100
Altura Máxima	0,987	0,100
DAP	0,986	0,100
Área Basal	0,985	0,100
Biomassa Total	0,982	0,100

A constância da variância dos modelos foi conferida inicialmente através da análise dos gráficos da Figura 14, dos resíduos contra os valores preditos no intervalo de ± 2 desvios padrões. Os gráficos relacionados aos modelos da estrutura vertical da vegetação apresentaram aleatoriedade com sutil forma de megafone (Neter et al, 1996), principalmente para os modelos de altura Lorey e média, o que sugere a variância não constante dos dados. Já os modelos da estrutura horizontal apresentaram aleatoriedade. Desta forma para verificar a homocedasticidade dos modelos foi efetuado o teste de *Levene* que demonstrou que a variância pode ser considerada constante para todos os modelos.

A análise dos gráficos da Figura 14 permite ainda detectar os *outliers*. Para o modelo de altura média duas parcelas (13 e 14) estão localizadas no limiar do intervalo de ± 2 desvios padrões, para altura Lorey a parcela 13 esta fora deste intervalo. A altura máxima apresentou 6 pontos muito além deste intervalo de referência (nível de confiança de 95%). Entre os modelos de estrutura horizontal somente o modelo de DAP apresentou ponto fora do intervalo, no caso a parcela 11.

Os pontos identificados nos gráficos foram confirmados através dos valores dos resíduos padronizados como *outliers* em Y, exceto o ponto 11 do modelo de DAP que foi reconhecido somente através da análise gráfica (Figura 14). Para verificar a influência destes pontos foi calculada a porcentagem da distância de Cook do valor do teste F de cada modelo. Conforme apresentado na Tabela 21, os valores ficaram muito abaixo do valor limiar de influência que é de 20%.

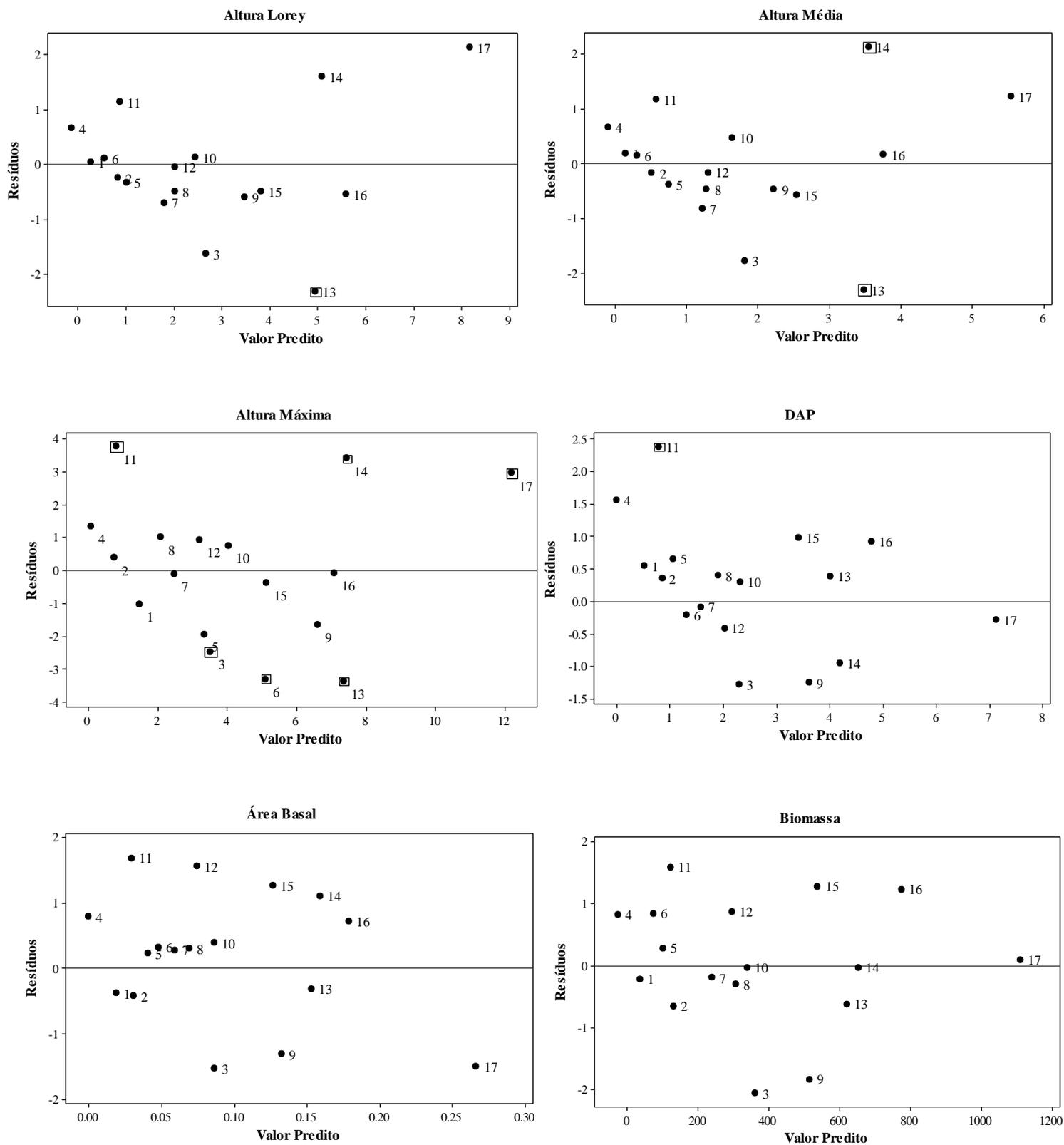


Figura 14 – Gráficos dos resíduos contra os valores preditos de cada modelo de regressão linear múltipla.

Tabela 21 – Distância Cook para pontos candidatos a *outliers* em Y, e a porcentagem em relação ao teste F de cada modelo para decisão da influência dos pontos. Pontos em itálico representam os identificados somente por análise gráfica.

	Y	COOK	%
Altura Lorey	13	0,3773	2,38
Altura Média	13	0,3773	2,09
	14	0,27627	1,53
Altura Máxima	3	0,03137	0,23
	6	0,08767	0,65
	11	0,16394	1,21
	13	0,69127	5,11
	14	0,37251	2,75
	17	0,87111	6,43
DAP	3	0,08767	0,55
	11	0,15725	0,98
Área Basal	3	0,08767	1,00
Biomassa Total	3	0,08767	0,54

Para a etapa de validação dos dados, inicialmente são apresentados na Tabela 22 os valores de PRESS, da SQR e da porcentagem da diferença entre os mesmos. Mediante os valores apresentados pode-se considerar que houve adequação dos modelos, com ressalva para o modelo de altura Lorey que apresenta diferença um pouco acima da metade. Quando comparados os valores para os modelos de estimativa da estrutura vertical e horizontal percebe-se que estes possuem melhor capacidade preditiva da função de regressão ajustada, com destaque para o modelo de estimativa do DAP. O modelo de estimativa da Biomassa também apresentou satisfatória adequação.

Tabela 22 – Valores do método de validação PRESS e a porcentagem da diferença do SQR.

MODELO	PRESS	SQR	%
Altura Lorey	53,59	25,35	52,69
Altura Média	18,50	9,84	46,82
Altura Máxima	140,51	74,83	46,74
DAP	15,69	10,12	35,53
Área Basal	0,04	0,03	39,80
Biomassa Total	639023	367408	42,50

A segunda etapa para a avaliação da adequação das funções de regressão ajustadas é baseada nos gráficos da Figura 15. Apesar da parcimônia da função de regressão da altura máxima (somente duas variáveis independentes), o modelo de estimativa da altura média foi considerado com maior capacidade preditiva quando levado em conta o valor do RMSE. Entre os

modelos para estimativa da estrutura horizontal, a função de regressão relacionada ao DAP apresentou a melhor capacidade preditiva, porém as outras funções de regressão foram igualmente satisfatórias quando analisados os gráficos com valores de RMSE e r^2 (Figura 15).

Comparando os dois métodos de função de regressão verificados (simples e múltipla) fica evidente o aumento dos valores de coeficiente de determinação quando inseridos os valores de retroespalhamento nas polarizações σ_{HH}° e σ_{VV}° como variáveis explicativas. O poder explicativo aumentou entre 11 - 19% para os modelos de estimativa de altura e entre 20 - 27% para os modelos de estimativa da estrutura horizontal e biomassa. Os valores de RMSE diminuíram com a adição destas variáveis nos modelos e o mesmo ocorreu para os valores de PRESS, o que segundo Rencher e Schaalje (2007) indica que estes modelos devem ser escolhidos em detrimento dos modelos de regressão simples.

Depois de desenvolvidas e validadas as funções de regressão ajustadas foram aplicadas sobre os valores de retroespalhamento da imagem Radarsat-2 para gerar os mapas de DAP, altura média (Figura 16) e biomassa (Figura 17).

Os valores apresentados no mapa de DAP médio variam entre 1,2 a 3,3 cm o que esta de acordo com os dados medidos em campo, sendo apenas quatro unidades amostrais que apresentaram valores acima de 3,3 cm. O mapa apresentou poucas regiões com DAP menor que 1,6 cm e a maioria dos indivíduos de maior DAP na parte central do mapa variando entre 2 a 3,3 cm. Cabe ressaltar que o parâmetro utilizado é o DAP médio, cujo RMSE do modelo foi de 0,77 cm, e por se tratar de uma região de mangue em regeneração a amplitude de variação desta medida é alta devido à heterogeneidade estrutural, como citado anteriormente. A altura média variou no mapa entre 0,2 a 1,9 m, intervalo considerado condizente com os valores medidos em campo, principalmente quando levado em conta o RMSE do modelo que foi de 0,76 m, restando apenas três parcelas fora deste intervalo de altura.

O mapa de biomassa total gerado a partir da função de regressão apresentou pequena variação de valores entre 0,383 – 0,404 kg.m^{-2} , considerado pouco representativo, pois corresponde apenas as três parcelas com menor valor de biomassa total, quando considerado o valor de 15% de incerteza da estimativa de biomassa, citado por Mougin *et al.* (1999).

A alta sensibilidade da banda C aos componentes estruturais da vegetação como a densidade, tamanho dos componentes, permissividade, orientação das folhas, estrutura do dossel (arquitetura das folhas e galhos) ocasionam a rápida saturação do sinal para esta frequência. O

valor a partir do qual ocorre à saturação do sinal, utilizando a polarização cruzada HV para a estimativa de biomassa, é de 7 kg.m^{-2} (Mougin *et al.*, 1999; Proisy *et al.*, 2000). Cabe ressaltar que este valor de saturação é referente a um dossel vegetal homogêneo e sem perturbação. Os valores estimados através do mapa gerado apresentaram valores de saturação inferiores ao mencionado acima, sugerindo que para vegetação de mangue em regeneração esta frequência satura com menor valor de biomassa.

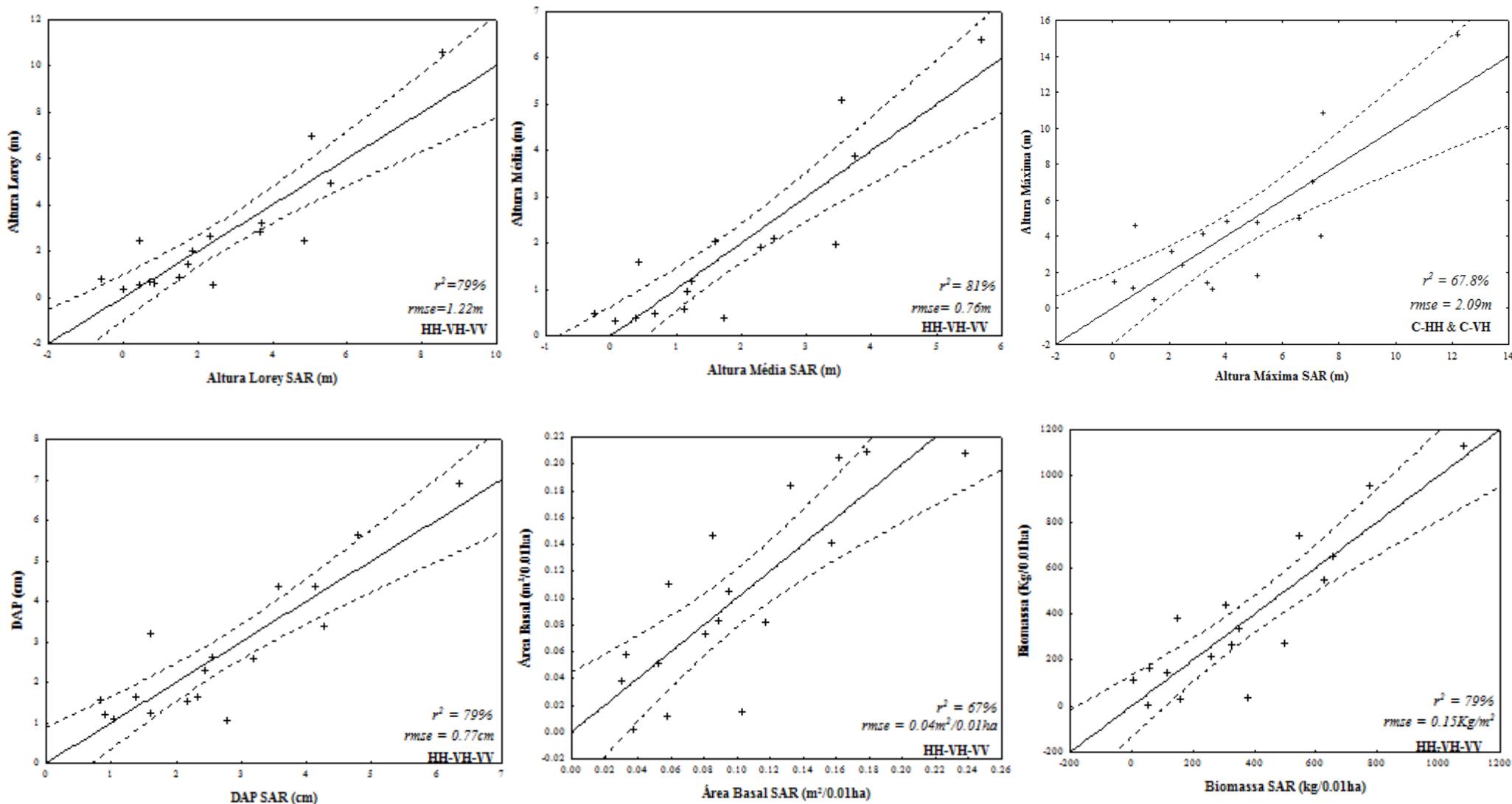


Figura 15 – Gráficos dos valores observados contra os valores preditos para os seis diferentes modelos, com os respectivos valores r^2 (coeficiente de determinação) do modelo e RMSE (erro médio quadrático).

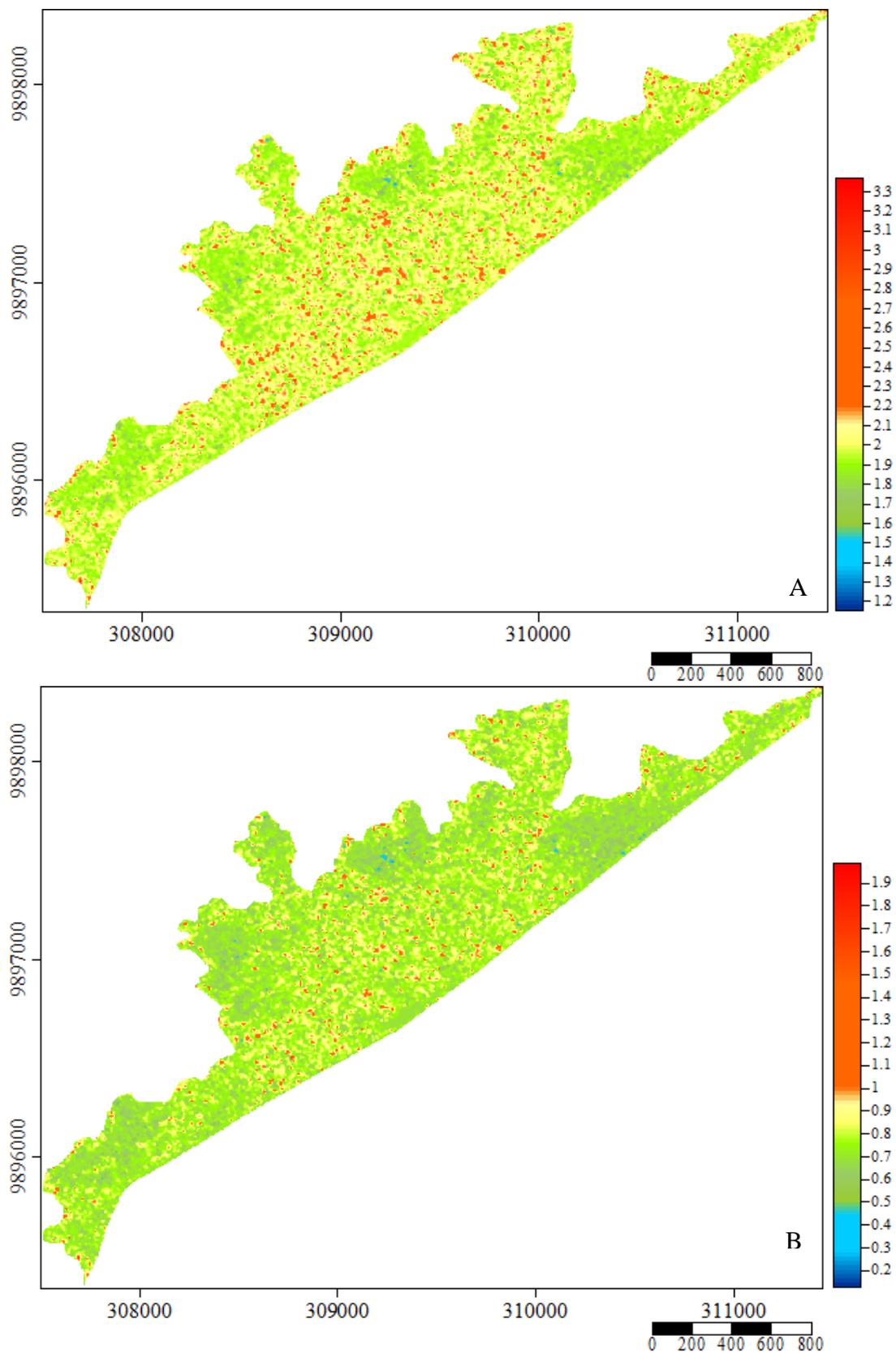


Figura 16 – Mapa de estimativa: A) DAP médio (cm) e B) Altura média (m), com base nos valores de retroespalhamento através das respectivas funções de regressão múltipla.

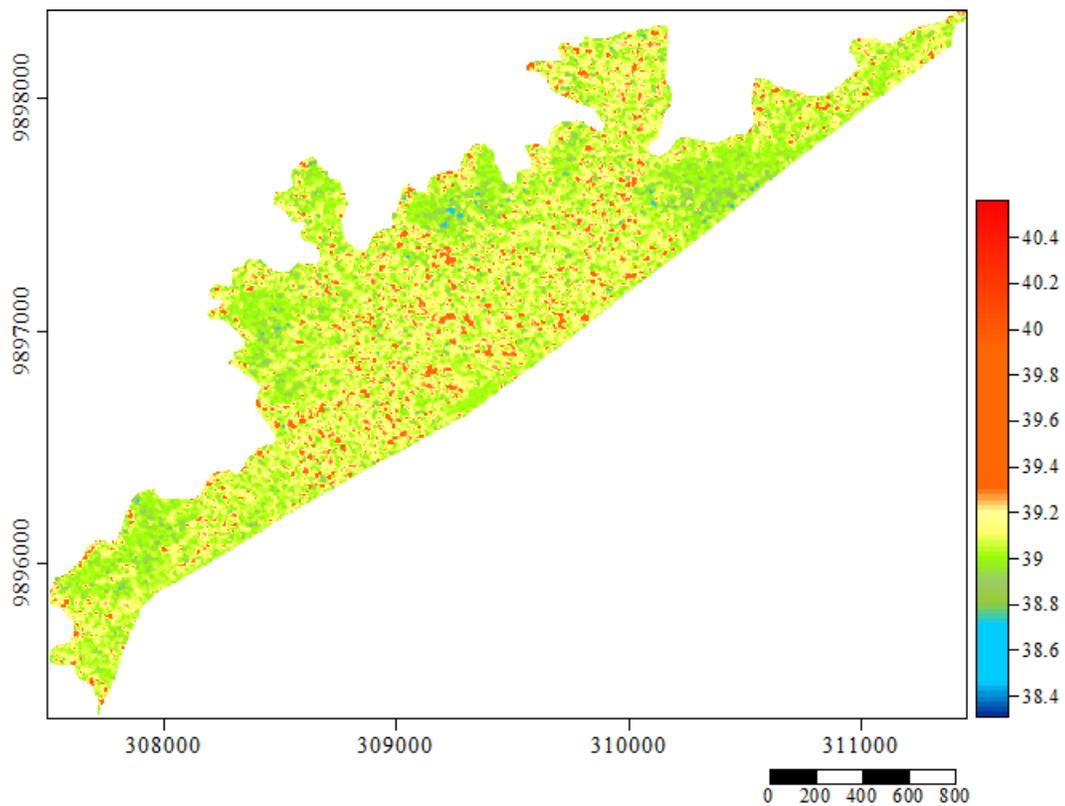


Figura 17 – Mapa de Biomassa total (Kg) calculado a partir da função de regressão ajustada para o conjunto de dados, com base nos valores de retroespalhamento da imagem Radarsat-2.

5 CONCLUSÕES

A vegetação de mangue em regeneração apresentou heterogeneidade estrutural, com grande amplitude de variação dos dados, sendo a variável área basal que melhor diferenciou os estágios de regeneração. Foram diferenciados quatro estágios denominados: estágio recente, regeneração inicial, regeneração intermediária e regeneração avançada. A espécie dominante é a *Avicennia germinans*, a espécie *Laguncularia racemosa* está presente nos quatro grupos em menor número e a espécie *Rizophora mangle* encontrada apenas no grupo de regeneração avançada, com maior desenvolvimento estrutural. A equação utilizada para o cálculo de biomassa refletiu a alta amplitude de variação entre os quatro grupos e pode ser considerada adequada.

O atributo-radar sigma linear apresentou as correlações mais fortes e significativas com os dados estruturais da vegetação de mangue em regeneração, principalmente na polarização cruzada VH.

O modelo de regressão múltipla com as polarizações σ°_{HH} , σ°_{VH} e σ°_{VV} apresentou alta capacidade preditiva principalmente para as variáveis: altura média, DAP, área basal e biomassa, permitindo a geração de mapas de tais parâmetros.

Os mapas de DAP e altura média gerados foram coerentes com os dados coletados em campo. Estes em conjunto com o mapa de biomassa apresentaram correspondências com a região central dos três mapas, contendo os maiores valores de DAP e altura média e, conseqüentemente, os maiores valores de biomassa total. Porém, o mapa de biomassa resultou em baixa amplitude de variação sugerindo a saturação do sinal, em manguezais em regeneração, abaixo do indicado na literatura para a banda C em manguezais homogêneos.

REFERÊNCIAS

- Alongi, D. M. **Present state and future of the world's mangrove forests.** Environmental Conservation. 29: 331-349 p. 2002.
- Chen, R.; Twilley, R. R. 1998. A gap dynamic model of mangrove forest development along gradients of soil salinity and nutrient resources. **Journal of Ecology**, v. 86, p. 37-51.
- Curtis, J. T.; McIntosh, R. P. 1951. An Upland Forest Continuum in the Prairie-Forest Border Region of Wisconsin. **Ecology**, v. 32, n. 3, p. 476-496.
- Dhn. **Tábuas de maré.** <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/20520Jun2010.htm> .
- Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. **Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia.** ACTA AMAZONICA. 28: 101-126 p. 1998.
- Fromard, F.; Puig, H.; Mougin, E.; Marty, G.; Betoulle, J. L.; Cadamuro, L. 1998. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana. **Oecologia**, v. 115, n. 1-2, p. 39-53.
- Henderson, F.; Lewis, A. **Principles and Applications of Imaging Radar: Manual of remote sensing** New York: John Wiley and Sons, 1998. 866 p.
- Henderson, F.; Lewis, A. 2008. Radar detection of wetland ecosystems: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 20, p. 5809-5835.
- Khatiresan, K.; Bingham, B. L. 2001. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. In: (Ed.). **Advances in Marine Biology**. v.40,pp.
- Kovacs, J.; Vandenberg, C. V.; Wang, J.; Flores-Verdugo, F. 2008. The Use of Multipolarized Spaceborne SAR Backscatter for Monitoring the Health of a Degraded Mangrove Forest. **Journal of Coastal Research**, v. 241, p. 248-254.
- 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**, v. 14, p. 401-408.
- Lara, R.; Szlafsztein, C.; Cohen, M.; Berger, U.; Glaser, M. 2002. Implications of mangrove dynamics for private land use in Bragança, North Brazil: a case study. **Journal of Coastal Conservation**, v. 8, n. 1, p. 97.

- Lee, J. S.; Grunes, M. R.; De Grandi, G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2363 - 2373.
- Lugo, A. E.; Snedaker, S. C. 1974. The Ecology of Mangroves. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 5, n. 1, p. 39-64.
- Matni, A. S.; Menezes, M. P. M.; Mehlig, U. **Estrutura dos bosques de mangue da península de Bragança, Pará, Brasil**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Ciências Naturais. 1: 43-52 p. 2006.
- Menezes, M. P. M. **Investigations of mangrove forest dynamics in Amazonia, North Brazil**. 2006. 151 p. (Doutorado). Center for Tropical Marine Ecology, University of Bremen, Bremen.
- Menezes, M. P. M.; Berger, U.; Mehlig, U. **Mangrove vegetation in Amazonia: a review of studies from the coast of Pará and Maranhão States, north Brazil**. Acta Amazonica. 38: 403-420 p. 2008.
- Menezes, M. P. M.; Mehlig, U. 2010. Floristics and Forest Structure - Mangrove Vegetation of the Caeté Estuary. In: Saint-Paull, U. e Schneider, H. (Ed.). **Mangrove Dynamics and Management in North Brazil**. v.211, 422 pp.
- 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**, n. Special Issue 56, p. 103 -107.
- Moraes, B. C.; Costa, J. M. N.; Costa, A. C. L.; Costa, M. H. 2005. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207 - 214.
- Mougin, E.; Proisy, C.; Marty, G.; 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**, v. 37, n. 1, p. 94-102.
- Mueller-Dombois, D.; Ellenberg, H. 1974. Aims & Methods of Vegetation Ecology. In: (Ed.). **Vegetation Analysis in the Field**. NY: John Wiley & Sons,pp.
- Neter, J.; Kutner, M. H.; Nachtseheim, C. J.; Wasserman, W. **Applied linear statistical models**. Boston: MsGraw-Hill, 1996. 1408 p.
- Paradella, W. R.; Ribeiro, A.; Veneziani, P.; Soares, E. **Radares Imageadores nas Geociências: estado da arte e perspectivas** Revista Brasileira de Cartografia. 57: 56-62 p. 2005.

- Proisy, C.; Mougin, E.; Fromard, F.; Karam, M. A. 2000. Interpretation of Polarimetric Radar Signatures of Mangrove Forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 1, p. 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**, v. 22, n. 20, p. 4197-4210.
- Ranson, K. J.; Sun, G. 1994. Mapping Biomass of a Northern Forest Using Multifrequency SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, p. 388-396.
- Rencher, A. C.; Schaalje, G. B. **Linear models in statistics**. 2 John Wiley & Sons, 2007. 672 p.
- Schaeffer-Novelli, Y.; Cintrón, G. 1986. Guia para estudos de áreas de manguezal. **Caribbean Ecological Research**, p. 150.
- Schaeffer-Novelli, Y. **Manguezais brasileiros**. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. São Paulo: 42 p. 1991.
- Schreuder, H. T.; Gregoire, T. T.; Wood, G. B. 1993. Mensurational aspects of forest inventory In: Schreuder, H. T.; Gregoire, T. T., *et al* (Ed.). **Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory**. New York: Jhon Wiley & Sons, 227-316 pp.
- Simard, M.; Zhang, K.; Rivera-Monroy, V. H.; Ross, M. S.; Ruiz, P. L.; Castañeda-Moya, E. 2006. Mapping Height and Biomass of Mangrove Forests in Everglades National Park with SRTM Elevation Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 6, p. 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**, v. 128, n. 5, p. 2131-2144.
- Soares, M. L. G. **Estrutura vegetal e grau de perturbação dos manguezais da Lagoa da Tijuca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil**. Revista Brasileira de Biologia. 59: 503-515 p. 1999.
- Soares, M. L. G.; Schaeffer-Novelli, Y. 2005. Above-ground biomass of mangrove species. I. Analysis of models. **Estuarine, Coastal and Shelf Science** v. 65, p. 1-18.
- Souza Filho, P. W. M.; El-Robrini, M. **Morfologia, processos de sedimentação e litofácies dos ambientes morfo-sedimentares da Planície Costeira Bragantina, Nordeste do Pará, Brasil**. Geonomos. 4: 1-16 p. 1995.

- Souza Filho, P. W. M. **Avaliação e Aplicação de dados de Sensores Remotos no Estudo de Ambientes Costeiros Tropicais Úmidos, Bragança, Norte do Brasil**. 2000. 219 p. (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, Belém
- Souza Filho, P. W. M.; El-Robrini, M. **Geomorphology of the Bragança Coastal Zone, Northeastern Pará State**. Revista Brasileira de Geociências. 30: 522-526 p. 2000.
- 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**, v. 10, p. 123-132.
- Souza Filho, P. W. M. **Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos**. Revista Brasileira de Geofísica. 23: 427-435 p. 2005.
- Souza Filho, P. W. M.; Lessa, G. C.; Cohen, M. C. L.; Costa, F. R.; Lara, R. J. 2009. The Subsiding Macrotidal Barrier Estuarine System of the Eastern Amazon Coast, Northern Brazil. In: Dillenburg, S. F. e Hesp, P. A. (Ed.). **Geology of Brazilian Coastal Barriers**. New York: Springer-Verlag, v.107, 220 pp.
- Spalding, M. D.; Blasco, F.; Field, C. D. **World Mangrove Atlas**. Okinawa, Japão: The International Society for Mangrove Ecosystems, 1997. 178 p. ISBN 4 906584 03 9.
- Toutin, T. 1995. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. . **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 2795-2811.
- Van Der Sanden, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. . 1997. 330 p. (Doutorado). Wageningen Agricultural University, Netherlands.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Tabela com parâmetros biofísicos de cada parcela, sendo o DAP e a densidade em classe diamétrica conforme utilizada no cálculo de biomassa.

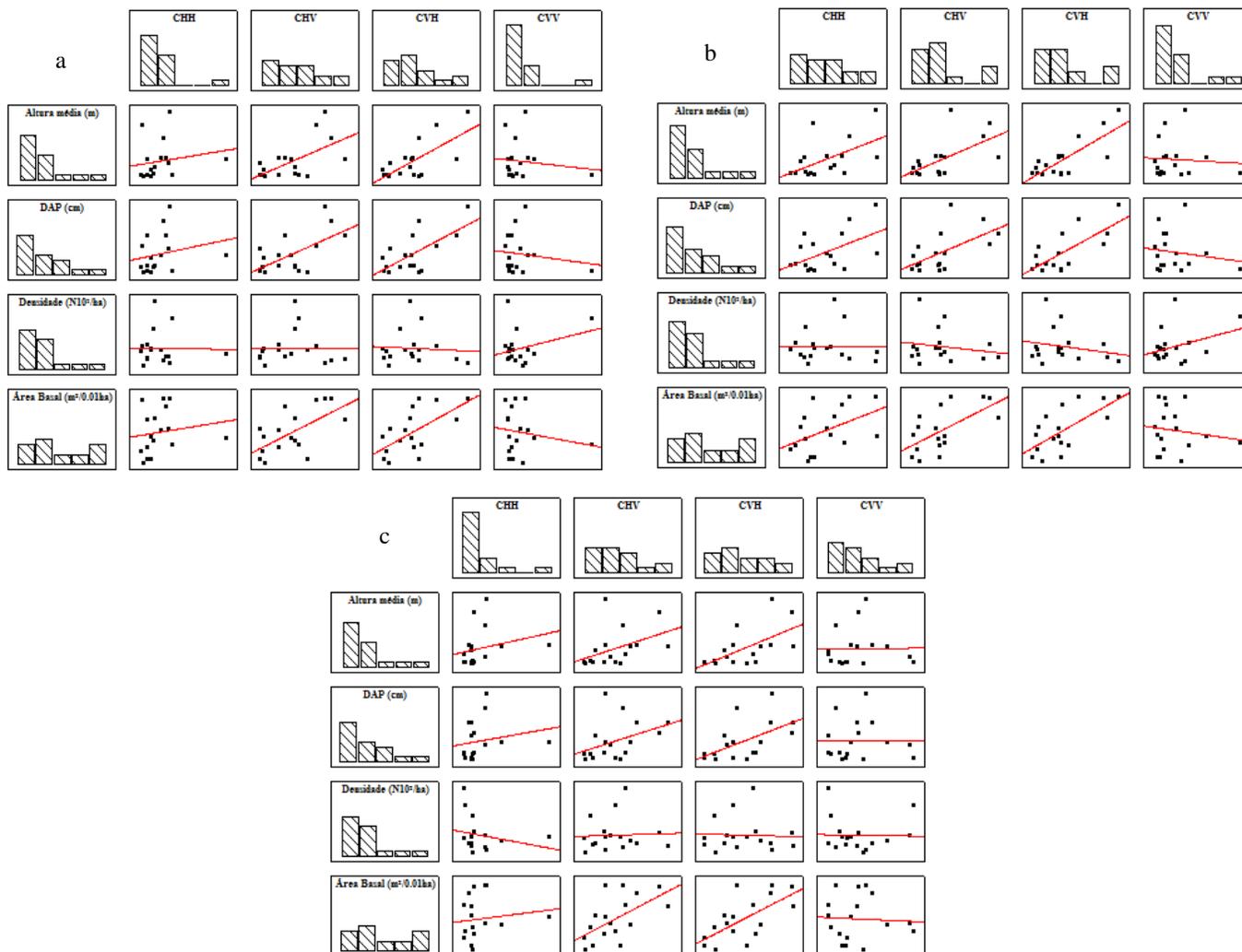
Parcela	Grupos	Densidade		Densidade total	Área Basal	DAP médio		Lorey	Altura Média	Altura Máxima
		(N/ha)	(N/ha)	(N/ha)	(m ² /ha)	(cm)	(cm)	(m)	(m)	(m)
		dap < 4cm	dap > 4cm			dap < 4cm	dap > 4cm			
<i>1</i>	I	1600	-	1600	0.15020	1.06290	-	0.32080	0.30225	0.46
<i>2</i>		8100	-	8100	1.12510	1.21412	-	0.50392	0.37494	1.13
<i>3</i>		14800	-	14800	1.45055	1.03546	-	0.48753	0.36539	1.04
<i>4</i>		13200	700	13900	3.72333	1.37932	4.81802	0.75142	0.46178	1.43
<i>5</i>		19100	400	19500	5.03500	1.56201	5.09554	0.61154	0.47338	1.4
<i>6</i>		39900	400	40300	5.75315	1.14195	5.17516	0.63937	0.38224	1.8
<i>7</i>	II	30900	600	31500	7.26071	1.42343	5.46709	0.85317	0.54662	2.37
<i>8</i>		14300	1500	15800	8.30857	1.95871	5.32909	1.38744	0.92649	3.1
<i>9</i>		10100	1600	11700	8.11154	2.12241	5.47373	2.81041	1.90564	4.95
<i>10</i>		12800	2000	14800	10.42958	2.15938	5.57166	2.62802	2.02521	4.78
<i>11</i>		7300	2700	10000	10.97852	2.19658	5.91531	2.43014	1.56700	4.55
<i>12</i>	III	52500	1200	53700	14.56385	1.53712	5.71921	1.95271	1.17886	4.13
<i>13</i>		4100	3100	7200	14.11029	2.62545	6.60571	2.42759	1.95632	4
<i>14</i>	IV	13100	4700	17800	20.41800	2.50353	5.83480	6.95122	5.07506	10.85
<i>15</i>		5200	3800	9000	18.33995	2.76825	6.52447	3.18074	2.08744	4.74
<i>16</i>		2400	4300	6700	20.89400	3.21789	6.97304	4.91991	3.88119	7
<i>17</i>		1600	2100	3700	20.78238	3.02747	9.84986	10.55373	6.38703	15.15

PARCELA	ESPÉCIE	Alt. Média	Alt. Lorey	Alt. Máx.	DAP	Área Basal	Biomassa Total
n°	<i>Avicennia</i>	(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /0.01ha)	(t/ha)
1	10	0.3212	0.359961264	0.46	1.031847134	0.000894564	0.23131559
2	60	0.3989	0.537866764	1.13	1.236199575	0.008531654	2.290539392
3	86	0.358523256	0.388855517	0.65	1.027995852	0.007713164	1.997803471
4	134	0.4615	0.752630204	1.43	1.561460215	0.036389074	10.78342835
5	195	0.473384615	0.611540429	1.4	1.634492896	0.050350006	14.32239106
6	403	0.382240695	0.639369337	1.8	1.181979106	0.05753145	16.04711476
7	315	0.546622222	0.853170379	2.37	1.500454959	0.072607122	20.98314415
8	158	0.926487342	1.387435704	3.1	2.278682577	0.083085707	26.19789303
9	107	1.969439252	2.870249187	4.95	2.635871183	0.07752085	26.18791921
10	148	2.025212838	2.628024172	4.78	2.620502668	0.104295792	33.56180721
11	80	1.774875	2.508837558	4.55	3.562898089	0.104794613	37.26769301
12	519	1.184315992	1.970601152	4.13	1.62515494	0.140361155	42.45199441
13	72	1.956319444	2.427592232	4	4.339171975	0.141102914	54.2711084
14	53	3.635660377	5.857871734	10.85	3.259223651	0.061027259	22.26549536
15	90	2.087444444	3.180735887	4.74	4.354210899	0.183399535	73.57389806
16	55	3.700363636	4.737283568	7	5.56745802	0.163990765	66.18894378
17	25	5.874	11.48033751	15.15	6.756687898	0.1526306	79.44708974
TOTAL	2510						
		Alt. Média	Alt. Lorey	Alt. Máx.	DAP	Área Basal	Biomassa Total
<i>Laguncularia</i>		(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /0.01ha)	(t/ha)
1	6	0.270666667	0.263125361	0.365	1.114649682	0.000607475	0.085980878
2	21	0.30647619	0.397433694	0.57	1.151046406	0.002719299	0.465403775
3	62	0.374903226	0.599579561	104	1.04581878	0.006792313	1.154972669
4	5	0.4692	0.699088885	0.405	1.312101911	0.00084422	0.151695767
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	10	1.223	1.519950139	213	1.99044586	0.003594585	0.755361755
10	-	-	-	-	-	-	-
11	20	0.7355	0.777605746	1.08	1.751592357	0.004990599	0.885134827
12	18	1.021666667	1.476935849	2.65	1.786978061	0.005277369	1.060669954
13	-	-	-	-	-	-	-
14	119	5.684117647	7.407081049	9.69	3.393726918	0.131823905	5.792941318
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	261						
		Alt. Média	Alt. Lorey	Alt. Máx.	DAP	Área Basal	Biomassa Total
<i>Rhizophora</i>		(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /0.01ha)	(t/ha)
1	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	-	-	-	-
14	6	5.71	7.53654003	8.91	4.267515924	0.011328859	36.95022273
15	-	-	-	-	-	-	-
16	12	4.71	5.586212396	6	5.904989384	0.044949246	29.13794431
17	12	7.455833333	7.991311292	9.81	7.197452229	0.055193237	32.97175703
TOTAL	30						

APÊNDICE C – Características estruturais por espécie das 17 parcelas estudadas

PARCELA	Espécie	Densidade Específica (N/ha)	Densidade Relativa (%)	Frequência Relativa (%)	Dominância Relativa (%)	Valor de Importância IVI
1	<i>Avicennia</i>	1000	62.5	50	59.6	172.1
	<i>Laguncularia</i>	600	37.5	50	40.4	127.9
2	<i>Avicennia</i>	6000	74.1	50	75.8	199.9
	<i>Laguncularia</i>	2100	25.9	50	24.2	100.1
3	<i>Avicennia</i>	8600	58.1	50	53.2	161.3
	<i>Laguncularia</i>	6200	41.9	50	46.8	138.7
4	<i>Avicennia</i>	13400	96.4	50	97.7	244.1
	<i>Laguncularia</i>	500	3.6	50	2.3	55.9
5	<i>Avicennia</i>	19500	100	100	100	300
6	<i>Avicennia</i>	40300	100	100	100	300
7	<i>Avicennia</i>	31500	100	100	100	300
8	<i>Avicennia</i>	15800	100	100	100	300
9	<i>Avicennia</i>	10700	91.4	50	95.6	237
	<i>Laguncularia</i>	1000	8.6	50	4.4	63
10	<i>Avicennia</i>	14800	100	100	100	300
11	<i>Avicennia</i>	8000	80	50	95.5	225.5
	<i>Laguncularia</i>	2000	20	50	4.5	74.5
12	<i>Avicennia</i>	51900	96.6	50	96.4	243
	<i>Laguncularia</i>	1800	3.4	50	3.6	57
13	<i>Avicennia</i>	7200	100	100	100	300
14	<i>Avicennia</i>	5300	29.8	33.3	29.9	93
	<i>Laguncularia</i>	11900	66.9	33.3	64.6	164.8
	<i>Rhizophora</i>	600	3.4	33.3	5.5	42.2
15	<i>Avicennia</i>	9000	100	100	100	300
16	<i>Avicennia</i>	5500	82.1	50	78.5	210.6
	<i>Rhizophora</i>	1200	17.9	50	21.5	89.4
17	<i>Avicennia</i>	2500	32.4	50	26.6	109
	<i>Rhizophora</i>	1200	67.6	50	73.4	191

APÊNDICE D – Diagrama de dispersão entre o retroespalhamento em (a) β° (dB), (b) σ° (dB), (c) γ (dB) nas quatro polarizações e os parâmetros biofísicos.



APÊNDICE E – Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 3x3. Destacados os valores de correlação altos e significativos (com 95% de confiança).

FELEE 3X3						
	Altura Lorey	Altura Média	Altura Máxima	DAP	Área Basal	Biomassa total
	(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /ha)	(Kg/0.01ha)
β°_{HH}	0.297	0.271	0.322	0.314	0.260	0.285
	0.247	0.292	0.208	0.220	0.314	0.268
β°_{HV}	0.467	0.482	0.465	0.485	0.489	0.490
	0.059	0.050	0.060	0.049	0.046	0.046
β°_{VH}	0.611	0.586	0.605	0.557	0.503	0.549
	0.009	0.014	0.010	0.020	0.039	0.023
β°_{VV}	-0.002	-0.034	0.011	-0.067	-0.113	-0.068
	0.994	0.896	0.967	0.800	0.665	0.796
σ°_{HH}	0.481	0.437	0.499	0.371	0.331	0.390
	0.051	0.079	0.042	0.143	0.195	0.122
σ°_{HV}	0.431	0.517	0.419	0.508	0.549	0.499
	0.084	0.033	0.094	0.037	0.023	0.042
σ°_{VH}	0.741	0.761	0.722	0.702	0.649	0.691
	0.001	0.000	0.001	0.002	0.005	0.002
σ°_{VV}	0.053	0.015	0.069	-0.097	-0.112	-0.081
	0.839	0.955	0.794	0.711	0.669	0.757
γ°_{HH}	0.230	0.267	0.258	0.186	0.146	0.125
	0.375	0.300	0.317	0.474	0.577	0.631
γ°_{HV}	0.385	0.457	0.384	0.523	0.636	0.553
	0.127	0.065	0.127	0.031	0.006	0.021
γ°_{VH}	0.609	0.634	0.606	0.658	0.709	0.682
	0.010	0.006	0.010	0.004	0.001	0.003
γ°_{VV}	0.016	-0.017	0.029	-0.051	-0.103	-0.097
	0.950	0.948	0.911	0.846	0.694	0.711

APÊNDICE F - Coeficiente de correlação entre parâmetros biofísicos e o retroespalhamento da imagem com filtro tamanho 7x7. Destacados os valores de correlação altos e significativos (com 95% de confiança).

FELEE 7X7						
	Altura Lorey	Altura Média	Altura Máxima	DAP	Área Basal	Biomassa total
	(m)	(m)	(m)	(cm)	(m ² /ha)	(Kg/0.01ha)
β°_{HH}	0.189	0.164	0.211	0.208	0.134	0.163
	0.468	0.531	0.417	0.422	0.609	0.533
β°_{HV}	0.450	0.472	0.440	0.534	0.495	0.531
	0.070	0.056	0.077	0.027	0.043	0.028
β°_{VH}	0.588	0.567	0.574	0.589	0.491	0.565
	0.013	0.018	0.016	0.013	0.045	0.018
β°_{VV}	-0.086	-0.113	-0.079	-0.139	-0.192	-0.142
	0.742	0.664	0.762	0.595	0.461	0.586
σ°_{HH}	0.561	0.533	0.566	0.508	0.479	0.574
	0.019	0.028	0.020	0.037	0.052	0.016
σ°_{HV}	0.417	0.507	0.409	0.493	0.549	0.487
	0.096	0.038	0.103	0.044	0.022	0.047
σ°_{VH}	0.631	0.677	0.622	0.600	0.616	0.599
	0.007	0.003	0.008	0.011	0.008	0.011
σ°_{VV}	-0.028	-0.065	-0.019	-0.163	-0.175	-0.147
	0.091	0.804	0.943	0.532	0.501	0.573
γ°_{HH}	0.212	0.244	0.236	0.181	0.129	0.126
	0.415	0.345	0.361	0.487	0.621	0.631
γ°_{HV}	0.308	0.370	0.318	0.398	0.561	0.439
	0.229	0.144	0.213	0.114	0.019	0.078
γ°_{VH}	0.524	0.537	0.531	0.509	0.598	0.534
	0.031	0.026	0.028	0.037	0.011	0.027
γ°_{VV}	-0.011	-0.047	-0.003	-0.067	-0.114	-0.098
	0.967	0.859	0.990	0.799	0.663	0.708