sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.03.13.58-TDI

EFEITOS DE GEOMORFOMETRIA NA CARACTERIZAÇÃO FLORÍSTICO-ESTRUTURAL DA FLORESTA TROPICAL NA REGIÃO DE TAPAJÓS COM DADOS SRTM E PALSAR

Polyanna da Conceição Bispo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e João Roberto dos Santos, aprovada em 05 de abril de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C34QC8>

INPE
São José dos Campos
2012

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/6921
Fax: (012) 3208-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):
Presidente:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Membros:
Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
Drª Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Drª Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SID)

sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.03.13.58-TDI

EFEITOS DE GEOMORFOMETRIA NA CARACTERIZAÇÃO FLORÍSTICO-ESTRUTURAL DA FLORESTA TROPICAL NA REGIÃO DE TAPAJÓS COM DADOS SRTM E PALSAR

Polyanna da Conceição Bispo

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelos Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e João Roberto dos Santos, aprovada em 05 de abril de 2012.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3C34QC8>

INPE
São José dos Campos
2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B542e

Bispo, Polyanna da Conceição.
Efeitos de geomorfometria na caracterização florístico-estrutural da Floresta Tropical na região de Tapajós com dados SRTM e PALSAR / Polyanna da Conceição Bispo. – São José dos Campos : INPE, 2012.
xxii + 125 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/06.03.13.58-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.
Orientadores : Drs. Márcio de Morisson Valeriano, e João Roberto dos Santos.

1. Geomorfometria. 2. Floresta. 3. SAR. 4. SRTM. 5. Sensoriamento Remoto. I.Título.

CDU 528.8.044.2(811.5)

Copyright © 2012 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2012 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor(a) em

Sensoriamento Remoto

Dra. Dilce de Fátima Rossetti

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Marcio de Morisson Valeriano

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Roberto dos Santos

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Salatiel Rodrigues Pires

Convidado(a) / UFSCAR / São Carlos - SP

Dr. Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça

Convidado(a) / INPA / Manaus - AM

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

Aluno (a): Polyanna da Conceição Bispo

São José dos Campos, 05 de abril de 2012

"O segredo do êxito é a constância de propósito"

Benjamin Disraeli

A minha mãe Maria (in memoriam) e a meus queridos irmãos Pitágoras e Patrícia

AGRADECIMENTOS

Se elaborar um trabalho desta natureza constitui, de certa forma um desafio, mencionar a totalidade de pessoas que colaboraram para a sua realização, talvez seja tarefa ainda mais difícil. No entanto, impossível deixar de citar nomes. Assim, gostaria de expressar minha gratidão:

Ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano pela acolhida junto ao INPE para que eu pudesse fazer a minha pós-graduação, pela orientação, amizade e conhecimentos transmitidos, os quais abriram caminhos para meu aperfeiçoamento científico e grande aprendizado. Grata também pela competência científica, pela disponibilidade e generosidade reveladas ao longo destes anos, pelo incentivo e apoio nos rumos escolhidos, bem como pelo suporte contínuo, críticas e sugestões, as quais foram fundamentais para desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. João Roberto dos Santos, pela co-orientação, amizade, pela competência científica e ensinamentos compartilhados, pelos desafios propostos somados ao crescente estímulo durante momentos cruciais do trabalho. Grata também pelas oportunidades, confiança, incentivo e constante suporte ao longo de todo o processo de construção desta pesquisa.

À Dra. Dilce de Fátima Rossetti pelo apoio durante o período de transição e início do meu doutorado, pelo convite para participar de seu projeto de pesquisa, presenteando-me com a oportunidade de aprender um pouco mais sobre sua temática científica.

Ao Dr. Paulo de Alencastro Graça pelo suporte durante o trabalho de campo e registro das fotografias hemisféricas.

Aos Dr. José Claudio Mura e Dr. Fábio Furlan Gama pelas relevantes discussões durante o processamento dos dados SAR.

Ao Dr. Sidnei João S. Sant'Anna pela assistência no programa de geração de respostas polarimétricas.

À Dra. Corina C. Freitas, Dr. Pitágoras da C. Bispo e Marcos Freitas pelo suporte e valiosas discussões durante as análises estatísticas.

À Dra. Helena França pela orientação durante o estágio docente, troca de experiências, apoio, incentivo e, em especial, pela preciosa amizade.

À Lauriana R. Sartori pelo auxílio durante os processamentos preliminares dos dados SAR e aos colegas Arnaldo Q. Silva, Cleber G. Oliveira, Igor Narvaes, Haron Xaud e Flora Martins pelas discussões e troca de conhecimentos durante o processamento destes dados.

À Viviana Muñoz pelo auxílio na geração das variáveis geomorfométricas regionais.

Ao LBA/Santarém, pelo suporte logístico e apoio institucional ao longo do trabalho de campo.

Ao INPE, pelo serviço de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto de qualidade, e à CAPES pela bolsa de doutorado, viabilizando a realização desta pesquisa.

A minha cunhada Vera C. Bispo, pelo carinho, apoio e tempo cedido para o término da edição deste documento. A minha sobrinha pequenina Maria Júlia C. Bispo pelo amor e carinho, mostrando-me a leveza e a simplicidade das coisas. Ao meu cunhado Renato Carlos pelo apoio e incentivo.

A minha mãe Maria da C. Bispo (in memoriam), certamente o meu exemplo de vida e fonte de inspiração. Todos que a conheceram sabem a grande pessoa que foi e a quem atribuo boa parte do que me tornei. Grata por seus ensinamentos e amor que permanecem em mim.

Aos meus irmãos Pitágoras da C. Bispo e Patrícia da C. Bispo com quem sempre pude contar, obrigada por tudo, enfrentamos grandes batalhas e certamente tivemos grandes vitórias e a principal delas foi sempre estarmos juntos. Por serem para mim exemplos de integridade, determinação e autenticidade, por estarem sempre presentes e participantes em todas as minhas conquistas. Grata por toda gratuidade e amor a mim dedicados.

À amiga Sonia Redi pelo apoio, amizade e sabedoria compartilhada.

Aos amigos Erika Saito, Liliam Castro, Etienne Tourigny, Izabel Reis, Fábio Fernandes, Emerson Servello, Vanessa Canavesi, Flavia Cardoso, Haron Xaud, Marcos Freitas Maristela Ramalho, Priscila Tavares, Viviana Muñoz, Roberto Silva, Janaina Lopes e Denilson Ribeiro pelos agradáveis momentos de convívio e amizade, os quais levarei sempre comigo.

A todos que fizeram parte desta trajetória, citados aqui ou não, agradeço.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar dados SRTM e PALSAR/ALOS como insumos ao estudo florístico-estrutural da vegetação em resposta a variações do relevo expressa em variáveis geomorfométricas, visando à modelagem da distribuição estrutural e de biomassa aérea na Floresta Nacional do Tapajós. Os dados florísticos estruturais foram coletados em campo, em parcelas distribuídas de acordo com classes fito-ecológicas e com sua condição geomorfométrica. Os dados geomorfométricos derivados de SRTM e dados polarimétricos derivados de PALSAR foram extraídos nos pontos de coleta para análises em conjunto com os dados de vegetação. Uma ordenação de espécies foi feita por meio de uma Análise de Correspondência Destendenciada (DCA) para verificar os agrupamentos de distribuição das espécies. As relações entre as variáveis da composição florística (abundancia, riqueza e florística) e os dados geomorfométricos foram avaliadas com análises de regressão. A relação entre espécies selecionadas e a geomorfometria foi avaliada com regressão logística. No desenvolvimento de estimativas das variáveis estruturais da floresta, os atributos geomorfométricos foram aplicados em análise de correlação canônica seguida de regressão entre cada variável estrutural e as variáveis geomorfométricas. Na estimativa da biomassa, os dados geomorfométricos foram avaliados por regressão múltipla. Os dados SAR, por sua vez, foram submetidos a análises exploratórias, para avaliação das respostas polarimétricas das parcelas amostrais em três diferentes categorias de terreno (plano, ondulado e forte-ondulado). Foi testada uma metodologia para isolar as variáveis polarimétricas do efeito do relevo através do cálculo do fator topográfico de iluminação, para melhoria nas estimativas de biomassa, porém a técnica não teve sucesso nas condições deste experimento. Finalmente, os dados SAR e geomorfométricos selecionados foram aplicados conjuntamente em análises de regressão múltipla em um modelo estatístico mais abrangente para estimativa da biomassa. Este modelo resultou numa estimativa mais correlacionada do que com variáveis polarimétricas sozinhas.

EFFECTS OF THE GEOMORPHOMETRY IN THE FLORISTIC-STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF TAPAJÓS RAIN FOREST WITH THE USE OF DATA SRTM AND PALSAR

ABSTRACT

The present study aimed to analyze SRTM and ALOS PALSAR data as inputs for floristic and structural study of vegetation as conditioned by relief variations expressed in geomorphometric variables in the TapajósNational Forest. Floristic and structural data were collected on field survey, in plots distributed according to phyto-ecological classes and to geomorphometric conditions. Geomorphometric data derived from SRTM and polarimetric data calculated from PALSAR were extracted in the survey points for analyses together with vegetations data. A species ordination through Detrended Correspondence Analysis (DCA) was accomplished to identify the species distribution groups. Floristic composition variables (abundance, richness and floristic) and geomorphometric data were evaluated through regression analysis. Logistic regression was applied to study the relationships between the occurrences of selected species. In the development of forest structural variables, geomorphometric variables were applied in canonical correlation analysis followed by regression between each structural variable and the geomorphometric variables. For biomass estimates, geomorphometric data were evaluated though multiple regression. SAR data were submitted to exploratory analysis of the polarimetric responses of plots stratified into three terrain types (flat, gentle and steep). An approach to free polarimetric data from relief effects for improvement in biomass estimates by compensating topographic illumination factor was proposed, but did not succeed in the experimented conditions. Finally, SAR and selected geomorphometric data were applied together in multiple regression analyses for a broader statistic model for biomass estimates. This model resulted in a more correlated estimate of biomass than the models accounting for polarimetric variables alone.

LISTA DE FIGURAS

2.1 - Vista lateral e frontal do campo elétrico para uma onda eletromagnética. 10
2.2 - Fontes de retroespalhamento dominantes em florestas.. 12
2.3 - Zonas do espaço de classificação bidimensional.. 14
2.4 - Elipse de polarização ilustrando os ângulos de orientação (χ) e elipticidade (ψ)... 22
2.5 - Representação tridimensional da resposta de polarização de um alvo teórico.. 22
3.1 - Fluxo geral das atividades... 27
3.2 - Localização da Floresta Nacional do Tapajós..... 29
3.3 - Cálculo das dimensões dos pixels.. 37
3.4 - Representação esquemática do procedimento de georreferenciamento. 39
3.5 - Análises florísticas e geração dos mapas de probabilidade..... 44
3.6 - Análises estruturais e geração dos mapas de estimativa.. 45
3.7 - Análises e geração dos modelos para estimativa de biomassa 47
4.1 - Variáveis geomorfométricas locais. 50
4.2 - Mosaico de imagens SAR sobreposto a uma imagem LANDSAT 7..... 52
4.3 - Curva espécie-área obtida com a amostragem empregada no inventário.. 53
4.4 - Parâmetros fitossociológicos das 10 famílias amostradas com maior IVI. 54
4.5 - Distribuição diamétrica e altura média por intervalo de classe 55
4.6 - Diagrama de dispersão 56
4.7 - Análise de correspondência destendenciada (DCA). 57
4.8 - Mapa de probabilidade de ocorrência das espécies..... 62-65
4.9 - Mapas de estimativa das variáveis AD, DAP e HT. 75
4.10 - Parcelas selecionadas por classe de relevo..... 78
4.11 - Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) em terreno plano..... 80
4.12 - Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) em terreno ondulado... 81
4.13 - Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) em terreno f. ondulado 82
4.14 - Distribuição dos pixels no espaço de classificação bidimensional (H, $\overline{\alpha}$) 87
4.15 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 1. 90
4.16 - Dispersão dos valores do fator cosseno entre as parcelas. 92
4.17 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 2 93
4.18 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo relacionando geomorfometria local e biomassa. 95
4.19 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 3. 96
4.20 - Validação: valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 3... 98

LISTA DE TABELAS

2.1 - Características dos quatro modos de aquisição de dados do sensor PALSAR. 11
3.1 - Características das imagens ALOS-PALSAR utilizadas neste estudo..... 32
4.1 - Coeficiente de correlação entre o primeiro eixo da DCA e as espécies..... 57
4.2 - Análises de regressão da abundância, riqueza e composição florística (representada pelo primeiro eixo da DCA) e as variáveis geomorfométricas locais. 58
4.3 - Análises de regressão logística de 4 entre as espécies mais abundantes e 4 das espécies menos abundantes e as variáveis geomorfométricas locais. 59
4.4 - Análises de regressão logística de 4 entre as espécies mais abundantes e 4 das espécies menos abundantes e as variáveis geomorfométricas regionais 60
4.5 - Correlações canônicas e pares canônicos estimados entre componentes..... 71
4.6 - Coeficientes da Matriz Estrutural entre os grupos 71
4.7- Análises de regressão da AD, DAP e HT e as variáveis geomorfométricas locais.73
4.8 - Análise de variância (ANOVA) das variáveis estruturais considerando as três categorias do terreno..... 79
4.9 - Teste de *Tukey* das variáveis estruturais. 79
4.10 - Estimativa da biomassa a partir das variáveis polarimétricas selecionadas..... 90
4.11 - Estimativa da biomassa a partir das variáveis polarimétricas sel.ajustadas..... 93
4.12 - Regressão entre a biomassa e a geomorfometria. (h:*elevação*; G: *declividade*).. 94
4.13 - Estimativa da biomassa das variáveis polarimétricas e geomorfométricas..... 96

LISTA DE SÍMBOLOS

An - Anisotropia de Cloude-Pottier
Ha - Hectares
H- Entropia de Cloude-Pottier
H'- Índice de diversidade de Shannon para indivíduos arbóreos
HT- Altura Total
ind.- indivíduos
J- Índice de Equabilidade de Pielou
Mg- Megagrama (tonelada)
Pd- Componente de espalhamento *double-bounce* de Freeman-Durden
Ps- Componente de espalhamento superficial de Freeman-Durden
P_T- Potência Total ou Span
Pv- Componente de espalhamento volumétrico de Freeman-Durden
Rc- Razão de Polarização Cruzada
Rp- Razão de Polarização Paralela
α- Ângulo alfa médio de Cloude-Pottier
α_s- Magnitude do espalhamento de Touzi
α_s3Terceira Componente da Magnitude de Touzi
α_s2 Segunda Componente da Magnitude de Touzi
α_s1 Primeira Componente da Magnitude de Touzi
γ- Coeficiente de espalhamento normalizado pelo ângulo de incidência
θ- Ângulo de incidência
σ- Seção transversal de radar
σ0- Coeficiente de retroespalhamento (sigma zero) de um alvo distribuído
σ°HH- Coeficiente de retroespalhamento na polarização HH
σ°HV - Coeficiente de retroespalhamento na polarização HV
σ°VV - Coeficiente de retroespalhamento na polarização VV
τ- Ângulo de heliticidade para a amplitude máxima
τ_m3 – Terceira Componente da Helicidade de Touzi
τ_m2 – Segunda Componente da Helicidade de Touzi
τ_m1 – Primeira Componente da Helicidade de Touzi
φ- Fase do campo elétrico
φ_s-Fase de Touzi
φ_s3-Terceira Componente da Fase de Touzi
φ_s2-Segunda Componente da Fase de Touzi
φ_s1-Primeira Componente da Fase de Touzi
ψ - Orientação de Touzi
ψ_3 - Terceira Componente da Orientação de Touzi
ψ_2 - Segunda Componente da Orientação de Touzi
ψ_1 - Primeira Componente da Orientação de Touzi
kh - Curvatura horizontal
h - Elevação
A - Orientação de vertentes
G - Declividade
kv - Curvatura vertical

RG - rugosidade
AN - amplitude
DN - dissecação
MN - integral hipsométrica
UM - índice de saturação

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Hipótese 3
1.2 Objetivo 3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 5
2.1 Os dados SRTM 5
2.2 Geomorfometria e suas variáveis 6
2.3 Relação entre a vegetação e topografia 8
2.4 Polarimetria SAR e seus atributos 10
2.5 Resposta Polarimétrica 21
2.6 Efeitos do relevo sobre o retroespalhamento de imagens SAR em áreas vegetadas 23
3 MATERIAL E MÉTODOS 27
3.1 Fluxo geral das atividades 27
3.2 Material 28
3.2.1 Área de estudo 28
3.2.2 Dados 31
3.2.3 Equipamentos e softwares 33
3.3 Metodologia 34
3.3.1 Processamento dos planos de informação topográfica 34
3.3.2 Procesamento dos dados de imageamento radar 35
3.3.3 Levantamento de campo 38
3.3.4 Análises dos dados 40
3.3.5 Testes de aplicação 43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 49
4.1 Aspectos descritivos 49
4.1.1 Dados geográficos 49
4.1.2 Caracterização do povoamento florestal 51
4.2 Análises estatísticas e modelagem dos dados florísticos e estruturais a partir de dados SRTM 55
4.2.1 Componente Florístico 55
4.2.2 Componente Estrutural 70
4.3 Relações entre a vegetação e dados de radar 77
4.3.1 Efeito da topografia na interação entre o sinal de radar e a vegetação 77
4.3.2 Modelagem da biomassa com dados polarimétricos e geomorfométricos 88
5 CONCLUSÕES 99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **101**
APÊNDICE A 113
APÊNDICE B 115
APÊNDICE C 123

1 INTRODUÇÃO

A floresta amazônica é o maior bioma tropical terrestre no mundo e a sua alta diversidade, riqueza e abundância de espécies se devem ao histórico de evolução da paisagem, que culminou na multiplicidade atual de ambientes. Esta região é constituída por um mosaico de habitats, com diferentes tipos de vegetação ocorrendo em áreas adjacentes sobre diferentes substratos (SILVA et. al, 2008a). A distribuição de suas espécies arbóreas, bem como da sua estrutura florestal, está relacionada à diversidade de nichos ecológicos conforme as preferências ecofisiológicas de cada espécie (FERREIRA; PRANCE, 1998; GASTON et al. 2000; PITMAN et al. 2001; SILVA et al. 2008a). A despeito do esforço de pesquisa *in situ*, a grande extensão do bioma, sua condição remota e as dificuldades de acesso, tornam o sensoriamento remoto uma abordagem vantajosa para entendimento da composição florístico-estrutural da floresta como resposta a outros fatores do meio físico, por permitir a observação da paisagem em escalas geográficas.

No que se refere a esta observação da paisagem em diferentes escalas, o estado do conhecimento cartográfico para a Amazônia brasileira ainda é incipiente. A fonte mais abrangente e completa de informações sobre vegetação na Amazônia é proveniente do histórico projeto RADAMBRASIL, que apresentam certa limitação para estudos de maior detalhamento temático em uma escala local, tais como análise da fragmentação florestal perante a dinâmica de antropização decorrente do aumento da fronteira agrícola e pecuária, ou mesmo, análise das relações entre variáveis ambientais locais e composição florístico-estrutural da tipologia florestal. Por outro lado, o detalhamento temático considerando o uso do sensoriamento remoto na faixa do espectro óptico, apresenta limitações diante das condições atmosféricas adversas (neblina, fumaça e nuvens) frequentes em vários setores da Amazônia brasileira, sendo uma alternativa o uso de dados-radar (VAN DER SANDEN , 1997; WOODHOUSE, 2006). Produtos de satélite tais como aqueles derivados do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), e o sensor PALSAR (*Phased-Array L-band Synthetic Aperture Radar*), a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) podem ser uma fonte importante para a análise da paisagem, com estudos mais direcionados à caracterização dos diferentes tipos vegetacionais e sua distribuição, havendo possibilidade de se obter melhores resultados em escala local quando da integração destes dados sensoriados.

A capacidade de penetração do sinal-radar nos alvos dependendo do comprimento de onda, caso do PALSAR em banda L, permite interagir com elementos estruturais da vegetação e em

certos casos com o solo, fornecendo informações sobre as propriedades elétricas e geométricas dos alvos de interesse. O entendimento da dinâmica de interação do sinal-radar com a estrutura complexa das florestas tropicais tem sido o principal foco da comunidade científica envolvida com o sensoriamento remoto de dados florestais. Diversos estudos têm sido dedicados à caracterização da estrutura florestal, à estimativa de volume da madeira e biomassa aérea da floresta com estes dados (DOBSON et al., 1992; SANTOS et al., 2003; SAATCHI et al., 2007; GONÇALVES, 2007; NARVAES, 2011; SAATCHI et al., 2011). A maioria das pesquisas que empregam dados de radar para sua estimativa tem sido realizada em áreas planas, sem efeitos decorrentes da despolarização da onda eletromagnética do radar, naturais em áreas de relevo movimentado. No contexto do desenvolvimento de modelos de estimativa de biomassa em terrenos movimentados, a investigação destes efeitos, bem como alternativas para minimizá-los, é um dos temas explorados no presente trabalho.

Por sua vez, produtos derivados do SRTM, cujas informações geomorfométricas locais contidas no projeto TOPODATA (VALERIANO, 2008), tais como elevação, declividade, orientação de vertente, curvatura horizontal e curvatura vertical, podem ser aplicados em estudos da paisagem como fatores da distribuição dos tipos vegetacionais e sua estrutura florestal. A estas aplicações acrescente-se a possibilidade de subsidiar correções decorrentes de distorções e efeitos da própria topografia sobre dados sensoriados, para melhorias no desenvolvimento de técnicas para mapeamento e inventário da tipologia florestal. Assim, técnicas de correção do sinal observado ("brilho") de imagens em desenvolvimento desde estudos precursores (VAN ZYL et al, 1993; LUCKMAN, 1998; HANTSON; CHUVIECO, 2011), podem assim ser aplicadas virtualmente em toda área coberta pela missão SRTM.

Apesar da baixa variação de altitude na região Amazônica, é reconhecido que a geomorfometria influencia a formação de ambientes diferenciados nos quais diferentes tipos de vegetação se estabelecem através de efeitos diversos do relevo, que podem ser expressos em variáveis geomorfométricas derivadas da elevação (BISPO et al. 2009). Alguns autores mostraram que em ambientes de floresta tropical, a gradiente florístico e estrutural está fortemente correlacionado com as condições de água do solo e fatores associados com a topografia diretamente (OGDEN; POWELL, 1979; CHAUVEL et al., 1987; SOLLINS, 1998; GANDOLFI, 2000; CATTERALL et al., 2001). Fisk et al. (1998) indicaram que os processos de ciclagem de nutrientes estão relacionadas à variação espacial dos níveis de umidade entre áreas elevadas, que tendem a ser mais secos, e as áreas mais baixas, onde a

umidade tende a ser maior. Esta variabilidade espacial da vegetação tem sido atribuída a fatores que incluem condições de alta umidade, limitação de nutrientes (VITOUSEK; SANFORD, 1986), acidez do e período de molhamento foliar (LETTS, 2005) todos controlados, em maior ou menor grau, pelo relevo. Florinsky e Kuryakova (1996), Vivian-Smith (1997) e Cardoso e Schiavini (2002) sustentam que a variação topográfica é também responsável pelo controle da deposição de matéria orgânica e de sementes, podendo criar ambientes que determinam a frequência de ocorrência de espécies de plantas. Embora existam diversos estudos dedicados à investigação da influência das variáveis ambientais sobre a diferenciação da vegetação, poucos são aqueles que testam rigorosamente as relações entre variáveis geomorfométricas e características florístico-estruturais da vegetação em florestas tropicais (JARVIS, 2009).

Diante do exposto, a importância do relevo no contexto deste estudo, a necessidade de desenvolvimento metodológico usando SRTM, a demanda por aplicações de tais dados e a relevância dos dados polarimétricos ALOS-PALSAR para estudos estruturais da vegetação, constituem os elementos de motivação do presente trabalho. Desse modo, esta proposta se insere num contexto mais específico que é o de relacionar dados geomorfométricos e polarimétricos a tipologias vegetais e suas características florístico-estruturais.

1.1 Hipótese

O presente trabalho busca testar duas hipóteses:

A primeira é a de que a distribuição florístico-estrutural da tipologia florestal pode ser explicada e modelada com base em dados geomorfométricos provenientes do SRTM. A segunda hipótese é a de que a integração entre dados polarimétricos oriundos do PALSAR e variáveis geomorfométricas melhora a capacidade preditiva dos modelos de estimativa de biomassa florestal.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral analisar dados SRTM e PALSAR/ALOS como subsídio ao estudo florístico-estrutural da tipologia florestal diante das variações geomorfométricas, visando a uma modelagem da distribuição estrutural, bem como da biomassa florestal em uma área na Amazônia Central. O atendimento a este objetivo abrange a solução de algumas questões específicas:

- Analisar os padrões de distribuição na composição florística e estrutural da floresta e o potencial das variáveis geomorfométricas derivadas do SRTM para explicar tais padrões;

- Gerar modelos para a estimativa para as variáveis estruturais da floresta, bem como mapas de probabilidade de ocorrência da abundância de espécies a partir de variáveis geomorfométricas;

- Avaliar o efeito da topografia sobre o restroespalhamento de imagens PALSAR em áreas de floresta;

- Integrar os atributos polarimétricos coerentes e incoerentes provenientes do PALSAR com as variáveis geomorfométricas oriundas do SRTM para a modelagem da estimativa de biomassa florestal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a compreensão deste trabalho, este capítulo faz uma breve fundamentação sobre o SRTM, as condicionantes topográficas da paisagem e suas relações com a vegetação. Em seguida, são apresentadas a fundamentação de polarimetria SAR e seus atributos, a resposta polarimétrica de alvos florestais e os efeitos do relevo sobre o retroespalhamento em áreas vegetadas.

2.1 Os dados SRTM

Os sensores da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foram embarcados no ônibus espacial *Endeavor*, para levantamento da topografia terrestre. Os dados foram coletados, entre os dias 11 e 22 de fevereiro de 2000, em 176 órbitas a 223 km de altura com inclinação orbital de 57°. Destas, 159 foram empregadas na operação de mapeamento. A SRTM consistiu no emprego de *doissingle-pass radar interferometer* na coleta de dados interferométricos (bandas C e X) para produção do MDE (Modelo Digital de Elevação) da superfície terrestre entre as latitudes 60°N e 56°S. O MDE interferométrico banda C, com 1 arco-segundo de resolução (aproximadamente 30 m ou 0,000277°) está disponível para o território dos Estados Unidos (SRTM 1), sendo que para o resto do globo foi disponibilizado apenas em versões integradas na resolução de 3 arco-segundos (aproximadamente 90m ou 0,000833°). O MDE foi obtido em coordenadas geográficas, datum horizontal WGS84, as altitudes em metros e referenciadas ao nível médio do mar como definido pelo geóide WGS84 *Earth Gravitational Model* (EGM96). Tais dados podem ser acessados gratuitamente no site http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/.

A missão SRTM teve como objetivo alcançar o nível de mapeamento entre as escalas 1:100.000 e 1:250.000. O conjunto de especificações para os dados finais foi estabelecido pela *National Geoespatial-Intelligence Agency* (NGA), sendo que as fontes interferométricas de erros e os erros aleatórios foram estimados, calibrados e compensados para atingir os critérios especificados. As especificações de exatidão vertical foram ±16m para altitude absoluta (a partir do conjunto total de dados) e ±6m para altitude relativa (a partir de uma escala local de 200 km). Para América do Sul foi obtido um erro absoluto de localização de 9,0m, erro absoluto de altitude de 6,2m e erro relativo de altitude de 5,5m (RODRIGUEZ et al., 2006; VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

Testes de refinamento dos dados SRTM 3 para a resolução de 1" mostraram que técnicas de interpolação baseadas em geoestatística podem favorecer a derivação posterior de variáveis geomorfométricas, calculadas a partir da altimetria (VALERIANO et al., 2006), como declividade, orientação de vertentes e curvatura. Diante da disponibilidade dos dados SRTM, e com o objetivo de facilitar a utilização do SRTM para o território brasileiro, um banco e dados geomorfométricos de livre acesso foi criado com o nome de Topodata (www.dsr.inpe.br/topodata). O processo geral engloba o refinamento dos dados seguido de sua derivação nas variáveis geomorfométricas básicas, além da elaboração de insumos relacionados à estrutura de drenagem e microbacias para interpretação visual, entre outros (VALERIANO, 2008). Na etapa de preparação do MDE, diferentes modelos de interpolação foram avaliados para seleção de um esquema unificado de refinamento por todo o território (VALERIANO; ROSSETTI, 2012). Esta seleção teve como critério a preservação de feições detalhadas, como bordas, picos e arestas e pequenas estruturas de drenagem, e aspectos de pequena amplitude altimétrica, associadas à rugosidade e à textura topográfica exibida pelo MDE em relevo sombreado. O MDE refinado foi submetido à derivação por operações de vizinhança encadeados em programas de lote (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010), e os produtos organizados em folhas compatíveis com a articulação do sistema cartográfico brasileiro na escala 1:250.000, ou seja, em folhas de 1° por 1,5°.

Ao lado de diversos estudos que fizeram uso de dados Topodata desde então, uma avaliação da precisão/exatidão vertical feita com diversos MDE com cobertura ampla disponíveis gratuitamente (MICELI et al., 2011) em área plana (região de Manaus, AM) e montanhosa (Petrópolis, RJ) mostrou que o MDE refinado do Topodata teve qualidade compatível com os demais dados, mesmo aqueles tomados na resolução de 1" (ASTER-DEM). Em todos os testes, o MDE do Topodata apresentou os menores erros médios quadráticos (EMQ) e as maiores tolerâncias para PEC A, B ou C nas escalas de 1:50.000 e 1:100.000. Em área montanhosa destacou-se dos demais quando avaliados na escala de 1:50.000 por ter atingido PEC B.

2.2 Geomorfometria e suas variáveis

A importância da mensuração das informações de relevo está na necessidade de se manipularem variáveis espaciais para obtenção de conhecimento sobre diferentes aspectos da paisagem. No contexto dos avanços tecnológicos e da evolução das diversas formas de representar o espaço, o Modelo Digital de Elevação (MDE), especialmente diante da

disponibilidade de dados SRTM, representa uma abordagem interessante para caracterização do relevo por meio de processos computacionais.

Neste contexto, a geomorfometria refere-se à abordagem paramétrica do terreno que se baseia na análise de modelos digitais de elevação e busca descrever quantitativamente a superfície topográfica (PIKE, 2000; CHRISTOFOLETTI, 1980) em diversas escalas, a partir de técnicas estatísticas e computacionais. Essas informações podem ser usadas isoladas ou combinadas para a caracterização do meio físico. Tal abordagem relaciona-se a variáveis ou medidas como a altura, comprimento, largura, superfície, volume, amplitude, declividade, curvaturas, orientação, densidade e frequência das formas do terreno entre outras.

A elevação corresponde à altitude do terreno e influencia os padrões de vegetação através de influências climáticas e da distribuição de material do solo. A declividade, juntamente com outras variáveis geomorfométricas, produz uma variedade de efeitos ambientais, tais como gradientes de umidade do solo, erosão do solo e transporte, interferência na organização vertical do dossel devido à penetração de luz e da distribuição dos ângulos internos dos povoamentos florestais, e exposição de indivíduos menores e mais jovens, na parte superior do dossel em áreas de declive acentuado (WILSON; GALLANT, 2000; CARDOSO; SCHIAVINI, 2002; ENOKI, 2003; RODRIGUES et al., 2007). A declividade e a orientação de vertentes influenciam a intensidade e direção dos fluxos de materiais, respectivamente, bem como a irradiância em função da geometria de iluminação luz solar. A densidade de iluminação varia localmente conforme o relevo (OKE, 1987) e indica o potencial de produtividade primária da vegetação.

Esses descritores derivados da topografia expressam efeitos locais sobre os regimes de água e energia, que, juntamente com variáveis bióticas podem afetar todos os atributos da vegetação natural. Qi e Zhu (2003) sugeriram que um conjunto básico de variáveis geomorfométricas para a caracterização do terreno local deve incluir as curvaturas vertical e horizontal (SCHMIDT et al., 2003; VALERIANO, 2003; VALERIANO; CARVALHO JÚNIOR, 2003). As curvaturas combinadas devem ser consideradas, por representar a forma do relevo, que estão ligadas às propriedades hidrológicas e de transporte, bem como ao substrato e, portanto, exercem influências indiretas na vegetação.

Embora não sejam direta ou facilmente derivadas a partir de MDE, existem muitas outras variáveis geomorfométricas que são também reconhecidas como indicadoras de condições ecofisiológicas do meio físico, cujo estudo e desenvolvimento foram dissociados dos recursos de SIG. Entre estas, Pike (1988) classifica altura, amplitude, profundidade de dissecação, predominância e integral hipsométrica como variáveis relacionadas à dispersão da altimetria.

Altura se refere à elevação relativa a um datum arbitrário, ou seja, uma cota relativa, de algum ponto do terreno que não seja o nível do mar, mais convenientemente como a elevação relativa ao menor nível do relevo na região em estudo. Quando esta referência é o nível do mar, a cota é chamada altitude, ou altitude absoluta. A amplitude é diferença entre as cotas extremas da área sob análise, ou seja, a diferença entre os pontos mais altos e os mais baixos de um terreno (PIKE, 1988; MEIJERINK, 1988). A dissecação é definida como a distância vertical entre os pontos da superfície topográfica em relação ao ponto mais alto dentro da área considerada para medição (EVANS, 1972; MARK, 1975), numa definição inversa à da altura. A predominância corresponde à caracterização do predomínio altimétrico de uma região (PIKE, 1988, DENT; YOUNG, 1981), alto-predominante ou baixo-predominante, conforme a distribuição das cotas se concentre próximo aos valores mais baixos ou mais altos, respectivamente.

A rugosidade da superfície também requer uma análise integrada por uma área definida, para observação da dispersão dos vetores normais à superfície do terreno. Entre as diversas abordagens para seu cálculo, pode ser estimada como o desvio padrão da declividade (GROHMANN et al., 2010).

Finalmente o índice de saturação relaciona a área de captação com a declividade de uma determinada área para estimar o acúmulo de água gravitacional (BEVEN; KIRKBY, 1979). Calculada como a área de captação dividida pela declividade, expressa a quantidade de água que converge para um determinado ponto (captação), ao mesmo tempo em que considera o potencial gravimétrico para seu escoamento. Nas áreas de declividade baixa, a água concentrada tende a saturar o solo. Enquanto a declividade é calculada localmente, como descrito, a área de captação requer o acúmulo das diversas linhas de escoamento determinadas pela superfície do terreno.

2.3 Relação entre a vegetação e topografia

Diversos estudos têm relacionado as variáveis topográficas com a diversidade e distribuição de espécies vegetais na paisagem (KIRKBY et al., 1990; FLORINSKY; KURYAKOVA, 1996; BISPO et al., 2009). Alguns se baseiam na influência sobre a vegetação através de efeitos do relevo sobre a hidrologia, fundamentalmente, uma vez que aquele determina o traçado planimétrico do curso de rios, variações na disponibilidade de água no solo e distribuição dos tipos de solo. Outros focam efeitos diversos da condição topográfica (solos, clima, hidrologia), expressa especialmente pela elevação, declividade, sobretudo, e mais

raramente estudos baseados nas curvaturas vertical e horizontal (DARGIE, 1987; KIRKBY et al., 1990). Nas paisagens brasileiras, onde predominam altitudes modestas, na maior parte entre 200 e 1200m, as diversas formas do terreno e as variáveis derivadas prevalecem como condicionantes de diferentes padrões fitofisionômicos, em relação à altitude, com poucas exceções. Na Amazônia, por exemplo, onde o relevo é descrito como de pequena amplitude, a posição observada em relação à transectos típicos pode manifestar diferenças na vegetação mais plausivelmente do que a altitude absoluta. Segundo Ayres (1993), a vegetação da Amazônia pode ser dividida em campinaranas que são florestas sobre solo arenoso, caracterizadas por vegetação escleromórfica, pobre e relativamente baixa, e florestas de terra firme, que se situam geralmente em terrenos ondulados, a baixas altitudes, com árvores mais altas, algumas chegando até 50m.

A heterogeneidade das condições do solo na Amazônia é frequentemente ligada à topografia e exerce uma notável influência sobre a composição, a estrutura e os padrões de diversidade da floresta (PELISSIER et al., 2001). A topografia da Amazônia Central é fortemente correlacionada com a textura do solo, e estes fatores são os maiores condicionantes da distribuição de espécies vegetais e da estrutura de suas comunidades, em escalas local e regional (SOLLINS, 1998; KUBOTA, 2004). A comunidade de palmeiras, por exemplo, distribui-se em três zonas de acordo com as condições hidromórficas do solo. Assim, pode-se reconhecer: solos bem drenados (platô, topo, vertente), solos pobremente drenados (zona de transição), solos sazonalmente inundados (igarapés) nos quais estas diferentes espécies se distribuem. Desse modo, verifica-se que a distribuição de diferentes espécies de palmeiras está fortemente relacionada ao tipo de solo, que por sua vez depende da situação topográfica local (KAHN; CASTRO, 1985). Tal condicionamento não se restringe à distribuição de tipos vegetacionais: cerca de 30% das variações espaciais nas estimativas de biomassa de árvores estão relacionadas às características do solo e à topografia (CASTILHO et al., 2006).

Embora se reconheçam os dados topográficos como importante fonte de informações para o sensoriamento remoto da vegetação, o estabelecimento de metodologias com este aporte requer o desenvolvimento de estudos específicos a cada ambiente, para determinar as relações que existem entre os aspectos da vegetação e os topográficos (KIRKBY et al., 1990; FLORINSKY e KURYAKOVA, 1996; KELLNDORFER et al., 2004).

2.4 Polarimetria SAR e seus atributos

O uso de dados de retroespalhamento de SAR (*Side Airborne Radar*) para estimativas de variáveis biofísicas e fisionômico-estruturais da vegetação tem sido intensificado nos últimos anos (VAN ZYL et al., 1989; CLOUDE; POTTIER, 1997; SANTOS et al., 2003; GONÇALVES, 2007; NARVAES, 2010) e se baseiam nas possíveis interações do sinal de microondas com a vegetação conforme o comprimento de onda e a polarização empregada. A polarimetria SAR pode ser definida como o estudo da orientação da onda eletromagnética com relação à superfície terrestre, do espalhamento dessa onda e da informação de fase entre os dois canais, horizontal (H) e vertical (V). A onda eletromagnética é constituída por dois campos de força, o elétrico e o magnético (Figura 2.1). Estes dois campos são perpendiculares entre si e transversais à direção de propagação da onda. Os sistemas SAR polarimétricos são desenvolvidos para descreverem completamente o estado de polarização, tanto da onda transmitida quanto recebida pelo RADAR. Os dados medidos registram informações de amplitude e fase e são armazenados em uma estrutura vetorial complexa (ULABY; ELACHI, 1990).

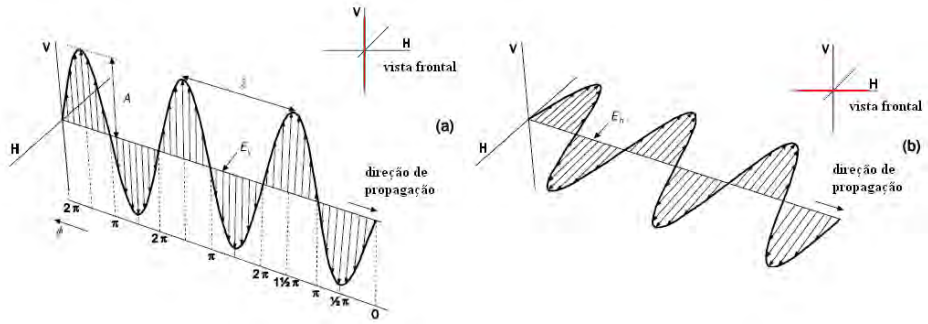

Figura 2.1 – Vista lateral e frontal do campo elétrico para uma onda eletromagnética. (a) Onda com polarização vertical, (V). (b) onda com a polarização horizontal (H). Ilustração do comprimento de onda λ, amplitude A, fase Φ, campo elétrico vertical E_v e campo elétrico horizontal E_h. Φ varia de 0 a 2π. Fonte: Modificada de VAN DER SANDEN (1997).

A notação HV é usada quando o radar emite a onda na polarização horizontal e recebe na vertical, isso também se aplica quando a emissão se dá na polarização vertical (VV e VH). A notação HH é usada quando o sistema radar emite na horizontal e recebe a onda de retorno também na polarização horizontal. As notações VV e HH são denominadas polarizações paralelas ou co-polarizações, VH e HV polarizações cruzadas ou cross-polarizações. A forma

mais simples de registrar estes dados é a partir da combinação de duas diferentes polarizações para as ondas transmitida e recebida. As ondas com polarização vertical somente irão interagir com parte de objetos no plano vertical, e vice-versa bem como ondas com polarização horizontal somente irão interagir com a parte de objetos no plano horizontal e vice-versa (VAN DER SANDEN, 1997).

A utilização de imagens SAR polarimétricas tais como as geradas pelo ALOS-PALSAR (banda L) (Tabela 2.1) podem fornecer informações sobre os alvos, especialmente sobre a vegetação, permitindo que estas sejam inferidas a partir do uso de classificadores baseados em técnicas de decomposição de mecanismos de espalhamento predominantes (NARVAES, 2010). Tais classificadores se baseiam na Teoria de Decomposição de Alvos empregada na determinação dos mecanismos de espalhamento médio pela soma de elementos independentes associados a mecanismos físicos (CLOUDE; POTTIER, 1996).

Tabela 2.1 – Características dos quatro modos de aquisição de dados do sensor PALSAR.

Modo de imageamento	***Polarização***	***Resolução nominal***	***Ângulo off-nadir***	***Órbita***	***Tamanho da cena (alc. x azim.)***	***Cobertura***	***Freqüência de observação***
Fine Beam Single (FBS)	HH	10 m	34,3°	Asc.	70 km x 52, 78km	Global	1,2 obs/ano
Fine Beam Dual (FBD)	HH + HV	20 m	34,3°	Asc.	70 km x 52, 78km	Global	1,4 obs/ano
Polarimetric (PLR)	HH + HV +VH + VV	30 m	21,5°	Asc.	30 km x 64, 72km	Regional	2 obs/2 anos
ScanSAR	HH	100 m	20,1° , 36,5° (5 beam)	Desc.	350 km x 350 Km	(a) Global; (b) Regional	(a) 1 obs/ano; (b) 8 obs/1ano
Fine Beam Dual (FBD)	HH + HV	20 m	49°	Asc.	70 km x 52, 78km	Círculo Ártico	1,3 obs/ano

Níveis de processamento dos dados PALSAR:L1.0 - Dado de sinal não processado e reconstruído, com coeficientes de correção radiométrica e geométrica anexados; L1.1 - Dado complexo em alcance inclinado (Slant range), processado com compressão em alcance e 1 look em azimute. Não disponível para o modo ScanSAR; e L1.5 - Imagem processada em Multilook, projetada para coordenadas cartográficas. L1.5/G: Sistematicamente geocodificada (Imagem com pixels alinhados em relação a trajetória do satélite); L1.5/R: Sistematicamente georeferenciada (Imagem com pixels alinhados com a grade da projeção UTM, mas não aplicados.
Fonte: ALOS, 2008 (http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html)

No que se refere à interação da onda emitida pelo radar com os componentes da estrutura florestal, o sinal pode interagir com o dossel, conforme sua capacidade de penetração e sua sensibilidade à água contida na vegetação (constante dielétrica), sensível ao arranjo espacial dos constituintes florestais e biomassa (VAN DER SANDEN, 1997). Além disso, o radar pode ter alta sensibilidade à rugosidade das camadas superiores do dossel, à estrutura e à sua orientação, dependendo da freqüência de operação do radar (VAN DER SANDEN, 1997). A Figura 2.2 apresenta os cinco mecanismos de espalhamentos e seus respectivos processos de

interação que ocorrem nas florestas: a energia retroespalhada está relacionada ao retorno do topo do dossel oriundo do espalhamento de volume da copa (1), do espalhamento direto do tronco das árvores e/ou da superfície do solo, denominado também de *single bounce* (2 e 3), da interação direta dos troncos e solo e vice-versa (4a e 4b) e da ocorrência do espalhamento solo-copa e vice-versa (5a e 5b) (espalhamento múltiplo e volumétrico).

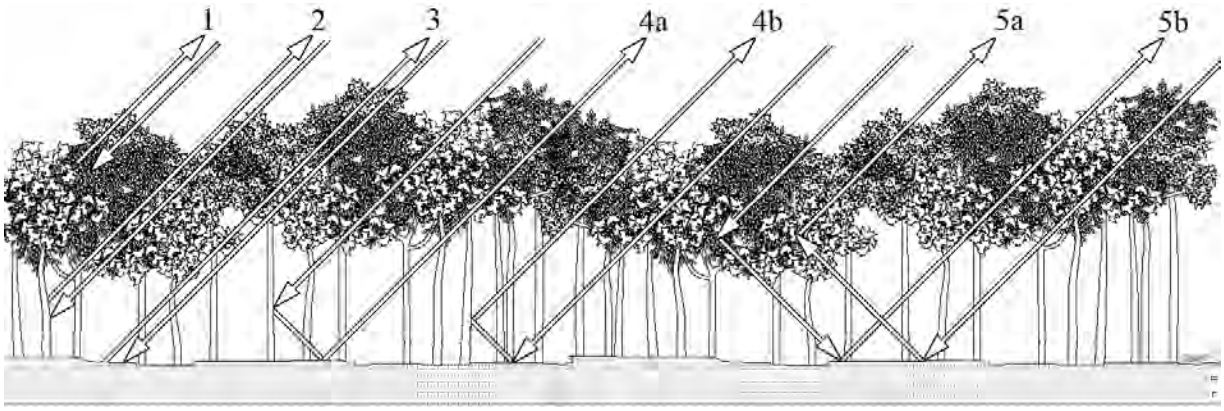

Figura 2.2 – Fontes de retroespalhamento dominantes em florestas: (1) espalhamento de volume da copa, (2) espalhamento direto do tronco de árvores, (3) espalhamento direto da superfície do solo, (4a) espalhamento tronco-solo, (4b) espalhamento solo-tronco, (5a) espalhamento solo-copa, (5b) espalhamento copa-solo. Fonte: Modificado a partir de VAN DER SANDEN (1997).

A partir da matriz de espalhamento complexa (amplitude e fase), a qual é obtida para cada elemento de resolução da imagem, pode-se extrair uma série de atributos provenientes das características polarimétricas para um alvo florestal, por exemplo. Os elementos desta matriz correspondem aos quatro componentes de retroespalhamento e são representados por S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}, S_{VV}. Cada um destes descreve a amplitude e a fase relativa da onda incidente e espalhada. A partir da matriz de espalhamento foram geradas as matrizes de covariância [C] e coerência [T]. Assim, a representação dos parâmetros complexos é obtida por meio da matriz de espalhamento, segundo Henderson e Lewis (1998), dada por:

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} \tag{2.1}$$

No caso deste trabalho, serão descritos alguns atributos polarimétricos baseados somente nas medidas de potência do radar (atributos incoerentes) e de fase (atributos coerentes).

Entre os atributos incoerentes a serem utilizados podemos citar os índices de Pope et al. (1994), os quais estão relacionados à diferentes características da vegetação. O índice CSI corresponde à estrutura do dossel, o VSI ao espalhamento volumétrico, o BMI à biomassa. Estes índices baseados em razões ou diferenças normalizadas são independentes dos efeitos de *range* e da declividade do terreno (GONÇALVES, 2007; NARVAES, 2010).

Alguns dos atributos coerentes a serem utilizados no presente trabalho serão as componentes geradas na decomposição de Freeman-Durden, as medidas de coerência em todas as polarizações, a entropia e do ângulo α. Freeman e Durden (1998) modelam os mecanismos de espalhamento a partir de um modelo para dados SAR polarimétricos constituído por três componentes nos mecanismos de espalhamento (espalhamento volumétrico, espalhamento *double bounce*, espalhamento superficial). Estes mecanismos de espalhamento são modelados de acordo com diferentes alvos pontuais, ou seja, o espalhamento volumétrico é modelado por uma nuvem de dipolos orientados aleatoriamente (espalhadores cilíndricos finos), com intuito de modelar o dossel florestal; o espalhamento *double bounce* de um par de superfícies ortogonais com diferentes constantes dielétricas (refletores de canto diédricos), com o intuito de representar à interação tronco-solo que ocorre nas florestas; e o espalhamento superficial de uma superfície moderadamente rugosa, contribuindo para simulação da rugosidade da superfície florestal. Uma das principais vantagens deste modelo é a sua praticidade, pois fornece um percentual relativo de cada mecanismo de espalhamento, além de avaliar a contribuição dos três mecanismos de espalhamento para as polarizações HH, HV e VV. Todas as variáveis de espalhamento expressam a contribuição de cada mecanismo na potência total retroespalhada (GONÇALVES, 2007).

Outro atributo coerente importante para distinguir espalhamentos simples e múltiplos é por meio da medida de entropia polarimétrica (H), proposto por Cloude e Pottier (1997). Este conceito provém da teoria da informação, utilizada como medida de complexidade, que explica a formação da imagem como um processo estocástico, ou seja, imagens produzidas com alto valor de entropia revelam uma imagem com maior riqueza de detalhes. Segundo os mesmos autores, a associação da entropia polarimétrica (H) e do ângulo alfa (α), este último derivado dos autovalores e autovetores da matriz de coerência [T] dos dados polarimétricos, indica o mecanismo de espalhamento médio dominante. Esta associação é plotada em um gráfico, onde se pode classificar o comportamento do alvo pela posição dos pontos obtidos em cada zona, onde ângulos α maiores que 45° correspondem à anisotropia de diedros e

menores de 45° correspondem à superfície anisotrópica. Para a entropia, o limiar entre baixa e média é de 0,5 e entre média e alta é de 0,9. Como ilustrado na Figura 2.3, nesta classificação são discriminadas 9 zonas distintas: Z1 - espalhamento múltiplo com alta entropia; Z2 - espalhamento da vegetação com alta entropia; Z3 - espalhamento da superfície com alta entropia (esta zona não faz parte da região útil do plano); Z4 - espalhamento múltiplo com média entropia; Z5 - espalhamento da vegetação com média entropia; Z6 - espalhamento da superfície com média entropia; Z7 – espalhamento múltiplo com baixa entropia; Z8 - espalhamento de dipolo com baixa entropia; e Z9 - espalhamento de superfície com baixa entropia.

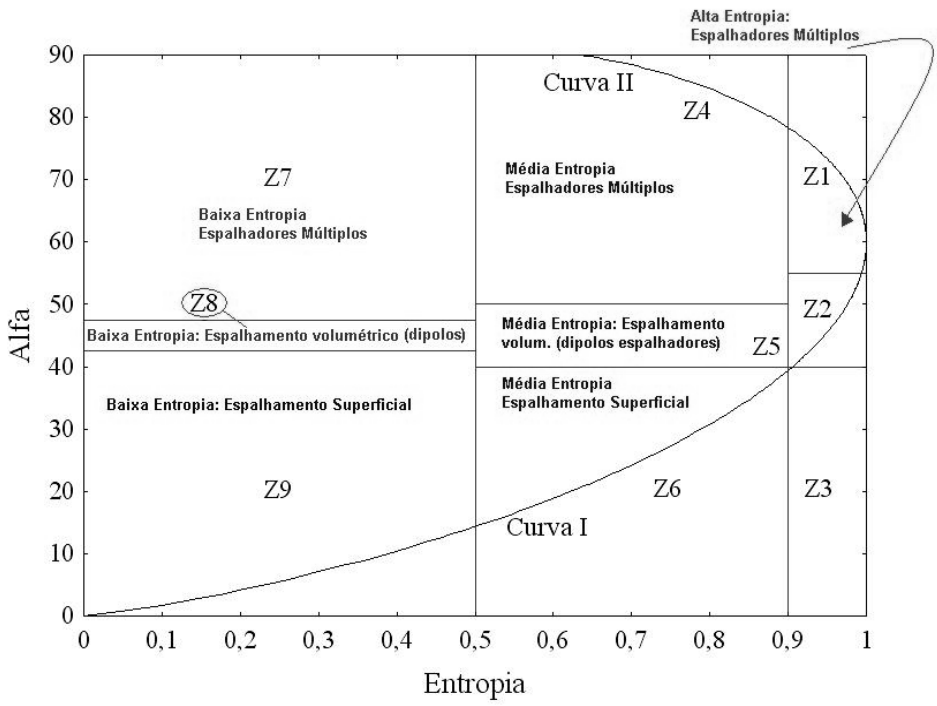

Figura 2.3 – Zonas do espaço de classificação bidimensional (H, $\overline{\alpha}$). As curvas I e II representam os limites de variação de $\overline{\alpha}$ como função de H. Fonte: GONÇALVES 2007, modificada de Cloude e Pottier (1997).

A coerência polarimétrica (γ) apresenta grande potencialidade na discriminação de ambientes florestais com alto grau de degradação, conforme citado por Gonçalves (2007). Esse autor encontrou em um conglomerado de atributos SAR constituinte da sua área florestal de estudo, valores baixos de coerência polarimétrica (γ), uma vez que este atributo determina o grau de correlação da informação de fase entre as polarizações HH e VV, menor em ambientes estruturalmente mais heterogêneos.

A descrição das características polarimétricas de um determinado alvo pode ser realizada por uma série de atributos extraídos da matriz de espalhamento complexa (amplitude e fase). No presente trabalho serão analisados os principais atributos incoerentes e coerentes SAR que têm se mostrados promissores em estudos florestais. A seguir cada variável será descrita conforme relatado por Gonçalves (2007) e Narvaes (2010).

a) Atributos incoerentes

Os atributos incoerentes são baseados nas informações da parte real da imagem. Entre os principais atributos incoerentes estão o coeficiente de retroespalhamento (σ^0) (WOODHOUSE 2006; VAN DER SANDEN, 1997), a razão de polarização paralela (Rp) e razão de polarização cruzada (Rc) (HENDERSON e LEWIS, 1998), a potência total (P_T) (WOODHOUSE 2006; LEE; POTTIER, 2009) e os índices formulados por Pope et al. (1994) em ambiente florestal, nomeados como índice de biomassa (BMI - *biomass index*), de estrutura do dossel (CSI - *canopy structure index*) e de espalhamento volumétrico (VSI - *volume scattering index*).

Coeficiente de retroespalhamento: Considera a geometria do alvo por unidade de área de superfície. O valor de σ° varia na proporção da área projetada da energia incidente, como uma função do cosseno do ângulo de incidência local, em dosséis florestais. Este valor é obtido em todas as polarizações e expresso em escala linear, medindo a quantidade de energia registrada pela antena.

$$\sigma^0_{HH} = 10^{\frac{(\sigma^0_{HH})dB}{10}} \tag{2.2}$$

$$\sigma^0_{VV} = 10^{\frac{(\sigma^0_{VV})dB}{10}} \tag{2.3}$$

$$\sigma^0_{HH} = 10^{\frac{(\sigma^0_{HH})dB}{10}} \tag{2.4}$$

Razão de polarização paralela: Corresponde a uma medida da rugosidade da superfície, para todos os ângulos de incidências, polarizações e superfícies. Em ambientes florestais, é um parâmetro do indicativo do mecanismo de espalhamento atuante. Valores elevados indicam (>1) que o espalhamento é do tipo *double bounce* (maior sensibilidade ao espalhamento na polarização HH em relação aos elementos na VV).

$$R_p = \frac{\sigma^0_{VV}}{\sigma^0_{HH}} \tag{2.5}$$

Razão de polarização cruzada: Considerado um parâmetro relacionado à rugosidade da superfície, mas fracamente dependente da umidade. Tem potencial de utilização em alvos florestais, porém quando os valores deste parâmetro são elevados, constituem-se em um indicativo do aumento do espalhamento no volume da copa (elementos espalhadores aleatórios).

$$R_c = \frac{\sigma^0_{HV}}{\sigma^0_{HH}} \tag{2.6}$$

Potência total (Span): Representado pela soma total dos mecanismos de espalhamento ocorrentes na floresta, sendo que nesta representação toda a informação de fase é perdida. Além disso, é considerado polarimetricamente invariante, ou seja, independe da base utilizada para descrever a onda de radar.

$$P_T = \sigma^0_{HH} + \sigma^0_{VV} + 2\sigma^0_{HV} \tag{2.7}$$

Índice de biomassa: Considerado indicador da quantidade relativa de madeira pela biomassa foliar. Este índice possui valores maiores para florestas com características de senescência do que para as perenifólias, devido à absorção dos sinais de microondas pela umidade das folhas verdes. Entretanto, esse índice é influenciado pelo ângulo de incidência local

$$BMI = \frac{\sigma^0_{HH} + \sigma^0_{VV}}{2} \tag{2.8}$$

Índice de estrutura do dossel: Relacionado com ecossistemas dominados pela estrutura vertical (florestas de terra firme) em comparação com a importância daqueles dominados por galhos horizontais ou quase horizontais (florestas inundadas). Por conseguinte, florestas de terra firme apresentam valores mais elevados de CSI do que florestas inundadas. As reflexões de canto ocorrentes na floresta (*double bounce*) tendem a reduzir este índice, quando há uma maior contribuição dos elementos horizontais em relação às estruturas predominantemente verticais.

$$CSI = \frac{\sigma^0_{VV}}{\sigma^0_{VV} + \sigma^0_{HH}} \tag{2.9}$$

Índice de espalhamento volumétrico: É considerada uma medida da despolarização do retroespalhamento, pois esta ocorre pelo multi-caminhamento no interior da estrutura aleatória do dossel florestal, provocando espalhamento múltiplo (volumétrico). Devido a sua formulação, e dependendo do tipo florestal em análise, pode fornecer melhor resposta com a biomassa dos troncos do que o índice de biomassa.

$$VSI = \frac{\sigma^0_{HV}}{\sigma^0_{HV} + BMI} \tag{2.10}$$

b) Atributos coerentes

Neste estudo serão analisados alguns atributos baseados nas medidas e informação de fase, os quais serão a diferença de fase ($\Delta\varphi$) e a coerência polarimétrica (γ) entre as polarizações HH e VV, ambos descritos em Henderson e Lewis (1998); a entropia (H), a anisotropia (A) e o ângulo alfa médio ($\overline{\alpha}$), resultantes da decomposição por autovetores da matriz de coerência (CLOUDE; POTTIER, 1996); e as componentes de espalhamento volumétrico (P_v), *double bounce* (P_d) e superficial (Ps), resultantes da decomposição da matriz de covariância (FREEMAN; DURDEN, 1998):

Diferença de fase HH-VV: É a variável relacionada ao tipo de espalhamento dominante. Apresenta valor próximo à 0º para espalhamento direto e se aproxima de ±180º para espalhamento *double bounce* (e.g., interação tronco-solo). No intervalo entre 0 e ±180º representa múltiplas interações, a exemplo do que ocorre nos dosséis florestais (S_{HH} e S_{VV} denotam, respectivamente, a amplitude de espalhamento complexa nas polarizações HH e VV; *arg* denota a função argumento; e * denota o conjugado complexo):

$$\Delta\varphi = \arg\left(S_{HH} S^*_{VV}\right) \tag{2.11}$$

Coerência polarimétrica: É a variável determina o grau de correlação da informação de fase entre as polarizações HH e VV. Na maior parte dos alvos naturais os elementos da matriz de espalhamento tendem a ser descorrelacionados e a diferença de fase correspondente tende a zero (<> símbolo que significa média espacial):

$$\gamma = \frac{\left|\left\langle S_{HH} S^*_{VV} \right\rangle\right|}{\sqrt{\left\langle S_{HH} S^*_{HH} \right\rangle \left\langle S_{VV} S^*_{VV} \right\rangle}} \tag{2.12}$$

Entropia: É a variável que determina o grau de aleatoriedade do processo de espalhamento. Para representar o processo de espalhamento determinístico o valor da entropia deve ser mínimo (H= 0) e quando mais de um mecanismo de espalhamento contribui para o sinal retroespalhado os valores de H devem ser médios. Todavia, um máximo valor de entropia (H =1) indica que todos os mecanismos de espalhamento apresentam contribuições equivalentes.

$$H = -\sum_{i=1}^{3} p_i \log_3(p_i), \quad \text{com} \quad p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^{3} \lambda_k} \tag{2.13}$$

onde pi denota a intensidade relativa do processo de espalhamento representado pelo autovalor λ_i, obtido da matriz de coerência .

Anisotropia: É uma variável que mede a importância relativa dos mecanismos secundários de espalhamento, funcionando complementarmente à entropia, pois produz informação adicional somente nos casos em que H apresenta valores intermediários. Os valores altos de A indicam que somente o segundo mecanismo de espalhamento (λ_2) apresenta importância, enquanto que valores baixos indicam que o terceiro mecanismo (λ_3) também é importante.

$$A = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \tag{2.14}$$

onde, em ordem decrescente os autovalores λ_2 e λ_3, com $\lambda_2 \geq \lambda_3$, são os dois menores autovalores obtidos da matriz de coerência .

Ângulo alfa médio: É a variável que descreve o tipo de mecanismo de espalhamento dominante. Os valores mais baixos de ($\overline{\alpha}$ = 0) para superfícies isotrópicas (indicam o espalhamento de superfície), apresentando valores crescentes à medida que a superfície se torna anisotrópica (SHH ≠ SVV). Já com valor de 45° representa diedros anisotrópicos (SHH ≠ SVV e Δφ= 180º) ou indica o espalhamento volumétrico, enquanto que valores máximos de (90º) representam alvos que produzem uma alteração de 2π entre a fase das polarizações HH e VV (refletores do tipo diedro ou espalhamento múltiplo).

$$\overline{\alpha} = \sum_{i=1}^{3} p_i \alpha_i \tag{2.15}$$

onde αi são as primeiras coordenadas dos autovetores associados a λ_i.

Espalhamento volumétrico: É a variável que por intermédio da potência total retroespalhada mede a contribuição do espalhamento volumétrico. Para este tipo de mecanismo se assume que o retroespalhamento é proveniente de um conjunto de espalhadores cilíndricos finos, orientados aleatoriamente, simulando o dossel florestal.

$$P_v = \frac{8 f_v}{3} \tag{2.16}$$

onde fv denota a contribuição do espalhamento volumétrico para a seção transversal VV.

Espalhamento double bounce: É a variável que, por intermédio da potência total retroespalhada, mede a contribuição do espalhamento *double bounce*. Para este tipo de mecanismo se assume que o retroespalhamento é proveniente de um conjunto de refletores de canto diédricos correspondendo, por exemplo, à interação solo-tronco de florestas para a seção transversal VV.

$$P_d = f_d \left(1 + |\alpha|^2\right) \tag{2.17}$$

onde α denota a estatística de segunda ordem <SHHSVV*> para o espalhamento *double bounce*, após a normalização referente ao termo VV.

Espalhamento superficial: É a variável que, por intermédio da potência total retroespalhada, mede a contribuição do espalhamento superficial. Para este tipo de mecanismo se assume que o retroespalhamento é modelado por superfícies rugosas que possuem feições com distribuição periódica na direção de propagação da radiação (*Bragg scattering*).

$$P_s = f_s \left(1 + |\beta|^2\right) \tag{2.18}$$

Onde fs denota a contribuição do espalhamento superficial para a seção transversal VV; e β denota a estatística de segunda ordem <SHHSVV*> para o espalhamento superficial, após a normalização referente ao termo VV).

Magnitude de Touzi: Parâmetro que fornece a magnitude do tipo de simetria referente ao tipo de espalhamento do alvo (considerado complementar ao ângulo alfa de Cloude). Os valores mais baixos de ($\alpha_{si} = 0$) indicam o que o alvo possui simetria e o espalhamento é considerado do tipo direto (*single bounce*), enquanto que valores intermediários ($\alpha_{si} = \pi/4$) indicam que o alvo apresenta assimetria de 45° em relação a interação com o alvo, considerado do tipo

múltiplo. Valores extremos de magnitude (α_{si} =π/2) indicam que o alvo está orientado a 90° em relação a onda incidente e o espalhamento é considerado do tipo *double bounce*. De acordo com TOUZI et al. (2009) a α_{si} e a $\Phi_{\alpha si}$ são definidas segundo as coordenadas polares da esfera de Poincaré como função da matriz de espalhamento [S].

$$\tan(\alpha_s).e^{j\phi\alpha_s} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \tag{2.19}$$

onde: μ_1 e μ_2 são os coautovalores da matriz [*S*].

Fase de Touzi: Parâmetro que fornece uma completa caracterização do tipo de espalhamento do alvo, considerado similar a diferença de fase HH-VV. Entretanto, os valores de φ_si possuem menor variabilidade de valores (menor desvio padrão da média) dentro da mesma classe classificada, além de ser invariante a base de polarização quando analisados alvos não-simétricos (TOUZI, 2007; TOUZI et al., 2009). Na verdade, a diferença entre os dois parâmetros está relacionada à diferença de conceitos, enquanto aφ_s_{HH} - φ_s_{VV} fornece a diferença de fase entre as polarizações HH e VV ao passo que a φ_si fornece a medida da diferença de fase entre o espalhamento diédrico e triédrico, além de ser independente da base de polarização ao passo que φ_s_{HH} - φ_s_{VV} esteja estritamente relacionado ao espalhamento nas polarizações HH e VV. Valores próximos de (φ_si = 0) indicam que o alvo possui espalhamento do tipo direto, enquanto que valores de (φ_si = ± 90°) o espalhamento é do tipo *double bounce*. Valores intermediários indicam que o espalhamento é oriundo de múltiplas interações.

$$\tan(\alpha_s).e^{j\phi\alpha_s} = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_1 + \mu_2} \tag{2.20}$$

Ângulo de orientação: Parâmetro que mede o ângulo de rotação aplicado para subtrair o efeito do ângulo de orientação no espalhamento do alvo, fornecendo uma medida intrínseca do ângulo de inclinação do alvo. Valores de ângulo de orientação próximos a zero (ψ = 0) indicam que não há rotação do alvo, enquanto que os valores entre –π/4 ≤ ψ ≥ π/4 significa que o alvo está rotacionado com relação a linha de visada do radar.

$$[R(\psi)] = \begin{bmatrix} \cos\psi & -sen\,\psi \\ sen\,\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

onde: ψ é a orientação da máxima polarização com respeito a polarização horizontal.

Ângulo de heliticidade: Parâmetro que permite a medida do grau de simetria de espalhamento do alvo, separando espalhadores simétricos de assimétricos, dado o mesmo tipo de espalhamento α de Cloude. Valores de $\tau_{mi} = 0$ indicam que o alvo possui simetria, enquanto que valores de heliticidade $-\pi/4 \leq \tau_{mi} \leq \pi/4$ representam o espalhamento do tipo hélice orientado à direita e à esquerda representados na esfera de Poincaré, respectivamente.

$$[T(\tau_m)] = \begin{bmatrix} \cos\tau_m & -jsen\tau_m \\ -jsen\tau_m & \cos\tau_m \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

onde: τ_m é o ângulo de heliticidade utilizado para avaliar o grau de simetria do alvo.

2.5 Resposta Polarimétrica

A resposta polarimétrica de um determinado alvo consiste na representação gráfica tridimensional da variação do retroespalhamento ($\sigma°$) deste alvo em função dos ângulos da elipse de polarização, denominados ângulo elipticidade ($-45º \leq \psi \leq 45º$) e ângulo de orientação ($0º \leq \chi \leq 180º$). Os ângulos de elipticidade de 0º e 45º, por exemplo, representam as polarizações linear e circular, respectivamente (Figura 2.4). Os ângulos de orientação de 0º e 180º representam polarização horizontal, e o ângulo de 90º indica polarização vertical (EVANS et al., 1988; SANTOS et al., 2009). Aliado a isso, a altura mínima do pedestal, representada no gráfico da Figura 2.5, indica a parte da componente não polarizada do espalhamento, estando relacionada ao grau de polarização da onda espalhada (EVANS et al., 1988).

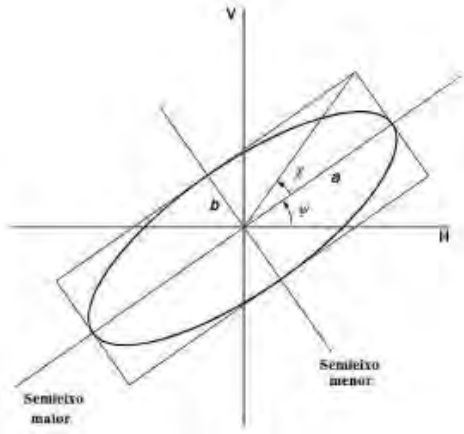

Figura 2.4 – Elipse de polarização ilustrando os ângulos de orientação (χ) e elipticidade (ψ). Fonte: Adaptada de VAN DER SANDEN (1997).

A forma da resposta polarimétrica representa os mecanismos de espalhamento dominantes refletindo características do alvo nas configurações polarizadas linear, circular ou elíptica, em todas as polarizações (MCNAIRN et al., 2002). De acordo com a natureza da transmissão e recepção da polarização, a resposta polarimétrica pode ser chamada co-polarizada, em que se tem mesma polarização tanto na transmissão como na recepção, ou cruzada quando ambas são ortogonais (VAN ZYL et al., 1987). Desse modo é possível visualizar a variação de σ° (normalizado) para todas as combinações dos ângulos ψ e χ tanto para a recepção como para a transmissão do vetor campo elétrico (Figura 2.5) .

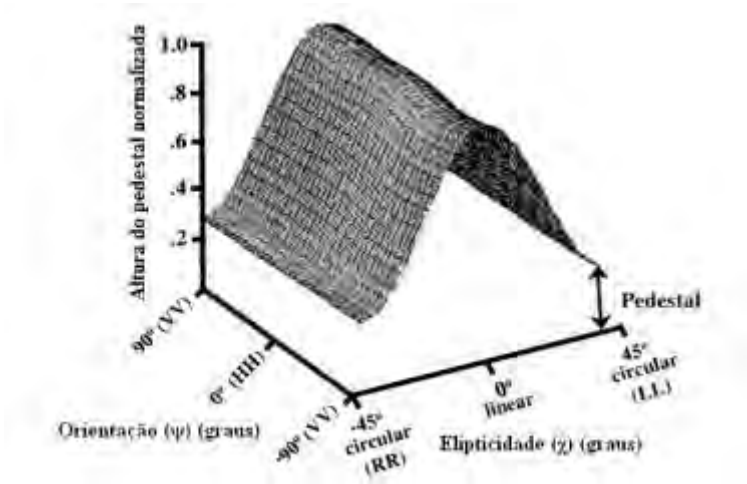

Figura 2.5 – Representação tridimensional da resposta de polarização de um alvo teórico. Fonte: NARVAES (2010), modificada de VAN ZYL et al. (1987).

2.6 Efeitos do relevo sobre o retroespalhamento de imagens SAR em áreas vegetadas

Com a disponibilidade de novas imagens SAR, tem crescido o número de estudos que exploram este recurso para o monitoramento da vegetação, bem como para a estimativa de biomassa. Embora os efeitos da topografia sobre a calibração de imagens SAR com relação ao espalhamento da área dos pixels (σ°) e remoção do ganho do padrão da antena sejam conhecidos (VAN ZYL et al., 1993; LUCKMAN, 1998), a dependência do coeficiente de retroespalhamento σ° para diferentes alvos florestais considerando as variações topográficas não foi totalmente investigada, com a maioria destes estudos realizada em áreas relativamente planas. Estudos sobre os efeitos da topografia nos mecanismos de espalhamento radar têm se limitado a quantificar a dependência do σ° do terreno plano sobre as variações no ângulo de incidência local, o que lhes permite derivar modelos empíricos para compensar pelos efeitos do ângulo de incidência em terreno montanhoso (BAYER et al., 1991; HINSE et al., 1988, TEILLET et al., 1985) e compreender a influência da inclinação do solo no mecanismo de espalhamento *double-bounce* entre troncos de árvores e solo (VAN ZYL et al., 1993, LUCKMAN; BAKER, 1995). Lee et al. (2004) comentam que, a decomposição de Freeman-Durden, por exemplo, apresenta algumas limitações, assim como outras técnicas de decomposição de alvos. Uma delas está relacionada com uma condição de reflexão simétrica, limitando a sua aplicação para áreas planas e horizontais. Outra limitação está relacionada a superfícies muito rugosas, que podem causar uma despolarização significante no sinal do radar, produzindo altos níveis para a polarização cruzada, o que sugere espalhamento volumétrico, especialmente para os radares de alta frequência, como as bandas X e C. Com isso, uma superfície rugosa será erroneamente classificada como vegetação.

Van Zyl (1993) mostrou o efeito da topografia do terreno abaixo da vegetação sobre retroespalhamento de áreas florestadas usando três frequências SAR polarimétricos sobre a Floresta Negra, na Alemanha. Mais especificamente, mostrou que o mecanismo de espalhamento dominante em área florestada pode mudar drasticamente quando a superfície do solo é inclinada em relação ao plano horizontal. No caso de uma superfície do solo horizontal, por exemplo, o espalhamento total pode ser dominado pelo espalhamento dos troncos das árvores, seguido de uma reflexão da superfície do solo. O autor mostrou que para uma inclinação relativamente pequena na superfície do solo (cerca de 2º a partir da horizontal) o termo de interação solo-tronco pode ser substituído pelo espalhamento apenas dos ramos como o mecanismo de espalhamento dominante. Seus resultados também mostram que o

efeito da topografia é mais pronunciado para espalhamento por comprimentos de onda mais longos e polarização HH. Assim, seus resultados iniciais revelam uma correlação muito forte entre a seção transversal do radar na banda P, de polarização HH, e atributos topográficos em área florestal. Na banda L, essa correlação entre essas variáveis desaparece, numa indicação de que as mudanças observadas na seção transversal do radar se devem a alterações na topografia. Eles também pontuam que o efeito da topografia em áreas planas é significativamente diferente daquela usualmente observada em áreas não vegetadas de terrenos montanhosos. Nesses casos, alterações na inclinação provocam mudanças no retroespalhamento geral do radar, devido a uma mudança no ângulo de incidência local. Isto é exatamente o efeito exibido pelo espalhamento direto do terreno. Neste caso, as faces declivosas voltadas para o radar apresentam reflexos mais fortes, enquanto as do nível de superfícies e encostas voltadas para o outro lado oposto ao radar apresentam retornos mais fracos. Quando certa quantidade de vegetação está presente, uma modificação no retroespalhamento observado é devido a uma mudança nos mecanismos de espalhamento dominante. Neste último caso, as áreas no nível da superficie realmente mostram retornos mais fortes do que aquelas decorrentes de encostas viradas para fora ou para a visada do radar. Também mostram que o efeito da topografia é mais pronunciado para espalhamento quanto maior o comprimento de onda, e afirmam que se deve considerar tal efeito em algoritmos designados para inferir a biomassa florestal, o solo e a umidade da vegetação.

Park e Yamaguchi (2011) também avaliaram os efeitos da variação da inclinação topográfica nas características de retroespalhamento da vegetação de imagens de radar polarimétrico. A análise experimental desses parâmetros foi realizada com base na simulação da matriz do alvo, decorrente do modelo de retroespalhamento da vegetação. Estes autores concluíram que para entender a sensibilidade do radar polarimétrico para condições geométricas e parâmetros biofísicos, as simulações devem ser realizadas considerando a topografia do terreno para diferentes volumes de madeira. A relação entre os parâmetros polarimétricos e os mecanismos de espalhamento da vegetação em florestas montanhosas é afetado por variações na contribuição relativa dos diferentes mecanismos de espalhamento. Autovetores podem indicar os mecanismos de espalhamento quando a contribuição do terreno é dominante entre os sinais retroespalhados em áreas florestais. Da mesma forma o ângulo de orientação polarimétrico e a correspondente compensação da orientação pode ser diretamente corresponde à topografia do terreno em questão. Devido às mudanças do ângulo de orientação e na declividade, análises errôneas resultantes de modelos de decomposição podem ser obtidas. Tal problema, no

primeiro caso, pode ser minimizado significativamente pela compensação do ângulo de orientação. Por outro lado, parâmetros polarimétricos podem fornecer informações incompletas sobre a declividade, por alterações nos mecanismos de espalhamento da vegetação, particularmente em termos da interação vegetação-solo e da própria topografia do terreno quando esse é coberto por florestas densas.

Conforme anteriormente citado, quando os dados SAR são adquiridos ao longo de um terreno montanhoso, as variações do ângulo de incidência local e o ângulo de orientação devido à topografia local podem levar às mudanças no espalhamento do sinal (PARK; YAMAGUCHI, 2011), o que pode ter influências na modelagem de estimativa de biomassa. O espalhamento *double-bounce* pelas ondas de radar nos troncos de árvores, seguido por um retroespalhamento do solo da floresta tornam-se informações a serem consideradas. Como este tipo de dispersão é muito sensível à orientação relativa das superfícies de espalhamento, considera-se que os resultados podem ser fortemente afetados pela topografia local. Portanto, as alterações nos mecanismos de espalhamento da vegetação, especialmente no termos de interação da vegetação-solo, devem ser cuidadosamente levados em conta na análise do sinal de SAR montanhosa áreas ou com relativa variação da amplitude topográfica no terreno.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Fluxo geral das atividades

O atendimento aos objetivos deste trabalho requereu a execução de atividades que podem ser distribuídas entre as etapas de (a) coleta e estruturação de dados, (b) análises e (c) aplicações, encadeadas conforme o fluxo geral esquematizado na Figura 3.1. No Apêndice A está apresentado o fluxograma do conjunto total de dados, de atividades e de produtos em maior detalhe.

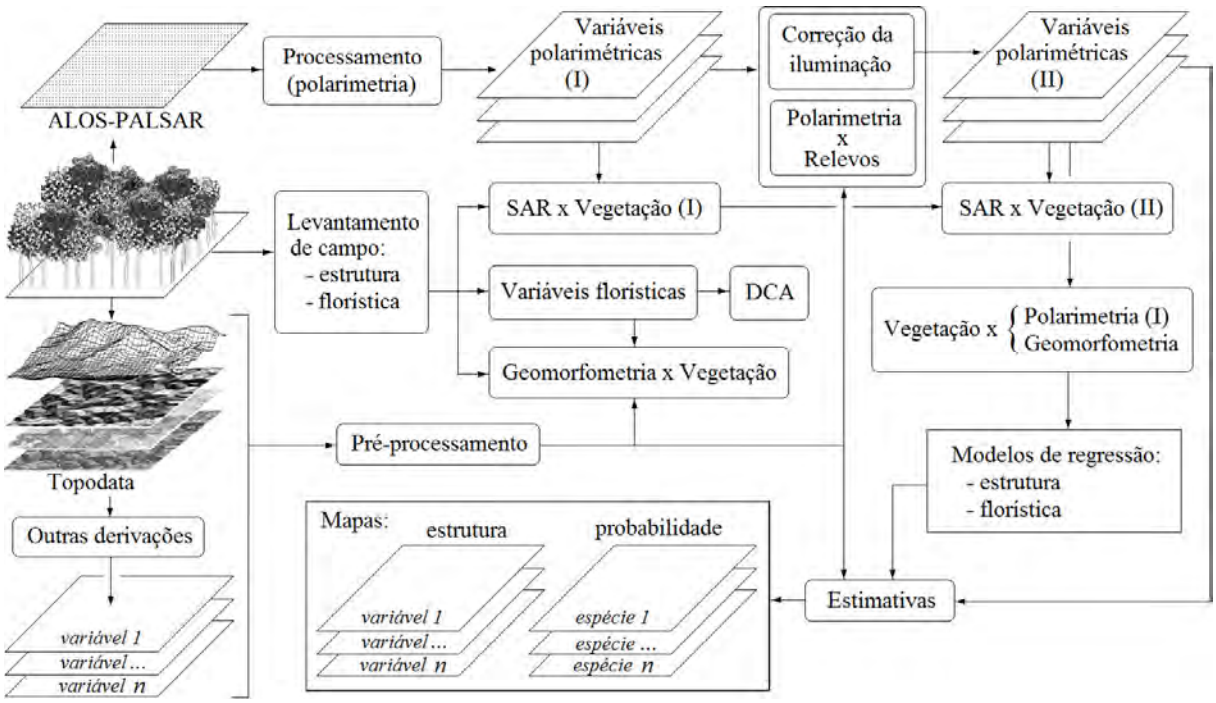

Figura 3.1 – Fluxo geral das atividades.

Na primeira etapa (a), incluem-se: (a1) levantamento em campo de dados florísticos e estruturais (abertura do dossel, diâmetro a altura do peito, altura total), registro em planilha e georreferenciamento das parcelas amostrais, e estimativa da biomassa florestal aérea através de equação alométrica; (a2) pré-processamento de planos de informação geomorfométrica obtidos do Topodata (mosaico e conversões) e derivação de outras variáveis a partir do respectivo MDE; e (a3) processamento (cálculo de atributos polarimétricos) de dados ALOS-PALSAR. Os dados destas diferentes fontes foram estruturados em SIG, sob geometrias espacialmente compatíveis entre si, para permitir sua integração e análises conjuntas.

Na etapa de análises, os dados florísticos foram aplicados no (b1) cálculo das variáveis da composição florística (abundância, riqueza e florística) e ordenados através de uma Análise de Correspondência Destendenciada (DCA), seguida de análise de correlação para identificar as espécies mais correlacionadas com o resultado da DCA.

As relações entre os dados de geomorfometria e de composição florística foram avaliadas a partir de (b2) análises de regressão entre cada variável da composição florística com as variáveis geomorfométricas. Foram feitas também análises de regressão logística entre algumas espécies e a geomorfometria. Na avaliação dos atributos geomorfométricos como estimadores das variáveis estruturais da floresta foram aplicadas (b3) análises de regressão entre as variáveis estruturais e as variáveis geomorfométricas e análise de correlação canônica entre os dois grupos de dados (variáveis geomorfométricas e estruturais da floresta). A relação entre biomassa e geomorfometria foi avaliada com (b4) análises de regressão múltipla.

Os dados SAR foram submetidos a (b5) análise exploratória, para avaliação das respostas polarimétricas das parcelas amostrais em três diferentes categorias de terreno (plano, ondulado e forte ondulado). Os ângulos da geometria de de aquisição destes dados foram aplicados no (b6) cálculo do fator topográfico de iluminação, como forma de isolar as variáveis polarimétricas deste efeito, para posterior análise de correlação com dados de biomassa. Adiante, os dados SAR e geomorfométricos selecionados nas análises anteriores (b4 e b6) foram conjuntamente aplicados em (b7) análises de regressão múltipla, para obtenção de um modelo estatístico mais abrangente para estimativa da biomassa.

Na etapa final (c), os resultados anteriores foram aplicados na modelagem da composição florística e estrutural da floresta. Através da operação dos modelos de regressão sobre os planos de informação das variáveis independentes, originadas de dados SRTM e PALSAR, foram gerados mapas de probabilidade de ocorrência de espécies e mapas de estimativa de dados estruturais.

3.2 Material

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde à Floresta Nacional do Tapajós (FNT), entre as coordenadas de 2°42’24” a 4°07’18” e de 54°52’37” a 54°57’38” W (Figura 3.2). A FNT é uma unidade de conservação de aproximadamente 545.000 ha inserida no bioma Amazônia no oeste do estado

do Pará, gerenciada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Dentro desta área se inclui uma unidade de manejo florestal com aproximadamente 3.220 ha, instalada para a exploração sustentada de madeira em tora, conforme o plano de manejo florestal da FNT (IBAMA/PNUD, 1997). A FNT abrange os municípios de Belterra, Aveiro, Rurópolis e Placas. No entorno desta Unidade de Conservação, o uso e a cobertura do solo se caracterizam por uma forte pressão antrópica sobre a floresta, principalmente pelo avanço da agricultura mecanizada e da pecuária extensiva.

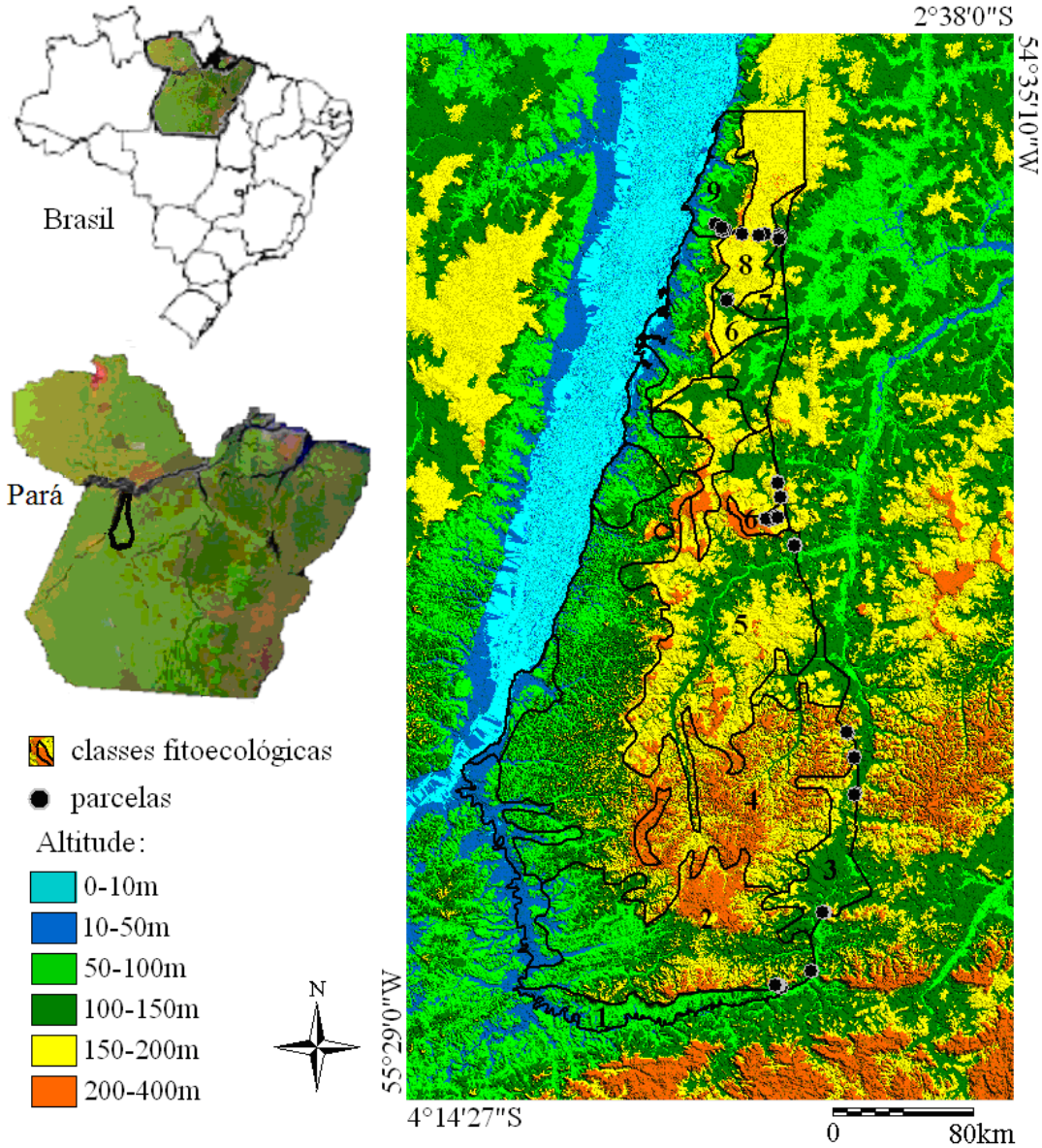

Figura 3.2 – Localização da Floresta Nacional do Tapajós. Apresentam-se as classes fitoecológicas do RADAMBRASIL (vetores modificados) sobreposto ao relevo sombreado obtido a partir do SRTM. As classes fitoecológicas são: 1

(Floresta tropical ombrófila aberta com palmeiras em relevo ondulado e floresta tropical ombrófila aberta sem palmeiras em relevo ondulado); 2 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas Submontanas – áreas do embasamento e sedimentares do Pré-Cambriano e Paleozóico – de relevo dissecado com cobertura emergentes); 3 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo ondulado com árvores emergentes); 4 (Florestatropical ombrófiladensa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes); 5 (Floresta tropical densaombrófila das áreas sedimentares de baixo platô com árvores emergentes, floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes e floresta tropical ombrófila aberta sem palmeiras em relevo ondulado); 6 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de alto platô com árvores emergentes); 7 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de baixo platô com árvores emergentes e Floresta tropical ombrófila densa das árvores sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes); 8 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de alto platô, com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila aberta com palmeiras em platô) e 9 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo ondulado com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes).

Segundo o IBAMA (2004), o clima da região é do tipo Ami (classificação de Köppen), com temperatura média anual de 25,5 °C e precipitação média anual de 1.820 mm, apresentando maior concentração de chuvas entre os meses de janeiro e maio. A topografia local varia de plana (na porção norte da área) à forte ondulada (na porção sul da área). Os tipos de solos predominantes, na área, são o Latossolo Amarelo Distrófico e o Podzólico Vermelho-Amarelo e a vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta (VELOSO, 1991).

A seleção dos locais de amostragem para o inventário florestal do presente estudo foi estratificada nas classes fito-ecológicas extraídas do RADAMBRASIL. Essas classes foram divididas de acordo com caráter florístico, litologia, geomorfologia e as condições climáticas,

conforme o conceito de Veloso et al. (1973), que é baseado na classificação fisionômica da vegetação xeromórficas proposto por Ellenberg (Sistema Ecológico de Savanas do RADAMBRASIL) (ELLENBERG; MUELLER-DOMBOIS, 1965; 1966) e as características hidromórficos (Sistemas Ecológicos de Formações Pioneiras e de Florestas Abertas e Densas), identificados com a ajuda de vários sensores usados em levantamentos aéreos de baixa altitude. A escolha da FNT como área de estudo deve-se, além da conexão com as áreas já inventariadas na sua região central, a uma ampla variação fitofisionômica. Para o presente estudo, as parcelas foram estabelecidas dentro de um subconjunto de classes fito-ecológicas RADAMBRASIL, correspondentes à Floresta Tropical Ombrófila Densa e à Floresta Tropical Ombrófila Aberta (VELOSO et al., 1991; IBGE, 1992), cuja localização e distribuição geográfica estão representadas no mapa da Figura 3.2.

3.2.2 Dados

3.2.2.1 Dados de campo

O inventário florestal foi realizado em setembro de 2009. Os dados de campo coletados correspondem às observações sobre todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito maior ou igual a 10 cm, distribuídos em 46 parcelas amostrais. Foram medidas a altura total (HT), o diâmetro a altura do peito (DAP) e a abertura do dossel (AD). Além das medições, todos os indivíduos foram identificados até o nível de espécie.

A realização do trabalho de campo contou com o uso de fita métrica para a mensuração do DAP, além de uma trena a laser para a medida da distância entre árvores. A altura dos indivíduos foi estimada visualmente por um especialista treinado (HT_e) e o conjunto todo posteriormente ajustado em função de medidas tomadas com clinômetro, pela equação relatada por Gonçalves e Santos (2008):

$$HT=EXP(0,1845)*HT_e^{0,948} \qquad (3.1)$$

Já a medida da AD foi feita através de fotografias hemisféricas, obtidas com lente grande angular (olho de peixe), que foram processados posteriormente em escritório para o cálculo da porcentagem de abertura do dossel.

Por último os dados foram planilhados e em seguida as informações coletadas em campo foram processadas para as análises do inventário. Finalmente o cálculo da biomassa acima do solo foi realizado a partir da equação alométrica de Brown et al. (1989):

$$\text{Biomassa}=0{,}044*((\text{DAP}^2)*\text{HT})^{0{,}9719} \qquad (3.2)$$

Em que HT corresponde à altura total

3.2.2.2 Dados geomorfométricos

Os dados geomorfométricos utilizados (elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical) provieram do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (Topodata – VALERIANO, 2008). Na elaboração do Topodata, os dados SRTM (versão 1, *unfinished* – NASA, 2006) do território nacional foram refinados de 3" para 1" com abordagem geoestatística (VALERIANO; ROSSETTI, 2012) e em seguida derivados em variáveis geomorfométricas através de diferentes operações de vizinhança (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Além da obtenção das variáveis geomorfométricas locais (elevação, declividade, orientação de vertentes e curvaturas), foram calculadas variáveis geomorfométricas regionais (fator de iluminação, rugosidade, índice de saturação, altura, amplitude, profundidade de dissecação predominância e integral hispsométrica) a partir dos dados do Topodata, as quais foram utilizadas em análises complementares.

3.2.2.3 Dados de Radar

Os dados de radar utilizados no presente estudo são provenientes do radar de abertura sintética em Banda L *Phased-Array L-band Synthetic Aperture Rad*ar (PALSAR), a bordo do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS). As imagens utilizadas foram adquiridas no modo multipolarimétrico 1.1 PLR (imagem *single look complex*), com data de imageamento de 13 de março de 2009. Foram utilizadas 3 imagens para cobrir toda a área de estudo. As principais características destas são mostradas na Tabela 1.

Tabela 3.1 – Características das imagens ALOS-PALSAR utilizadas neste estudo.

Imagem (a)	
Informações	*Características*
Órbita	ascendente
Inpt scn ctr time	20090313022157434
RDR wavelenght	0,2360571
Ângulo de incidência	24,008

Fator de calibração	-83,000000
Latitude de origem (graus)	-3,9553
Longitude de origem (graus)	-54,8395
Linhas	18432
Pixels	1248
Interleave indicator	BSQ
Linear spacing	3,5876557
Pixel spacing	9,3685143
Imagem (b)	
Informações	*Características*
Scene indicator	ALPSRP166877120
Órbita	ascendente
Inpt scn ctr time	20090313022205661
RDR wavelenght	0,2360571
Ângulo de incidência	23,941
Fator de calibração	-83,000000
Latitude de origem (graus)	-3,4595
Longitude de origem (graus)	-54,9547
Linhas	18432
Pixels	1248
Interleave indicator	BSQ
Linear spacing	3,5877564
Pixel spacing	9,3685143
Imagem (c)	
Informações	*Características*
Scene indicator	ALPSRP166877130
Órbita	ascendente
Inpt scn ctr time	20090313022213888
RDR wavelenght	0,2360571
Ângulo de incidência	23,959
Fator de calibração	-83,000000
Latitude de origem (graus)	-2,9615
Longitude de origem (graus)	-55,0599
Linhas	18432
Pixels	1248
Interleave indicator	BSQ
Line spacing	3,5878539
Pixel spacing	9,3685143

3.2.3 Equipamentos e softwares

1- Para o processamento dos dados florísticos foram utilizados os softwares:

Mata Nativa 2 (SOUZA et al., 2006a)

2 - Especificamente, no que se refere à abertura do dossel, o processamento das fotografias hemisféricas tomadas em campo foram feitas a partir do software *GLA 2* (FRAZER et al., 1999).

3 - Para o processamento dos dados geomorfométricos foram utilizados os softwares:

Idrisi Andes (EASTMAN, 2006)

Global Mapper 11 (GLOBAL MAPPER SOFTWARE LLC, 2011)

ArcGIS 10 (ESRI, 2011)

SagaGIS (OLAYA, 2009)

4 - Foram ainda empregados algoritmos específicos para o cálculo dos atributos iluminação (VALERIANO, 2011), rugosidade (GROHMANN et al, 2010), altura, dissecação, amplitude e predominância (MUÑOZ, 2009), integral hipsométrica (MUÑOZ, *comunicação pessoal*) e o índice de saturação, implementado no *SagaGIS* (OLAYA, 2009), cujo cálculo da área de captação se baseia no algoritmo Determinístico de Oito Direções (D8).

5 - Para o processamento das imagens SAR foram utilizados os softwares:

PCI 10.3 (PCI GEOMATICS, 2009)

PolsarPro 4.2 (ESA, 2011)

ENVI 4.8 (ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS, 2010)

6 - Finalmente, as análises estatísticas foram realizadas com os softwares:

Canoco 4.5 (TER BRAAK; ŠMILAUER, 2002)

Pcord 6 (McCUNE; MEFFORD, 2011)

Minitab 14 (MINITAB, 2003)

Statistica 7 (STATSOFT, 2004)

SAM 3 (RANGEL et al., 2010)

3.3 Metodologia

3.3.1 Processamento dos planos de informação topográfica

Os dados geomorfométricos locais foram obtidos do Topodata, em arquivos no formato GeoTIFF dos planos de informação da elevação (o MDE refinado) e de suas derivações. Para cada variável, as quadrículas (1° x $1,5^o$ cada) que compõem a área de estudo foram concatenadas em mosaico.

Além das variáveis geomorfométricas locais, o MDE foi derivado em outras variáveis geomorfométricas. Dessa forma, foram aplicados algoritmos implementados em Idrisi Andes para cálculo de planos de informação relativos à altura, profundidade de dissecação, amplitude e predominância (MUÑOZ, 2009), assim como a integral hipsométrica (MUNÕZ, *comunicação pessoal*). O plano de informação da rugosidade foi calculado com o algoritmo desenvolvido e implementado no ArcGIS por Grohmann et al (2010). O cálculo do plano do índice de saturação, que envolve a área de captação e a declividade, foi realizado com a operação do algoritmo correspondente D8, implementado na SAGA-GIS.

O fator de iluminação solar (para modelagem da vegetação) e o fator cosseno (para correção do brilho em imagem radar) foram obtidos operando-se os planos de declividade e orientação de vertentes com algoritmo proposto por Valeriano (2011), elaborado em Idrisi 2.0. No primeiro caso, o algoritmo integra parâmetros diurnos e anuais da dinâmica celeste em função da posição global analisada. No segundo caso, usou-se apenas o cálculo de iluminação momentânea, com os ângulos do sistema radar.

Os diferentes aplicativos requeridos para a obtenção de todo o conjunto de variáveis geomorfométricas de interesse exigiram freqüentes intervenções de pré-processamento, para permitir essas derivações e, adiante, para compatibilizar os diferentes dados.

3.3.2 Procesamento dos dados de imageamento radar

As imagens PALSAR *single look complex*, nível de processamento 1.1 são fornecidas na geometria *slant range*, com preservação da fase em 32 bits na parte real e imaginária. Neste tipo de imagem existe diferença entre as dimensões em *range* e *azimute*, além de intenso ruído *speckle*. Para solucionar esses problemas geralmente se realiza o processamento *multilook,* ou seja, uma reamostragem na direção de azimute cujo principal objetivo é gerar pixels com dimensões regulares e imagem com o efeito do ruído *speckle* reduzido. Este foi o processamento inicial realizado nas imagens selecionadas para o presente estudo. Assim, a matriz de espalhamento (matriz de Sinclair [S]) foi convertida em matriz de covariância [C] e também em matriz de coerência [T] aplicando média espacial de 7x1 pixels. A média espacial permitiu a conversão do espaçamento do pixel de aproximadamente 3,58 m em *azimute* por 9,36 m em *range* no alcance inclinado *(slant range*) para aproximadamente 23 m em azimute x 25 m em *range* no alcance do terreno (*ground range*). A Figura 3.3 demonstra o cálculo dos parâmetros de reamostragem para as três imagens. Após esse processamento, as imagens

foram submetidas à filtragem com filtro refinado de Lee de janela 5x5 para minimizar o ruído *speckle* nas matrizes de covariância e coerência. Ressalta-se que para a geração dos parâmetros de Touzi, excepcionalmente, o procedimento foi diferente, com *multilook* 3x1 (*azimute* x *range*) e processamento do cálculo em janela de tamanho 7x7, sem filtragem (TOUZI, 2011, *comunicação pessoal*).

Os demias atributos polarimétricos, coerentes e incoerentes, foram gerados a partir da imagem filtrada. A geração dos atributos polarimétricos foi realizada a partir do *software* PolsarPro. O dado PALSAR recebido (formato CEOS da JAXA: arquivos LED, VOL, TRL e IMG das quatro polarizações) foi importado para este *software*, onde foram realizadas as etapas ilustradas no fluxograma da Figura 3.7, exceto a geração dos valores de σ^o, que foi calculado no *software* PCI, versão 10.3, a partir da seguinte fórmula (SHIMADA et al., 2009):

$$\sigma^\circ = 10\log_{10} I + CF - A \tag{3.3}$$

em que, *I* é a intensidade para cada polarização HH, HV, VH e VV, *CF* é o fator de calibração radiométrica e A é um fator de conversão, dos dados PLR 1.1 do PALSAR. O fator de calibração, que depende do ângulo de incidência e o fator de conversão foram determinados por Shimada et al. (2009), utilizando 572 pontos coletados pelo mundo, a partir de alvos distribuídos, selecionados inclusive na região Amazônica. Os valores obtidos por SHIMADA et al. (2009) foram *CF*=-83 e *A*=32. O valor de σ^o extraído em escala logarítmica foi convertido em escala linear para os cálculos dos atributos polarimétricos coerentes. A conversão foi feita com base na seguinte fórmula:

$$\sigma^\circ = 10^{\frac{(\sigma^\circ)dB}{10}} \tag{3.4}$$

Para compensar o efeito da topografia sobre a resposta do restroespalhamento SAR na estimativa de biomassa, foi gerado o plano de informação do fator cosseno (ou fator topográfico de iluminação), que envolve a declividade e orientação de vertentes relativas ao ângulo zenital e ângulo azimutal de aquisição do sistema de radar. A distribuição da iluminação dada pelo relevo é definida pela Equação 3.5, da trigonometria esférica:

$$\cos\theta_0 = \cos\theta_s \cos\theta_t + \sin\theta_s \sin\theta_t \cos(\varphi_s - \varphi_t) \tag{3.5}$$

em que $\cos\theta_0$ é o fator cosseno, θ_s é o ângulo zenital solar, θ_t é o ângulo zenital da normal à superfície do terreno (que corresponde à declividade), φ_s é o ângulo azimutal solar e φ_t é o ângulo azimutal da normal à superfície (que corresponde à orientação de vertente). A equação foi aplicada sobre os planos de declividade e orientação de vertentes com parte do algoritmo proposto por Valeriano (2011) para iluminação solar, adaptado para uma situação fixa de iluminação, correspondente à geometria de aquisição do sistema sensor ALOS.

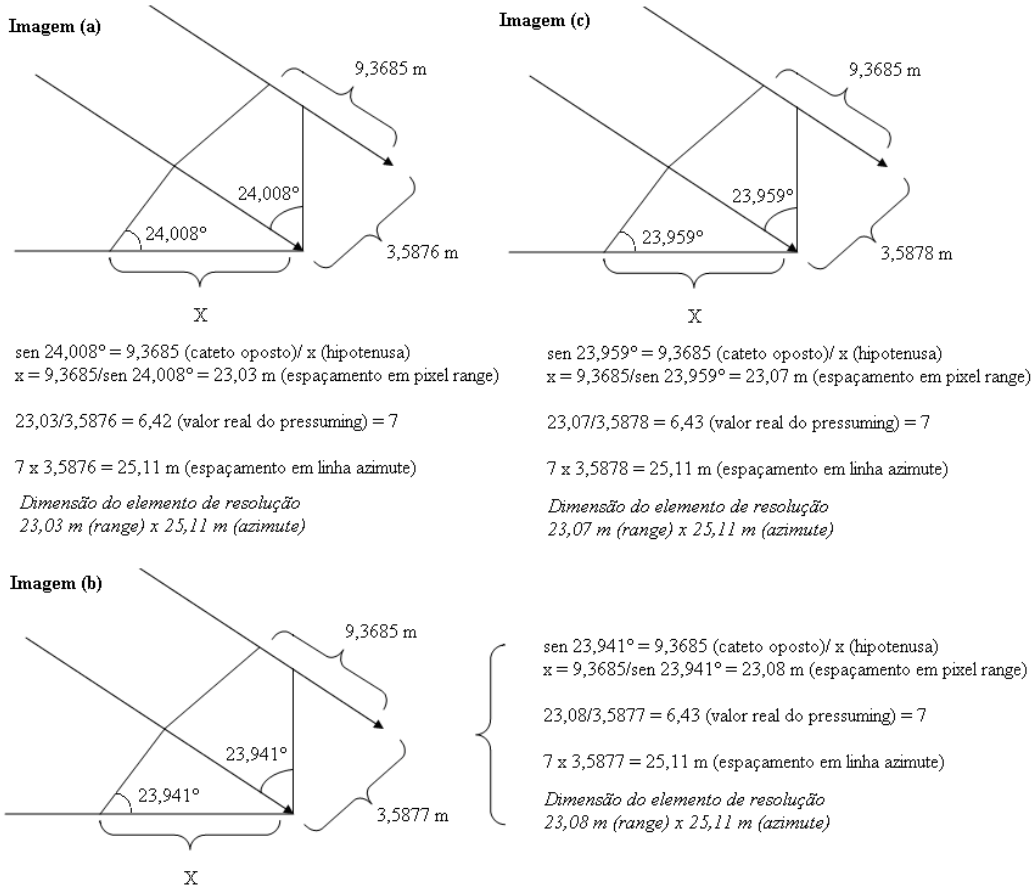

Figura 3.3 – Cálculo das dimensões dos pixels.

Após o cálculo do fator cosseno, foram feitas análises de regressão lineares simples entre cada um dos atributos polarimétricos SAR (como variáveis dependentes) e o fator cosseno (variável independente). Os resíduos destas análises foram utilizados como variáveis polarimétricas supostamente sem o efeito da topografia para estimativa de biomassa. Em seguida foram avaliados o potencial e a eficácia de tal método para a área de estudo.

3.3.3 Levantamento de campo

Para representar a variabilidade florística e estrutural existente na área selecionada foram estabelecidas de 4 a 6 parcelas em 9 classes fitoecológicas diferentes, em áreas de floresta primária, resultando em 46 parcelas de 25x100 m² cada, totalizando uma área amostral de 11,5 ha. A definição prévia da alocação das parcelas amostrais levou em consideração a presença de diferentes classes fitoecológicas, buscando-se também uma boa distribuição das parcelas ao longo da área de pesquisa assim como a facilidade de acesso por ocasião do trabalho de campo.

Para que houvesse a máxima variabilidade de condições de relevo em cada classe de vegetação, representações detalhadas da curvatura horizontal foram examinadas e repetições de uma mesma classe tiveram sua alocação distribuída em áreas de convergência, neutras e de divergência. Foram indicados pontos excedentes em cada condição, de modo que houvesse alternativas a eventuais dificuldades de acesso vivenciadas pela equipe em campo. O acesso às parcelas planejadas foi apoiado por mapas diversos com o auxílio do Sistema de Posicionamento Global (GPS) de navegação. Na proximidade dos pontos indicados, o posicionamento definitivo de cada parcela foi decidido em campo com novo registro de sua localização geográfica. Nas parcelas, foram inventariados todos os indivíduos arbóreos com diâmetro à altura do peito (DAP) maior ou igual a 10 cm, altura total (HT) e abertura do dossel (AD), com a tomada de coordenadas da posição relativa para cada registro.

A identificação botânica das espécies encontradas foi inicialmente feita em campo a partir de seu nome popular, com o auxílio de um identificador botânico familiarizado com a flora local (usando os nomes populares das espécies). Posteriormente estes foram associados aos respectivos nomes científicos com o apoio de listas de espécies publicadas em outros artigos científicos (GUIMARÃES; PYLE, 1999, OLIVEIRA, 2005), também realizados na FNT. Os nomes científicos e detalhes bibliográficos básicos associados foram confirmados com a utilização do banco de dados *International Plant Names Index* – IPNI (http://www.inpi.org). Após a identificação, as espécies foram agrupadas por famílias, conforme o sistema de classificação do *Angiosperm Phylogeny Group* (APG, 2009).

Com o intuito de facilitar a integração e análise dos dados e possibilitar a realização de consultas espaciais, as informações levantadas foram estruturadas em Sistema de Informações Geográficas (SIG), com as posições relativas dos indivíduos de uma mesma parcela

convertidas em georreferência com o procedimento descrito por GONÇALVES (2007), conforme a Figura 3.4.

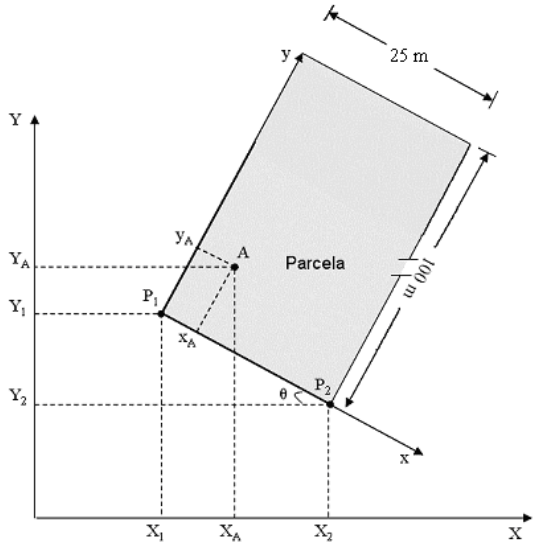

Figura 3.4 – Representação esquemática do procedimento de georreferenciamento das árvores inventariadas nas parcelas amostrais. Fonte: Modificada de GONÇALVES (2007).

Seja (x,y) o sistema de coordenadas local – estabelecido em campo com trena métrica para a mensuração da posição relativa dos indivíduos – e (X,Y) o sistema de coordenadas UTM, ambos em metros. Os pontos $P_1(X_1, Y_1)$ e $P_2(X_2,Y_2)$ correspondem às coordenadas obtidas com o sistema GPS no posicionamento de cada parcela amostral. A partir destes pontos foi calculado o ângulo Θ formado entre os dois sistemas planos. Assim, para uma dada árvore A, a transformação das coordenadas locais em coordenadas do sistema UTM será obtida com a aplicação da equação (MATHER, 1999):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \tag{3.6}$$

Com,

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & sen\theta \\ -sen\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$, se a rotação do sistema (x,y) for no sentido anti-horário (3.7)

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -sen\theta \\ sen\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$, se a rotação do sistema (x,y) for no sentido anti-horário (3.8)

3.3.4 Análises dos dados

3.3.4.1 Extração e pareamento dos dados

Os dados georreferenciados do levantamento foram submetidos a diversas migrações e conversões entre diferentes programas de SIG, para compatibilização de sua estrutura com aquela dos dados geomorfométricos locais provenientes do Topodata, bem como com as variáveis complementares citadas na seção 2.2 e os atributos polarimétricos.

Para as variáveis geomorfométricas, esta etapa foi realizada através de operações de exportação e importação das imagens (raster) e dos polígonos correspondentes às parcelas (vetor) entre os diferentes SIGs. Após as conversões, os dados foram definitivamente armazenados no Arcgis, onde foram realizadas as manipulações finais de preparo (geometria, resolução e posicionamento), assim como todo o processamento a partir de então. Foi feita uma amostragem das variáveis por parcelas, sendo em seguida extraídas as médias dos valores de cada variável geomorfometrica em cada parcela.

No que se refere aos atributos polarimétricos, estes foram gerados no sistema de referência da imagem de radar (*slant range*), sendo que os pontos amostrados em campo foram então projetados para este sistema a partir do processo de geocodificação inversa (MEIER et al., 1993), ou seja, cada ponto amostral antes coletado em sistema de referencia WGS-84 foi projetado para o sistema da imagem de radar em *slant range* (linha e coluna). Essa transformação foi realizada no programa *Sarscape* a partir da imagem bruta ALOS/PALSAR, utilizando os dados de efemérides da aquisição e o modelo digital de elevação (SRTM). Optou-se por este tipo de conversão ao invés da ortoretificação da imagem de radar, porque esta poderia produzir alterações na informação de fase da imagem devido ao processo de reamostragem.

Os dados geomorfométricos e polarimétricos amostrados foram pareados em planilhas de acordo com sua posição geográfica e o conteúdo destas planilhas submetido às análises estatísticas.

3.3.4.2 Modelagem estatística dos dados florísticos e estruturais

As análises da composição florística foram conduzidas no sentido de investigar as relações entre a abundância, riqueza, florística e as variáveis geomorfométricas na área selecionada. Para verificar se a abundância de espécies estava correlacionada com o número de parcelas

onde estas espécies ocorriam, foi usado o coeficiente de correlação de Pearson e o gráfico de dispersão entre as duas variáveis. As informações florísticas foram submetidas a uma Análise de Correspondência Destendenciada (DCA) (LEGENDRE; LEGENDRE, 1998) para verificar se houve um padrão de distribuição entre as parcelas. A contribuição de cada espécie para a formação do primeiro eixo da DCA foi obtida, correlacionando a abundância dessa espécie com os resultados da DCA. Em seguida foi realizado um teste de Mantel (LEGENDRE e LEGENDRE, 1998) para verificar se a distância geográfica estava relacionada ao padrão florístico encontrado entre as parcelas.

Com o objetivo de verificar quais variáveis geomorfométricas afetavam mais a variação da composição florística (representadas pelos dois primeiros eixos da DCA), abundância e riqueza das espécies arbóreas foram realizadas Análises de Regressão Múltipla (LEGENDRE e LEGENDRE, 1998).

Foi avaliada a autocorrelação espacial entre os resíduos das análises de regressão através do Índice de Moran (ANSELIN, 1996). Confirmada a existência da autocorrelação espacial, foram aplicados filtros espaciais, com o objetivo de separar a componente correlata, cujos resíduos foram então incluídos em uma nova análise de regressão (DINIZ-FILHO; BINI, 2005; PEREZ NETO, 2006).

Para verificar se a distribuição das espécies menos abundantes era mais localizada e a das mais abundantes mais regionalizada, diante do coeficiente de correlação de Pearson e o gráfico de dispersão entre as abundâncias e o número de parcelas em que cada espécie ocorria, foram feitas análises de regressão logística (usando o *Method Backward Wald*), que permitiram gerar mapas de probabilidade de ocorrência de espécies. Esta análise foi experimentada usando as variáveis geomofométricas locais e cada uma das 4 espécies mais abundantes e em seguida com as 4 espécies menos abundantes. Também foram realizadas análises de regressão logística entre as variáveis geomorfométricas regionais (rugosidade, índice de saturação, altura, amplitude, profundidade de dissecação predominância e integral hispsométrica) e cada uma das 4 espécies mais abundantes e as 4 menos abundantes para verificar a correspondência das espécies com estas variáveis. Para a avaliação dos modelos de regressão obtidos, foi utilizada a curva ROC ou AUC (*Area Under Curve*), que se baseia na seguinte escala: 0,6 é aceitável (o modelo é pelo menos um pouco útil), 0,7 é bom, 0,8 é muito bom e 0,9 excelente (ZHU et al., 2010).

As relações entre o grupo de variáveis estruturais da floresta (DAP, HT e AD) e a geomorfometria local (elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal e fator de iluminação) foram avaliadas com análise de correlação canônica (ACC - HARRIS, 1998) e análises de regressão múltipla (NETER et al., 1996). A ACC indica a existência e a intensidade da associação entre dois grupos de variáveis. As análises de correlação canônica referem-se a combinações lineares de variáveis entre dois grupos que tenham a máxima correlação entre si. Esta é uma técnica de avaliação da interdependência entre grupos de variáveis, muito usada em estudos exploratórios. Neste trabalho, foram realizadas análises de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo de características estruturais da floresta e o grupo de características geomorfométricas locais do terreno.

Foi realizada também uma análise de partição da variância (BORCARD et al., 1992) dos dados estruturais com objetivo de quantificar as variações devidas a cada fator, entre a componente ambiental isoladamente (geomorfometria local), a componente espacial (coordenadas geográficas) isoladamente, a componente ambiental estruturada espacialmente e a fração de variância inexplicada.

O retroespalhamento de dados SAR foi avaliado em relação às respostas de polarização (assinaturas polarimétricas) e à classificação dos mecanismos de espalhamento. A resposta de polarização paralela (Figura 2.5) foi feita levando em conta a distribuição da seção transversal de radar (σ) dos dados provenientes de cada parcela amostral, plotada em um gráfico de três dimensões, como função de todas as combinações possíveis dos ângulos de orientação (ψ) e elipticidade (χ) da elipse de polarização (Figura 2.4). As superfícies resultantes foram comparadas visualmente e os seus resultados foram interpretados baseando-se naqueles obtidos na etapa de caracterização das unidades amostrais.

Foram extraídos os valores de entropia e ângulo alfa médio (H, $\overline{\alpha}$) dos pixels de cada parcela e plotados no espaço de classificação bidimensional (CLOUDE; POTTIER, 1997). Nesta técnica, de decomposição de alvos, os mecanismos de espalhamento são plotados em um espaço bidimensional, divididos em 9 zonas distintas (Figura 2.7). O significado físico associado a estes atributos é elucidado em maiores detalhes na fundamentação teórica (seção 2.4).

Foram realizadas análises de correlação entre os atributos coerentes e incoerentes com o objetivo de eliminar das etapas seguintes variáveis que apresentassem uma alta correlação entre si. Como nível de corte (limiarização) optou-se por coeficientes de correlação maiores do que 0,70.

De acordo com a premissa de que variações no terreno e variações das propriedades biofísicas podem ter influência direta no comportamento do sinal do radar foi realizada uma análise em que foram separados 3 grupos de parcelas, conforme o terreno, plano, ondulado (em que se inclui suave-ondulado) e forte-ondulado. Foi avaliada a significância das diferenças de retroespalhamento SAR entre estas condições do terreno, decorrentes das características florístico-estruturais.

3.3.5 Testes de aplicação

Inicialmente foram gerados mapas de probabilidade de ocorrência de espécies, em seguida modelos de estimativa das variáveis estruturais da floresta e por último foram realizados diversos testes para a modelagem da estimativa de biomassa, sendo selecionado o melhor modelo entre estes testes.

Uma vez confirmada a relação entre a abundância de espécies e o número de parcelas com as respectivas ocorrências, foram realizadas análises de Regressão Logística relacionando 4 das espécies mais abundantes e 4 das espécies menos abundantes com as variáveis geomorfométricas locais para gerar os respectivos mapas de probabilidade de ocorrência na área de estudo (Figura 3.5). Em seguida foi feito o mesmo com as variáveis geomorfométricas regionais (altura, amplitude, profundidade de dissecação, integral hipsométrica, predominância, índice de saturação e rugosidade), para verificar se existia um mesmo padrão de distribuição de espécie para ambos os grupos de variáveis (locais e regionais).

No que se refere à composição estrutural da floresta, foram gerados modelos de regressão para cada uma das variáveis DAP, HT e AD em relação às variáveis geomorfométricas locais (Figura 3.6). A seleção de variáveis e proposição do modelo de regressão a ser utilizado foi implementado a partir do procedimento *best subset* (NETER et al., 1996). Também foi verificado se existia autocorrelação espacial entre as mesmas através do Índice de Moran. A validação de cada modelo selecionado foi avaliada com uso do critério da soma dos quadrados da predição (PRESS) (NETER et al., 1996). O procedimento consistiu em estimar as variáveis dependentes (DAP, HT e AD) de cada observação a partir de funções ajustadas

com as n-1 observações remanescentes. Assim, o valor PRESS foi calculado e comparado à SQR (soma dos quadrados dos resíduos) do modelo ajustado com todas as n observações. De acordo com Neter et al. (1996), quando o valor PRESS é semelhante à SQR, o QMR (quadrado médio dos resíduos) pode ser considerado um indicador adequado da potencialidade preditiva do modelo.

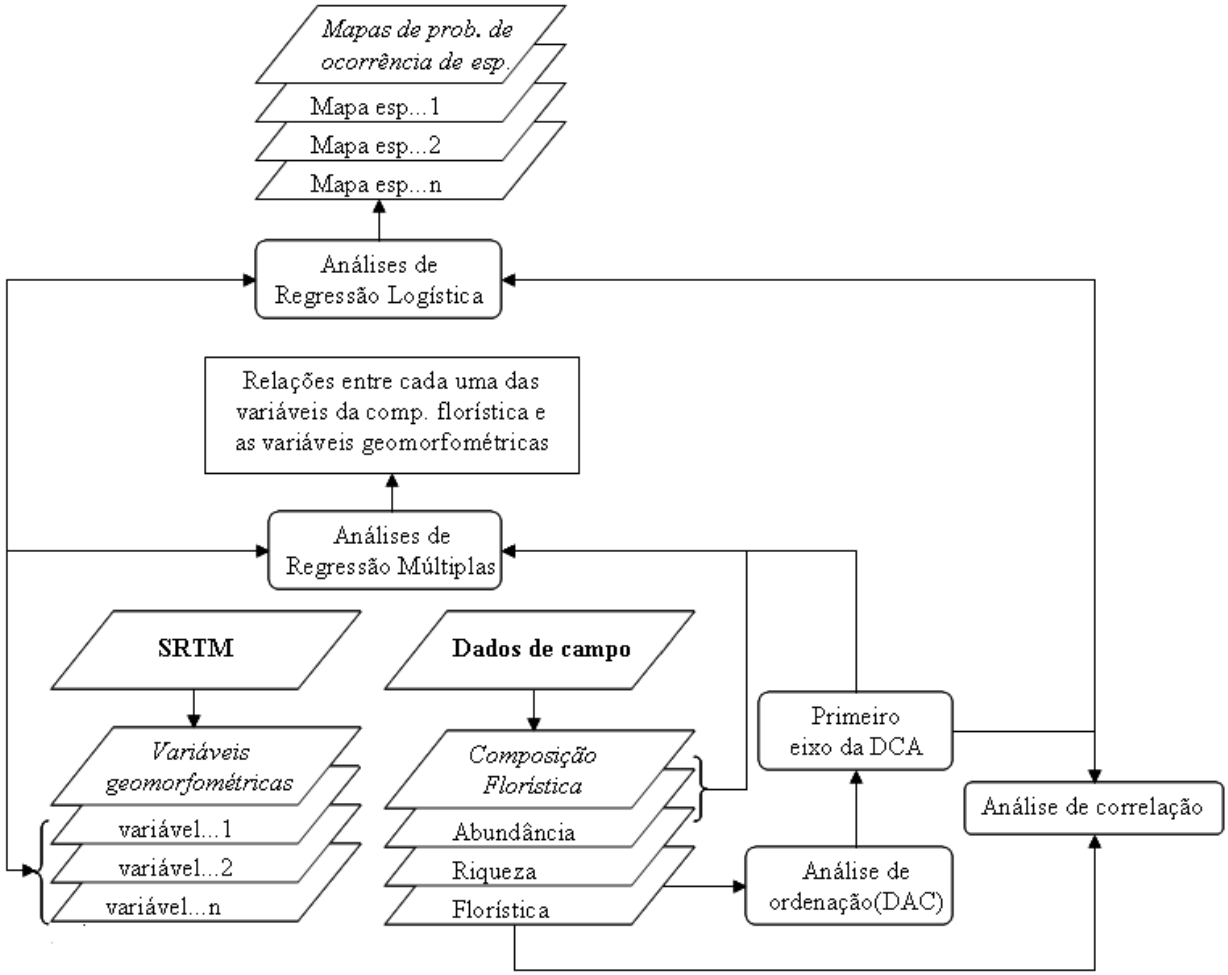

Figura 3.5 – Análises florísticas e geração dos mapas de probabilidade de ocorrência de espécies.

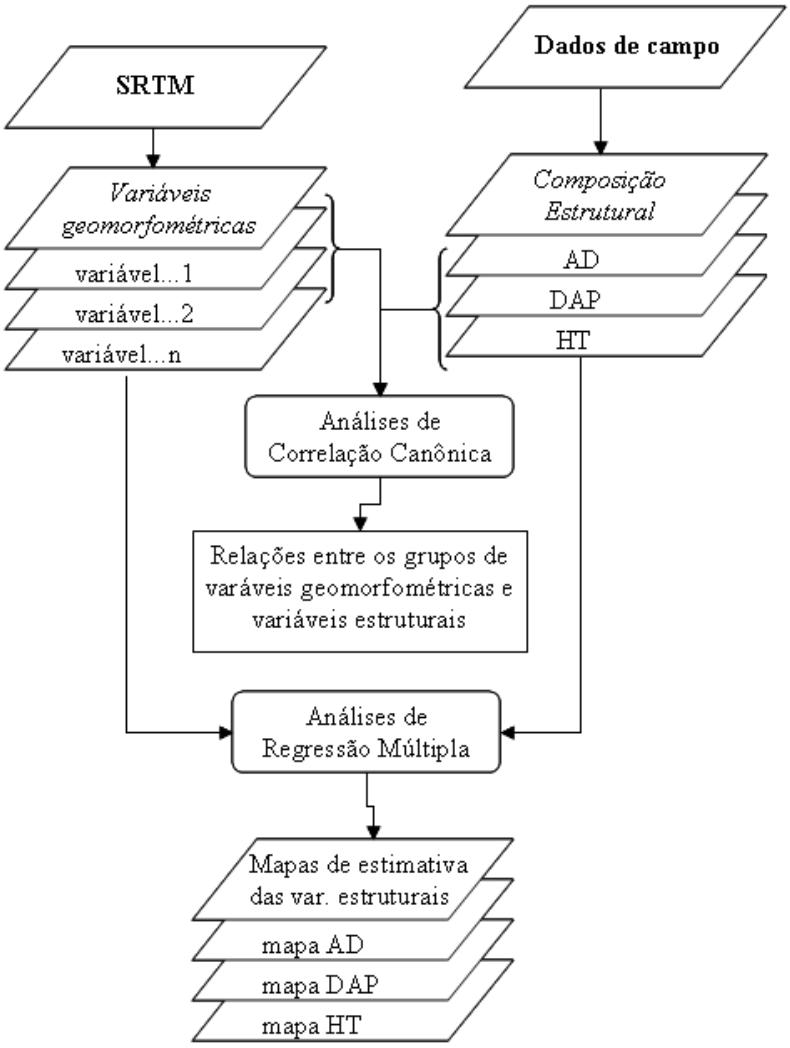

Figura 3.6 – Análises estruturais e geração dos mapas de estimativa das variáveis biofísicas da tipologia florestal condicionada às variações geomorfométricas.

Finalmente, foi analisado o efeito da topografia no sinal de resposta polarimétrica PALSAR da vegetação, quando da modelagem da estimativa de biomassa florestal aérea. Como tentativa para minimizar o efeito da topografia na resposta polarimétrica PALSAR nas áreas florestadas, fez-se uso do fator cosseno (VALERIANO, 2011). Foram realizadas regressões lineares simples entre cada um dos atributos polarimétricos (como variável dependente) e o fator cosseno (como variável independente). Desse modo, os resíduos de tais análises corresponderiam às variáveis polarimétricas sem o efeito da topografia (representado pelo fator cosseno) na resposta SAR. Os resíduos então foram utilizados em uma análise de regressão múltipla como variáveis independentes para estimativa de biomassa acima do solo. Foi gerado também um modelo com as variáveis polarimétricas originais *versus* biomassa, e

os resultados dos dois modelos comparados entre si para avaliação do desempenho e das diferenças.

Diante do fato de a abordagem acima não ser considerada satisfatória, procurou-se ainda realizar uma regressão múltipla apenas entre as variáveis geomorfométricas e a biomassa (BM) para verificar quais destas variáveis eram mais significativas para explicar a variação da biomassa. Em seguida as variáveis geomorfométricas mais significativas foram inseridas em uma nova análise de regressão mais abrangente, entre a biomassa e os atributos coerentes e incoerentes de radar com o objetivo de controlar o fator topográfico nesta análise. Este modelo foi então comparado com o modelo gerado anteriormente entre a biomassa e as variáveis polarimétricas. Após a seleção do modelo final, foi realizada a validação dos resultados com o uso de 10 amostras independentes para avaliar o poder de predição do modelo de melhor desempenho na estimativa de biomassa florestal (Figura 3.7).

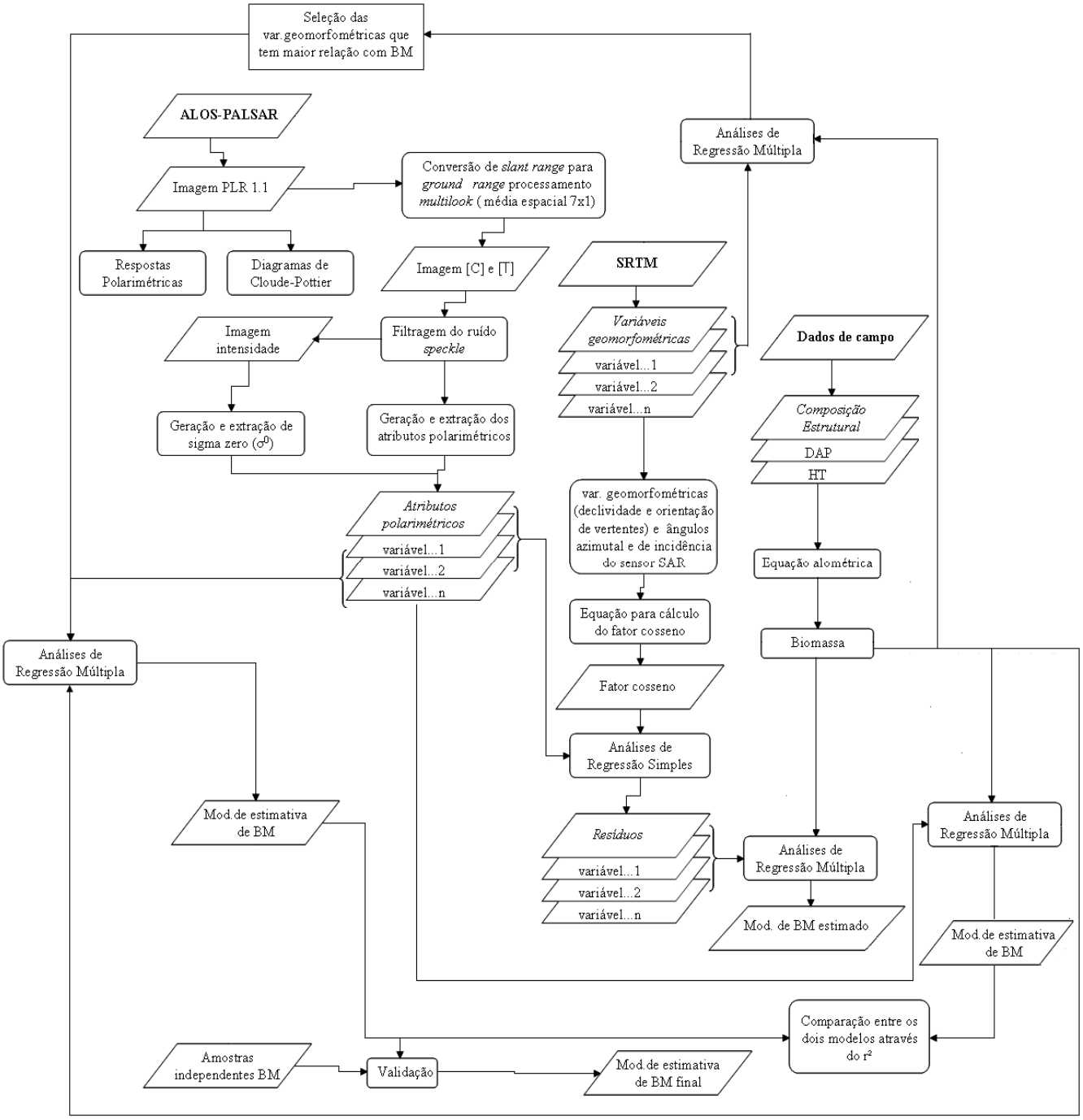

Figura 3.7 – Análises e geração dos modelos para estimativa de biomassa numa integração de atributos derivados dos dados SRTM e PALSAR/ALOS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aspectos descritivos

4.1.1 Dados geográficos

Para uma primeira apreciação dos principais dados geográficos, variáveis geomorfométricas locais e do mapa fitoecológico do RADAM foram plotados sobre uma mesma base geográfica para uma análise visual em busca das correspondências mais evidentes (Figura 4.1). Na escala absoluta apresentada, as distribuições espaciais da orientação de vertentes e da curvatura horizontal mostram-se excessivamente detalhadas, em uma textura fina por toda a área de estudo, em contraste com as classes fitoecológicas, que são distribuídas em manchas de traçados relativamente simples, em regiões. A elevação na área de estudo mostrou-se espacialmente mais estruturada, com alguma correspondência ao mapa fitoecológico, assim como a declividade, em menor grau. A curvatura vertical mostra estrutura com detalhamento intermediário entre o primeiro e o segundo grupo de variáveis, com uma diversificação regional de padrões de distribuição.

Algumas correspondências entre padrões topográficos e classes de vegetação mostram-se evidentes desde esta apreciação conjunta dos dados. O relevo dissecado associado à classe 4, perceptível na representação da elevação, foi prontamente evidenciado pelas variações exibidas pela declividade e pela curvatura vertical. Estas mesmas variáveis são indicadoras das feições de baixo platô e relevo dissecado correspondentes classe 5, assim como o relevo ondulado correspondente à classe 1. Outras classes mostram expressão mais discreta no relevo, mais associadas a níveis de elevação, sobretudo, e ao padrão de distribuição da declividade, tais como as classes 7 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de baixo platô com árvores emergentes e Floresta tropical ombrófila densa das árvores sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes) e 8 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de alto platô, com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila aberta com palmeiras em platô). Pode-se se observar com base no recorte de cada variável localizadas na Figura 4.1 (em sua parte superior esquerda) com maior detalhe os diferentes padrões no terreno a partir das variáveis elevação, declividade e curvatura vertical. As variáveis orientação de vertentes e curvatura horizontal referem-se aos ângulos azimutais de exposição do terreno e não constituem diretamente fatores com potencial de indicação de condições ecofisiológicas. A distribuição destes dados não mostrou padrões bem definidos,

em concordância com a expectativa de escalas típicas de observação decorrente da variabilidade das diferentes derivações geomorfométricas (VALERIANO e ALBUQUERQUE, 2010).

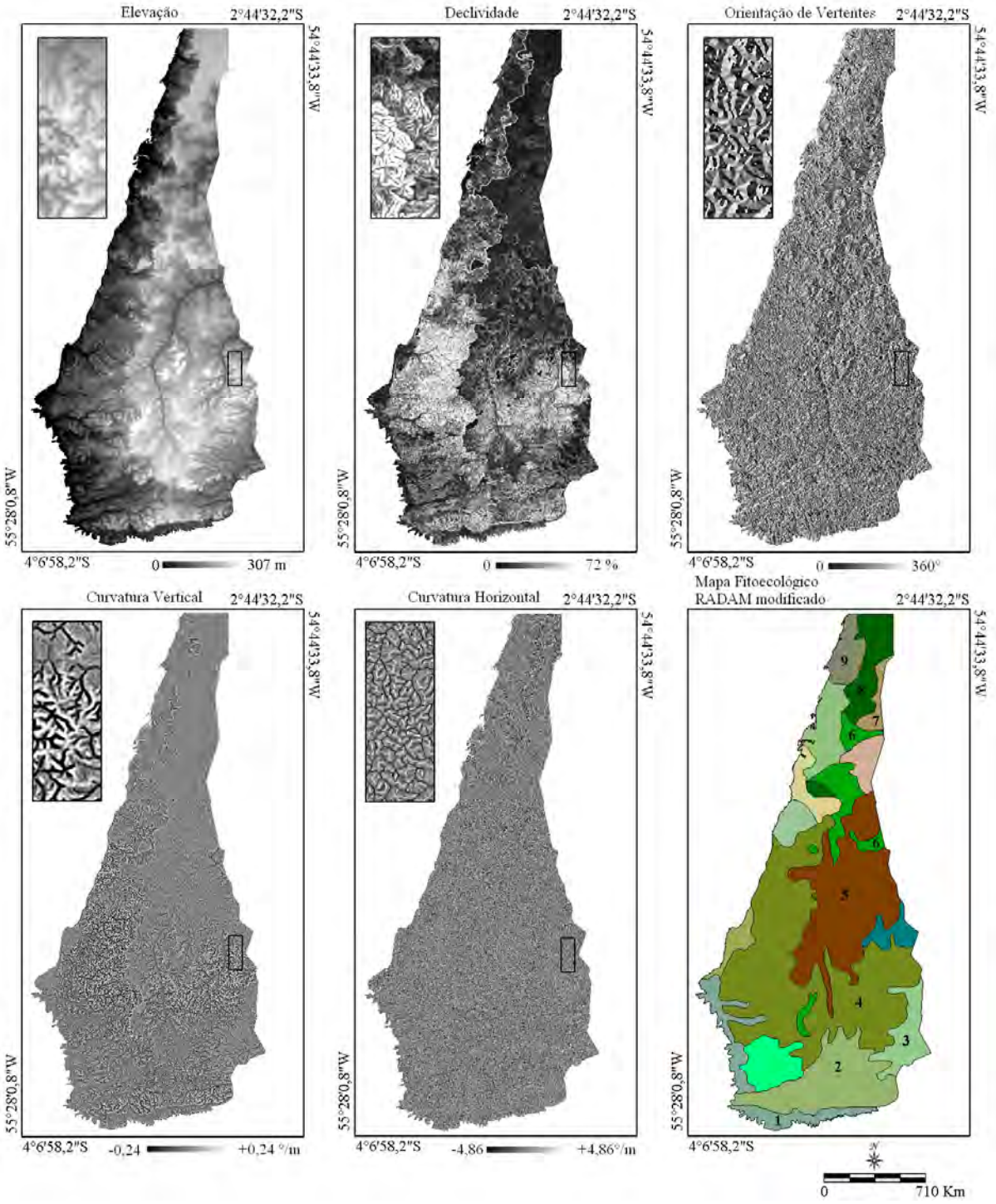

Figura 4.1 – Variáveis geomorfométricas locais e na parte inferior direita é apresentado o mapa fitoecológico do RADAM modificado, evidenciando apenas 9 classes. São elas: 1 (Floresta tropical ombrófila aberta com palmeiras em relevo

ondulado e floresta tropical ombrófila aberta sem palmeiras em relevo ondulado); 2 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas Submontanas – áreas do embasamento e sedimentares do Pré-Cambriano e Paleozóico – de relevo dissecado com cobertura emergentes); 3 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo ondulado com árvores emergentes); 4 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes); 5 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de baixo platô com árvores emergentes, floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes e floresta tropical ombrófila aberta sem palmeiras em relevo ondulado); 6 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de alto platô com árvores emergentes); 7 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de baixo platô com árvores emergentes e Floresta tropical ombrófila densa das árvores sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes); 8 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de alto platô, com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila aberta com palmeiras em platô) e 9 (Floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo ondulado com árvores emergentes e floresta tropical ombrófila densa das áreas sedimentares de relevo dissecado com árvores uniformes).

Na Figura 4.2, o mosaico correspondente às imagens SAR, PLR 1.1, corrigidas e ortoretificadas, não permite a observação de padrões relacionados à distribuição das classes de vegetação. Entretanto, os atributos polarimétricos gerados a partir destas, avaliados no presente trabalho, revelam muitas informações, bem como os atributos geomorfométricos complementares (o fator de iluminação e os aspectos ou atributos geomorfométricos regionais).

4.1.2 Caracterização do povoamento florestal

O presente item consiste na descrição das principais características da comunidade florestal analisada para produzir uma síntese dos dados florístico-estruturais que favoreça a percepção da variabilidade destes dados e a sua modelagem como aspecto associado às informações de radar e às variáveis geomorfométricas.

Como citado anteriormente, nos 11,5 hectares amostrados no inventário florestal foram encontrados 4.448 indivíduos arbóreos, distribuídos em 49 famílias botânicas e 232 espécies. Desse total, 60 indivíduos arbóreos, correspondentes a 9 espécies não identificadas, foram agrupados sob a denominação "Indeterminadas". A curva espécie-área, apresentada na Figura 4.3, indicou uma tendência à estabilização do encontro de novas espécies a partir de uma área amostral de aproximadamente 8 ha. Em função da considerável redução no encontro de novas espécies acima de 8 ha, a intensidade amostral do inventário realizado (11,5 ha) foi considerada suficiente para representar a composição florística da área. Diante das dimensões e da diversidade da Amazônia, o atendimento a esta condição é fundamental para permitir análises da composição florística, em contraposição à necessidade de grandes extensões amostrais em inventários florestais na Amazônia, conforme é discutida por Jardim e Hosokawa (1986).

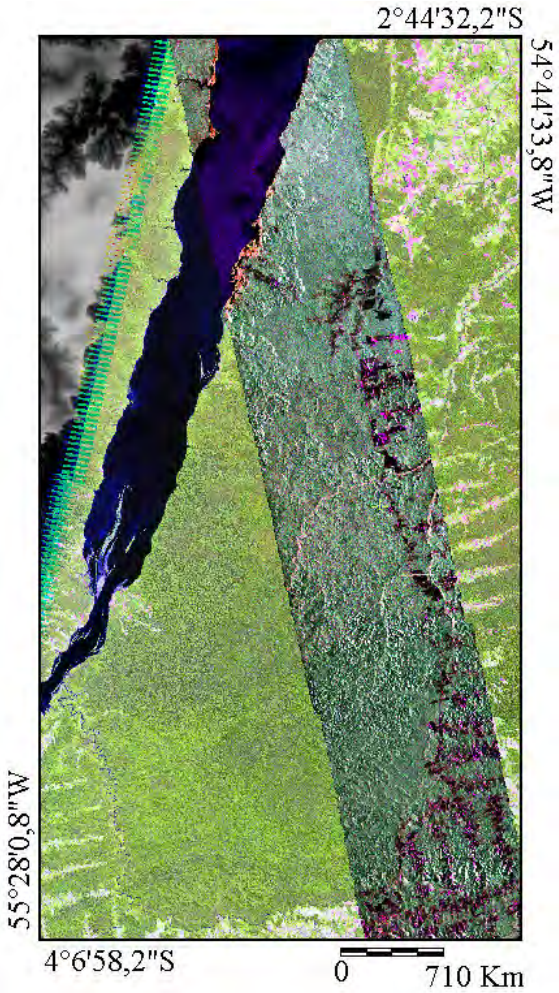

Figura 4.2 – Mosaico de imagens SAR sobreposto a uma imagem LANDSAT 7.

O valor obtido para o índice de Shannon-Weaver (H' = 4,69) indicou uma alta diversidade de espécies. A equabilidade de Pielou apresentou valor de 0,86, o que indica uma elevada diversidade florística no componente arbóreo da comunidade estudada. Esta elevada diversidade está fortemente correlacionada com a alta porcentagem de espécies raras, a qual contribui significativamente para o aumento da diversidade local (ALMEIDA et al., 1993). Os resultados encontrados são comparáveis aos de outros estudos já realizados na Floresta Nacional do Tapajós (BARROS, 1980; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; OLIVEIRA, 2005, GONÇALVES; SANTOS, 2008; NARVAES, 2010).

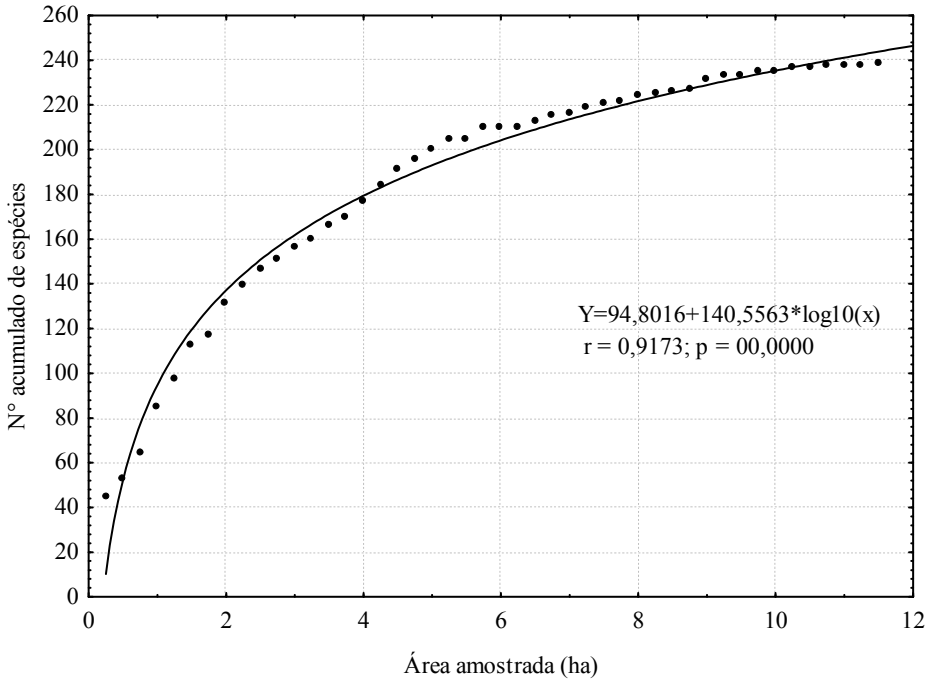

Figura 4.3 – Curva espécie-área obtida com a amostragem empregada no inventário florestal.

Na Figura 4.4 são apresentados os parâmetros fitossociológicos das dez famílias amostradas com maior IVI (índice de valor de importância). A comunidade florestal estudada foi caracterizada pela concentração de uma grande quantidade de indivíduos arbóreos em poucas famílias botânicas. Do total de 4.448 indivíduos inventariados, 2.940 (66%) foram representados somente pelas 6 (de 49) famílias apresentadas na Figura 4.4.

Em termos de distribuição da riqueza florística foi constatado um padrão semelhante. Um conjunto de apenas oito famílias contribuiu com mais de 50% do total de espécies encontradas, a saber: Fabaceae (53), Moraceae (13), Malvaceae (10), Euphorbiaceae (10), Lecythidaceae (9), Sapotaceae (9), Apocynaceae (9) e Lauraceae (8). Em adição, observou-se

que 8% das famílias contribuíram com apenas uma espécie. Este padrão é frequentemente encontrado em estudos realizados para florestas naturais tropicais de terra firme na Amazônia (CARVALHO, 1982; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; SOUZA et al., 2006b; GONÇALVES; SANTOS, 2008; SILVA et al., 2008a; NARVAES, 2010). Estes autores citam que poucas famílias botânicas representam grande parte da riqueza florística na região, em padrão semelhante aos presentes resultados em termos de riqueza florística, com predomínio de Fabaceae, Moraceae, Lecythidaceae, dentre outras, em relação à diversidade e número de indivíduos. A importância da família Fabaceae é evidenciada, mesmo em outros trechos de floresta tropical, como na Floresta Estacional Perefinófila, no norte do Mato Grosso (KUNZ et al., 2008), e no presente trabalho foi a mais representativa em termos de riqueza, com 16% do total de espécies.

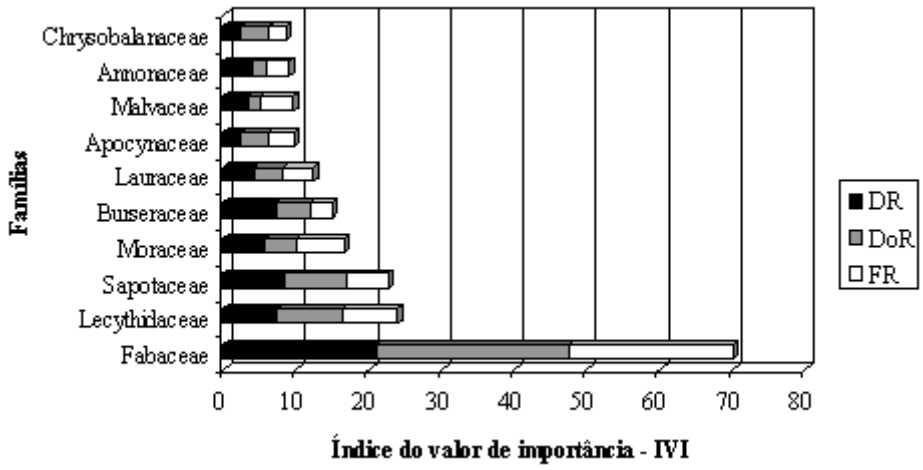

Figura 4.4 – Parâmetros fitossociológicos das 10 famílias amostradas com maior IVI. DR, DoR, e FR correspondem, respectivamente, à densidade, dominância e freqüência relativas.

Na Tabela 1 do Apêndice B estão apresentados os parâmetros fitossociológicos de todas as espécies amostradas, por ordem alfabética de famílias e em ordem decrescente de índice do valor de importância relativo (IVI%). Pela análise destes dados, é possível observar que as cinco espécies com maior valor de importância no povoamento foram: *Pouteria* sp., *Protium apiculatum* Swart, *Inga* sp., *Rinorea guianensis* Aubl. Kuntze e *Licaria canella* (Meisn.) Kosterm. Juntas, essas espécies representaram 20% da densidade total observada. Por outro lado, o inventário florestal indicou um índice elevado de espécies localmente raras (i.e.,

espécies que ocorrem na amostragem com apenas um indivíduo). Do total de 232 espécies amostradas, 37 (16%) foram representadas por uma única árvore.

A densidade estimada para a comunidade florestal foi de 386 indivíduos/ha. Na Figura 4.5 pode-se notar a distribuição diamétrica do conjunto de indivíduos arbóreos levantados, em classes de diâmetro com intervalos de 5 cm, bem como a sua altura média. A estrutura diamétrica do povoamento seguiu o padrão usual de florestas tropicais inequiâneas (J-invertido), com um balanço entre o recrutamento e a mortalidade de árvores. Foi possível visualizar uma alta concentração de árvores nas primeiras classes de diâmetro (87% até o limite de 35 cm), com uma redução exponencial dessa concentração no sentido das classes de maior diâmetro. No que se refere à altura média por classe diamétrica, nota-se que a maioria dos indivíduos apresentaram altura média em torno de 15 a 20 m.

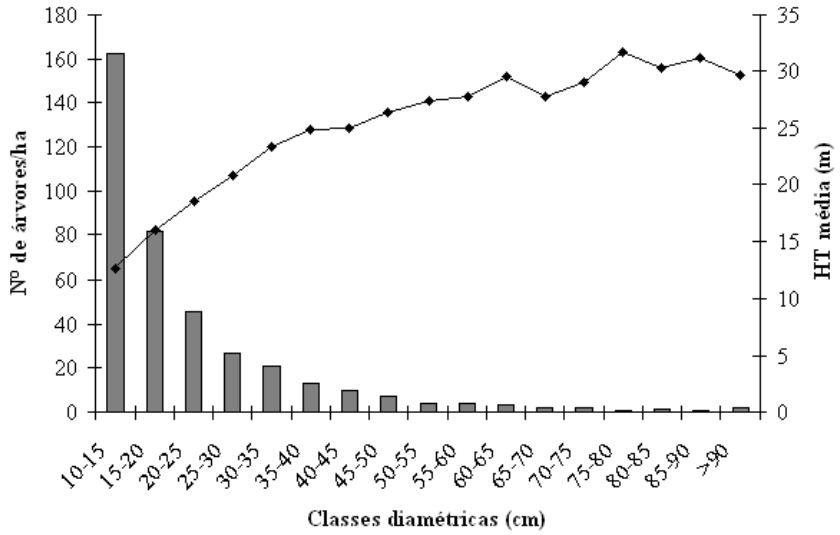

Figura 4.5 – Distribuição diamétrica e altura média por intervalo de classe dos 4.448 indivíduos arbóreos amostrados no inventário florestal.

4.2 Análises estatísticas e modelagem dos dados florísticos e estruturais a partir de dados SRTM

4.2.1 Componente Florístico

Dentro dos 11,5 ha do total de parcelas amostradas, a elevação do terreno variou entre 81 e 218 m, enquanto que a declividade variou de 2 a 27%. Nessas condições topográficas, a

população florestal apresentou uma abundância de 386 indivíduos/ha e uma riqueza de 20 espécies/ha.

A Figura 4.6 mostra a relação entre o número total de indivíduos de cada espécie e o número de parcelas em que essas mesmas espécies ocorreram. As espécies mais abundantes estavam presentes em um maior número de parcelas. O alto valor do coeficiente de correlação de Pearson (r = 0.85; p = 0.0001), indica que a abundância de cada espécie está positivamente relacionada com o número de parcelas em que cada uma delas ocorre.

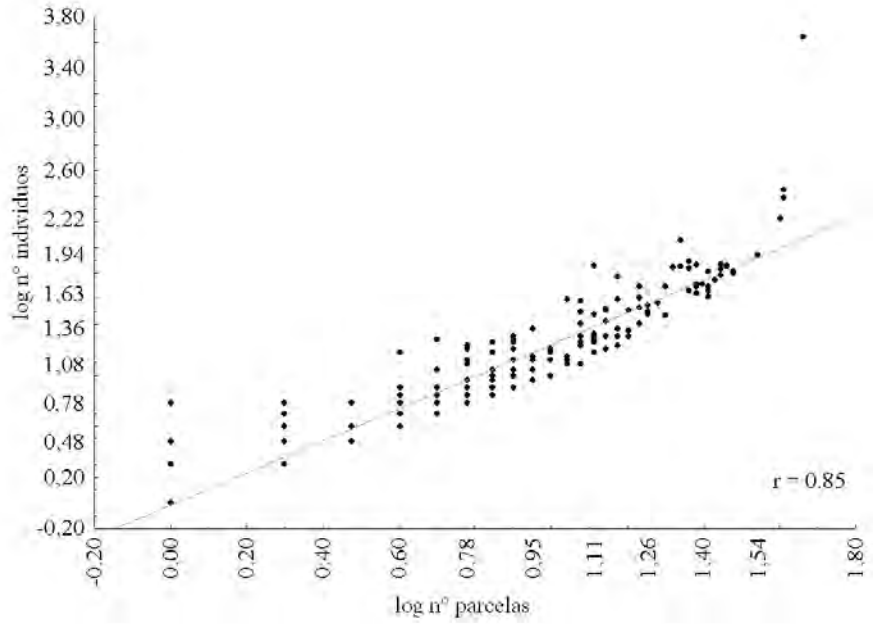

Figura 4.6 – Diagrama de dispersão entre log da abundância de cada espécie e o log do número de parcelas em que cada espécie ocorre.

A DCA aplicada sobre os dados florísticos mostrou que existe um padrão de distribuição da composição florística para a área estudada (Figura 4.7). Considerando a dispersão das parcelas em um espaço formado pelos dois primeiros eixos da DCA, os quais representam 51,2% da variação da composição florística, foi possível observar a formação de três grupos distintos. Estes foram associados às classes fitoecológicas do RADAMBRASIL (1976). O primeiro grupo é constituído pelas parcelas associadas à classe 9 (parcelas 21, 24, 25, 37 e 38) e 10 (parcelas 30, 31, 32, 33 e 34), o segundo é formado por parcelas associadas à classe 3 (parcelas 10,11,12 e 13) e o terceiro é formado pelas demais parcelas acrescidas de duas das parcelas associadas à classe 3 (parcelas 14 e 15). Embora as parcelas 14 e 15 estejam geograficamente mais próximas das parcelas do segundo grupo, o teste de Mantel mostrou

que a distância geográfica entre as parcelas afetou muito pouco a distribuição da composição florística (p =0,0002), apresentando uma baixa correlação com a mesma (r=-0,28). Portanto, pode-se desconsiderar este fator na explicação para formação do padrão de distribuição da composição florística. As espécies que mais contribuíram para a formação do primeiro eixo da DCA estão apresentadas na Tabela 4.1. Este eixo foi positivamente correlacionado com espécies que estavam associadas com alta curvatura vertical e baixa elevação, em média.

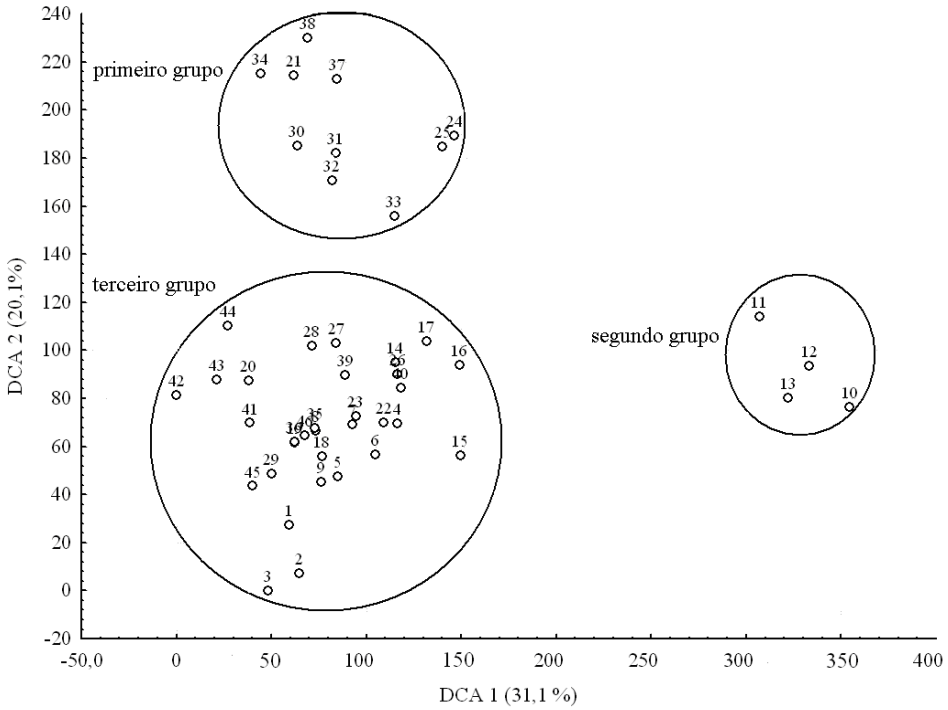

Figura 4.7 – Análise de correspondência destendenciada (DCA) da similaridade na composição florística entre as parcelas.

Tabela 4.1 – Coeficiente de correlação entre o primeiro eixo da DCA e as espécies

Espécies	***r****
Guatteria poeppigiana Mart.	0,84
Inga paraensis Duke	0,84
Bagassa guianensis Aubl.	0,80
Apeiba albiflora Duke	0,77
Jacaranda copaia D. Don	0,74
Aegiphila sp.	0,73
Casearia decandra Jacq.	0,67
Ficus maxima Miller	0,65
Sapium sp.	0,65
Laetia procera (Poepp.) Eichler	0,64
Byrsonima aerugo Sagot	0,63
Cassia pentandra Raddi	0,63
Allophylus floribundus Radlk.	0,58

* Apenas coeficientes de correlação > 0,50 são mostrados

As análises de Regressão Múltiplas indicaram que as variáveis geomorfométricas não influenciaram significativamente a abundância e riqueza das parcelas. Por outro lado, foi observada a influência significativa de duas variáveis geomorfométricas (curvatura vertical e elevação) sobre o primeiro eixo da DCA (Tabela 4.2). Quatro parcelas (10, 11, 12 e 13) mostraram correlação positiva entre o primeiro eixo da DCA e a curvatura vertical e uma correlação negativa com a elevação. O primeiro eixo da DCA em várias outras parcelas (por exemplo: 41, 42, 43, 44, 45, 20 e 34) está negativamente correlacionado com a curvatura vertical e positivamente com e elevação (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Análises de regressão da abundância, riqueza e composição florística (representada pelo primeiro eixo da DCA) e as variáveis geomorfométricas locais (*kh*: curvatura horizontal, *h*: elevação, *A*: orientação de vertentes, *G*: declividade e *kv*: curvatura vertical).

	B*	***t**†*	***p***
	Abundância		
kh	−0,243	−1,094	0,280
h	−0,083	−0,495	0,622
sen (*A*)	−0,106	−0,663	0,510
cos (*A*)	−0,102	−0,653	0,517
G	−0,022	−0,132	0,894
kv	0,111	0,481	0,632
	Riqueza		
kh	−0,003	−0,018	0,985
h	0,184	1,127	0,266
sen (*A*)	−0,205	−1,317	0,195
cos (*A*)	−0,074	−0,490	0,626
G	−0,088	−0,533	0,596
kv	−0,062	−0,277	0,782
	Primeiro Eixo da DCA		
kh	−0,119	−0,746	0,460
h	**−0,348**	**−1,981**	**0,045**
sen (*A*)	0,016	0,138	0,890
cos (*A*)	0,153	1,337	0,189
G	0,121	0,826	0,413
kv	**0,410**	**2,505**	**0,016**
Filtro espacial 1	0,219	1,295	0,203
Filtro espacial 2	0,201	1,464	0,151
Filtro espacial 3	**0,367**	**2,863**	**0,006**

*Coeficiente de regressão padronizado. †Teste t-Student.

Para verificar a capacidade preditiva da geomorfometria sobre a distribuição das espécies, foram experimentadas análises de Regressões Logísticas, sobre algumas espécies abundantes e outras menos abundantes, em relação a variáveis geomorfométricas locais (Tabela 4.3) e regionais (Tabela 4.4). Neste tipo de análise, as ocorrências de cada uma das espécies são as variáveis dependentes, enquanto as variáveis geomorfométricas são os estimadores

independentes. As equações de regressão logística foram aplicadas sobre suas variáveis significativas para a geração de mapas de probabilidade de ocorrência das espécies (Figura 4.8).

Tabela 4.3 – Análises de regressão logística de 4 entre as espécies mais abundantes e 4 das espécies menos abundantes e as variáveis geomorfométricas locais (*kh*: curvatura horizontal, *h*: elevação, *A*: orientação de vertentes, *G*: declividade e *kv*: curvatura vertical).

Variáveis	***B***	***E. Padrão***	***E. Wald***	***df***	***p***	***Exp (B)***	***AUC***
			espécies mais abundantes				
Protium apiculatum Swart							
kh	-1,609	0,857	3,527	1	0,060	0,200	
Constante	2,595	0,642	16,330	1	0,000	13,401	0,72
*Pouteria*sp,							
kh	3,044	1,913	2,532	1	0,112	20,994	
cos*A*	-1,645	0,922	3,179	1	0,75	0,193	
kv	-74,139	45,516	2,653	1	0,103	0,000	
Constante	3,096	0,919	11,344	1	0,001	22,104	0,84
Inga sp,							
h	0,028	0,016	3,029	1	0,082	1,028	
G	0,153	0,115	1,784	1	0,182	1,166	
kv	-30,420	24,450	1,548	1	0,213	0,000	
Constante	-3,170	2,657	1,423	1	0,233	0,42	0,78
Rinorea guianensis (Aubl,) Kuntze							
cos*A*	-0,888	0,489	3,304	1	0,069	0,411	0,,66
Constante	-0,093	0,307	0,092	1	0,762	0,911	
			espécies menos abundantes				
Guatteria poeppigiana Mart,							
kv	28,228	16,128	3,064	1	0,080	1,817E12	
Constante	-0,217	0,331	0,430	1	0,512	0,805	0,66
Inga paraensis Ducke							
kv	40,735	19,279	4,464	1	0,035	4,910E17	
Constante	-1,381	0,434	10,123	1	0,001	0,251	0,74
Bagassa guianensis Aubl,							
G	0,234	0,102	5,250	1	0,022	1,263	
Constante	-5,573	1,807	9,515	1	0,02	0,004	0,89
Apeiba albiflora Ducke							
G	0,136	0,073	3,494	1	0,062	1,146	
kv	55,138	24,945	4,886	1	0,027	8,838E23	
Constante	-4,002	1,194	11,239	1	0,001	0,018	0,85

O coeficiente da regressão logística indica a probabilidade de ocorrência de uma determinada espécie para o aumento de uma unidade na variável independente, em relação direta ou inversa, conforme este coeficiente seja positivo ou negativo, respectivamente. No caso de um coeficiente positivo, quanto maior for seu valor, maior será o poder preditivo da variável independente sobre a probabilidade de ocorrência de uma determinada espécie.

Considerando 4 das espécies mais abundantes e as variáveis geomorfométricas locais, tem-se que para *Protium apiculatum* Swart, a variável com maior poder preditivo foi *kh*, para a

*Pouteria*sp. é *kh*, cos*A*e *kv*, para *Inga* sp. é *h*, *G* e *kv* e para *Rinorea guianensis* (Aubl.) Kuntze é o cos*A*. Em relação a 4 das espécies menos abundantes confirma-se a sua maior relação com a curvatura vertical (Tabela 4.2) em que para a *Guatteria poeppigiana* Mart. e a *Inga paraensis* Ducke a variável *kv* tem o maior poder preditivo, para *Bagassa guianensis* Aubl é SN e para *Apeiba albiflora* Ducke é *G* e *kv*. Considerando as variáveis geomorfométricas regionais e as 4 espécies mais abundantes *Protium apiculatum* Swart as variáveis com maior poder preditivo são RG e AN, para *Pouteria*sp. são AN, DN e MN, para *Inga* sp. são DN e MN e finalmente para *Rinorea guianensis* (Aubl.) Kuntze são UM, DN e MN. Quando são analisadas as espécies menos abundantes a variável como maior capacidade preditiva para *Guatteria poeppigiana* Mart é RG, enquanto a variável AN tem a maior relação com *Inga paraensis* Ducke, *Bagassa guianensis* Aubl e *Apeiba albiflora* Ducke. Todos os modelos selecionados foram considerados de "úteis" (AUC=0,6) a "muito bons" (AUC=0,8), segundo a categorização proposta por Zhu et al. (2010).

Tabela 4.4 – Análises de regressão logística de 4 entre as espécies mais abundantes e 4 das espécies menos abundantes e as variáveis geomorfométricas regionais (RG: rugosidade; AN:amplitude; DN: dissecação; MN: integral hipsométrica; UM: índice de saturação).

Variáveis	***B***	***E. Padrão***	***E.Wald***	***df***	***p***	***Exp (B)***	***AUC***
			espécies mais abundantes				
Protium apiculatum Swart							
RG	28,846	17,660	2,668	1	0,102	3,371E12	
AN	-0,169	0,08	4,456	1	0,035	0,845	
Constante	4,499	1,840	5,978	1	0,014	89,912	0,83
*Pouteria*sp,							
AN	-0,063	0,045	1,929	1	0,165	0,939	
DN	0,063	0,041	2,290	1	0,130	1,065	
MN	21,619	11,432	3,576	1	0,059	2,448E9	
Constante	-14,733	8,836	2,780	1	0,095	0,000	0,80
Inga sp,							
DN	-0,040	0,028	2,101	1	0,147	0,961	
MN	-16,676	10,264	2,640	1	0,104	0,000	
Constante	16,631	9,148	3,305	1	0,069	1,671E7	0,72
Rinorea guianensis (Aubl,) Kuntze							
UM	0,238	0,125	3,591	1	0,058	1,268	
DN	0,046	0,025	3,329	1	0,068	1,047	
MN	13,722	6,798	4,075	1	0,044	9,111E5	
Constante	-15,982	6,574	5,909	1	0,015	0,000	0,77
			espécies menos abundantes				
Guatteria poeppigiana Mart,							
RG	7,354	4,948	2,209	1	0,137	1,562E3	
Constante	-0,815	0,615	1,752	1	0,186	0,443	0,6
Inga paraensis Ducke							
AN	0,058	0,027	4,791	1	0,029	1,060	
Constante	-2,702	0,922	8,579	1	0,003	0,067	0,69
Bagassa guianensis Aubl,							
AN	0,104	0,050	4,328	1	0,038	1,109	
Constante	-6,041	2,158	7,837	1	0,05	0,002	0,85

Apeiba albiflora Ducke							
AN	0,089	0,035	6,440	1	0,011	1,093	
Constante	-4,490	1,365	10,813	1	0,001	0,011	0,76

Considerando os dados descritos acima, estes revelaram que a área analisada possui uma alta riqueza (20 espécies/ha) e abundância (386 indivíduos/ha) de espécies arbóreas, em concordância com os resultados obtidos por trabalhos conduzidos na região Amazônica (ESPÍRITO-SANTO et al., 2005; GONÇALVES; SANTOS, 2008; JARVIS; MULLIGAN, 2009; LAURENCE et al., 2010).

Vários estudos têm demonstrado a influência da topografia sobre a riqueza de espécies arbóreas na região amazônica e em regiões subtropicais. Kubota et al. (2004), estudando os efeitos da heterogeneidade topográfica na riqueza e abundância de espécies arbóreas em floresta subtropical no Japão, observaram diferenças em ambos atributos seguindo as variações nas condições topográficas locais. Resultados similares também foram encontrados por Liberman et al. (1985), em uma região de floresta primária tropical de terras baixas em La Selva, Costa Rica. Laurence et al. (2010) documentou o efeito dos atributos do solo e da topografia sobre a abundância e riqueza de espécies arbóreas na Amazônia. Jarvis e Mulligan (2009) observaram que a riqueza de espécies em um ambiente de floresta tropical montana estava significativamente correlacionada com a curvatura vertical, apresentando uma maior riqueza em áreas convexas. Entretanto, o mesmo resultado não foi encontrado quando os autores relacionaram as variáveis topográficas e a riqueza de espécies em uma área de floresta tropical primária de terras baixas, onde não houve a mesma correlação. No presente estudo, também conduzido em uma área de floresta primária tropical de terras baixas, os dados de relevo não foram indicativos da riqueza e a abundancia de espécies arbóreas.

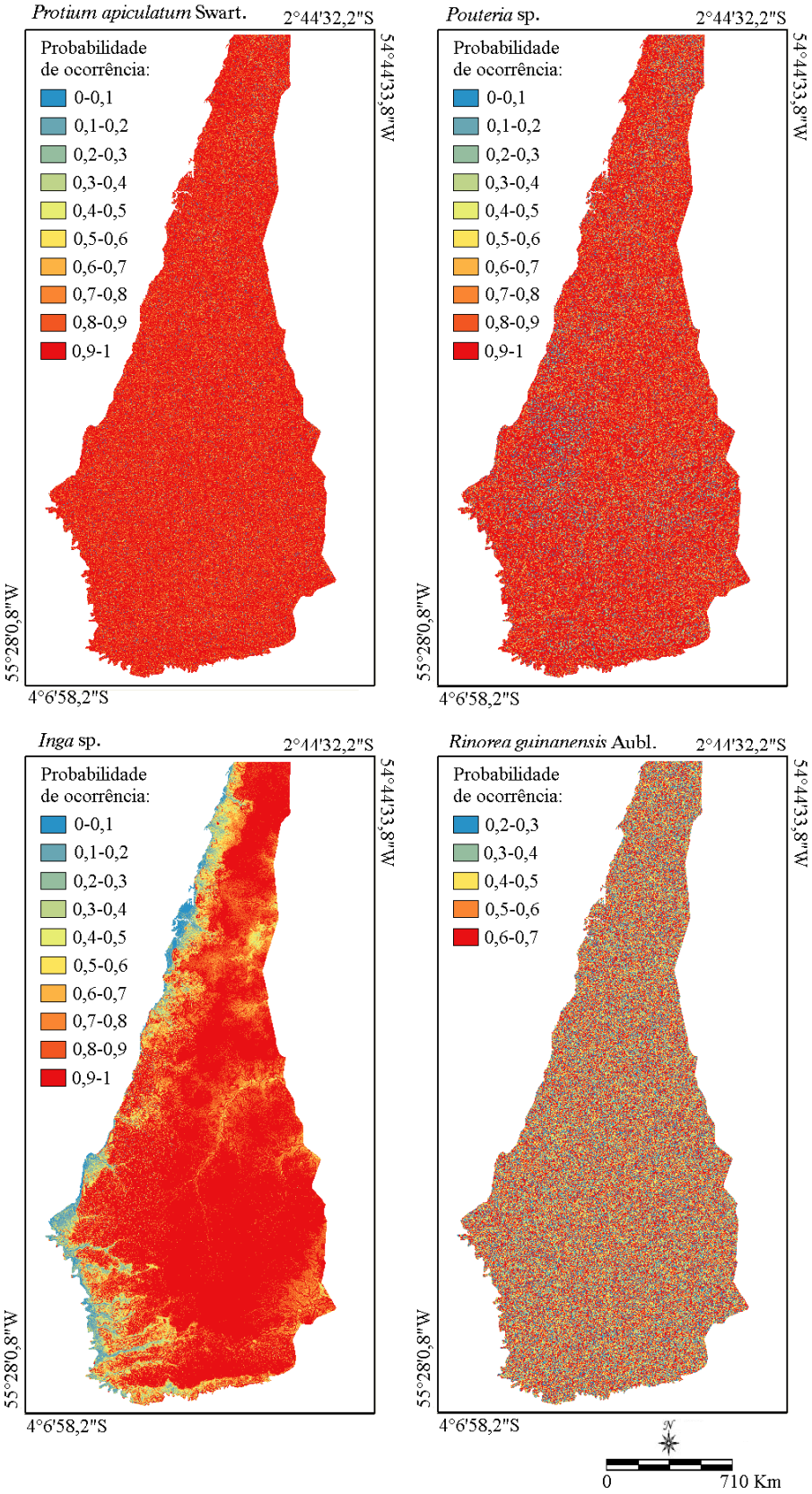

Figura 4.8(a) – Mapa de probabilidade de ocorrência das espécies mais abundantes usando a geomorfometria local.

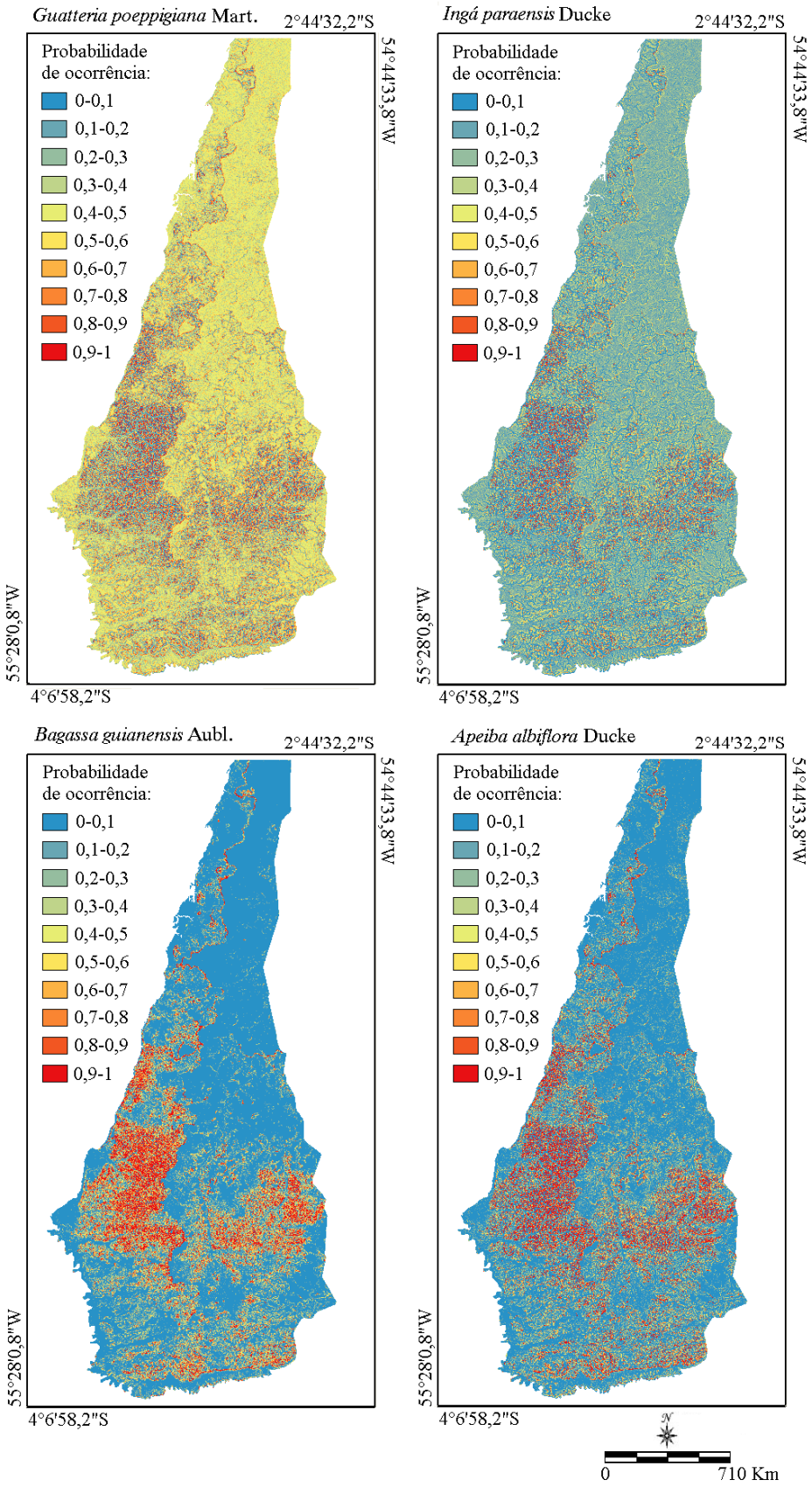

Figura 4.8(b) – Mapa de probabilidade de ocorrência das espécies menos abundantes usando a geomorfometria local.

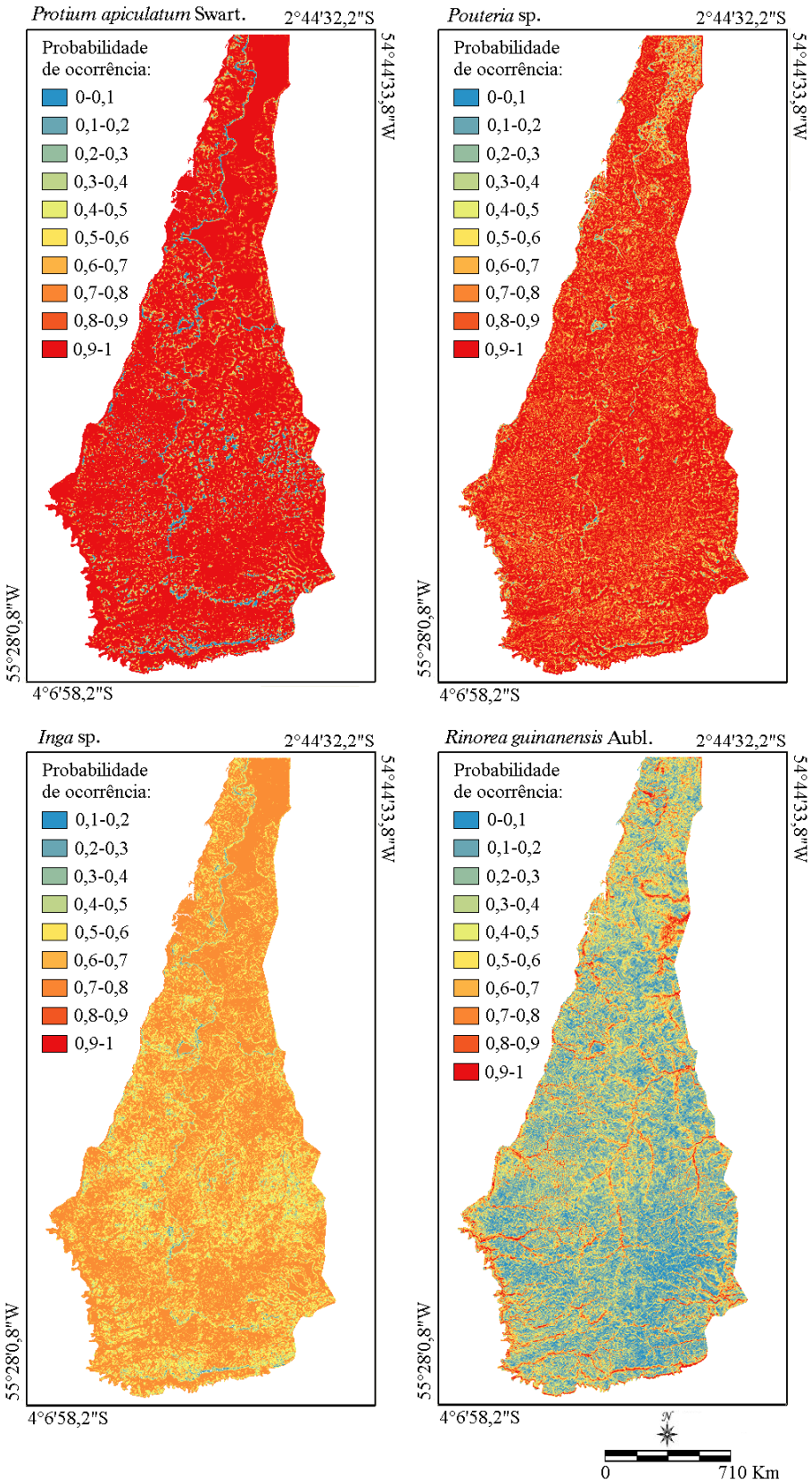

Figura 4.8(c) – Mapa de probabilidade de ocorrência das espécies mais abundantes usando a geomorfometria regional.

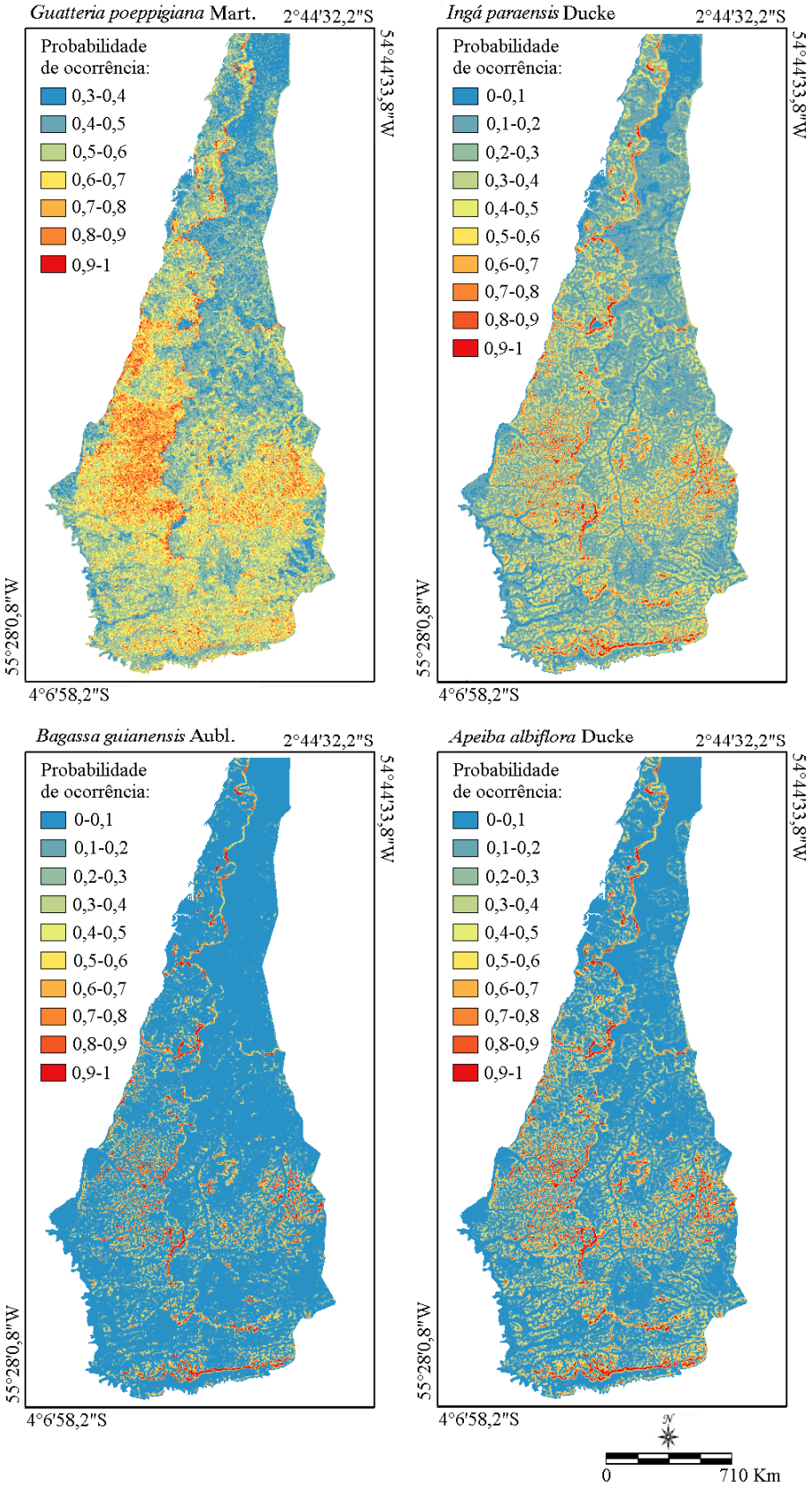

Figura 4.8(d) – Mapa de probabilidade de ocorrência das espécies menos abundantes usando a geomorfometria regional.

Resultados similares também foram encontrados em outros tipos de fisionomia vegetal. Enoki (2003) estudou a micro-topografia e distribuição do dossel de árvores de uma floresta sub-tropical no norte da Ilha de Okinawa (Japão) e observou que os padrões topográficos não evidenciavam a riqueza de espécies. Silva et al. (2008b) encontraram resultados análogos dentro de uma área de floresta tropical (fragmentos de floresta secundária na Mata Atlântica, SE, Brasil). Estes autores observaram que não houve relação significativa entre a heterogeneidade do relevo (expresso como pelo relevo médio, altitude, orientação de vertentes e declividade) e a riqueza de espécies arbóreas no fragmento estudado. Os dados do presente trabalho e outros estudos publicados anteriormente sugerem que a influência da topografia sobre a riqueza e abundância de espécies depende da amplitude de variação topográfica e das interações de outros fatores locais e regionais, numa indicação de que não existe um padrão universal.

No presente estudo, a composição florística, representada pelo primeiro eixo da DCA (Tabela 4.2), foi significativamente correlacionada com a curvatura vertical e a elevação. Como a variação da altitude nesta área de estudo é relativamente baixa, esta correlação pode estar associada a outras variáveis tais como densidade de drenagem, a dinâmica de inundação e a disposição dos diferentes estratos do terreno durante a formação do solo, que possui ação mais direta sobre o controle da distribuição de espécies (AYRES, 1993; NELSON, 1994; WITTMANN et al., 2002). As variáveis de curvatura do terreno estão relacionadas com os processos de migração e acúmulo de matéria orgânica, sais minerais e água no solo, assim como sedimentos, em escla temporal mais ampla. A curvatura horizontal influencia a divergência e a convergência gravimétrica (portanto, dispersão e acúmulo de material) da superfície e, por sua vez, a curvatura vertical influencia a aceleração ou desaceleração dos fluxos de material ao longo das vertentes (KIRKBY e CHORLEY, 1967; SHARY, 1991). A ação destas duas variáveis na formação do solo afeta a umidade do solo, o pH, a profundidade dos horizontes, a quantidade de matéria orgânica e outras propriedades do solo (SHARY, 1991; MOORE et al., 1993). A combinação destes fatores na condição presente do solo condiciona, a favor ou contra, o estabelecimento de determinadas espécies de plantas.

Efeitos indiretos devem ser considerados na interpretação da resposta significativa entre a elevação e a composição florística. O regime de inundação e atributos do solo são dois fatores relacionados à elevação que podem afetar a composição florística. O regime de inundações funciona como um disparador da sucessão florestal na região amazônica (NELSON, 1994;

WITTMANN et al., 2002) e em outros biomas (BUDKE et al., 2007), e assim condiciona o estabelecimento de espécies. Variações estruturais também são observadas ao longo das encostas em condições de não-inundação, indicando que a posição do perfil reflete fatores do passado ou presente que afetam mais diretamente o crescimento das florestas (AYRES, 1993; FERREIRA, 1997) e que podem também ter efeitos sobre a composição florística. Com relação aos atributos do solo, inundações e outros efeitos topográficos sobre a formação do solo, tais como a distribuição de umidade e matéria orgânica ao longo das encostas, devem ser considerados, além da distribuição dos tipos de solo em função dos materiais predominantes nos diferentes níveis estratigráficos.

No presente estudo o primeiro eixo da DCA está correlacionado positivamente com algumas espécies moderadamente abundantes (Tabela 4.1). Estas espécies tiveram maior ocorrência em terrenos com maiores valores médios de curvatura vertical, ou seja, de terrenos retilíneos a convexos, indicando um efeito da curvatura nestas espécies em especial. Embora os dados de solo não tenham sido coletados neste estudo, os solos Latossolo Amarelo Distrófico e Podzólico Vermelho Amarelo são reconhecidos por prevalecerem na formação de planaltos e planícies da área de estudo, respectivamente (IBAMA, 2004). Ambos os tipos de solo têm sido descritos como sendo de baixa fertilidade. Eles se diferem em suas propriedades físicas; latossolos apresentam um quase uniforme e alto teor de argila em todos os horizontes do solo, enquanto que os podzólicos apresentam um aumento abrupto do conteúdo de argila no horizonte B em relação ao horizonte A, o qual é relativamente mais arenoso. Uma apreciação visual do modelo de elevação digital (DEM) e dos dados geomorfológicos revela morfologias planas de superfícies Pré-Cambrianas e Cenozóicas preservadas nos topos, cercadas por bacias hidrográficas de morfologia erosional, com dissecção e padrões de drenagem refletindo a variedade de sistemas de relevo desenvolvidos em ambos os estratos. Por causa do arranjo complexo de topossequências (DENT; YOUNG, 1981) incluído no conjunto de dados, não é esperado que os atributos pedológicos expliquem por si a correlação entre a elevação e os atributos florísticos, exceto por tendências gerais decorrentes dos processos pretéritos de formação do solo e dos terraços fluviais (GERRARD, 1981), no máximo.

As variáveis geomorfométricas relacionadas com a altitude, quando consideradas dentro de diferentes sistemas do terreno, podem refletir condições topográficas de efeitos mais recentes sobre as propriedades do solo (MOORE et al., 1993) em uma escala relativamente local, que pode afetar várias características da vegetação, inclusive a composição local de espécies. As

derivadas da elevação de primeira ordem (declividade e orientação de vertentes) e as de segunda ordem (curvaturas), estão mais diretamente relacionadas com tais condições do que com a própria elevação, independentemente da (e, paradoxalmente, por causa da) baixa variação da elevação na região. Quando as derivações da elevação são distribuídas ao longo de um perfil de elevação do terreno, as relações envolvendo essas variáveis tendem a ter maior potencial para estimar os atributos florestais do que aquelas baseadas apenas na altitude.

Os dados aqui apresentados mostram que as espécies que foram mais fortemente correlacionadas com o primeiro eixo da DCA ocorriam com maior freqüência em terrenos com maiores valores médios de curvatura vertical, ou seja, de terrenos retilíneos a convexos. Parcelas com estas características estavam localizadas em seções de terrenos convexos ou em singularidades (bordas e pequenas elevações) presentes em áreas côncavas (LORENZI, 1998; RIBEIRO et al., 1999). Análises em escala regional revelaram que estas parcelas estão localizadas em áreas baixas, de platô dissecado, correspondentes a interflúvios tabulares com drenagem aprofundada (IBAMA, 2004).

Entre as espécies correlatas ao primeiro eixo da DCA, os habitats topográficos típicos de *Guatteria poeppigiana* Mart., *Inga paraensis* Ducke e *Bagassa guianensis* Aubl., descritos na literatura, mostraram-se correlacionadaos à elevação e à curvatura vertical. *Guatteria poeppigiana* Mart. está frequentemente presente em solos argilosos de planícies de inundação (RIBEIRO et al., 1999), I. *paraensis* prefere terrenos baixos (LORENZI, 1998), e *B. guianensis* prefere áreas bem drenadas e terrenos férteis posicionados nas encostas (LORENZI, 1998). Assim, as peculiaridades do terreno representadas pela elevação e curvatura vertical podem definir nichos ecológicos específicos, o que pode explicar o padrão de distribuição espacial de algumas das espécies da região de estudo.

No ambiente tropical no qual este estudo foi conduzido, alguns gradientes ambientais, especialmente aqueles de microclima e altitude, são estreitos, e em tais condições, algumas espécies podem, por sua vez ocupar nichos ecológicos extremamente particularizados (HUTCHINSON, 1957). Estas espécies apresentam considerável sensibilidade às variações ambientais, e suas distribuições poderiam ser determinadas por fatores que não são prontamente evidentes. Em alguns casos, especialmente em áreas com baixa amplitude de variação do relevo, as curvaturas horizontais e verticais podem mostrar influência significativa sobre as propriedades de fitocenose (JARVIS; MULLIGAN, 2009),

possibilidade corroborada pelo presente estudo. Outro estudo com resultados semelhantes é o trabalho de Enoki (2003), que demonstrou que a composição de espécies é relacionada com índices topográficos (declividade e uma média regionalizada da curvatura), embora alguns padrões não puderam evidenciar a riqueza de espécies.

Apesar de algumas espécies terem sido descritas como relacionadas à topografia em outros estudos, os dados do presente trabalho não o confirmaram para grande parte das espécies aqui estudadas. Embora se reconheçam diferenças de escalas de observação (e outras limitações dos dados) entre estudos locais e a presente abordagem geográfica com dados remotos para tal discrepância, interações ecofisiológicas específicas podem ser consideradas. As espécies mais abundantes apresentaram ampla distribuição, ocorrendo em grande parte das parcelas, independente de suas características topográficas. Este resultado sugere que essas espécies possuem maior amplitude de nicho. Nesta condição, observamos uma correlação positiva entre a amplitude de distribuição (número de parcelas) e a abundância. Este é um padrão freqüentemente encontrado e várias hipóteses têm sido levantadas para explicá-lo (SIQUEIRA et al., 2009), tal como a hipótese de amplitude de nicho (BROWN, 1984). Esta hipótese considera que as espécies que ocupam uma maior variedade de habitats e exploram diversas condições ambientais e recursos tendem a expandir a sua ocorrência, ou seja, são generalistas, portanto são mais amplamente distribuídas e abundantes. No presente estudo, a espécies mais abundantes foram *Protium apiculatum* Swart (283 indivíduos), *Pouteria sp*. 1 (242 indivíduos), *Ingá sp*. (166 indivíduos), *Rinorea guianensis* (Aubl.) Kuntze (113 indivíduos), *Licaria canella* (Meisn.) Kosterm. (87 indivíduos), *Miconia sp*. (77 indivíduos), *Ocotea sp*. (74 indivíduos), *Pithecellobium racemosum* Ducke (73 indivíduos), *Jacaranda copaia* D. Don (72 indivíduos), e *Boil guianensis* Aubl. (71 indivíduos). Estas espécies não apresentaram preferências geomorfométricas significativas e coerentemente foram encontradas nos diferentes tipos de terreno, compoucas exceções. Isto pode ser confirmado pela Figura 4.8, nas quais pode-se observar que as 4 espécies mais abundantes apresentam distribuição mais regional e sem um padrão definido tanto quando consideramos a variáveis geomorfométricas locais (Figura 4.8 a e b), bem como quando consideramos as variáveis regionais (Figura 4.8 c e d). Em contraposição, as 4 espécies moderadamente abundantes citadas anteriormente possuem preferências, com padrões de distribuição mais locais e definidos, ou seja, a sua probabilidade de ocorrência é maior em determinados terrenos, com características geomorfométricas particularizadas.

Os dados de geomorfometria local não foram indicadores significativos da riqueza e da abundância de espécies entre as parcelas da área de estudo. No entanto, a composição florística mostrou-se influenciada pela curvatura vertical e elevação, particularmente por algumas espécies que se mostraram sensíveis à variação topográfica observada. Os resultados desta pesquisa mostram que as relações entre a vegetação e a geomorfometria local podem ser distintas de acordo com a espécie observada. No âmbito local, a importância da inserção de variáveis geomorfométricas derivadas da elevação (como evidenciado pela curvatura vertical) é realçada, especialmente na região amazônica, onde a amplitude do terreno é muitas vezes muito baixa. Estas variáveis podem afetar indiretamente através do controle do fluxo de escoamento superficial, acúmulo e transporte de matéria orgânica do solo propiciando a formação de diferentes ambientes nos quais formam habitats e nichos propícios para que determinadas espécies menos generalistas ocorram.

4.2.2 Componente Estrutural

Em escala local, a topografia é considerada a mais importante variável na distribuição espacial e na estrutura das florestas tropicais. Esta variabilidade espacial da vegetação tem sido atribuída a vários fatores incluindo alta umidade (RICKLEFTS, 1996), a limitação de nutrientes (VITOUSEK e SANFORD, 1986), a baixa temperatura (AIBA; KITAYAMA, 2002) e a acidez do solo (HAFKENSCHEID, 2000), os quais podem ser condicionados pelo relevo. Na Tabela 4.5, as análises de correlações canônicas mostram que as correlações dos dois primeiros pares canônicos foram elevadas e significativas a 1% de probabilidade, pelo teste de qui-quadrado. Também se verifica que a correlação canônica do primeiro par canônico é elevada (0,8195) e que os grupos considerados não são independentes. Na Tabela 4.6 verificam-se as associações intergrupos estabelecidas.

As associações se mostraram evidentes entre as variáveis canônicas, dado que o primeiro par de fatores canônicos, com correlação de 0,819, associa largos diâmetros à altura do peito, baixa estatura e dossel mais fechado a áreas de maiores elevações, baixos valores cosseno da orientação de vertentes (predominância nas faces voltadas para o Sul), declividades mais amenas e menos iluminação, enquanto que o segundo par de fatores canônicos, com correlação de 0,5592, associa árvores mais baixas, diâmetros mais finos e dossel menos aberto com altos valores de orientação de vertentes, baixos valores de declividades e curvaturas.

Tabela 4.5 – Correlações canônicas e pares canônicos estimados entre componentes do Grupo I (estrutura florestal): DAP, HT e AD e Grupo II (geomorfometria): *kh*, *h*. sen *A*, cos *A*, *G*, *kv*, ILUM.

Variáveis	***Pares Canônicos***		
	1°	**2°**	**3°**
DAP	0,699162	-0,192116	-1,03425
HT	-0,314699	-0,873486	0,76195
AD	-0,616547	-0,228738	-0,84699
kh	0,206125	-0,449017	0,318548
h	0,978364	-0,244700	-0,309005
sen *A*	0,144453	0,155777	-0,231372
cos *A*	-0,246842	0,250037	-0,875712
G	0,005597	-0,895289	-0,130911
kv	-0,318180	-0,052584	-0,470549
ILUM	-0,074356	-0,607488	-0,135220
ρ	0,819508	0,559240	0,356041
X^2	64,15227	20,16894	5,35424
GL	21	12	5
α	0,000003	0,064015	0,374216

DAP = diâmetro a altura do peito, HT = altura total, AD = abertura do dossel, *kh* = curvatura horizontal, *h* =elevação, sen *A*= seno da orientação de vertentes, cos ON=cosseno da orientação de vertentes, *G*=declividade, *kv*= curvatura vertical, ILUM=iluminação, ρ= correlação canônica, X^2= Qui-quadrado calculado, GL= graus de liberdade, α = nível de significância.

Tabela 4.6 – Coeficientes da Matriz Estrutural entre os grupos I (estrutura florestal) e II (geromorfometria).

Variáveis	***Fatores Canônicos***		
	1°	**2°**	**3°**
DAP	0,723700	-0,582942	-0,369373
HT	0,058469	-0,973659	0,220386
AD	-0,831106	-0,164077	-0,531358
kh	0,053623	-0,323420	-0,039698
h	0,934262	0,008987	-0,258623
sen *A*	0,052408	-0,043090	-0,226475
cos *A*	-0,287955	0,206288	-0,846025
G	-0,233891	-0,718960	-0,071005
kv	0,049894	-0,315726	-0,234123
ILUM	-0,180664	-0,249933	-0,147864

DAP = diâmetro a altura do peito, HT = altura total, AD = abertura do dossel, *kh* = curvatura horizontal, *h* =elevação, sen *A*= seno da orientação de vertentes, cos ON=cosseno da orientação de vertentes, *G*=declividade, *kv*= curvatura vertical, ILUM=iluminação, ρ= correlação canônica, X^2= Qui-quadrado calculado, GL= graus de liberdade, α = nível de significância.

Devido à complexidade ambiental e à grande variação estrutural, que são características comuns em florestas tropicais, foi aplicada a técnica estatística da partilha de variância no sentido de se identificarem as componentes explicativas das diferentes porcentagens desta variação, e quantificar parte da variação que não poderia ser explicada pelos fatores

envolvidos na análise. Desse modo, a partilha de variância da AD das parcelas estudadas evidenciou que 82% da variabilidade dos dados foram explicados pelas variáveis geomorfométricas, mais especificamente *h*, sem variância explicada pela componente geomorfométrica indissociável da posição geográfica e nem variância estruturada apenas pelo espaço. Assim, 82 % da variabilidade da AD na comunidade florestal pôde ser explicada pelas variáveis geomorfométricas e 18 % da variânica foi considerada inexplicável. Já considerando a DAP 80,18% da variabilidade destes dados foram explicados pela geomorfometria local representada por *G* e *h*, sem que houvesse, também, variância explicada pela componente geomorfométrica indissociável da posição geográfica e nem variância estruturada apenas pelo espaço. Desse modo 19,82 % da variância foi considerada inexplicada. A partilha de variância da HT mostrou que 47,36 % dos dados foram explicados pela variável geomorfométrica local *G* inserida no modelo, e que não houve variância explicada pelo componente geomorfométrico indissociável da posição geográfica nem variância estruturada apenas pelo espaço, com 52,64 % da variância considerada inexplicável.

Para a investigação mais detalhada da distribuição das variáveis estruturais e sua estimativa com base na geomorfometria, foram feitas análises de regressão múltiplas. A análise visual detalhada dos diagramas de dispersão entre AD, DAP e HT e o conjunto total de variáveis explicativas apontou a ocorrência de 3 *outliers* no grupo de observações. Para explorar com maior profundidade as relações entre cada uma das variáveis dependentes e suas respectivas variáveis explicativas, estas observações foram removidas e as relações recalculadas, sem que se evidenciassem outros *outliers* através da distância de Cooks. Outra análise preliminar, a respeito da distribuição numperica dos dados não indicou a necessidade de transformação das variáveis. No ajuste de modelos de regressão, como regra geral (NETER et al., 1996), o número total de observações utilizadas (i.e., 46 ou 43 sem os *outliers*) deve ser 10 vezes o número de variáveis, o que neste experimento corresponde a um máximo de 4 variáveis. Os modelos selecionados tiveram no máximo 3 variáveis explicativas, dentro da recomendação.

Os critérios de seleção utilizados apresentaram convergência na indicação dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas. No modelo de estimativa da AD foram considerados o cosseno da orientação de vertentes e a elevação como o melhor conjunto de variáveis (R^2 = 0,47, QMR= 14,17). No modelo para DAP, por sua vez, a curvatura horizontal foi acrescentada ao conjunto de variáveis (R^2 = 0,56, QMR= 3,601). Por fim, o modelo de

estimativa para HT foi estabelecido com base na curvatura horizontal e a na declividade (R^2 = 0,24, QMR= 1,748).

Na Tabela 4.7 são apresentados, para todos os modelos, os coeficientes de regressão padronizados estimados (β), os respectivos erros padrões (SE), valor da estatística t, valor p e o VIF (fatores de inflação da variância), este último, conforme sugerido por Neter et al. (1996), para detecção de possível presença de multicolinearidade.

Tabela 4.7 – Análises de regressão da AD, DAP e HT e as variáveis geomorfométricas locais (*kh*: curvatura horizontal, *h*: elevação, *A*: orientação de vertentes, *G*: declividade e *kv*: curvatura vertical).

Variável	***β***	***SE***	***t***	***p***	***VIF***
Modelo AD					
Constante	20,13	2,334	8,68	0,000	
h	-0,08	0,015	-5,23*	0,000	1,0
Cos *A*	2,26	0,910	2,49*	0,017	1,0
S = 3,76, R-Sq = 47,2,5%, R-Sq(adj) = 44,6%, R-Sq(pred) = 39,57%					
Modelo DAP					
Constante	12,209	1,471	8,30	0,000	
kh	1,056	0,559	1,89*	0,067	1,0
h	0,054	0,008	6,72*	0,000	1,1
G	0,170	0,052	3,26*	0,002	1,1
S = 1,89770, R-Sq = 56,2%, R-Sq(adj) = 52,8%, R-Sq(pred) = 48,34%					
Modelo HT					
Constante	15,31	0,405	37,82	0,000	
kh	0,703	0,389	1,80*	0,079	1,0
G	0,107	0,034	3,09*	0,004	1,0
S = 1,32, R-Sq = 24%, R-Sq(adj) = 20,2%, R-Sq(pred) = 12,47%					

* Valor significativo ao nível de 10% de significância

Como pode ser observado, o valor da estatística *t* foi significativo em todos os casos (AD, DAP e HT). É possível constatar que todos os valores de VIF calculados foram inferiores a 10, o que indica a ausência de problemas graves com multicolinearidade nestes modelos de regressão (NETER et al., 1996). A aplicação dos testes de normalidade e o gráfico de probabilidade normal para os resíduos mostraram que os dados de todas as variáveis estudadas tiveram distribuição que não diferiu da normal. Os modelos foram submetidos ao teste de Levene, que apontou a variância constante dos resíduos. Analisando os gráficos de resíduos contra os valores preditos, verificou-se que os pressupostos de linearidade e homocedasticidade não foram violados. Aliado a isso, a análise de autocorrelação espacial realizada através do índice de Moran mostrou que não houve autocorrelação dos resíduos.

Para a validação dos dados, o valor PRESS do modelo AD (649,412) diferiu em 14,17 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (566,93). Já o valor PRESS do modelo DAP (165,592) diferiu em 3,6 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (140,449). Finalmente o valor PRESS do modelo HT (80,5138) diferiu em 1,74 (QMR) da SQR deste mesmo modelo (65,929). Com base em resultados apresentados por Neter et al. (1996), estas diferenças foram consideradas próximas o suficiente para suportar a eficácia dos modelos selecionados. Contudo, quando comparado ao QMR do modelo AD, o QMR dos modelos HT e DAP podem ser considerados como melhores indicadores da verdadeira capacidade preditiva da função de regressão ajustada. Cabe-se ressaltar aqui o baixo valor de R^2 do modelo HT.

Uma vez validados, os modelos foram aplicados sobre o conjunto de variáveis geomorfométricas locais de modo a obter os mapas de estimativa de AD, DAP e HT. Este modelo corrobora os resultados da análise de correlação canônica, segundo os quais largos diâmetros à altura do peito, estatura de baixa a moderada e dossel mais fechado estiveram associados a áreas de maiores elevações. Segundo o modelo estimado, os menores valores de AD (de 0 a 7%) estão relacionadas a áreas mais elevadas e com menores valores de cosseno da orientação de vertentes (faces orientadas para o Sul). Por sua vez, aberturas do dossel entre 7 e 23 % estão concentradas em locais característicos de menores elevações e altos valores para o cosseno da orientação de vertentes (faces orientadas para o Norte). Como reflexo do coeficiente de determinação (R^2) extremamante baixo para a estimativa de HT e um pouco maior para as demais estimativas (AD e DAP), os mapas gerados apresentaram padrões de distribuição espacial mais coesos e ajustados a feições do relevo para estas últimas do que para a primeira (Figura 4.9).

Com relação ao modelo de estimativa de DAP, indivíduos com 10 a 20 cm se concentram em áreas convergentes a planares, menos elevadas e pouco a moderadamente inclinadas. Indivíduos com DAP de 23 a 36 cm caracterizam-se por terrenos mais planos, elevações e declividades moderadas. Finalmente as árvores com DAP maior do que 26 cm estão distribuídas em áreas planares a divergentes, com maiores elevações e declividades de onduladas a fortemente onduladas.

Abstraindo-se a pouca robustez do modelo de estimativa de HT, seria possível inferir que as menores alturas médias (11 a16 m) se concentram em áreas menos declivosas e de retilíneas a convergentes. As áreas com declividades de moderadas a altas e terrenos de planares a

divergentes, ou seja, maiores valoresde *G* e *kh*, respectivamente, são ocupadas por indivíduos cujas médias de altura variam de 16 a 24m.

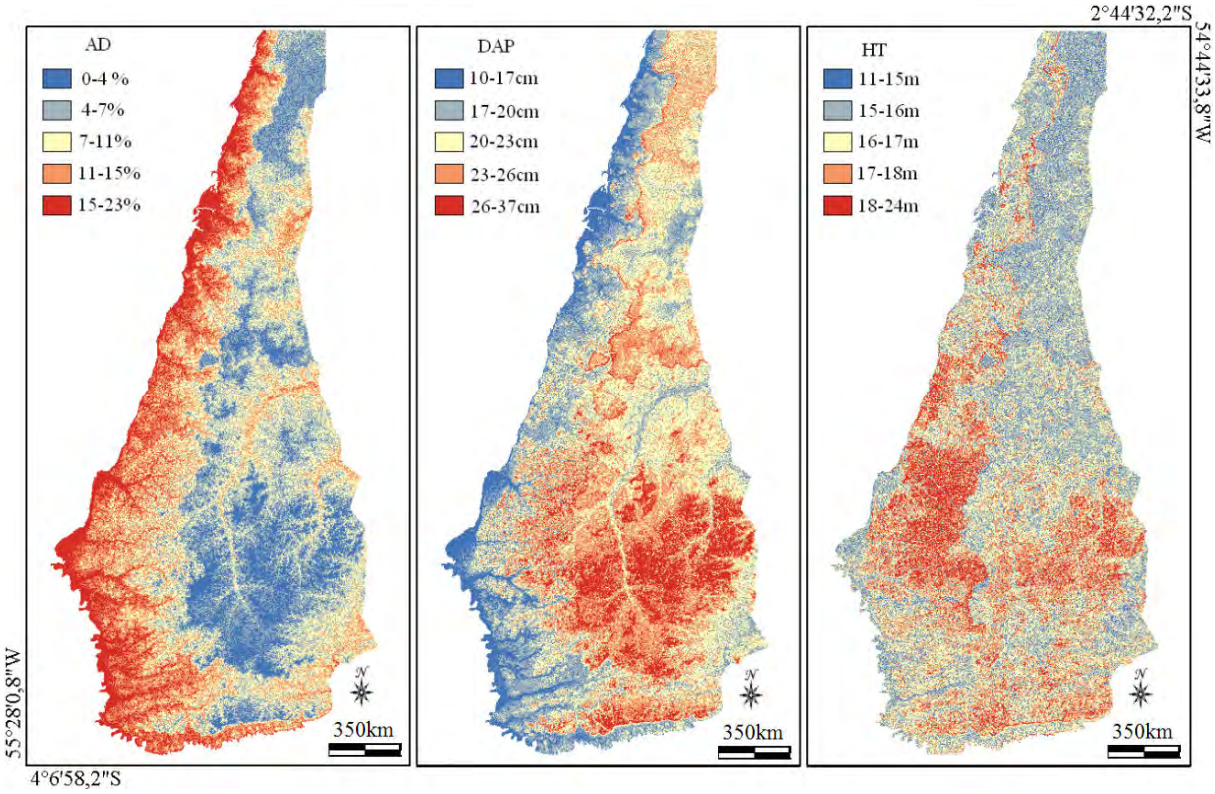

Figura 4.9 – Mapas de estimativa das variáveis AD, DAP e HT para a Floresta Nacional do Tapajós.

Uma análise visual realizada sobre os três mapas referentes aos modelos gerados (Figura.4.9) corrobora com a análise exploratória realizada a partir da análise de correlação canônica, em que áreas com dossel mais fechado (menores AD, de 4 a 7%) coincidem com áreas de maiores valores médios de DAP, enquanto que áreas com maior declividade apresentam indivíduos mais altos. Estas observações estão de acordo com estudo de Robert e Moraive (2003), na floresta perene e úmida na Índia, que foi verificado que o diâmetro das árvores variou de acordo com a declividade e da altura da árvore em encostas suaves e íngremes. O crescimento de árvores de grande porte foi claramente superior em declives íngremes. Para o presente estudo, as distribuições de diâmetro também foram diferentes entre as parcelas, sendo que a altura das árvores diferiu de acordo com a inclinação, e que, para um determinado intervalo de diâmetros, as árvores eram mais altas nas encostas íngremes do que em encostas suaves. Parte da variação dos parâmetros estruturais da floresta pode ser explicada pela topografia, e as mudanças observadas entre os terrenos planos, suave ondulados, ondulados e fortes ondulados sugerem diferenças não só na distribuição estrutural das árvores através de uma modificação

de sua forma, mas também nos principais processos responsáveis pela dinâmica de distribuição, tais como competição, estabelecimento e sobrevivência (ROBERT; MORAIVE, 2003).

As diferenças no diâmetro e da altura das árvores podem também estar relacionadas à disponibilidade de luz solar e à composição do solo, associadas em parte às diferenças na declividade e elevação (UMEKI, 1995; KING, 1996; ROBERT; MORAIVE, 2003). Pode ocorrer, por exemplo, uma diminuição da drenagem do solo e de sua capacidade de retenção de água, devido a um aumento de escoamento superficial de água, material orgânico e nutrientes pelo solo com o aumento da declividade (OLIVEIRA-FILHO et al., 1994, 1998). Considerando sua distribuição numa determinada extensão de terreno, o aumento do ângulo médio de declividade corresponde a um aumento da anisotropia da luz. O padrão das copas das árvores observadas nas encostas, devido à assimetria na direção do declive (UMEKI 1995; ROBERT; MORAIVE, 2003), permite uma melhor penetração desta luz lateral no sub-bosque. Assim, as árvores de pequena a média dimensões podem obter mais luz sobre terrenos íngremes do que em declives suaves e investir menos no crescimento ou altura. Considerando-se árvores de grande porte, a maioria delas cresce para alcançar o dossel (25-30 m de altura) e, assim, beneficiar-se da luz direta, seja em encostas suaves ou íngremes. No caso do presente estudo, para as árvores de grande porte, a competição por recursos do solo (não restritos à fertilidade), os quais estão relacionados à topografia, mostrou-se superior à competição por luz. Em corroboração, o fator de iluminação solar médio anual, calculado a partir dos dados SRTM, variou de 0,57 a 0,60, ou seja, o recurso é farto e homogêneo por toda a área de estudo. Naturalmente, esta pequena amplitude de variação na luminosidade não mostrou-se correlacionada às diferenças na composição estrutural da área de estudo nas análises feitas neste trabalho. As diferenças de estrutura observadas, de modo geral entre os declives suaves e íngremes, mostraram-se independentemente dos dados de iluminação solar na expressão usada, referente ao total anual.

Dois fatores colaboram para a pouca variação do fator de iluminação anual: a topografia relativamente plana e a baixa latitude. O primeiro fator refere-se à possibilidade de variação na distribuição espacial, dada pelo relevo, independente da localidade. A baixa latitude corresponde a uma simetria de distribuição dos ângulos solares tal que a integração anual tende a resultar isotrópica, com uma situação média próxima ao nadir. Nesta situação, os fatores mensais de iluminação, por sua vez, são menos invariáveis, dadas as mudanças na

declinação solar ao longo do ano, que alteram a distribuição relativa de luz entre as vertentes que se inclinarem para o Norte e aquelas para o Sul. Variações mensais no fator de iluminação mensais podem ser associadas a dados florísticos (ou estruturais, se forem condicionados pela florística), desde que ocorram interações entre ciclos fenológicos específicos e variações sazonais expressivas na exposição solar. Estas aplicações dependem da variação devida ao relevo nas diferentes épocas do ano, evidentemente, e requerem a busca por modelos específicos a partir de 12 variáveis, por uma extensão de testes muito além do alcance do presente trabalho.

4.3 Relações entre a vegetação e dados de radar

4.3.1 Efeito da topografia na interação entre o sinal de radar e a vegetação

Para avaliar os efeitos da geomorfometria sobre dados de radar em áreas vegetadas foram realizadas algumas análises exploratórias sobre os dados estruturais e polarimétricos. Das 46 parcelas, foram selecionadas 30 e estas foram subdivididas conforme a sua localização em termos geomorfológicos, em 3 categorias: 10 parcelas em relevo plano, 10 em relevo ondulado (aqui também se insere o suave ondulado) e 10 em relevo forte ondulado (Figura 4.10).

Na Tabela 4.8 são apresentadas as médias dos parâmetros dendrométricos abertura do dossel (AD), diâmetro das árvores (DAP) e altura (HT) de cada categoria analisadas via ANOVA, com intervalos de confiança computados a 95%. Os valores médios registrados para os tratamentos apresentaram amplitude de variação de 14% para AD, 10,67 cm para o DAP e de 4,11 m para a HT. A ANOVA foi aplicada como forma verificar diferenças significativas entre as distribuições de cada variável estrutural correspondentes às condições topográficas (Figura 4.10). Os resultados da estatística F indicaram a ocorrência de médias de HT sem diferenças significativas ao nível de 5% ($p=0,065$). A análise mostrou que as variáveis estruturais AD e DAP, por sua vez, tiveram diferenças significativas ($p<0,05$).

As diferenças mínimas significativas do teste de *Tukey* (para $p<0,05$) confirmam algumas observações já discutidas na seção 4.2.2, como a menor abertura de dossel (AD) em áreas mais planas (Tabela 4.9). No que se refere à AD entre as classes de condições topográficas ondulada e forte ondulada, não houve diferenças consideráveis entre elas, que compõem um único grupo homogêneo. Com relação à variável DAP, a classe em relevo plano apresentou um maior valor médio, enquanto os terrenos ondulados e forte-ondulados não se

diferenciaram entre si. Os valores médios HT, por sua vez, não evidenciaram diferenças significativas entre as classes de relevo.

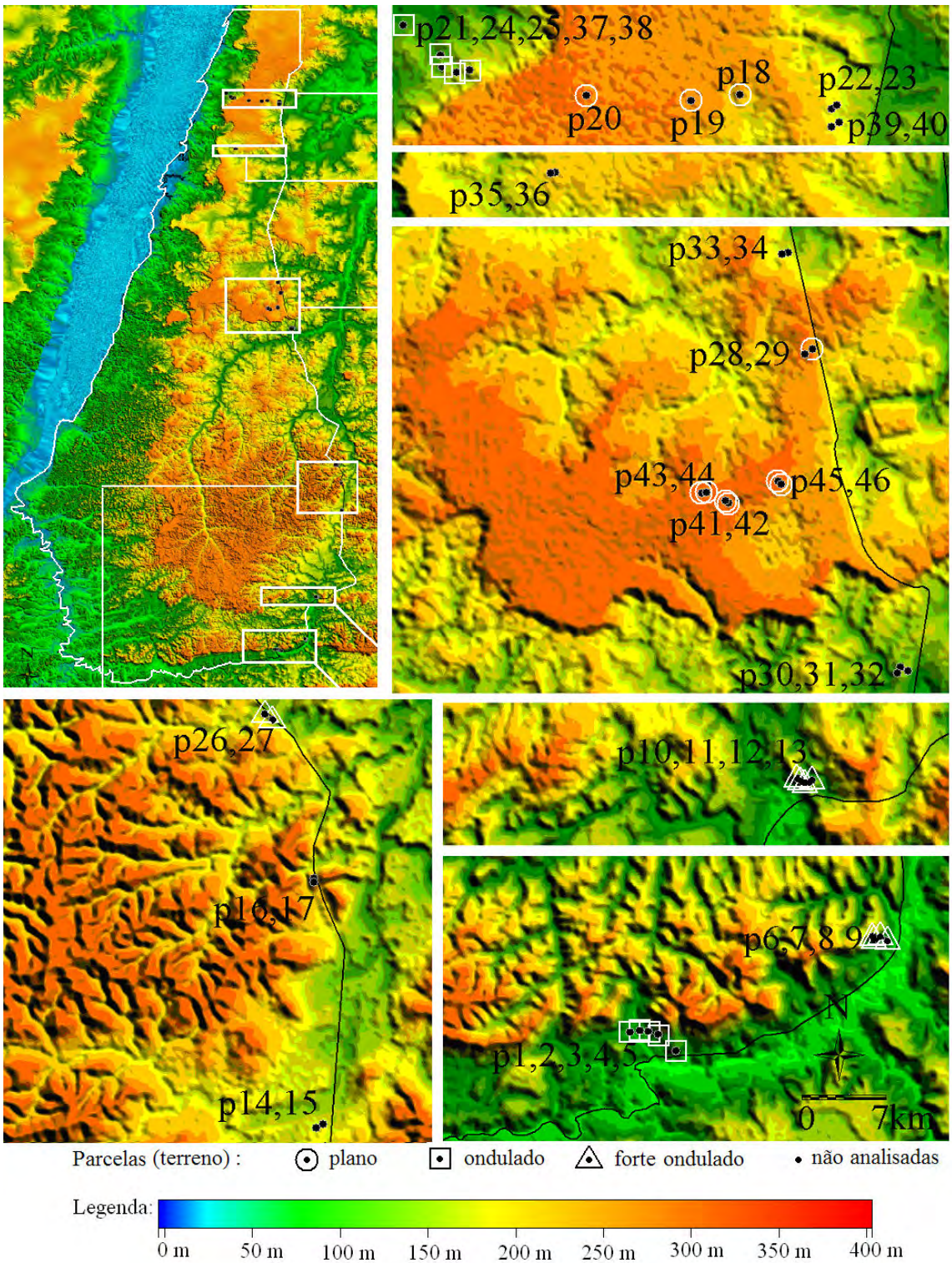

Figura 4.10 – Parcelas selecionadas por classe de relevo para as análises da relação entre dados de radar e de vegetação, nas diferentes condições topográficas.

Tabela 4.8 – Análise de variância (ANOVA) das variáveis estruturais considerando as três categorias do terreno.

	SS	*GL*	*MS*	*F*	*p*
AD					
Intercepto	1968,897	1	1968,897	175,2004	0,000000
Terreno	329,714	2	164,857	14,6696	0,000049
Erro	303,425	27	11,238		
DAP					
Intercepto	14913,29	1	14913,29	3686,940	0,000000
Terreno	146,32	2	73,16	18,087	0,000010
Erro	109,21	27	4,04		
HT					
Intercepto	8433,629	1	8433,629	5392,671	0,000000
Terreno	9,495	2	4,747	3,036	0,064690
Erro	42,225	27	1,564		

Tabela 4.9 – Teste de *Tukey* das variáveis estruturais considerando as três categorias do terreno.

AD			*AP*			*HT*		
plano	3,42613	a	plano	20,34803	a	ondulado	16,03024	a
ondulado	10,13330	b	ondulado	21,15564	a	plano	16,87409	a
f. ondulado	10,74425	b	f. ondulado	25,38419	b	f.ondulado	17,39565	a

(Teste de *Tukey*: uma mesma letra indica grupos indistintos para $\alpha = 0,05$)

As Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 mostram, respectivamente, as respostas polarimétricas e o comportamento da estrutura florestal, em 4 parcelas representativas de cada um dos 3 diferentes tipos de terreno (plano, ondulado e forte ondulado), com o número de árvores e a altura total (HT) por intervalo de classe diamétrica bem como os valores médios de abertura do dossel (AD) e de biomassa acima do solo por parcela (BM). Tais informações estruturais foram utilizadas para auxiliar na interpretação das respostas polarimétricas. Apesar de não terem sido registradas diferenças estatísticas significativas entre os valores médios de altura total (HT) entre as parcelas, as distribuições diamétricas sugerem a ocorrência de certa variabilidade nos padrões estruturais. As parcelas P20, P41, P42 e P43 foram as que apresentaram estrutura mais desenvolvida, consequentemente com maior biomassa, e com localização em áreas planas. A análise visual destes gráficos mostra uma distribuição diferencida das parcelas correspondentes às classes do terreno plano em relação às outras duas classes, reforçando os resultados encontrados na ANOVA e no teste *Tukey*.

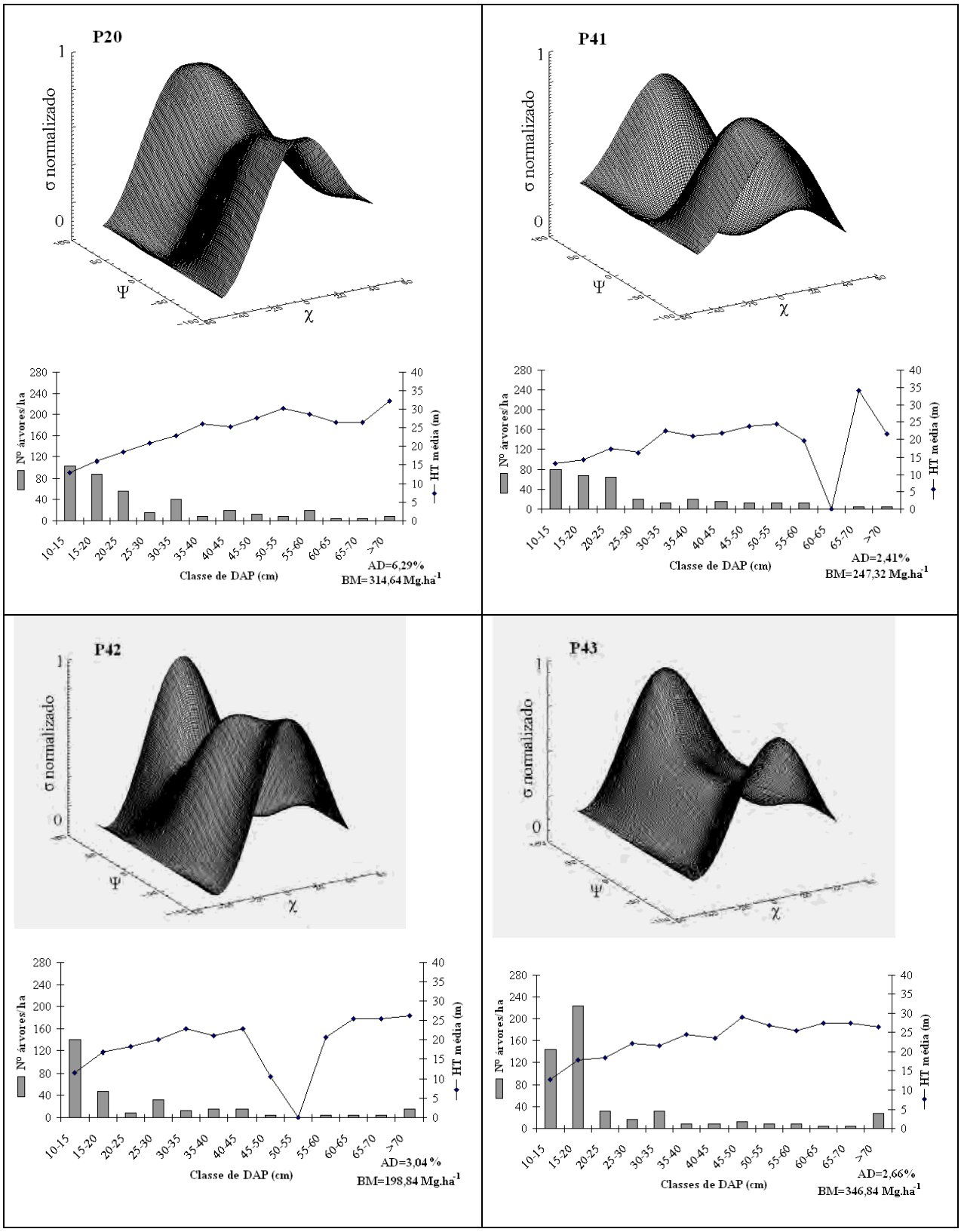

Figura 4.11 – Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando os valores correspondentes aos parâmetros dendrométricos e de biomassa para as parcelas localizadas em terreno plano na região do Tapajós.

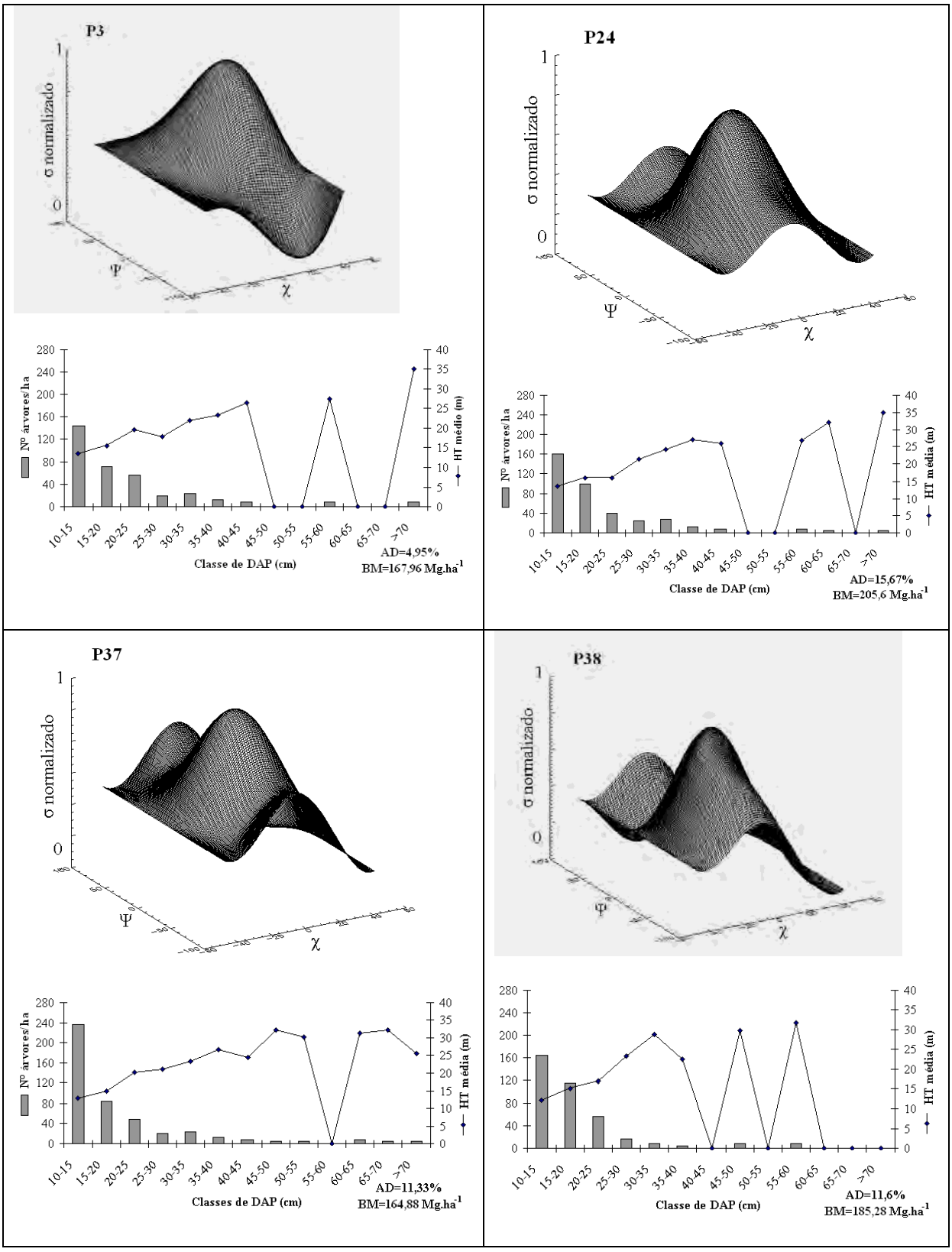

Figura 4.12– Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando os valores correspondentes aos parâmetros dendrométricos e de biomassa para as parcelas localizadas em terreno ondulado na região do Tapajós.

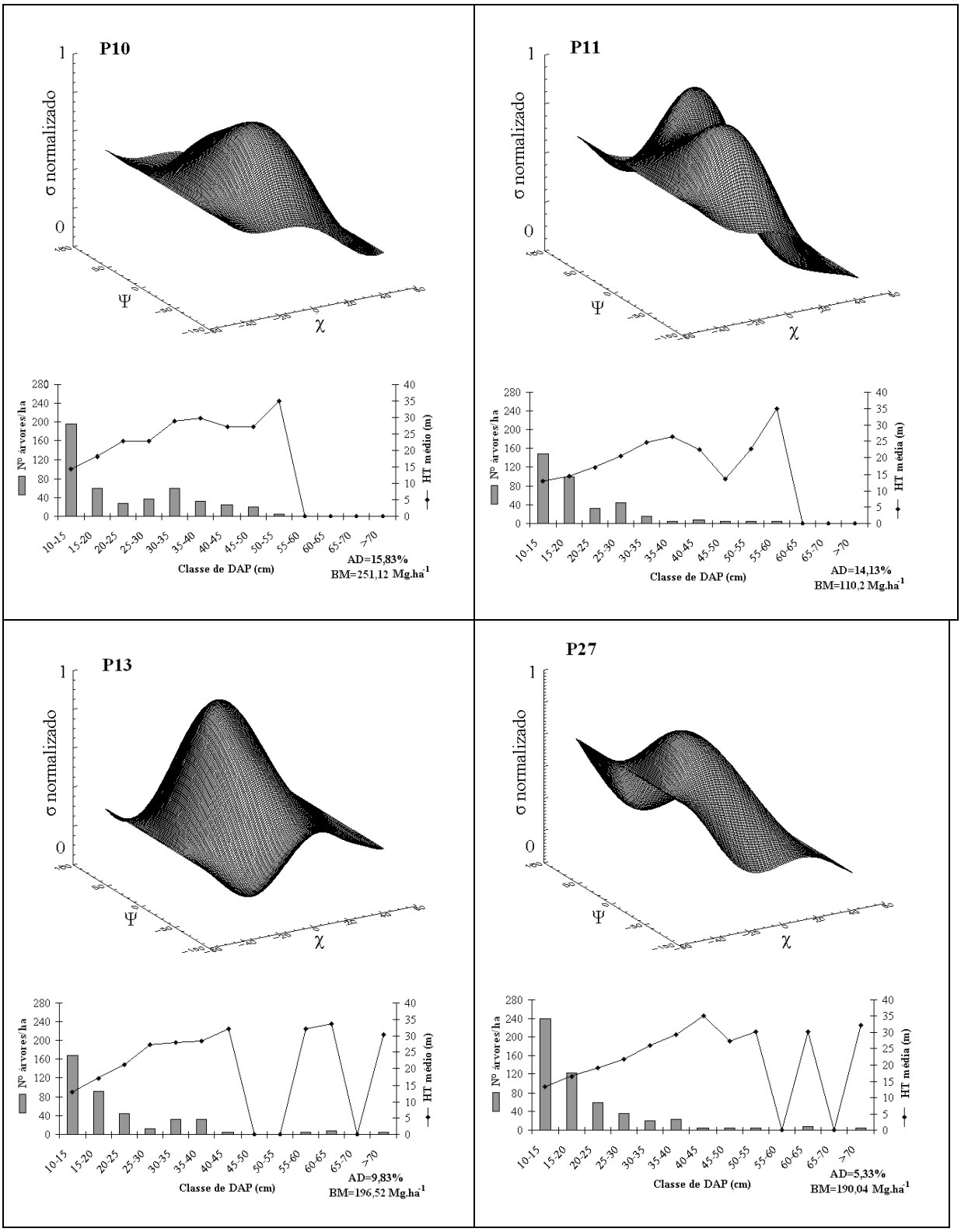

Figura 4.13 – Resposta de polarização em banda L (ALOS/PALSAR) e comportamento estrutural da tipologia florestal, mostrando os valores correspondentes aos parâmetros dendrométricos e de biomassa para as parcelas localizadas em terreno forte ondulado na região do Tapajós.

As configurações polarimétricas de determinado alvo não constituem "assinaturas" invariáveis, pois tais respostas dependem, além de uma série de fatores intrínsecos desses alvos, de fatores externos a ele interligados no processo de ocorrência geográfica e ambiental. Nas áreas florestais em terrenos planos (Figura 4.11), a maioria das parcelas se comportou com alta resposta na polarização VV (P20, P41, P42 e P43). Estas unidades florestais apresentaram os maiores valores de σ em polarizações lineares ($\chi = 0°$), com orientação preferencialmente vertical ($\psi = \pm 90°$). O formato desta resposta de polarização mostra uma forte similaridade com a resposta teórica de cilindros condutores finos e curtos (por exemplo, elementos espalhadores de menores dimensões do que o comprimento de onda). Aliado a isso tais parcelas possuem dossel mais fechado (em torno de 3% de AD) e maior valor de biomassa aérea, isto sugere que o espalhamento por pequenos galhos orientados verticalmente é uma importante contribuição para o retroespalhamento total desta unidade, conforme relatado em estudos de Gonçalves, (2007).

Como síntese dessas observações, nas áreas planas não houve variações muito bruscas no que se refere à altura do pedestal das respostas polarimétricas. A altura do pedestal é definida pelo valor mínimo do gráfico da resposta polarimétrica, visível nas representações das respostas polarimétricas (Figura 2.5 da seção 2.5). Evans et al. (1988) descrevem o incremento no pedestal segundo o aumento do conteúdo de vegetação entre as classes agricultura e floresta. Este valor define a proporção de radiação despolarizada, associada por Gonçalves (2007) à composição florística de uma floresta tropical, em estudo com banda L PALSAR, em que a variação de diversidade florística apresentou influência na altura do pedestal. No caso do presente estudo, houve um comportamento característico de áreas de floresta com alta densidade de elementos que promovem espalhamento múltiplo e/ou de terrenos movimentados, como esperado.

No que se refere às amostras florestais de terrenos ondulados (Figura 4.12), as respostas de polarização das unidades P3, P24, P37 e P38 indicaram que os maiores valores de retroespalhamento (σ) ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0°$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0°$). Embora este comportamento sugira um efeito direto da topografia, através da distribuição dos ângulos de incidência na superfície do terreno (efeito cosseno), pode ser também devido a dosséis com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Esta resposta é similar àquelas apresentadas pela teoria para refletores de cantos triédricos, os quais possuem uma geometria de espalhamento do tipo *double bounce*,

em que a entrada do refletor está alinhada com a direção de propagação da radiação eletromagnética, como mencionado em Zebker e Norikane (1987). Mantida esta hipótese, este comportamento pode se explicar pelo fato de estas amostras possuírem uma maior abertura do dossel, como corroboram os dados levantados (em torno de 11%). Apesar de haver uma contribuição do espalhamento proveniente de múltiplas interações dos elementos espalhadores com orientação preferencialmente horizontal, o espalhamento do tipo *double bounce* (interação solo-tronco) se deve nesse caso às condições estruturais indicativas de um dossel mais aberto, de acordo com o mecanismo predominante. Há de considerar também a maior altura do pedestal de certas amostras tais como P37, P38 e P24. De acordo com Zebker e Van Zyl (1991), isto sugere a ocorrência de uma variação considerável das propriedades de espalhamento em elementos de resolução adjacentes, ou seja, de um indicador da presença de um componente de espalhamento não polarizado (despolarização). De acordo com McNairn et al. (2002), a despolarização é a mudança no grau de polarização de uma onda totalmente ou parcialmente polarizada, resultando em um aumento (despolarização negativa) ou decréscimo (despolarização positiva) na componente não polarizada da onda.

A maior altura do pedestal destas últimas unidades amostrais citadas pode ser explicada em parte pela maior densidade de indivíduos (aproximadamente 400 ind/ha), conforme relatada por Evans et al. (1988), assim como pelas condições de relevo que, embora não tenha uma variação considerável, mostrou-se suficiente para permitir alguma despolarização do sinal.

Finalmente, as respostas polarimétricas da floresta nos terrenos forte ondulados (Figura 4.13) apresentaram uma maior variação do que as outras duas classes anteriormente discutidas. As parcelas P27, P11, P13 e P10 apresentaram comportamento similar entre si e indicam que os maiores valores de retroespalhamento (σ) ocorreram em polarizações lineares ($\chi = 0°$), com orientação preferencialmente horizontal ($\psi = 0°$), de acordo com o que descrevem Zebker e Norikane (1987). Tais autores mencionam que o espalhamento se deve a múltiplas interações dos elementos espalhadores com orientação preferencialmente horizontal (dossel florestal homogêneo), conjuntamente com setores da cobertura florestal onde o espalhamento é do tipo *double bounce* (interação solo-tronco), oriundo da abertura do dossel (em média 13% nestas parcelas). Neste caso, é oportuno lembrar, como possível efeito sobre esta resposta, aquela decorrente da despolarização (identificada devido à altura do pedestal na resposta polarimétrica mais elevada), comum em terrenos movimentados. Aliado a isso, a considerável altura do pedestal encontrada para os casos aqui observados sugerem, de acordo com Zebker e

Van Zyl (1991), a ocorrência de uma variação expressiva das propriedades de espalhamento em elementos da imagem, ou seja, de um indicador da presença de um componente de espalhamento não polarizado, teoricamente. Esta mudança do estado de polarização conhecida como despolarização é causada principalmente pelo espalhamento múltiplo devido à rugosidade da superfície e à interação volumétrica com o alvo. Uma vez interagindo com o alvo, a onda eletromagnética incidente pode ser despolarizada e/ou repolarizada.

Em síntese, as configurações polarimétricas da tipologia florestal estudada não seguiram um padrão típico intra- e inter-classes de relevo. Os resultados apresentados nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 mostram que existem certas variações nas respostas polarimétricas entre as classes de relevo relacionadas a um conjunto de mecanismo de espalhamento, sobretudo volumétrico, predominante em floresta primária, bem como à despolarização provocada pela variação do relevo. Aliado a isso, estes resultados corroboram aqueles de Rauste (1991), que estudou dados SAR de banda P, de penetrabilidade na floresta comparável à da banda L, pelo qual conclui que o efeito do relevo é forte e expressivo nos canais co-polarizados.

A partir das diferentes respostas polarimétricas obtidas para a maioria das amostras que são representativas da variabilidade da paisagem estudada, foi possível constatar que o comportamento do retroespalhamento decorre de variações sutis na estrutura do dossel. Essas variações resultam do arranjo espacial das árvores, da estrutura vertical que definem os vários estratos e de seus adensamentos, que projetam distintas variações na abertura do dossel, além da densidade e dimensão dos indivíduos arbóreos e demais aspectos da estrutura das copas das árvores. Tais aspectos, essencialmente estruturais, são também reflexo da complexidade florística da floresta tropical, cuja composição afeta indiretamente o sinal da banda L retroespalhado ao sensor radar.

Aliada à análise das respostas polarimétricas, outra análise buscou identificar os mecanismos de espalhamento dominantes em cada uma das classes de relevo. Cloude e Pottier (1997) propuseram um esquema de classificação não supervisionada baseado no uso do plano em 3-D (entropia, anisotropia, ângulo alfa), utilizado para extrair parâmetros médios de dados experimentais com um algoritmo de suavização baseado em estatística de segunda ordem (matriz de coerência), conforme relatado e empregado por Narvaes (2010). Este método, empregado também na presente pesquisa, permitiu identificar os mecanismos de espalhamento dos alvos florestais nas 3 diferentes classes de relevo. A distribuição dos pixels de cada categoria florestal nas distintas condições de relevo, derivadas das amostras

estabelecidas em campo e identificadas nas imagens PALSAR, foram plotados no espaço de classificação bidimensional (Figura 4.14). Nestes gráficos, observa-se que a distribuição da maior parte dos pixels ocorreu na zona Z2 (cerca de 88,5 %). Isto indica que para estas unidades os processos de espalhamento predominante são os de alta entropia, ocasionado pelo espalhamento da vegetação com espalhadores anisotrópicos aleatórios (CLOUDE; POTTIER, 1997; LEE; POTTIER, 2009).

Sobrepostos ao diagrama elaborado por Cloude e Pottier (1997) os dados de espalhamento resultantes do presente trabalho (Figura 4.14) mostram que não houve diferenças signifnificativas entre as três categorias de relevo, exceto uma sutil diferença entre as amostras florestais localizadas em relevo fortemente ondulado. O comportamento polarimétrico destas amostras se concentrou um pouco mais nas zonas 2 e 5, indicando um mecanismo regido por espalhamento múltiplo e volumétrico.

Segundo Lee e Pottier (2009), o espalhamento volumétrico de alta entropia ocorre quando $\alpha = 45°$ e $H > 0.9$ (zona Z2). Esse comportamento é proveniente de uma nuvem de partículas curtas anisotrópicas ou do espalhamento múltiplo de uma nuvem de partículas de baixa perda simétrica. Cloude e Pottier (1997) e Lee e Pottier (2009), afirmam que este espalhamento pode ser devido aos dosséis florestais ou da dispersão de alguns tipos de superfícies vegetadas com elementos de espalhamento anisotrópicos aleatórios, especialmente galhos. Nota-se que para cada zona supracitada as proporções de pixels foram similares em todos os casos para as 3 tipologias analisadas. Entretanto, as unidades de plano e intermediário apresentaram uma percentagem de pixels na zona Z5. De acordo com Cloude e Pottier (1997) e Lee e Pottier (2009), a Z5 é referente ao mecanismo de espalhamento dominante do tipo dipolo. Tal zona inclui o espalhamento de superfícies vegetadas, com espalhadores anisotrópicos com correlação moderada relacionada à orientação dos espalhadores. Este comportamento indicou que há em todas as unidades os espalhamentos de entropia média, com independência da estrutura florestal e da composição florística, também importantes na definição dos processos predominantes de espalhamento.

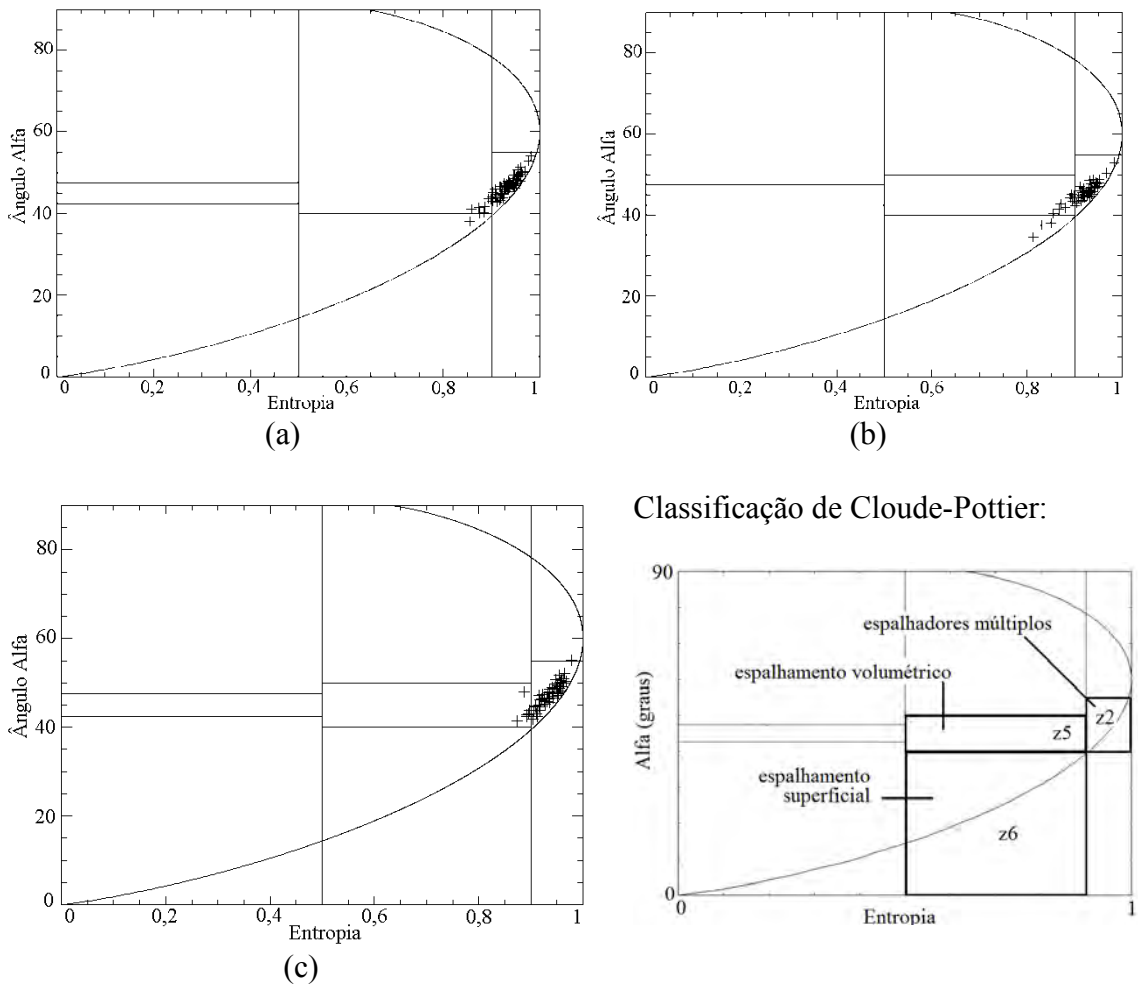

Figura 4.14 – Distribuição dos pixels no espaço de classificação bidimensional (H, $\overline{\alpha}$) para as categorias de terreno analisadas: (a) plano, (b) ondulado e (c) forte ondulado. Para interpretação vide a seção 2.4, na qual se tem as zonas do espaço de classificação bidimensional (H, $\overline{\alpha}$).

Todas as unidades amostrais apresentaram a maior porcentagem dos pixels na zona Z2. A importância percentual das demais zonas foi observada, respectivamente, nas zonas Z5 e Z6. Além disso, para as unidades de plano e intermediário a zona Z6 também apresentou uma pequena percentagem de pixels, indicando que para esta tipologia esta zona reflete o aumento na H devido a mudanças na rugosidade da superfície de espalhamento e devido aos efeitos de propagação da copa. Este comportamento diferenciado pode ser explicado pela estratificação da floresta em dois estratos bem homogêneos, geralmente, com estruturas de orientação preferencialmente horizontais. O comportamento do dossel florestal para esta tipologia menos avançada do ponto de vista estrutural pode ter acarretado o aumento dos valores de entropia entre 0,6 e 0,7, já que, de acordo com Lee e Pottier (2009), este comportamento é conseqüência de uma cobertura da superfície que compreende espalhadores elipsoidais

achatados nos pólos, como por exemplo, folhas. Complementarmente, para esta zona (Z6) Cloude e Pottier (1997) mostram que este tipo de comportamento é representado pelo mecanismo de espalhamento do tipo superficial, onde neste tipo de espalhamento os valores elevados de entropia resultam da heterogeneidade observada nos dosséis florestais.

Os testes de comparação de médias, empregados na detecção de diferenças entre as classificações, indicaram que não houve diferença significativa entre as classificações de plano, ondulado e forte ondulado ao nível de significância de 5%. Gonçalves (2007) também não encontrou estas diferenças ao estudar exclusivamente áreas de floresta com exploração madeireira na Floresta Nacional do Tapajós, em variadas condições de impacto.

4.3.2 Modelagem da biomassa com dados polarimétricos e geomorfométricos

A modelagem de biomassa tem exercido papel de fundamental importância na quantificação da produção florestal e em especial em pesquisas relacionadas às mudanças climáticas globais, uma vez que é um dos principais parâmetros nos modelos de estimativa de fluxo de carbono (BROWN et al., 1993). A dificuldade de determinar a biomassa de cada árvore pelo método direto (pesagem de todas as árvores que ocorrem em parcelas fixas, fornecendo estimativas) ao executar um inventário florestal é uma questão reconhecida pelos pesquisadores. Portanto, o recurso da análise de regressão para o desenvolvimento de modelos estatísticos para estimar a biomassa florestal é uma alternativa importante de uso corrente (SILVA, 2007) para estimativas em escalas geográficas. Aliado a isso, nos últimos anos tem se intensificado o uso de dados remotos polarimétricos SAR dentro de tal abordagem, que representam uma perspectiva para estimar a biomassa florestal em grandes extensões territoriais (DOBSON et al., 1992; SANTOS et al., 2003; SAATCHI et al., 2007; GONÇALVES, 2007; NARVAES, 2011; SAATCHI et al., 2011). Entretanto, em sua grande maioria, estes estudos se restringem a áreas de terrenos planos.

Para o presente estudo, no qual se procurou amostrar dados em diversas condições do terreno (de plano a forte ondulado), a análise exploratória dos dados estruturais, respostas polarimétricas e mecanismos de espalhamento permitiram que fossem verificadas estruturas de correlações entre os dados, que confirmam o efeito da topografia sobre o sinal SAR. As análises sugerem a despolarização da onda eletromagnética pelas mudanças de exposição da superfície do terreno, porém não se deve descartar a distribuição do ângulo de incidência dada pelo relevo, como possíveis fontes de erro na classificação dos alvos. Diante disso, como

tentativa de controlar ou reduzir o segundo efeito da topografia, foi calculado o (fator) cosseno da incidência das ondas radar sobre o terreno. Foram calculados modelos de regressão das variáveis polarimétricas em função deste fator, para obtenção dos resíduos que, teoricamente, seriam dados polarimétricos ajustados a independer deste efeito, como novos estimadores da biomassa florestal acima do solo. Assim, foram construídos 3 modelos (modelo 1, modelo 2 e modelo 3) de regressão para estimativa da biomassa: com os dados polarimétricos originais (Tabela 4.10), com os dados polarimétricos ajustados pelo fator cosseno (Tabela 4.11) e com os dados polarimétricos integrados aos dados geomorfométricos (Tabela 4.13). No Apêndice C, encontra-se a tabela de correlação entre as variáveis polarimétricas. As variáveis com correlação acima de 70% (Tabela 1) foram eliminadas da análise para se evitar a multicolinearidade dos dados na modelagem da biomassa.

A Tabela 4.10 mostra os resultados da estimativa da biomassa a partir das variáveis polarimétricas selecionadas. Todas as variáveis selecionadas nessa modelagem estão relacionadas negativamente com a biomassa, exceto a entropia (*H*). A entropia é um dos componentes extraídos da decomposição de Cloude e Pottier (1997), que indica o grau de aleatoriedade da distribuição dos mecanismos de espalhamento. Considerando que os valores de entropia apresentaram-se altos (próximos ou iguais a 1), pode-se afirmar que os auto-valores da matriz de coerência são quase todos iguais, numa indicação de espalhamento do tipo "ruído aleatório" que despolariza completamente a onda incidente. O fato de a entropia mostrar-se relacionada positivamente com a biomassa indica que a despolarização da onda pode ser devido à aleatoriedade dos elementos florestais, mas também existe a possibilidade de parte desta despolarização ser devido ao efeito direto da topografia (CLOUDE; POTTIER, 1997). A anisotropia (*An*), por sua vez, indica a importância relativa dos mecanismos de espalhamento secundários, sendo mais representativo quando ocorre média entropia. Para alta entropia, como no presente trabalho, a anisotropia não traz nenhuma informação adicional, uma vez que os auto-valores são aproximadamente iguais (CLOUDE; POTTIER, 1997).

A helicidade (τ_m) expressa o grau de simetria de espalhamento do alvo, separando espalhadores simétricos de assimétricos, dado o mesmo tipo de espalhamento α de Cloude. No presente estudo, a heleticidadade correlacionada negativamente com a biomassa indica que, quanto maior for a biomassa, mais o espalhamento do tipo hélice estará orientado à direita (TOUZI et al., 2007).

Tabela 4.10 – Estimativa da biomassa a partir das variáveis polarimétricas selecionadas (*τ_m1:* primeira componente da helicidade de Touzi; α*_s1:* primeira componente da magnitude de Touzi*; H:* Entropia*; An:* Anisotropia)

Variável	β	SE	t	p	VIF
Constante	-191,8	398,8	-0,48	0,635	
τ_m1	-10,595	5,687	-1,86	0,074	1,0
α_s1	-11,562	3,648	-3,17	0,004	1,1
H	634,6	410,4	1,55	0,135	1,1
An	-463,9	233,0	-1,99	0,057	1,2
S = 59,5062 R-Sq = 44,7% R-Sq(adj) = 35,9%, PRESS = 126644 R-Sq(pred) = 20,92% p=0,004					

Modelo 1: BM = – 191,8 – 10,595 *τ_m1* – 11,562 *α_s1* + 634,6 *H* – 463,9 *An*

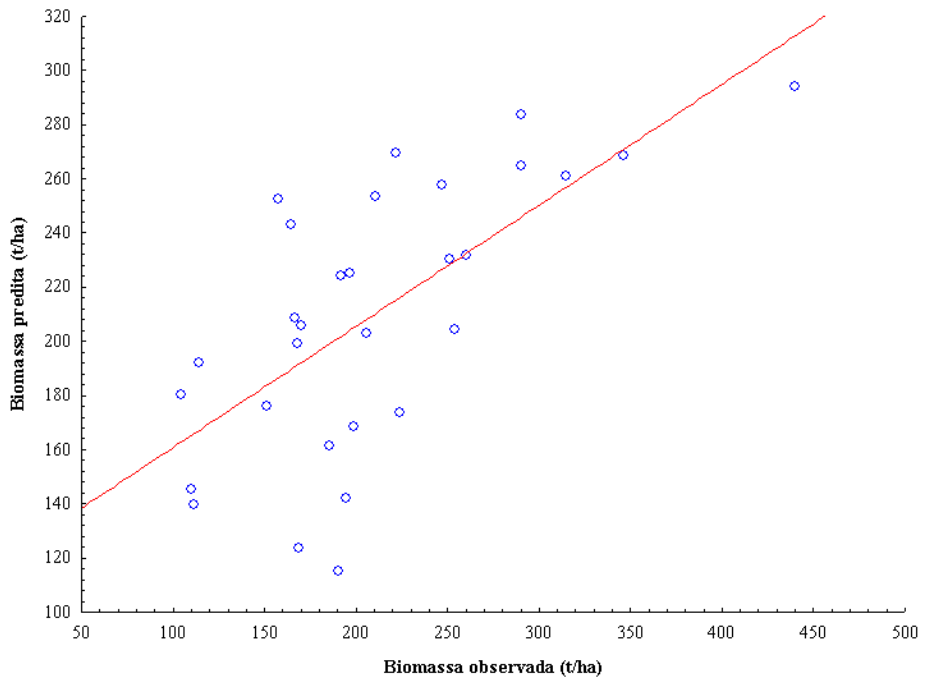

Figura 4.15 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 1

A magnitude de Touzi (*α_si*) é um parâmetro que expressa a magnitude do tipo de simetria referente ao tipo de espalhamento do alvo (considerado complementar ao ângulo *α* de Cloude). Os resultados mostraram a magnitude correlacionada negativamente com a biomassa, portanto os espalhamentos tendem a ser dos tipos *single bounce* e múltiplo. Os valores mais baixos da magnitude (*α_si* = 0) indicam o que o alvo é simétrico e o espalhamento é considerado do tipo direto (*single bounce*), enquanto que valores intermediários (*α_si* = π/4) indicam que o alvo apresenta assimetria de 45° em relação a interação com o alvo, considerada do tipo múltiplo.

Tais variáveis foram as mais significativas na estimativa de biomassa, embora o valor de R^2 tenha sido pequeno, de 35,9%, sendo a biomassa total observada de 210,02 $Mg.ha^{-1}$, desvio padrão de ±74,31 $Mg.ha^{-1}$ e o RMSE (raiz quadrada do erro quadrático médio) de 54,32 $Mg.ha^{-1}$, ou seja 25,86 % de RMSE em relação à média de biomassa observada (Figura 4.15).

A seleção destas variáveis no modelo acima é diversa comparativamente a outros trabalhos já realizados nesta área de estudo, nos quais foram analisados dados polarimétricos para a estimativa da biomassa em áreas de exploração madeireira (GONÇALVES, 2007) e em áreas de vegetação secundária em diferentes estágios sucessionais (NARVAES 2010), todos situados em terrenos planos. Uma possível explicação para este fato está na despolarização do sinal de radar em áreas com relevo de suave ondulado a forte ondulado, o que corrobora com Lee et al. (2004). Segundo estes autores, algumas técnicas de decomposição de alvos, como a decomposição de Freeman-Durden, por exemplo, apresentam algumas limitações, uma delas relacionada com uma condição de reflexão simétrica, que limita a sua aplicação para terrenos planos. As superfícies muito rugosas podem causar uma despolarização significante no sinal do radar, produzindo altos níveis de polarização cruzada, com espalhamento volumétrico, especialmente para os radares de alta frequência, como as bandas X e C. Com isso, uma superfície com relevo de suave ondulado a forte ondulado com ausência de vegetação, por exemplo, poderia ser erroneamente classificada como vegetação. Existem poucos estudos que analisam os efeitos do relevo no sinal do radar em áreas vegetadas (VAN ZYL, 1993; LUCKMAN, 1998; PARK; YAMAGUCHI, 2011), mas estes estudos mostram que, mesmo em áreas com pouca rugosidade no relevo, o sinal do radar sofre alterações significativas, podendo afetar, por exemplo, estimativas de biomassa através de procedimentos de modelagem SAR, como as do presente estudo.

Apesar da aparente homogeneidade de certas florestas nativas, o arranjo espacial da densidade de biomassa florestal não é constante. Segundo Luckman (1998), a topografia é um dos principais fatores que afetam esta heterogeneidade, mostrando, por exemplo, em um estudo realizado na Inglaterra que a biomassa variou entre diferentes condições, sendo observadas 40 $Mg.ha^{-1}$ (toneladas por hectare) em áreas planas sujeitas a alagamentos e até 220 $Mg.ha^{-1}$ para áreas localizadas em encostas suaves. No presente estudo, a biomassa variou de na ordem de 200 t /ha entre terreno plano e forte ondulado. Como a densidade da biomassa florestal tem uma forte influência no retroespalhamento radar (VAN ZYL, 1993; LUCKMAN, 1998), o efeito indireto da topografia sobre a avaliação de crescimento dessa biomassa deve, assim, ser

considerado na análise de retroespalhamento do radar. Qualquer variação de retroespalhamento com topografia deve ser devido a uma combinação de seus efeitos sobre o crescimento da árvore e também, dos mecanismos de espalhamento radar (LUCKMAN, 1998).

A Figura 4.16 apresenta os valores de fator cosseno correpondente à geometria de aquisição dos dados de radar deste estudo nas 30 parcelas inventarias. Nota-se que a amplitude de variação desta variável para a área de estudo é muito pequena, de 0,16, numa escala que vai de 0,0 a 1,0. Para avaliar se esta variação afetou os dados, foi realizada a regressão linear simples entre cada um dos atributos SAR como variáveis dependentes e o fator cosseno como variável independente.

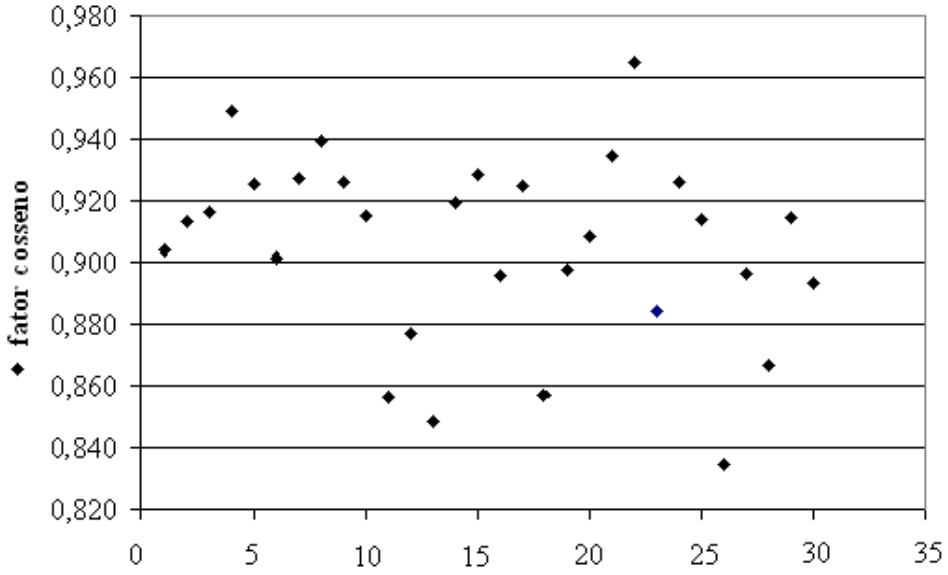

Figura 4.16 – Dispersão dos valores do fator cosseno entre as parcelas.

A análise de regressão a partir do ajuste do fator cosseno nas variáveis (Tabela 4.11), não indicou a necessidade de alterações no conjunto de variáveis promissoras para o modelo, dado que foram as mesmas obtidas sem o ajuste. Entretanto, houve uma piora na qualidade da estimativa, de acordo com os valores de R^2 e de p (17,8 % e 0,062 respectivamente). O mesmo se refere ao RMSE, de 61,48 $Mg.ha^{-1}$, ou 29,27% em relação a média da biomassa observada (Figura 4.17), considerando a biomassa total observada de 210,02 $Mg.ha^{-1}$ e desvio padrão de ±74,31 $Mg.ha^{-1}$.

Tabela 4.11 – Estimativa da biomassa a partir das variáveis polarimétricas selecionadas ajustadas (*τ_m1:*primeira componente da helicidade de Touzi; α*_s1:* primeira componente da magnitude de Touzi*; H:* Entropia*; An:* Anisotropia)

Variável	***β***	***SE***	***t***	***p***	***VIF***
Constante	210,02	12,30	17,08	0,000	
τ_m1	-10,920	6,481	-1,68	0,104	1,0
α_s1	-10,796	4,625	-2,33	0,028	1,4
H	673,8	477,2	1,41	0,170	1,0
An	-326,8	285,5	-1.14	0,263	1,4
S = 67.3538 R-Sq = 29.2% R-Sq(adj) = 17.8%. PRESS = 158213 R-Sq(pred) = 1.20% p=0,062					

Modelo 2: BM = 210,02 – 10,920 *τ_m1* – 10,796 *α_s1* + 673,8 *H* – 326,8 *An*

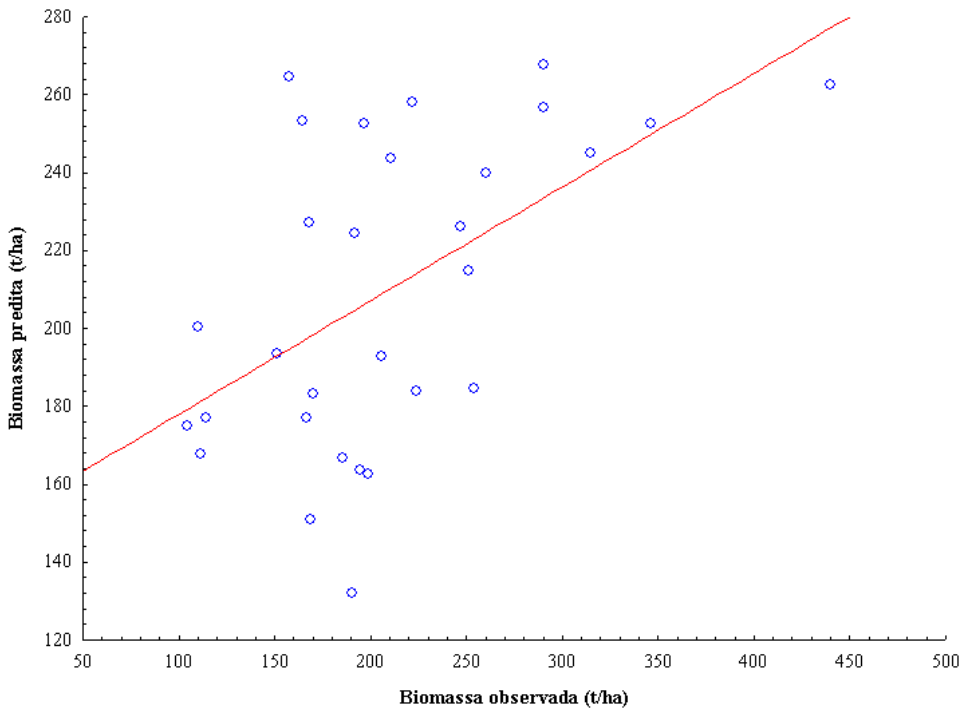

Figura 4.17 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 2

Uma possível explicação para tais resultados indicam que, em área com baixa amplitude de variação, os valores de fator cosseno gerados não variaram de modo significativo em virtude do ângulo azimutal e o ângulo de incidência do sensor. A condição prevalecente na Amazônia, de relevo baixo e intenso efeito dossel pela cobertura florestal, é reconhecida como desfavorável para extração de informações direcionais, sobretudo dos dados SRTM (VALERIANO, 2008). Muitos dos ângulos calculados deste MDE vêm do efeito da topografia de dossel – rigorosamente, a topografia do nível médio de fase – devido à aquisição desses dados na banda C. Outra explicação intrínseca aos dados baseia-se nas

diferenças de detalhamento (~25m), maior nos dados polarimétricos, cujas variações ocorrem dentro de um único elemento de aquisição da elevação (~90m) e posterior cálculo das derivações. A partir deste mecanismo específico, o ajuste proposto inseriu uma fonte de variância independente do efeito topográfico que vigora de fato sobre os dados polarimétricos originais. Coerentemente, os coeficientes de determinação dos dados polarimétricos em relação ao efeito cosseno variaram de -0,03 a 0,28. Apesar de todas essas limitações, não se deve descartar que em áreas com grandes amplitudes de variação topográfica, terrenos montanhosos, este método deve ser considerado para redução do efeito da topografia sobre o sinal do SAR para aplicações diversas, mesmo que estas sejam em áreas florestais e com dados SRTM.

Diante dos resultados anteriores, foi realizada uma análise de regressão entre as variáveis geomorfométricas e a biomassa para identificar as mais importantes na estimativa da biomassa (Tabela 4.12). Considerando esta análise, a biomassa total observada e seu desvio padrão foram respectivamente 210,02 $Mg.ha^{-1}$ e ±74,31 $Mg.ha^{-1}$, e o erro associado 45,80 $Mg.ha^{-1}$, isto é , 21,80% de RMSE em relação a média observada de biomassa (Figura 4.18). As variáveis elevação (*h*) e declividade (*G*) mostraram-se as mais significativas, e foram, portanto integradas aos dados polarimétricos em uma nova análise de regressão.

Tabela 4.12 – Regressão entre a biomassa e a geomorfometria. (h: *elevação*; G: *declividade*)

Variável	***β***	***SE***	***t***	***p***	***VIF***
Constante	-19,67	40,37	-0,49	0,630	
h	1,3467	0,2086	6,46	0,000	1,1
G	3,053	1,502	2,03	0,052	1,1
S = 48.2827 R-Sq = 60.7% R-Sq(adj) = 57.8% PRESS = 80090.9 R-Sq(pred) = 49.99%					

$$BM = -19{,}67 + 1{,}3467\,h + 3{,}053\,G$$

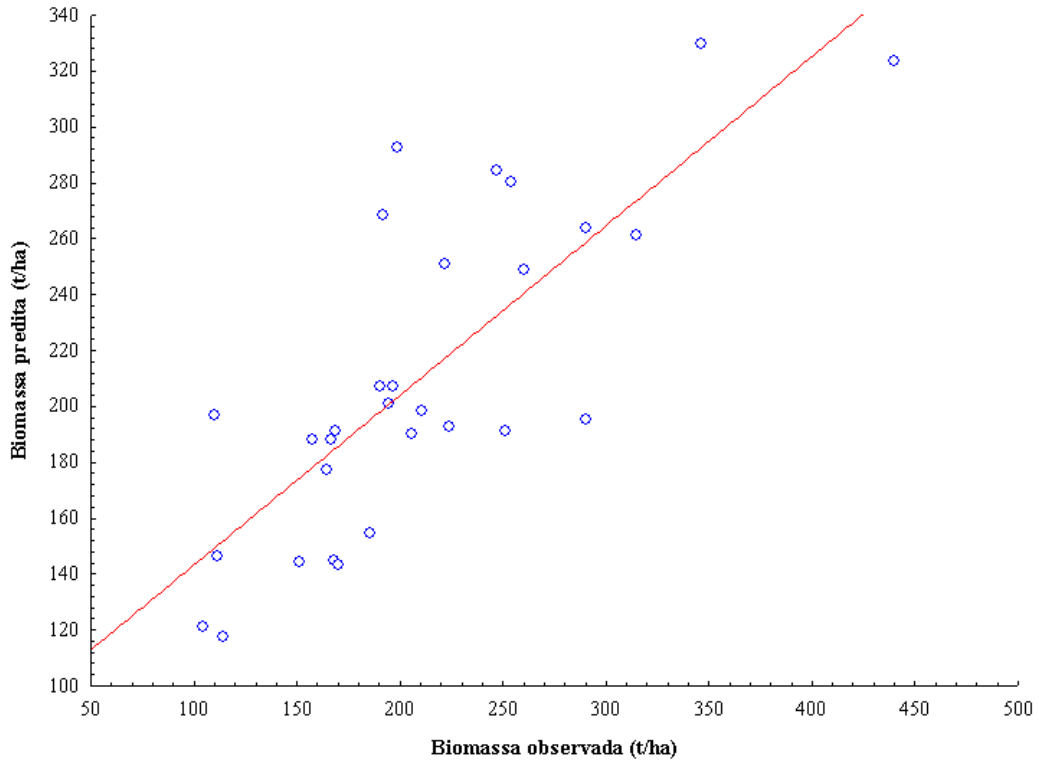

Figura 4.18 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo relacionando geomorfometria local e biomassa.

O modelo gerado com dados de radar e geomorfométricos (Tabela 4.13) mostrou uma expressiva melhora no R^2 (74%), em relação aos modelos geomorfométricos e polarimétricos isolados, que apresentaram coeficientes de 57% (Tabela 4.12 e Figura 4.18) e 35% (Tabela 4.11 e Figura 4.17), respectivamente. As variáveis topográficas incluídas na nova regressão para a geração do modelo de estimativa de biomassa foram *h* e *G*. As varáveis SAR que mais explicavam a variação da biomassa foram *τ_m3* e *Pv*, ambas correlacionadas positivamente com a biomassa, e o *τ_m1* e a *An*, correlacionados negativamente.

A anisotropia (*An*) apresentando forte correlação negativa com a biomassa indica a presença de mecanismos de espalhamento secundários. Garestier et al. (2009) estudaram a resposta polarimétrica os dados de radar aetrotransportados, em bandas L e P, considerando diferentes alturas das camadas da floresta Avnei (Landes, França), para estimar os parâmetros biofísicos da floresta. Os resultados mostraram que anisotropia apresenta alta correlação negativa com a distribuição da altura da floresta. Esses autores comentam acerca da necessidade de estudos mais detalhados em outras tipologias florestais, inclusive, em áreas distintas de relevo. Este fato corrobora com o presente estudo em que a anisotropia esteve negativamente correlacionada com a biomassa. A biomassa total observada é de 210,02 t/ha com desvio

padrão de ±74,31 t/ha. O modelo apresentou um erro de 33,15 t/h, ou seja de 15,78% de erro em relação a média de biomassa observada (Figura 4.19).

Tabela 4.13 – Estimativa da biomassa das variáveis polarimétricas e geomorfométricas.(*Pv:* espalhamento volumétrico*; An:* Anisotropia; h: *elevação*; G: *declividade*; *τ_m1:*primeira componente da helicidade de Touzi;*τ_m3:*terceira componente da helicidade de Touzi;)

Variável	***β***	***SE***	***t***	***p***	***VIF***
Constante	31,11	39,48	0,79	0,439	
Pv	142,01	83,96	1,69	0,104	1,5
An	-598,3	161,7	-3,70	0,001	1,5
h	1,4635	0,1728	8,47	0,000	1,3
G	3,350	1,206	2,78	0,011	1,2
τ_m3	0,4288	0,2545	1,68	0,106	1,1
τ_m1	-9,478	3,723	-2,55	0,018	1,1
S=37.8613, R-Sq=79.4%, R-Sq(adj)=74.0%. PRESS=71595.9 R-Sq(pred)=55.29% p=0,000.					

Modelo 3 = 31,11 + 142,01 *Pv* – 598,3 *An* + 1,465 *h* + 3,35 *G* + 0,4288 *τ_m3* – 9,478 *τ_m1*

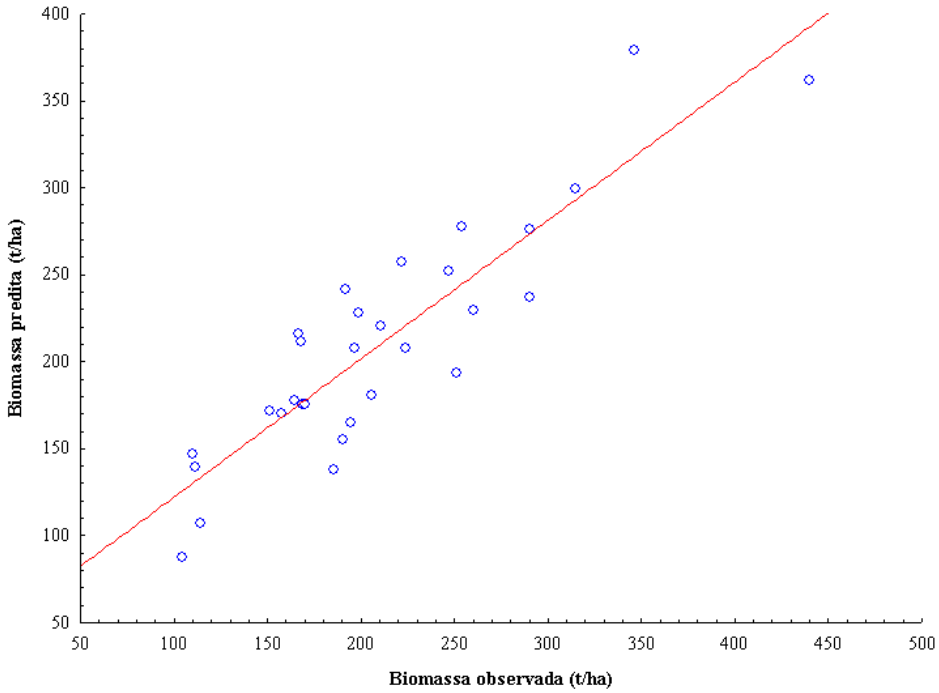

Figura 4.19 - Valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 3

No modelo de espalhamento volumétrico (*Pv*), considera-se o alvo como uma nuvem de dipolos aleatoriamente orientados, muito finos e cilíndricos, simulando a estrutura aleatória do dossel florestal, o que condiz com os resultados encontrados no presente estudo: quanto maior a biomassa, maior é a quantidade de elementos distribuídos aleatoriamente pela célula

de resolução de uma imagem. Algumas das variáveis encontradas neste modelo de estimativa de biomassa condizem com os modelos já encontrados em áreas planas nos estudos de Gonçalves (2007) e de Narvaes (2010), que selecionaram a variável *Pv*, além de variáveis de Touzi, tais como τ_m.

Os resíduos gerados a partir do modelo selecionado foram submetidos a uma análise de autocorrelação espacial em que comprovou-se a ausência de autocorrelação entre os dados. Como verificado, não há a presença de autocorrelação espacial para os resíduos padronizados, uma vez que o índice de Moran resultou em 0,0554. De acordo com Ramos (2002), o valor de índice de Moran próximo a zero, juntamente com a significância acima da estabelecida (α = 0,05), indica que os resíduos não apresentam autocorrelação espacial e possuem uma tendência aleatória. Apesar da tendência aleatória, os resíduos de uma observação não possuem nenhum grau de associação espacial com aqueles das observações adjacentes. Assim, o melhor modelo para a biomassa selecionado e validado para este estudo foi o *modelo 3*.

A validação deste modelo foi realizada utilizando-se 10 amostras das 16 parcelas restantes que não entraram no modelo. Utilizando-se as amostras separadas para o processo de validação, foi calculada a biomassa média para a área em estudo. Os resultados foram comparados com a biomassa levantada em campo (biomassa média observada 227,36t/ha, desvio padrão±40,54 $Mg.ha^{-1}$). O RMSE foi de aproximadamente 25,76 $Mg.ha^{-1}$. A validação dos dados mostra um valor de apenas 11,33% de erro em relação à média da biomassa observada (Figura 4.20). O erro médio encontrado na validação dos resultados foi considerado baixo.

Os resultados gerais da modelagem da biomassa não permitiram avaliar a contribuição dos dados geomorfométricos para o ajuste de dados polarimétricos em relação ao relevo. Entretanto, os demais resultados confirmam a importância da geomeorfometria como insumo adicional para modelagem da biomassa por sensoriamento remoto com radar, pela sua relação causal com aspectos ecofisiológicos que condicionam o crescimento e a distribuição de espécies florestais.

Validação do modelo 3:

$$BM = 31{,}11 + 142{,}01\ Pv - 598{,}3\ An + 1{,}465\ h + 3{,}35\ G + 0{,}4288\ \tau_m3 - 9{,}478\ \tau_m1$$

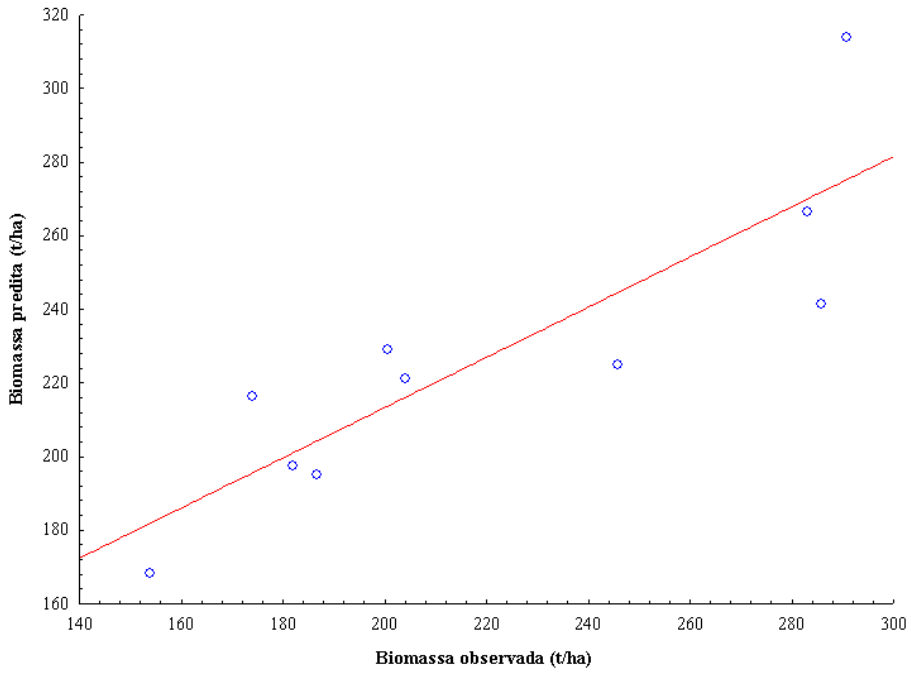

Figura 4.20 – Validação: valores preditos x valores observados com aplicação do modelo 3 nas 10 amostras.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu concluir que:

1. A distribuição florístico-estrutural da tipologia florestal pode ser explicada e modelada com base em dados geomorfométricos provenientes do SRTM. Aliada a isso, a integração entre dados polarimétricos oriundos do PALSAR e variáveis geomorfométricas melhoram a capacidade preditiva dos modelos de estimativa de biomassa florestal.

2. As variáveis geomorfométricas locais podem explicar parte da variação da composição florística, mesmo em regiões que possuem baixa amplitude de variação topográfica como a do presente estudo. Nesta situação, as variáveis mais representativas foram a elevação e a curvatura vertical.

3. Considerando a distribuição das espécies mais abundantes e das espécies menos abundantes, observa-se que, para a Floresta Nacional do Tapajós, a sua distribuição corrobora com a teoria relacionada ao tamanho de nichos, segundo a qual determinadas condições ambientais podem definir nichos ecológicos específicos, o que pode explicar o padrão de distribuição espacial das espécies menos abundantes da região de estudo, que apresentam nicho ecológico extremamente restritos. Isto foi confirmado pelos mapas de probabilidade de ocorrência de espécies gerados com base nas variáveis geomorfométricas locais e regionais.

4. A relação entre a geomorfometria e as variáveis da estrutura florestal mostrou que a geomorfometria condiciona parte de sua variação, mais especificamente a abertura do dossel (AD) e diâmetro na altura do peito (DAP). Aliado a isso, a inclusão de variáveis geomorfometricas locais permitiu a geração de modelos de estimativa das variáveis estruturais satisfatórios, exceto pela variável altura (HT), que apresentou um menor valor de r^2 comparativamente às outras variáveis.

5. As assinaturas polarimétricas revelaram comportamento característico do efeito da topografia sobre o sinal do radar através da altura do pedestal, que indica a intensidade da despolarização da onda incidente. Nos terrenos planos, como esperado, tal efeito não foi muito evidente nas parcelas. Entretanto, observou-se uma maior freqüência de ocorrência e de intensidade da despolarização nas parcelas de terrenos ondulados a forte-ondulado, acentuada despolarização como comportamentos atípicos nesta última condição.

6. O presente estudo mostrou que as variáveis geomorfométricas têm grande potencial de aplicação em estudos ecológicos e florestais não só através de seu uso isolado, mas também a partir de sua integração com outros tipos de dados sensoriados, como insumo para a compreensão da paisagem, em especial da distribuição e caracterização da vegetação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIBA S.; KITAYAMA K. Effects of the 1997-98 El Niño drought on rain forests of Mount Kinabalu, Borneo. **Journal of Tropical Ecology**, v.18, p. 215-30, 2002.

ALMEIDA, S. S.; LISBOA, P. L. B.; SILVA, A. S. L. Diversidade forística de uma comunidade arbórea na estação científica "Ferreira Penna", em Caxiuanã (Pará). **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Botânica**, v.9, p. 93-128, 1993.

ANSELIN, L. The Moran scatterplot as ESDA tool to assess local instability in spatial association. In: FISHER, M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D.(eds.). **Spatial analytical perspectives on GIS**. London: Taylor & Francis, 1996. p. 111-126.

AYRES J. M. **As Matas de Várzea do Mamirauá.** Médio Rio Solimões. Rio de Janeiro: Sindicato Nacional dos Editores de Livros, 1993.

BARROS, P. L. C. **Estudo das distribuições diamétricas da floresta do Planalto Tapajós - Pará.** 1980. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 1980.

BAYER, T.; WINTER, R.; SCHREIER, G. Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 1290–1296, 1991.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**., v. 24, p. 43–69, 1979.

BISPO, P.C., VALERIANO, M.M; KUPLICH, T. M. Relation of local geomorphometric variables with the vegetation of the Madeira-Purus interfluve (AM/RO). **Acta Amazonica,** v. 39, p. 81–90, 2009.

BORCARD, D., P. LEGENDRE, AND P. DRAPEAU. Partialling out the spatial component of ecological variation. **Ecology,** v.73, p.1045 – 1055, 1992.

BROWN, J. H. (1984) On the relationship between abundance and distribution of species**.** **American Naturalist,** v**.** 124, p. 255–79, 1984.

BROWN, S.; GILLESPIE, A. J. R.; LUGO, A. E. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. **Forest Science**, v.35, n.4, p. 881-902, 1989.

BROWN, S.; IVERSON, L.R.; PRASAD, A.; LIU, D. Geographical distributions of carbon in biomass and soils of Tropical Asian Forests. **Geocarto International**, v.4, p.45-59, 1993.

BUDKE J. C.; JARENKOW J. A. ; OLIVEIRA-FILHO A.T. Relationships between tree component structure, topography and soils of a riverside forest, Rio Botucaraí, Southern Brazil. **Plant Ecology**, v.189, p. 187–200, 2007.

CARDOSO, E.; SCHIAVINI I. Relação entre distribuição de espécies arbóreas e topografia em um gradiente florestal na Estação Ecológica do Panga (Uberlândia, MG). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 25, p. 277–89, 2002.

CARVALHO, J. O. P. **Análise estrutural da regeneração natural em floresta tropical densa na região do Tapajós no estado do Pará.** 1982. 128p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1982.

CASTILHO, C.V.; MAGNUSSON, W. E.; ARAÚJO, R. N. O.; LUIZÃO, R. C.; LUIZÃO, F. J.; LIMA, A. P.; HIGUCHI, N. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian forest: effects of soil and topography. **Forest Ecology and Management,** v. 234, n. 1-3, p. 85-96, 2006.

CHAUVEL A.; LUCAS Y.; BOULET R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central- Amazonia,Brazil. **Experientia** v.43, p.234–41, 1987.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**, 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 188p.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing,** v. 34, n. 2, p. 498-518, Mar 1996.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 35, n. 1, p. 68-78, 1997.

DARGIE, T. C. D. An ordination analysis of vegetation patterns on topoclimate gradients in South-East Spain. **Journal of Biogeography**, v.14, p. 197–211, 1987.

DENT, D.; YOUNG, A. **Soil Survey and Land Evaluation**. London: George Allen & Unwin Ed., 1981. 278p.

DINIZ-FILHO J. A. F.; BINI L.M. Modelling geographical patterns in species richness using eigenvector-based spatial filters. **Global Ecology and Biogeography**, v. 14, p. 177–85, 2005.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; LE TOAN T.; KASISCHE, E. S.; CHRISTENSEN, N. Dependence of radar backscatter on coniferous forest biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, p. 412–415, 1992.

ELLENBERG, H.; MULLER-DOMBOIS, D. Tenttative physionomic-ecological classification of plant formationof the earth. **Bericht Uber das Geobotanische Institut Rübel**, v. 37, p. 21–55, 1965/1966.

ENOKI, T. Microtopography and distribution of canopy trees in a subtropical evergreen broad-leaved forest in the northern part of Okinawa Island, Japan. **Ecological Research**,v. 18, p. 103– 13, 2003.

EASTMAN, J.R. **IDRISI Andes.** guide to GIS and image processing, 2006.

ESA. European Space Agency. **The Polarimetric SAR Data Processing and Educacional Tool. Polsar pro 4.2**. http://earth.eo.esa.int/polsarpro. 2011.

ESRI. **ArcGIS Version 10**. Environmental SystemsResearch Institute. 2011.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; MACHADO E. L. M. Análise da composição florística e fitossociológica da Floresta Nacional do Tapajós com o apoio geográfico de imagens de satélites. **Acta Amazonica,** v. 35, p.155–73, 2005.

EVANS, D. L.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Radar polarimetry: analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6 p. 774 – 789, 1988.

EVANS, I. S. General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics. In: METHUEN AND CO. LTD (eds). **Spatial Analysis in Geomorphology**, London, 1972, p. 17–90.

FERREIRA C. A. C. **Variação florística e fisionômica da vegetação de transição campina, campinarana e floresta de terra firme na Amazônia Central, Manaus.** 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.

FERREIRA, L. V.; PRANCE, G. T Structure and species richness of low diversity floodplain forest on the rio Tapajós, Eastern Amazonian. **Biodiversity and Conservation**, v. 7, n. 5, p. 585-96, 1998.

FLORINSKY, I.V.; KURYAKOVA, G.A. Influence of topography on some vegetation cover properties. **Catena,** v. 27, n.2, p. 123-141, 1996.

FRAZER, G.W., CANHAM, C.D. & LERTZMAN, K.P.**Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0.** University, Burnaby, British Columbia, and The Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, New York. 1999.

FREEMAN, A.; DURDEN, S. L. A Three-component scattering model for polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 963-973, 1998.

GARESTIER, F.; DUBOIS-FERNANDEZ, P.C.Forest biophysical parameter estimation using L- and P- Band polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** , v. 47, p. 3379 – 3388, 2009.

GASTON K.J, BLACKBURN T.M, GREENWOOD J.J.D, GREGORY R.D, QUINN R.M, LAWTON J.H. Abundance–occupancy relationships. **J. Appl. Ecol**. 2000, v.37(Suppl. 1), p.39–59.

GERRARD, A. J. **Soils and Landforms**. London: George Allen & Unwin, 1981. 218 p.

GLOBAL MAPPER SOFTWARE LLC.**Global Mapper software package**. 2011.

GONÇALVES, F. G. **Avaliação de Dados Polarimétricos para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais**. 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

GONÇALVES, F.G., SANTOS, J. R. Composição florística e estrutura de uma unidade de manejo florestal sustentável na Floresta Nacional do Tapajós, Pará. **Acta Amazônica**, v. 38, n.2, p. 229 -244, 2008.

GROHMANN, C.H.; SMITH, M.J.; RICCOMINI, C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland, geoscience and remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.99, p.1-14, 2010.

GUIMARÃES, E. G. T.; PYLE, E. H. **Levantamento florestal de 20 ha na Floresta Nacional do Tapajós.**Santarém, Pará: LBA, 1999. 30p.

HANTSON, S. y CHUVIECO, E.: Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery, **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, vol. 13, 2011, p.691–700.

HAFKENSCHEID R. **Hydrology and biogeochemistry of tropical montane rain forests of contrasting stature in the Blue Mountains, Jamaica**. Tese (Doutorado) - VrijeUniversity, 2000. 302 p.

HARRIS, R.J. **A primer of multivariate statistics**. New York: Academic, 1998. 332 p.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing**: principles and applications of imaging radars. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866p.

HINSE, M., GWYN, Q. H. J; BONN, F. Radiometric correction of C-band imagery for topographic effects in regions of moderate relief. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,**v. 26, p. 122–132, 1988.

HUTCHINSON, G. E. Concluding remarks. **ColdSpringHarbor Symposia on Quantitative Biology**, v. 22, p. 415–27, 1957.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. IBGE, Rio de Janeiro, 1992. 92 p.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS . **Floresta Nacional do Tapajós – Plano de Manejo**. IBAMA, Belterra, 2004. 373 p.

ITT VISUAL INFORMATION SOLUTIONS.ENVI Version 4.**8**. 2010.

JARDIM, F. C. S.; HOSOKAWA, R. T. Estrutura da foresta equatorial úmida da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. **Acta Amazônica,** v. 16/17, p. 411-508, 1986.

JARVIS, A.; MULLIGAN, M. **Terrain controls on tree diversity and structure in tropical forests:** an example in two neotropical montane and lowland forests. London: VDM Verlag, 2009. 272 p.

KAHN, F.; CASTRO, A. The palm community in forest of Central Amazon, Brazil. **Biotropica,** v. 17, n.3, p. 210-216, 1985.

KELLNDORFER, J.; WALKER, W.; PIERCE, L.; DOBSON, C.; FITES, J.A.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. **Remote Sensing of Environment***,* v 93, n.3, p. 339-358, 2004.

KING, D. A. Allometry and life history of tropical trees. **Journal of Tropical Ecology**, v. 12, p.25–44, 1996.

KIRKBY, M. J.; CHORLEY; R. J. Throughflow, overland flow and erosion. **International Association of Scientific Hydrology Bulletin,** v. 12, p. 5–21, 1967.

KIRKBY, M.; ATKINSON, K.; LOCKWOOD, J. G. Aspect vegetation cover and erosion on semi-arid hillslopes. In: J. THOMES (ed). **Vegetation and Geomorphology.** NewYork: John Wiley, 1990, p. 25–39.

KUBOTA, Y.; MURATA, H.; KIKUZAWA, K. 2004. Effects of topographic heterogeneity on tree species richness and stand dynamics in a subtropical forest in OkinawaIsland, southern Japan. **Journal of Ecology**, v. 92, n.2, p. 230-24, 2004.

KUNZ, S. H.; IVANAUSKAS, N. M.; MARTINS, S. V.; SILVA, E.; STEFANELLO, D. Aspectos florísticos e fitossociológicos de um trecho de Floresta Estacional Perenifólia na Fazenda Trairão, Bacia do rio das Pacas, Querência-MT. **Acta Amazônica**, v.38, n.2, p.245-254, 2008.

LAURENCE, S. G. W., LAURENCE, W. F., ANDRADE, A. et al. Influence of soils and topography on Amazonian tree diversity: a landscape-scale study. **Journal of Vegetation Science**, v 21, p. 96–106, 2010.

LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; POTTIER, E.; FERRO-FAMIL, L. Unsupervised Terrain Classification Preserving Polarimetric Scattering Characteristics. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 4, pp. 722-731, 2004.

LEE, J. S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging:** from basics to applications. Boca Raton: Boca Raton: Taylor & Francis, 2009. 398 p.

LETTS, M. G.; MULLIGAN M. The impact of light quality and leaf wetness on photosynthesis in north-west Andean tropical montane cloud forest. **J.Trop. Ecol**. v.21, p.549-57, 2005.

LEGENDRE P.; LEGENDRE L.**Numerical Ecology**, 2 ed. New York: Elsevier. 853 p.

LIEBERMAN, M.; LIEBERMAN, D.; HARTSHORN G., S.; PERALTA, R. Small scale altitudinal variation in lowland wet tropical forest vegetation. **Journal of Ecolgy**, v. 73, p. 505–16, 1985.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras:** manual de identificação e cultivo de plantas: arbóreas nativas do Brasil, 2 ed. Nova Odessa: Plantarum, 1998, 352 p.

LUCKMAN, A. J., Correction of SAR imagery for variation in pixel scattering area caused by topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p. 344–350, 1998.

LUCKMAN, A. J.; BAKER, J. R. The contribution of trunk-ground interactions to the SAR backscatter from a coniferous forest**. Proceedings of IEEE IGARSS,** 95, p. 2032–2034, 1995.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography,** v. 57, n. 3-4, p.165-177, 1975.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images**: an introduction. 3. ed. Chichester, England: John Wiley and Sons, 2005. 324p.

McCUNE, B.; MEFFORD. M. J. **PC-ORD. multivariate analysis ofecological data**.Version 6.MjM Software, GlenedenBeach, 2011.

MCNAIRN, H.; DUGUAY, C.; BRISCO, B.; PULTZ, T. Z. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 2, p. 308-320, 2002.

MEIER E.; FREIU.; NUESCH, D**.** Precise Terrain Corrected Geocoded Images, SAR Geocoding**. Data and System,** Wichmann Verlag, 1993**.**

MEIJERINK, A.M.J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v. 1, p. 23-44, 1988.

MICELI, B. S., DIAS, F. M., SEABRA, F. M., SANTOS, P. R. A., & FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, 63(1), 191-201, 2011.

MINITAB, INC.**MINITAB 14 Statistical Software.** Minitab Inc., State College, 2003.

MOORE, I.D.; GESSLER; P. E; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v 2, p.443–52, 1993.

MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. 2009, 112p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009.

NARVAES, I. **Avaliação de dados SAR polarimétricos para a estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais**. 2010, 167p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

NEUMANN, M.; SAATCHI, S.; ULANDER,L. M. H.; FRANSSON, J. E. S.: Assessing Performance of L- and P-Band Polarimetric Interferometric SAR Data in Estimating Boreal Forest Above-Ground Biomass. IEEE T. **Geoscience and Remote Sensing**, v.50, p. 714-726, 2012.

NASA. http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/. 2006

NELSON, B.W. **Inventário florístico da Amazônia:** tendência de amostragem nos herbários e potencial de Sensoriamento Remoto. 1994. 216 p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 1994.

NETER, J.; KUTNER,N.H.; NACHTSSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. **Applied Linear Statistical Models.** 4 ed. Boston: McGraw Hill, 1996, 791p.

OGDEN J. ; POWELL J. A. A quantitative description of the forest vegetation on an altitudinal gradient in the Mount Field National Park, Tasmania, and a discussion of its history and dynamics. **Aust. J. Ecol**. v.4, p.293-325, 1979.

OKE, T.R. **Boundary layer climates**. New York: Routledge, 1987. 464 p.

OLAYA, V. **A gentle introduction to SAGA GIS**. http://geosun1.uni geog.gwdg.de/saga/html/index.php. 2009.

OLIVEIRA, L.C. **Efeito da exploração da madeira e de diferentes intensidades de desbastes sobre a dinâmica da vegetação de uma área de 136ha na Floresta Nacional do Tapajós**. 2005. 183p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo. 2005.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; VILELA, E. A.; CARVALHO, D. A.; GAVILANES, M. L. Effects of soils and topography on the distribution of tree species in a tropical riverine forest in south-eastern Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v.10, p. 483–508, 1994.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; CURI, N.; VILELA, E. A.; CARVALHO, D. A. Effects of canopy gaps, topography, and soils on the distribution of woody species in a central Brazilian deciduous dry forest. **Biotropica**, v. 30, p.362–375, 1998.

PARK, S-E; YAMAGUCHI, Y. Topography Effects on Polarimetric Sar Remote Sensing ofMountainous Terrain. **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**. p. 4099-4102, 2011.

PCI GEOMATICS. **PCI Geomatica 10.3**. User Guide. 2009.

PELISSIER, P.; DRAY, S.; SABATIER, D. Within-plot relatinships between tree species occorrences and hydrological soil constraints: na exemple in French Guiana investigated trough canonical correlation analysis. **Plant Ecology,** v. 162, n.2, p. 143-156, 2001.

PEREZ-NETO, P. R. A unified strategy for estimating and controlling spatial, temporal and phylogenetic autocorrelation in ecological models. **Oecologia Brasiliensis,** v. 10, p. 105–19, 2006.

PIKE, R. J. Geomorphometry diversity in quantitative surfase analysis. **Progress in Physical Geography,** v. 24, n. 1, p. 1-20, 2000.

PIKE, R.J The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology**, v. 20, n. 5, p. 491-511, 1988.

PITMAN, N.C.A; J.W. TERBORGH; M.R. SILMAN; P. NUÑEZ; D.A. NEILL; C.E. CERO; W.A. PALACIOS & M. AULESTIA. Dominance and distribution of tree species in upper Amazonian terra firme forests. **Ecology**, v.82, p. 2101–2117, 2001.

POPE, K. O.; BENAYAS-REY, J. M.; PARIS, J. F. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p.205-219, 1994.

QI, F.; ZHU, A. X. Knowledge discovery from soil maps using inductive learning. **International Journal of Information Science**, v. 17, p. 771–95, 2003.

RADAMBRASIL Departamento Nacional de Produção Mineral. Folha AS.21- Santarém. **Geologia,geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro**: DNPM, 510 p. (Levantamento dos Recursos Naturais, v. 10), 1976.

RANGEL, T. F.;DINIZ-FILHO, J. A.;BINI, L. M.SAM: a comprehensive application for Spatial Analysis in Macroecology. **Ecography**, v. 33, n. 1, p. 46-50, 2010.

RAMOS, F. R. **Análise espacial de estruturas intra-urbanas:** o caso de São Paulo. 2002. 142p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

RAUSTE, Y. Polarimetric Radar signatures of forest as a function of terrain topography. **Geoscience and Remote Sensing Symposium**, 1991. IGARSS '91. Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management., International, p. 341-344, 1991.

RIBEIRO, J.E.L.S, HOPKINS, M.J.G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C.A.; COSTA, M.A.S.; BRITO, J.M.; SOUZA, M.A.D.; MARTINS, L.H.P.; LOHMANN, L.G.; ASSUNÇÃO, P.A.C.L.; PEREIRA, E.C.; SILVA, C.F.; MESQUITA, M.R.; PROCÓPIO, L.C.**Flora da Reserva Ducke:** guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra firme na Amazônia Central, 2ed. Manaus: INPA-DFID, 1999. 793 p.

RICKLEFS, R.E. 1996. **A economia da natureza.** 3 ed**.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 470p.

ROBERT, A.; MORAVIE, M. A. Topographic variation and stand heterogeneity in a wet evergreen forest of India. **Journal Tropical Ecology**, v.19, p. 697–707, 2003.

RODRIGUES, L. A.; CARVALHO, D. A.; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; CURI, N. Efeitos de solos e topografia sobre a distribuição de espécies arbóreas em um fragmento de floresta estacional semidecidual, em Luminárias, MG. **Revista Árvore**, v. 31, p. 25–35, 2007.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C. S.; BELZ, J. E.. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing,** v. 72, n.3,p. 249-260, 2006.

SAATCHI, S.; HALLIGAN, K.; DESPAIN, D. G.; CRABTREE, R. L. Estimation of forest fuel load from radar remote sensing. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, p. 1726 – 1740, 2007.

SAATCHI, S.; MARLIER, M.; CHAZDON, R.L.; CLARK, D.B.; RUSSELL, A.E. Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of above-ground biomass. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.2836-2849, 2011.

SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SOLER, L. S.; Sant'Anna, S. J. S. Airborne P-band SAR applied to the above ground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 482-493, 2003.

SANTOS, J. R.; NARVAES, I. S.; GRAÇA, P. M. L. A.; GONÇALVES, F. G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon. In: JEDLOVEC, G. (NASA/MSFC-USA) (eds.). **Advances on geosciences and remote sensing.** 1 ed. Vukovar: In-Tech, v. 8, p. 183-206, 2009.

SCHMIDT, J., EVANS, I. S.; BRINKMANN, J. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation**. International Journal of Information Science**, v. 17, p. 797–814, 2003.

SHARY, P. A. The second derivative topographic method. In: STEPANOV, I. N. (ed).**The Geometry of the Earth Surface Structures.** Pushchino: PushchinoResearchCenter Press, 1991, p. 30–60.

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, v. 107, n.1-2, p.1-32, 2002.

SHIMADA, M.; ISOGUSHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and geometric calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

SILVA, R.P. **Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM).** 2007, 135p. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicas) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus , 2007.

SILVA, K. E; MATOS, F.D.A.; FERREIRA M. M. Composição florística e fitossociologia de espécies arbóreas do Parque Fenológico da Embrapa Amazônia Ocidental. **Acta Amazônica**, v. 38, p. 213–22, 2008a.

SILVA, W. G.; METZGER, J. P.; BERNACCI, L. C.; CATHARINO, E. L. M.; DURIGAN, G.; SIMÕES, S. Relief influence on tree species richness in secondary forest fragments of Atlantic Forest, SE, Brazil. **Acta Botânica Brasílica**, v. 22, p. 589–98, 2008b.

SIQUEIRA, T.; BINI, L. N.; CIANCIARUSO, M. V., ROQUE, F. O.; TRIVINHO-STRIXINO S.The role of niche measures in explaining the abundance–distribution relationship in tropical lotic chironomids. **Hydrobiologia**, v. 636, p. 163–72, 2009.

SOLLINS, P. Factors influencing species composition in tropical lowland rain forest: does soil matter? **Ecology**, v.79, p. 23–30, 1998.

SOUZA, A.L.; SILVA, G.F., CHICHORRO, J.F.; CARACIOLO, R.L. **Mata nativa 2 Manual do usuário**. Cientec, 2006 a.

SOUZA, D. R.; SOUZA, A. L.; LEITE, H. G.; YARED, J. A. G. Análise estrutural em floresta ombrófila densa de terra firme não explorada, Amazônia Oriental. **Revista Árvore**, v.30, n.1, p. 75-87, 2006 b.

STATSOFT, Inc.**STATISTICA (data analysis softwaresystem)**. Version 7.www.statsoft.com. 2004.

TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; MEUNIER, J.-F.; GOODENOUGH, D. G. Slopeaspect effects in synthetic aperture radar imagery. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 39–49, 1985.

TER BRAAK, C.J.F.; ŠMILAUER, P. **CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide:** software for canonical community ordination. Version 4.5. Ithaca: Microcomputer Power 2002, 500p.

TOUZI, R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 1, p. 73-84, 2007.

TOUZI, R.; DESCHAMPS, A.; ROTHER, G. Phase of target scattering for wetland characterization using polarimetric C-band SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 9, p. 3241-3261, 2009.

ULABY, F. T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech House ed., 1990. 388 p.

UMEKI, K. Modelling the relationship between the asymmetry in crown display and local environment. **Ecological Modelling,** v.82, p.11–20, 1995.

VALERIANO, M. M. ; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata:** processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-16702-RPQ/854), 2010. 79p.

VALERIANO, M. M. ; KUPLICH, T. M. ; STORINO, M. ; AMARAL, B. D.; MENDES JÚNIOR, J. N.; LIMA, D. J. . Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169-1181, 2006.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.

VALERIANO, M. M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 5933-5940. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39ULK4H>. Acesso em: 05 jun. 2012.

VALERIANO, M. M. Curv atura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 539–46, 2003.

VALERIANO, M. M. **Topodata:** guia para utilização de dados geomorfológicos locais**.** São José dos Campos: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818), 2008, 72p.

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, A. O. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias**. Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, p. 17–29, 2003.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 1997. 330 p. Tese (Doutorado) – Wageningen Agricultural University, Netherlands, 1997.

VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management**. 1997. 330p. Doctoral Thesis – Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1997

VAN ZYL, J. J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data". **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 36 - 45, 1989.

VAN ZYL, J. J. The effect of topography on radar scattering from vegetated areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, p. 153–160, 1993.

VAN ZYL, J. J. CHAPMAN, B. D.; DUBOIS, P.; SHI, J. The effect of topography on SAR calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,** v. 31, p. 1036–1043, 1993.

VAN ZYL, J. J., ZEBKER H. A., ELACHI C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529-543, 1987.

VELOSO H. P., JAPIASSU A. M. S., GOES FILHO L. & LEITE P. F. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudos fitogeográficos de parte das Folhas SC.23-Rio São Francisco e SC.24-Aracaju. In: **Projeto Radambrasil.** parte das folhas SC.23-Rio São Francisco e SC.24-Aracaju. Rio de Janeiro, 1973. cap. 4, p. 1-119. (Levantamento de Recursos Naturais, 1).

VELOSO, R. B., RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.124 p.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics,** v. 17, p. 137–67, 1986.

WILSON, J.P., GALANT, J.C. **Terrain analysis:** principles and applications. New York: John Wiley & Sons, 2000. 479p.

WITTMANN, F.; ANHUF, D.; JUNK, W. J. Tree species distribution and community structure of central Amazonian várzea forests by remote-sensing techniques. **Journal of Tropical Ecology**,v. 18, p. 805–20, 2002.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing.** Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 370 p.

ZEBKER, H. A.; NORIKANE, L. Radar polarimeter measures orientation of calibration corner reflectors. **Proceedings of the IEEE**, v. 75, n. 12, p. 1686-1688, 1987.

ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J. Imaging radar polarimetry: a review. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 11, p. 1583-1606, 1991.

ZHU, W.; ZENG, N.; WANG, N. Sensitivity, specificity, accuracy, associated confidence interval and ROC analysis with practical SAS. **Health Care and Life Sciences**, **NESUG**, p.1-9, 2010.

APÊNDICE A

FLUXO DETALHADO DO CONJUNTO TOTAL DE ATIVIDADES

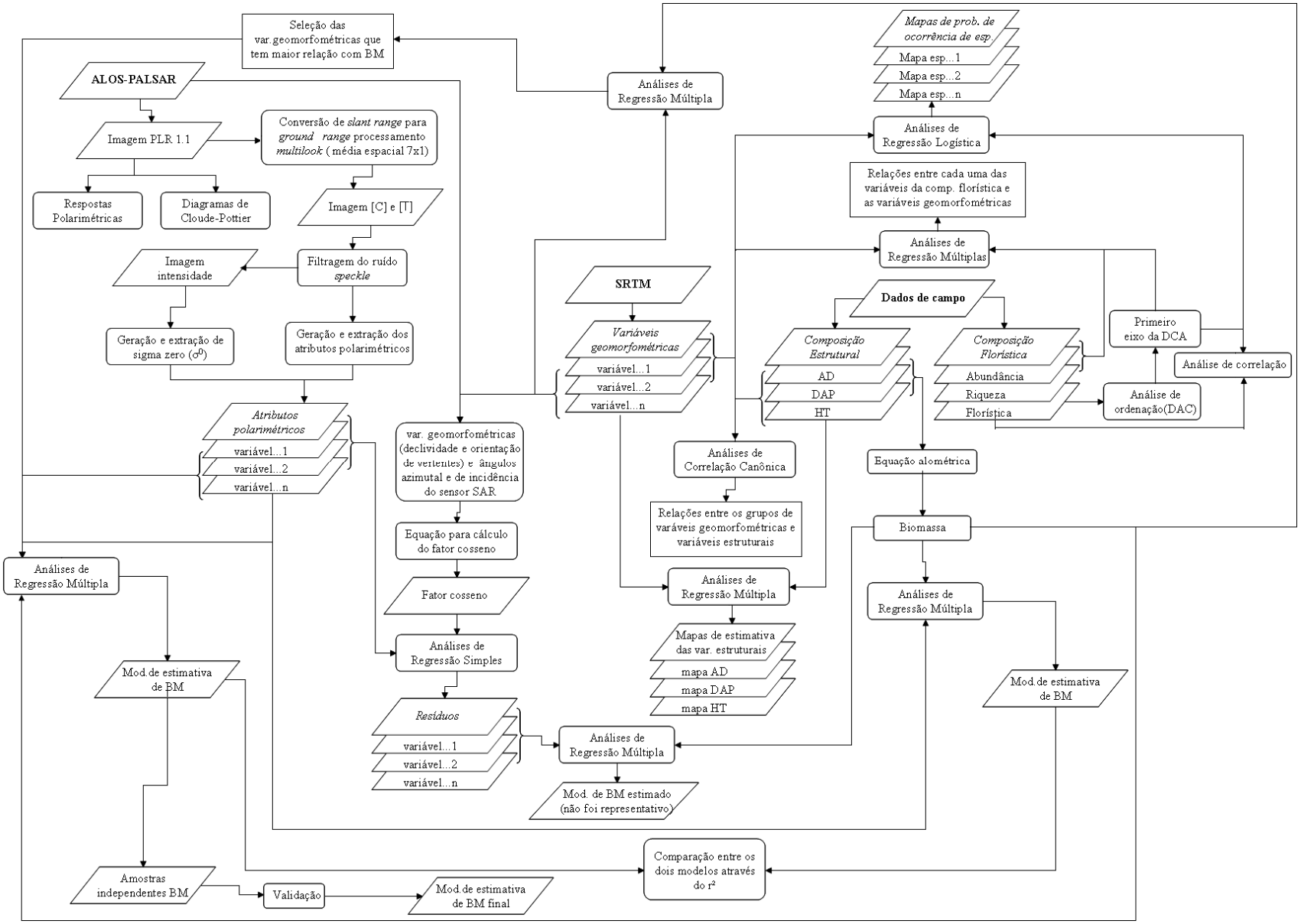

Figura 1 – Fluxo detalhado do conjunto total de atividades.

APÊNDICE B

RELAÇÃO DAS ESPÉCIES ARBÓREAS INVENTARIADAS

Tabela 1 - Relação das espécies arbóreas inventariadas na Floresta Nacional do Tapajós, com o respectivo número de árvores (N), densidade absoluta (DA), densidade relativa (DR), dominância absoluta (DoA), dominância relativa (DoR), freqüência absoluta (FA), freqüência relativa (FR) e índice do valor de importância relativo (IVI%), por ordem alfabética de famílias e em ordem decrescente de IVI%.

Famílias e espécies	***N***	***DA***	***DR***	***DoA***	***DoR***	***FA***	***FR***	***IVI %***
Anacardiaceae								
Astronium gracile Engl.	18	1,565	0,4	0,105	0,5	28,26	0,62	0,51
Anacardium spp.	8	0,696	0,18	0,065	0,31	17,39	0,38	0,29
Astronium fraxinifolium	5	0,435	0,11	0,05	0,24	10,87	0,24	0,2
Tapirira guianensis Aubl.	7	0,609	0,16	0,021	0,1	15,22	0,33	0,2
Spondias mombin L	2	0,174	0,04	0,008	0,04	2,17	0,05	0,04
Spondias spp	1	0,087	0,02	0,003	0,01	2,17	0,05	0,03
Annonaceae								
Guatteria poeppigiana Mart.	68	5,913	1,53	0,232	1,1	50	1,1	1,24
Duguetia echinophora R.E.Fr.	70	6,087	1,57	0,143	0,68	47,83	1,05	1,1
Xylopia benthami R.E.Fr.	23	2	0,52	0,032	0,15	19,57	0,43	0,37
Guatteria ovalifolia R.E.Fr.	7	0,609	0,16	0,019	0,09	15,22	0,33	0,19
Annona montana Macfad. & R.E.Fr.	3	0,261	0,07	0,004	0,02	6,52	0,14	0,08
Duguetia sp.	1	0,087	0,02	0,008	0,04	2,17	0,05	0,04
Apocynaceae								
Geissospermum sericeum Benth. & Hook.f. ex Miers	51	4,435	1,15	0,503	2,4	52,17	1,15	1,56
Aspidosperma rigidum Rusby	13	1,13	0,29	0,101	0,48	21,74	0,48	0,42
Aspidosperma desmanthum Benth.	8	0,696	0,18	0,087	0,42	15,22	0,33	0,31
Lacmellea aculeata (Ducke) Monach.	10	0,87	0,22	0,017	0,08	21,74	0,48	0,26
Himatanthus sucuuba (Spruce) Woodson	8	0,696	0,18	0,023	0,11	15,22	0,33	0,21
Ambelania sp.	7	0,609	0,16	0,012	0,06	13,04	0,29	0,17
Malouetia sp.	7	0,609	0,16	0,014	0,07	13,04	0,29	0,17
Aspidosperma duckei Huber ex Ducke	6	0,522	0,13	0,01	0,05	4,35	0,1	0,09
Aspidosperma macrocarpon	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03
Araliaceae								
Didymopanax morototoni (Aubl.) Decne. & Planch.	17	1,478	0,38	0,12	0,57	26,09	0,57	0,51
Didymopanax navarroi	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Arecaceae								
Trichilia sp. 2	19	1,652	0,43	0,03	0,14	10,87	0,24	0,27
Bignoniaceae								
Jacaranda copaia D.Don	72	6,261	1,62	0,504	2,4	28,26	0,62	1,55
Tabebuia serratifolia Rolfe.	2	0,174	0,04	0,037	0,18	4,35	0,1	0,11
Tabebuia impetiginosa Standl.	2	0,174	0,04	0,006	0,03	4,35	0,1	0,06
Tabebuia ochracea	1	0,087	0,02	0,006	0,03	2,17	0,05	0,03
Bixaceae								
Bixa arborea Huber	16	1,391	0,36	0,032	0,15	13,04	0,29	0,27
Boraginaceae								
Cordia alliodora (Ruíz & Pav.) Cham.	43	3,739	0,97	0,064	0,3	52,17	1,15	0,81
Cordia bicolor A.DC. in DC.	13	1,13	0,29	0,104	0,49	19,57	0,43	0,41
Cordia goeldiana Huber	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Burseraceae								
Protium apiculatum Swart	283	24,609	6,36	0,747	3,56	89,13	1,96	3,96
Protium subserratum Engl.	18	1,565	0,4	0,089	0,42	26,09	0,57	0,47

Trattinickia rhoifolia Willd.	15	1,304	0,34	0,072	0,34	21,74	0,48	0,39
Protium robustum (Swart) D. M. Porter	1	0,087	0,02	0,076	0,36	2,17	0,05	0,14
Protium sp.	3	0,261	0,07	0,003	0,02	6,52	0,14	0,08
Caricaceae								
Jacaratia spinosa var. digitata (Poepp.) A.DC.	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03
Caryocaraceae								
Caryocar glabrum Pers.	5	0,435	0,11	0,157	0,75	8,7	0,19	0,35
Caryocar villosum Pers.	2	0,174	0,04	0,177	0,84	4,35	0,1	0,33
Caryocar microcarpum Ducke	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Celastraceae								
Maytenus pruinosa Reiss.	7	0,609	0,16	0,028	0,13	13,04	0,29	0,19
Chrysobalanaceae								
Licania sp.	59	5,13	1,33	0,578	2,76	32,61	0,72	1,6
Licania heteromorpha Benth.	30	2,609	0,67	0,096	0,46	39,13	0,86	0,66
Couepia bracteosa Benth.	22	1,913	0,49	0,102	0,49	34,78	0,76	0,58
Clusiaceae								
Rheedia acuminata Planch. & Triana	7	0,609	0,16	0,035	0,17	15,22	0,33	0,22
Calophyllum brasiliense Cambess	1	0,087	0,02	0,035	0,17	2,17	0,05	0,08
Symphonia globulifera L.f.	3	0,261	0,07	0,005	0,02	4,35	0,1	0,06
Combretaceae								
Terminalia amazonia Exell in Pulle	12	1,043	0,27	0,189	0,9	26,09	0,57	0,58
Connaraceae								
Connarus spermattetii	2	0,174	0,04	0,002	0,01	4,35	0,1	0,05
Ebenaceae								
Diospyros sp.	6	0,522	0,13	0,018	0,08	13,04	0,29	0,17
Euphorbiaceae								
Phyllanthus nobilis (L.f.) Müll. Arg.	14	1,217	0,31	0,066	0,31	23,91	0,53	0,38
Hevea sp.	8	0,696	0,18	0,083	0,4	10,87	0,24	0,27
Sapium sp.	10	0,87	0,22	0,04	0,19	15,22	0,33	0,25
Sagotia racemosa Baill.	13	1,13	0,29	0,028	0,13	13,04	0,29	0,24
Glycydendron amazonicum Ducke	7	0,609	0,16	0,009	0,04	13,04	0,29	0,16
Euxylophora sp.	1	0,087	0,02	0,012	0,06	2,17	0,05	0,04
Croton cajucara Benth.	1	0,087	0,02	0,011	0,05	2,17	0,05	0,04
Mabea sp.	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03
Pausandra densiflora Lanj.	1	0,087	0,02	0,001	0	2,17	0,05	0,03
Joannesia heveoides Ducke	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Fabaceae								
Inga sp.	166	14,348	3,71	0,302	1,44	86,96	1,91	2,35
Dialium guianense (Aubl.)Sandwith in A.C.Sm.	60	5,217	1,35	0,488	2,33	60,87	1,34	1,67
Sclerolobium chrysophyllum Poepp.	65	5,652	1,46	0,361	1,72	56,52	1,24	1,47
Tachigali myrmecophila Ducke	55	4,783	1,24	0,38	1,81	58,7	1,29	1,44
Swartzia corrugata Benth.	69	6	1,55	0,335	1,6	45,65	1	1,38
Pithecellobium racemosum Ducke	73	6,348	1,64	0,137	0,65	52,17	1,15	1,15
Hymenaea parvifolia Huber	23	2	0,52	0,374	1,78	32,61	0,72	1
Inga paraensis Ducke	30	2,609	0,67	0,24	1,15	28,26	0,62	0,81
Piptadenia suaveolens Miq.	20	1,739	0,45	0,238	1,14	34,78	0,76	0,78
Alexa grandiflora Ducke	16	1,391	0,36	0,337	1,6	17,39	0,38	0,78
Enterolobium maximum Ducke	20	1,739	0,45	0,244	1,16	26,09	0,57	0,73
Parkia sp.	34	2,957	0,76	0,106	0,51	36,96	0,81	0,69
Eperua bijuga Mart. ex Benth.	29	2,522	0,65	0,045	0,22	43,48	0,95	0,61
Sclerolobium guianense Benth.	26	2,261	0,58	0,121	0,58	30,43	0,67	0,61
Pterocarpus amazonicus Huber	20	1,739	0,45	0,128	0,61	30,43	0,67	0,58
Swartzia brachyrhachis Harms	17	1,478	0,38	0,115	0,55	32,61	0,72	0,55

Ormosia sp.	23	2	0,52	0,06	0,29	32,61	0,72	0,51
Parkia multijuga Benth.	9	0,783	0,2	0,2	0,95	15,22	0,33	0,5
Swartzia stipulifera Harms	20	1,739	0,45	0,067	0,32	32,61	0,72	0,49
Hymenaea courbaril Linn.	4	0,348	0,09	0,227	1,08	8,7	0,19	0,45
Inga alba (Sw.) Willd.	18	1,565	0,4	0,035	0,16	26,09	0,57	0,38
Hymenolobium excelsum Ducke	6	0,522	0,13	0,126	0,6	13,04	0,29	0,34
Copaifera multijuga Hayne	9	0,783	0,2	0,062	0,3	19,57	0,43	0,31
Abarema sp.	14	1,217	0,31	0,025	0,12	19,57	0,43	0,29
Tachigali sp.	13	1,13	0,29	0,021	0,1	21,74	0,48	0,29
Eperua schomburgkiana Benth.	7	0,609	0,16	0,065	0,31	15,22	0,33	0,27
Andira Anthelmia	1	0,087	0,02	0,154	0,73	2,17	0,05	0,27
Pithecellobium scandens	15	1,304	0,34	0,053	0,25	8,7	0,19	0,26
Enterolobium schomburgkii Benth.	7	0,609	0,16	0,063	0,3	15,22	0,33	0,26
Andira surinamensis (Bondt) Splitg. ex Amshoff	7	0,609	0,16	0,037	0,18	10,87	0,24	0,19
Dipteryx odorata Willd.	5	0,435	0,11	0,048	0,23	10,87	0,24	0,19
Cassia pentandra Raddi	5	0,435	0,11	0,046	0,22	10,87	0,24	0,19
Stryphnodendron barbatimam Mart.	5	0,435	0,11	0,05	0,24	8,7	0,19	0,18
Dimorphandra gardneriana Tul.	4	0,348	0,09	0,037	0,18	8,7	0,19	0,15
Platymiscium filipes Benth.	5	0,435	0,11	0,027	0,13	8,7	0,19	0,14
Peltogyne paradoxa Ducke	5	0,435	0,11	0,007	0,03	10,87	0,24	0,13
Schizolobium amazonicum Huber	4	0,348	0,09	0,041	0,2	4,35	0,1	0,13
Sclerolobium melinonii Harms	3	0,261	0,07	0,022	0,11	6,52	0,14	0,11
Dimorphandra gardneriana Tul.	3	0,261	0,07	0,028	0,13	6,52	0,14	0,11
Martiodendron parvifolium (Benth.) Gleason	5	0,435	0,11	0,022	0,1	4,35	0,1	0,1
Ormosia discolor Spruce ex Benth.	3	0,261	0,07	0,006	0,03	6,52	0,14	0,08
Acacia mearnsii	6	0,522	0,13	0,005	0,03	2,17	0,05	0,07
Abarema mataybifolia (Sandwith) Barneby & J.W.Grimes	2	0,174	0,04	0,011	0,05	4,35	0,1	0,06
Vataireopsis spp.	3	0,261	0,07	0,006	0,03	4,35	0,1	0,06
Cynometra bauhiniifolia Benthan	1	0,087	0,02	0,015	0,07	2,17	0,05	0,05
Bowdichia nitida Spruce	1	0,087	0,02	0,014	0,07	2,17	0,05	0,05
Balizia elegans (Ducke)Barneby & Grimes	1	0,087	0,02	0,011	0,05	2,17	0,05	0,04
Parkia pendula Benth.	1	0,087	0,02	0,007	0,03	2,17	0,05	0,04
Dipteryx magnifica Ducke	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Diplotropis purpurea (Rich.) Amshoff	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Dinizia excelsa Ducke	1	0,087	0,02	0,001	0	2,17	0,05	0,02
Goupiaceae								
Goupia glabra Aubl.	10	0,87	0,22	0,115	0,55	15,22	0,33	0,37
Humiriaceae								
Endopleura uchi (Huber) Cuatrec.	6	0,522	0,13	0,078	0,37	10,87	0,24	0,25
Sacoglottis sp.	3	0,261	0,07	0,03	0,14	6,52	0,14	0,12
Hypericaceae								
Vismia japurensis Reichardt	19	1,652	0,43	0,104	0,5	10,87	0,24	0,39
Vismia cayennensis (Jacq.) Pers.	2	0,174	0,04	0,002	0,01	4,35	0,1	0,05
Vismia guianensis (Aubl.) Choisy	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Lamiaceae								
Vitex megapotamica	8	0,696	0,18	0,013	0,06	17,39	0,38	0,21
Lauraceae								
Licaria canella (Meisn.) Kosterm.	87	7,565	1,96	0,293	1,4	76,09	1,67	1,67
Ocotea sp.	74	6,435	1,66	0,3	1,43	60,87	1,34	1,48
Mezilaurus iatuba (Meiss.) Taub.	6	0,522	0,13	0,119	0,57	6,52	0,14	0,28
Mezilaurus lindaviana Schwacke & Mez	10	0,87	0,22	0,045	0,21	17,39	0,38	0,27
Mezilaurus sp.	7	0,609	0,16	0,059	0,28	13,04	0,29	0,24
Aniba canelilla Mez	4	0,348	0,09	0,005	0,03	6,52	0,14	0,09

Aniba duckei Kosterm.	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Ocotea rubra Mez	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Lecythidaceae								
Eschweilera amara Nied.	70	6,087	1,57	0,343	1,63	63,04	1,38	1,53
Couratari oblongifolia Ducke & R.Knuth	49	4,261	1,1	0,42	2	52,17	1,15	1,42
Holopyxidium jarana Ducke	45	3,913	1,01	0,388	1,85	56,52	1,24	1,37
Eschweilera odora Miers	65	5,652	1,46	0,13	0,62	65,22	1,43	1,17
Eschweilera blanchetiana Miers.	49	4,261	1,1	0,203	0,97	43,48	0,95	1,01
Eschweilera amazonica R.Knuth	25	2,174	0,56	0,106	0,5	26,09	0,57	0,55
Bertholletia excelsa Humb. & Bonpl.	10	0,87	0,22	0,13	0,62	17,39	0,38	0,41
Lecythis usitata Miers	4	0,348	0,09	0,135	0,64	8,7	0,19	0,31
Cariniana micrantha Ducke	9	0,783	0,2	0,02	0,09	13,04	0,29	0,19
Malpighiaceae								
Byrsonima aerugo	39	3,391	0,88	0,113	0,54	23,91	0,53	0,65
Malvaceae								
Theobroma speciosum Willd.	41	3,565	0,92	0,046	0,22	56,52	1,24	0,79
Sloanea froesii Earle Sm.	31	2,696	0,7	0,061	0,29	39,13	0,86	0,62
Sterculia speciosa	15	1,304	0,34	0,06	0,29	28,26	0,62	0,42
Apeiba albiflora Ducke	19	1,652	0,43	0,066	0,32	17,39	0,38	0,38
Quararibea guianensis Aubl.	18	1,565	0,4	0,021	0,1	17,39	0,38	0,3
Bombax paraense Ducke	11	0,957	0,25	0,03	0,14	19,57	0,43	0,27
Bombax sp.	5	0,435	0,11	0,043	0,21	8,7	0,19	0,17
Theobroma subincana Spruce ex Sagot	8	0,696	0,18	0,014	0,07	8,7	0,19	0,15
Luehea speciosa Willd.	2	0,174	0,04	0,012	0,06	4,35	0,1	0,07
Pachira cf. insignis	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Melastomataceae								
Miconia sp.	77	6,696	1,73	0,097	0,46	50	1,1	1,1
Mouriria plasschaerti Pulle	18	1,565	0,4	0,05	0,24	28,26	0,62	0,42
Bellucia sp.	16	1,391	0,36	0,042	0,2	17,39	0,38	0,31
Meliaceae								
Carapa guianensis Aubl.	32	2,783	0,72	0,325	1,55	30,43	0,67	0,98
Guarea kunthiana A.Juss.	21	1,826	0,47	0,05	0,24	28,26	0,62	0,44
Guarea sp.	7	0,609	0,16	0,014	0,06	15,22	0,33	0,19
Trichilia lecointei Ducke	3	0,261	0,07	0,007	0,03	6,52	0,14	0,08
Monimiaceae								
Siparuna sp.	3	0,261	0,07	0,028	0,13	6,52	0,14	0,11
Moraceae								
Perebea guianensis Aubl.	71	6,174	1,6	0,135	0,64	63,04	1,38	1,21
Sahagunia racemifera Huber	45	3,913	1,01	0,094	0,45	50	1,1	0,85
Perebea mollis (Poepp. & Endl.) J.E.Huber	35	3,043	0,79	0,101	0,48	39,13	0,86	0,71
Brosimum lactescens (S.Moore) C.C.Berg	18	1,565	0,4	0,137	0,65	28,26	0,62	0,56
Maquira sclerophylla (Ducke) C.C.Berg	16	1,391	0,36	0,104	0,5	21,74	0,48	0,44
Helicostylis pedunculata Benoist	14	1,217	0,31	0,09	0,43	19,57	0,43	0,39
Brosimum guianense Huber ex Ducke	13	1,13	0,29	0,063	0,3	17,39	0,38	0,32
Brosimum discolor Schott	12	1,043	0,27	0,016	0,07	23,91	0,53	0,29
Ficus maxima P. Miller	6	0,522	0,13	0,073	0,35	8,7	0,19	0,22
Bagassa guianensis Aubl.	7	0,609	0,16	0,02	0,09	8,7	0,19	0,15
Brosimopsis obovata Ducke	3	0,261	0,07	0,053	0,25	6,52	0,14	0,15
Clarisia racemosa Ruiz & Pav.	3	0,261	0,07	0,042	0,2	6,52	0,14	0,14
Brosimum parinarioides Ducke	5	0,435	0,11	0,013	0,06	8,7	0,19	0,12
Myristicaceae								
Virola melinonii (Benoist) A.C.Sm.	52	4,522	1,17	0,161	0,77	54,35	1,19	1,04
Iryanthera juruensis Warb.	31	2,696	0,7	0,238	1,13	26,09	0,57	0,8
Virola cuspidata Warb.	13	1,13	0,29	0,031	0,15	23,91	0,53	0,32

Virola divergens Ducke	4	0,348	0,09	0,008	0,04	6,52	0,14	0,09
Myrtaceae								
Eugenia lambertiana DC.	62	5,391	1,39	0,116	0,55	65,22	1,43	1,13
Myrcia sp.	19	1,652	0,43	0,034	0,16	28,26	0,62	0,4
Myrcia paivae O.Berg	16	1,391	0,36	0,025	0,12	30,43	0,67	0,38
Eugenia paraensis O.Berg	7	0,609	0,16	0,012	0,06	8,7	0,19	0,13
Eugenia sp.	4	0,348	0,09	0,014	0,07	8,7	0,19	0,12
Nyctaginaceae								
Neea sp.	67	5,826	1,51	0,147	0,7	60,87	1,34	1,18
Olacaceae								
Minquartia guianensis Aubl.	39	3,391	0,88	0,492	2,34	32,61	0,72	1,31
Ptychopetalum olacoides	6	0,522	0,13	0,008	0,04	8,7	0,19	0,12
Opiliaceae								
Agonandra sp.	11	0,957	0,25	0,057	0,27	15,22	0,33	0,28
Polygonaceae								
Coccoloba latifolia Lam.	1	0,087	0,02	0,002	0,01	2,17	0,05	0,03
Quiinaceae								
Lacunaria jenmani Ducke	11	0,957	0,25	0,019	0,09	17,39	0,38	0,24
Rubiaceae								
Chimarrhis turbinata DC.	11	0,957	0,25	0,054	0,26	15,22	0,33	0,28
Duroia sprucei Rusby	10	0,87	0,22	0,021	0,1	17,39	0,38	0,23
Duroia macrophylla Huber	7	0,609	0,16	0,012	0,06	13,04	0,29	0,17
Rutaceae								
Euxylophora paraensis	3	0,261	0,07	0,033	0,16	6,52	0,14	0,12
Salicaceae								
Casearia decandra Jacq.	40	3,478	0,9	0,066	0,32	36,96	0,81	0,68
Casearia javitensis H.B. & K.	25	2,174	0,56	0,061	0,29	36,96	0,81	0,55
Laetia procera (Poepp.) Eichler	20	1,739	0,45	0,063	0,3	17,39	0,38	0,38
Homalium sp.	13	1,13	0,29	0,031	0,15	19,57	0,43	0,29
Lindackeria paraensis Kuhlm.	6	0,522	0,13	0,016	0,08	13,04	0,29	0,17
Ryania speciosa Vahl	3	0,261	0,07	0,003	0,02	6,52	0,14	0,08
Sapindaceae								
Talisia longifolia Radlk.	49	4,261	1,1	0,102	0,49	56,52	1,24	0,94
Allophylus floribundus Radlk.	17	1,478	0,38	0,025	0,12	13,04	0,29	0,26
Sapotaceae								
Pouteria sp. 1	242	21,043	5,44	0,833	3,97	89,13	1,96	3,79
Manilkara huberi Standl.	37	3,217	0,83	0,458	2,18	41,3	0,91	1,31
Pouteria bilocularis (H.J.P.Winkl.) Baehni	20	1,739	0,45	0,16	0,76	32,61	0,72	0,64
Pouteria sp. 2	32	2,783	0,72	0,067	0,32	34,78	0,76	0,6
Manilkara paraensis Standl.	12	1,043	0,27	0,149	0,71	13,04	0,29	0,42
Crysophyllum prieuri	13	1,13	0,29	0,103	0,49	19,57	0,43	0,4
Pouteria lasiocarpa	8	0,696	0,18	0,03	0,14	15,22	0,33	0,22
Micropholis venulosa (Mart. & Eichler ex Miq.) Pierre	6	0,522	0,13	0,009	0,04	10,87	0,24	0,14
Pouteria macrocarpa (Mart.) D. Dietr.	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Simaroubaceae								
Picrolemma sprucei Hook	33	2,87	0,74	0,051	0,24	30,43	0,67	0,55
Simaba cedron Planch.	20	1,739	0,45	0,023	0,11	28,26	0,62	0,39
Simarouba versicolor	8	0,696	0,18	0,043	0,21	13,04	0,29	0,22
Urticacaeae								
Cecropia leucoma Miq.	13	1,13	0,29	0,051	0,24	23,91	0,53	0,35
Cecropia hololeuca	3	0,261	0,07	0,022	0,1	2,17	0,05	0,07
Cecropia sciadophylla Mart.	6	0,522	0,13	0,049	0,24	13,04	0,29	0,22
Pourouma longipendula Ducke	15	1,304	0,34	0,299	1,43	15,22	0,33	0,7
Cecropia catarinensis	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03

Verbenaceae								
Aegiphila sp.	18	1,565	0,4	0,076	0,36	15,22	0,33	0,37
Violaceae								
Rinorea guianensis (Aubl.) Kuntze	113	9,826	2,54	0,315	1,5	47,83	1,05	1,7
Rinorea flavescens Kuntze	38	3,304	0,85	0,039	0,18	26,09	0,57	0,54
Paypayrola grandiflora Tul.	6	0,522	0,13	0,007	0,03	13,04	0,29	0,15
Vochysiaceae								
Erisma uncinatum Warm.	11	0,957	0,25	0,252	1,2	10,87	0,24	0,56
Qualea sp.	5	0,435	0,11	0,114	0,54	10,87	0,24	0,3
Vochysia haenkeana Mart.	4	0,348	0,09	0,015	0,07	8,7	0,19	0,12
Vochysia surinamensis Stafl	3	0,261	0,07	0,026	0,12	6,52	0,14	0,11
Vochysia maxima Ducke	3	0,261	0,07	0,006	0,03	6,52	0,14	0,08
Vochysia sp. 1	2	0,174	0,04	0,007	0,03	4,35	0,1	0,06
Ruizterania albiflora (Warm.) Marc.-Berti	1	0,087	0,02	0,012	0,06	2,17	0,05	0,04
Indeterminadas								
Abiu Caramurim*	49	4,261	1,1	0,215	1,02	36,96	0,81	0,98
Araracanga Vermelha*	5	0,435	0,11	0,019	0,09	10,87	0,24	0,15
Muirarana*	1	0,087	0,02	0,003	0,01	2,17	0,05	0,03
Munguba Folha Fina*	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Embauba Amarela*	1	0,087	0,02	0,007	0,03	2,17	0,05	0,03
Abiu Rajado*	1	0,087	0,02	0,001	0,01	2,17	0,05	0,03
Breu Seco*	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03
Quataquisala*	1	0,087	0,02	0,004	0,02	2,17	0,05	0,03
Tachi Preto Folha Peluda*	1	0,087	0,02	0,006	0,03	2,17	0,05	0,03

(*) Espécie identificada somente por nome popular

APÊNDICE C

CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS POLARIMÉTRICAS E A BIOMASSA

Tabela 1 – Quadro de correlação entre a totalidade de dados polarimétricos e biomassa

Correlações grifadas foram significativas para p< 0,05 (N=30)

	τ_m	*τ_m3*	*τ_m2*	*τ_m1*	*ψ*	*ψ_3*	*ψ_2*	*ψ_1*	*φ_s*	*φ_s3*	*φ_s2*	*φ_s1*	*α_s*	*α_s3*	*α_s2*	*α_s1*	*Pv*	*Ps*	*Pd*	P_T
τ_m	1,00	0,46	0,65	-0,04	-0,02	-0,04	-0,15	0,10	0,02	0,00	-0,30	0,22	-0,03	0,31	-0,18	-0,21	0,08	0,13	0,33	0,14
τ_m3	0,46	1,00	-0,37	-0,06	-0,04	-0,14	-0,23	0,22	0,24	0,26	-0,35	0,31	-0,12	-0,07	-0,23	0,14	-0,10	-0,18	-0,14	-0,15
τ_m2	0,65	-0,37	1,00	-0,11	0,02	0,10	0,01	-0,07	-0,17	-0,19	-0,05	-0,01	0,11	0,40	0,06	-0,35	0,18	0,29	0,46	0,28
τ_m1	-0,04	-0,06	-0,11	1,00	0,13	-0,14	0,16	0,08	-0,10	-0,14	0,14	-0,10	-0,29	-0,12	-0,31	0,00	0,22	0,16	0,13	0,20
ψ	-0,02	-0,04	0,02	0,13	1,00	-0,12	0,36	0,77	-0,20	0,23	-0,57	0,07	-0,31	-0,08	-0,33	-0,20	0,08	-0,00	-0,14	0,02
ψ_3	-0,04	-0,14	0,10	-0,14	-0,12	1,00	-0,50	-0,24	0,13	-0,35	0,31	0,15	0,25	0,13	0,37	0,06	-0,10	0,18	0,00	0,03
ψ_2	-0,15	-0,23	0,01	0,16	0,36	-0,50	1,00	-0,16	-0,29	0,24	-0,11	-0,40	-0,25	-0,19	-0,45	-0,02	-0,12	-0,28	-0,17	-0,21
ψ_1	0,10	0,22	-0,07	0,08	0,77	-0,24	-0,16	1,00	-0,02	0,23	-0,63	0,30	-0,21	0,00	-0,16	-0,22	0,20	0,07	-0,03	0,13
φ_s	0,02	0,24	-0,17	-0,10	-0,20	0,13	-0,29	-0,02	1,00	0,38	0,25	0,56	0,47	0,09	0,56	0,26	-0,01	-0,03	0,03	-0,02
φ_s3	0,00	0,26	-0,19	-0,14	0,23	-0,35	0,24	0,23	0,38	1,00	-0,12	-0,22	-0,07	-0,07	-0,22	0,11	0,05	-0,32	-0,35	-0,17
φ_s2	-0,30	-0,35	-0,05	0,14	-0,57	0,31	-0,11	-0,63	0,25	-0,12	1,00	-0,39	0,13	-0,12	0,31	0,10	0,11	0,15	0,17	0,15
φ_s1	0,22	0,31	-0,01	-0,10	0,07	0,15	-0,40	0,30	0,56	-0,22	-0,39	1,00	0,39	0,19	0,48	0,10	-0,08	0,14	0,18	0,04
α_s	-0,03	-0,12	0,11	-0,29	-0,31	0,25	-0,25	-0,21	0,47	-0,07	0,13	0,39	1,00	0,65	0,85	0,20	-0,44	-0,30	-0,14	-0,37
α_s3	0,31	-0,07	0,40	-0,12	-0,08	0,13	-0,19	0,00	0,09	-0,07	-0,12	0,19	0,65	1,00	0,41	-0,35	-0,25	-0,10	-0,05	-0,17
α_s2	-0,18	-0,23	0,06	-0,31	-0,33	0,37	-0,45	-0,16	0,56	-0,22	0,31	0,48	0,85	0,41	1,00	0,15	-0,20	0,01	0,00	-0,10
α_s1	-0,21	0,14	-0,35	0,00	-0,20	0,06	-0,02	-0,22	0,26	0,11	0,10	0,10	0,20	-0,35	0,15	1,00	-0,27	-0,21	-0,22	-0,26
Pv	0,08	-0,10	0,18	0,22	0,08	-0,10	-0,12	0,20	-0,01	0,05	0,11	-0,08	-0,44	-0,25	-0,20	-0,27	1,00	0,79	0,64	0,94
Ps	0,13	-0,18	0,29	0,16	-0,00	0,18	-0,28	0,07	-0,03	-0,32	0,15	0,14	-0,30	-0,10	0,01	-0,21	0,79	1,00	0,74	0,94
Pd	0,33	-0,14	0,46	0,13	-0,14	0,00	-0,17	-0,03	0,03	-0,35	0,17	0,18	-0,14	-0,05	0,00	-0,22	0,64	0,74	1,00	0,79
P_T	0,14	-0,15	0,28	0,20	0,02	0,03	-0,21	0,13	-0,02	-0,17	0,15	0,04	-0,37	-0,17	-0,10	-0,26	0,94	0,94	0,79	1,00
H	0,00	0,05	-0,03	-0,15	0,00	-0,28	0,33	-0,05	-0,04	0,27	-0,06	-0,22	0,11	-0,12	-0,18	0,01	-0,23	-0,64	-0,18	-0,43
An	0,36	0,08	0,30	0,00	-0,12	-0,26	-0,04	0,01	0,14	0,02	0,08	0,09	-0,22	-0,00	-0,08	-0,35	0,50	0,48	0,53	0,53
α	0,05	0,08	-0,00	-0,10	-0,08	-0,37	0,35	-0,11	0,00	0,23	-0,04	-0,16	0,13	-0,12	-0,14	0,09	-0,16	-0,56	-0,12	-0,35
Δφ(°)	-0,22	-0,12	-0,13	0,12	0,20	-0,42	0,25	0,24	0,07	0,03	-0,01	0,04	0,14	-0,14	0,10	0,11	-0,13	-0,32	-0,04	-0,22
γ	0,31	-0,16	0,43	0,08	-0,27	0,28	-0,11	-0,34	-0,09	-0,58	0,19	0,17	0,13	0,13	0,12	0,07	-0,10	0,35	0,58	0,19
$\sigma°_{HH}$	0,14	-0,10	0,25	0,06	-0,01	0,13	-0,28	0,09	0,03	-0,24	0,09	0,19	-0,30	-0,12	0,01	-0,17	0,78	0,95	0,68	0,91
$\sigma°_{HV}$	0,20	-0,09	0,29	0,22	0,09	0,11	-0,20	0,15	-0,07	-0,16	0,10	0,01	-0,38	-0,11	-0,16	-0,29	0,86	0,85	0,67	0,90
$\sigma°_{VV}$	0,39	0,04	0,41	-0,07	0,29	0,07	-0,12	0,33	-0,17	0,01	-0,17	-0,02	-0,27	0,01	-0,18	-0,28	0,71	0,66	0,59	0,73
Rp	0,30	0,07	0,25	-0,02	0,38	0,08	0,13	0,26	-0,30	0,21	-0,15	-0,35	-0,09	0,13	-0,29	-0,24	0,00	-0,19	-0,03	-0,09
Rc	0,03	-0,01	0,01	0,28	0,30	-0,01	0,24	0,14	-0,31	0,07	-0,03	-0,34	-0,24	-0,03	-0,40	-0,25	-0,03	-0,25	-0,17	-0,15
BMI	0,27	-0,04	0,35	0,01	0,13	0,12	-0,23	0,20	-0,06	-0,15	-0,02	0,11	-0,31	-0,07	-0,08	-0,23	0,82	0,90	0,70	0,91
CSI	0,21	0,00	0,21	-0,00	0,28	0,06	0,14	0,18	-0,29	0,18	-0,06	-0,38	-0,05	0,10	-0,26	-0,20	0,01	-0,18	0,05	-0,07
VSI	-0,13	0,01	-0,17	0,29	0,13	-0,09	0,20	0,03	-0,14	-0,04	0,03	-0,15	-0,15	-0,10	-0,24	-0,15	-0,05	-0,21	-0,19	-0,14
Biomassa	-0,11	-0,02	-0,05	-0,32	0,13	0,04	0,04	0,11	-0,08	0,15	-0,03	-0,18	0,17	0,22	0,11	-0,39	-0,18	-0,40	-0,27	-0,31

Tabela 1 – Quadro de correlação entre a totalidade de dados polarimétricos e biomassa (continuação)

Correlações grifadas foram significativas para p< 0,05 (N=30)

	H	***An***	***α***	***Δφ(°)***	***γ***	***σ°$_{HH}$***	***σ°$_{HV}$***	***σ°$_{VV}$***	***Rp***	***Rc***	***BMI***	***CSI***	***VSI***	***Biomassa***
τ_m	0,00	0,36	0,05	-0,22	0,31	0,14	0,20	0,39	0,30	0,03	0,27	0,21	-0,13	-0,11
τ_m3	0,05	0,08	0,08	-0,12	-0,16	-0,10	-0,09	0,04	0,07	-0,01	-0,04	0,00	0,01	-0,02
τ_m2	-0,03	0,30	-0,00	-0,13	0,43	0,25	0,29	0,41	0,25	0,01	0,35	0,21	-0,17	-0,05
τ_m1	-0,15	0,00	-0,10	0,12	0,08	0,06	0,22	-0,07	-0,02	0,28	0,01	-0,00	0,29	-0,32
ψ	0,00	-0,12	-0,08	0,20	-0,27	-0,01	0,09	0,29	0,38	0,30	0,13	0,28	0,13	0,13
ψ_3	-0,28	-0,26	-0,37	-0,42	0,28	0,13	0,11	0,07	0,08	-0,01	0,12	0,06	-0,09	0,04
ψ_2	0,33	-0,04	0,35	0,25	-0,11	-0,28	-0,20	-0,12	0,13	0,24	-0,23	0,14	0,20	0,04
ψ_1	-0,05	0,01	-0,11	0,24	-0,34	0,09	0,15	0,33	0,26	0,14	0,20	0,18	0,03	0,11
φ_s	-0,04	0,14	0,00	0,07	-0,09	0,03	-0,07	-0,17	-0,30	-0,31	-0,06	-0,29	-0,14	-0,08
φ_s3	0,27	0,02	0,23	0,03	-0,58	-0,24	-0,16	0,01	0,21	0,07	-0,15	0,18	-0,04	0,15
φ_s2	-0,06	0,08	-0,04	-0,01	0,19	0,09	0,10	-0,17	-0,15	-0,03	-0,02	-0,06	0,03	-0,03
φ_s1	-0,22	0,09	-0,16	0,04	0,17	0,19	0,01	-0,02	-0,35	-0,34	0,11	-0,38	-0,15	-0,18
α_s	0,11	-0,22	0,13	0,14	0,13	-0,30	-0,38	-0,27	-0,09	-0,24	-0,31	-0,05	-0,15	0,17
α_s3	-0,12	-0,00	-0,12	-0,14	0,13	-0,12	-0,11	0,01	0,13	-0,03	-0,07	0,10	-0,10	0,22
α_s2	-0,18	-0,08	-0,14	0,10	0,12	0,01	-0,16	-0,18	-0,29	-0,40	-0,08	-0,26	-0,24	0,11
α_s1	0,01	-0,35	0,09	0,11	0,07	-0,17	-0,29	-0,28	-0,24	-0,25	-0,23	-0,20	-0,15	-0,39
Pv	-0,23	0,50	-0,16	-0,13	-0,10	0,78	0,86	0,71	0,00	-0,03	0,82	0,01	-0,05	-0,18
Ps	-0,64	0,48	-0,56	-0,32	0,35	0,95	0,85	0,66	-0,19	-0,25	0,90	-0,18	-0,21	-0,40
Pd	-0,18	0,53	-0,12	-0,04	0,58	0,68	0,67	0,59	-0,03	-0,17	0,70	0,05	-0,19	-0,27
P_T	-0,43	0,53	-0,35	-0,22	0,19	0,91	0,90	0,73	-0,09	-0,15	0,91	-0,07	-0,14	-0,31
H	1,00	-0,27	0,93	0,47	-0,25	-0,61	-0,35	-0,24	0,34	0,43	-0,49	0,38	0,36	0,37
An	-0,27	1,00	-0,09	-0,28	0,07	0,43	0,30	0,36	-0,04	-0,23	0,43	-0,02	-0,26	-0,22
α	0,93	-0,09	1,00	0,43	-0,23	-0,51	-0,33	-0,19	0,29	0,31	-0,41	0,32	0,25	0,28
Δφ(°)	0,47	-0,28	0,43	1,00	-0,06	-0,33	-0,15	-0,24	0,02	0,25	-0,32	0,10	0,34	0,14
γ	-0,25	0,07	-0,23	-0,06	1,00	0,27	0,20	0,16	-0,02	-0,10	0,24	0,04	-0,11	-0,33
σ°$_{HH}$	-0,61	0,43	-0,51	-0,33	0,27	1,00	0,85	0,68	-0,29	-0,37	0,94	-0,31	-0,28	-0,30
σ°$_{HV}$	-0,35	0,30	-0,33	-0,15	0,20	0,85	1,00	0,72	0,01	0,11	0,86	-0,02	0,14	-0,16
σ°$_{VV}$	-0,24	0,36	-0,19	-0,24	0,16	0,68	0,72	1,00	0,44	-0,12	0,89	0,38	-0,34	-0,07
Rp	0,34	-0,04	0,29	0,02	-0,02	-0,29	0,01	0,44	1,00	0,50	0,02	0,97	0,04	0,30
Rc	0,43	-0,23	0,31	0,25	-0,10	-0,37	0,11	-0,12	0,50	1,00	-0,29	0,51	0,85	0,33
BMI	-0,49	0,43	-0,41	-0,32	0,24	0,94	0,86	0,89	0,02	-0,29	1,00	-0,03	-0,33	-0,22
CSI	0,38	-0,02	0,32	0,10	0,04	-0,31	-0,02	0,38	0,97	0,51	-0,03	1,00	0,04	0,26
VSI	0,36	-0,26	0,25	0,34	-0,11	-0,28	0,14	-0,34	0,04	0,85	-0,33	0,04	1,00	0,25
Biomassa	0,37	-0,22	0,28	0,14	-0,33	-0,30	-0,16	-0,07	0,30	0,33	-0,22	0,26	0,25	1,00