



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16624-TDI/1598

**USO DE IMAGENS ALOS/PALSAR
MULTIPOLARIZADAS PARA DETECÇÃO DE
INCREMENTO DE DESFLORESTAMENTO NA
AMAZÔNIA**

Sumaia Resegue Aboud Neta

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Luciano Vieira Dutra, e Corina da Costa Freitas, aprovada em
30 de setembro de 2009

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.19.09.48>>

INPE
São José dos Campos
2009

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16624-TDI/1598

**USO DE IMAGENS ALOS/PALSAR
MULTIPOLARIZADAS PARA DETECÇÃO DE
INCREMENTO DE DESFLORESTAMENTO NA
AMAZÔNIA**

Sumaia Resegue Aboud Neta

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Luciano Vieira Dutra, e Corina da Costa Freitas, aprovada em
30 de setembro de 2009

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/11.19.09.48>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

About Neta, Sumaia Resegue.

Ab75Us Uso de imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia / Sumaia Resegue About Neta. – São José dos Campos : INPE, 2009.
264 p. ; (INPE-16624-TDI/1598)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Luciano Vieira Dutra, e Corina da Costa Freitas.

1. Incremento de desflorestamento. 2. ALOS/PALSAR.
3. PRODES. 4. SEGSAR. 5. Tapajós-PA. I.Título.

CDU 528.854(811.5)

Copyright © 2009 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 © 2009 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 Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro


Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Corina da Costa Freitas


Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Dalton de Morisson Valeriano


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Tatiana Mora Kuplich


Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

**Dr. Paulo Maurício Lima de Alencastro
Graça**


Convidado(a) / INPA / Manaus - AM

Aluno (a): Sumaia Resegue Aboud Neta

São José dos Campos, 30 de setembro de 2009

“(...) Não tenhas medo. Eu mesmo te ajudarei.” (Isaias 41:13)

“(...) E vou fazer os cegos andar num caminho que não conheceram, farei que pisem numa senda que não conheceram. O lugar escuro transformarei diante deles em luz e o terreno escabroso em terra plana. Estas são as coisas que vou fazer para eles e não vou abandoná-los” (Isaias 42:16)

“(...) Sê corajoso e forte, e age. Não tenhas medo nem fiques aterrorizado, porque Jeová DEUS, meu DEUS, está contigo. Não te desampará nem te deixará até que se acabe toda a obra do serviço da casa de Jeová” (1 Crônicas 28:20)

“(...) Transformei todos os meus montes em caminhos” (Isaias 49:11)

Dedico este trabalho ao libanês que partiu do Oriente Médio em busca de seus sonhos, fugindo da guerra, sem falar português... e aqui neste país varonil construiu uma bela história... Ao meu avô Farid Aboud, falecido, aos 95 anos, um mês antes desta defesa, dedico este trabalho.

Agradeço ao meu amado DEUS, meu criador, meu rei, meu tudo, aquele que me permitiu viver, me permitiu voar e chegar até aqui... chegar além de onde os meus sonhos pudessem algum dia imaginar. À ti Senhor, todo mérito, toda honra e toda glória.

Agradeço e dedico esta dissertação de mestrado as pessoas mais especiais da minha vida, minha família, a minha verdadeira riqueza, ao meu “porto seguro”: muito obrigada por todo apoio, todo amor, toda confiança depositada, todos os sonhos compartilhados.... A vocês minha mãe Vera Maria M. Aboud, meu pai Roberto Aboud, minha irmã Samira Laura Aboud e meu sempre querido Celso Martins, obrigada por me fazerem ser quem sou, pelo colo, pelo ombro, por me ajudarem a não desistir... obrigada, obrigada, obrigada... Sem vocês não existiria nem inspiração nem “luz” para finalizar esta dissertação. Obrigada também a minha querida tia Doralice Marques por sempre me apoiar, sempre acreditar em mim!!!

Agradeço aos meus orientadores Dr. Luciano Vieira Dutra e Dra. Corina da Costa Freitas por me “estenderem a mão” e abrirem as portas do INPE. Obrigada por permitirem que eu entrasse em um universo onde poucos conseguem entrar e por depositarem confiança em meu trabalho. Pelas dúvidas esclarecidas e auxílios prestados deixo aqui registrado o meu profundo agradecimento. Parece que foi ontem que cheguei aqui pela primeira vez...

Obrigada a minha banca examinadora por me darem a honra de dividirem este momento comigo. Agradeço em especial ao Dr. Dalton Morisson Valeriano pelas dúvidas esclarecidas e conhecimento compartilhado ao longo desta dissertação.

Obrigada aos meus amigos inpeanos, em especial a turma do SERFE 2007, pensão da D. Laís, amigos do sigma e senzala. Obrigada Dr. Sidnei Sant’Anna, Bruno Prado, Graziela Scofield, Rogério Galante, Júlio Guerra e Daniel Andrade por me auxiliarem em muitas das dúvidas que encontrei.

Obrigada aos meus amigos de Lins-SP, a cidade do meu coração, “a menina dos meus olhos...”. Agradeço também aos meus amigos joseenses por todas as horas em que foram minha família em São José do Campos-SP, obrigada Thiago D. Pereira, Bruna Peloso, Ericson Hayakawa e Sílvia Cristina.

Por fim, a todos que um dia irão ler este trabalho, se posso oferecer um conselho fica aqui registrado além da eternidade: Em um mundo onde muitos não vêem o poder divino, nunca se esqueçam do principal: “(...) Há mais vantagem na sabedoria...(..) e tudo isso é vaidade e um esforço para alcançar o vento” (Eclesiastes 2:17). O poder divino é o que realmente importa em nossa existência e sem ele não conseguiremos ir muito longe, pois sempre existirá um vazio a ser preenchido =)

RESUMO

A Amazônia é uma região da floresta tropical que possui cerca de 5,4 milhões de km² e abriga uma ampla biodiversidade de espécies do planeta. No entanto, seu modelo de ocupação tem aumentado significativamente o desflorestamento na Amazônia Legal. Por serem regiões bastante úmidas, a presença de nuvens é constante, ocasionando limitações no imageamento por sensores ópticos. Deste modo, o uso de sensoriamento remoto por radar é privilegiado, devido ao fato das microondas praticamente não sofrerem interferência atmosférica o que permite o imageamento das áreas independente das condições climáticas da região. Neste contexto, este estudo avaliou o potencial de imagens de radar para discriminar incremento de desflorestamento em uma área localizada na Floresta Nacional de Tapajós-PA. Foi utilizada uma imagem multipolarizada do sensor ALOS/PALSAR (banda L), modo polarimétrico (PLR) e nível de processamento 1.5. Realizaram-se classificações e segmentações na imagem radar sem filtro e com filtro *Gamma 5x5*. Avaliou-se o classificador pontual MAXVER-ICM e por regiões Bhattacharyya (com segmentações SPRING e SEGSAR), onde em todos os casos as imagens multipolarizadas em amplitude foram segmentadas e classificadas individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV e HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV). Os resultados foram comparados com o mapa temático construído a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006, com o intuito de detectar o incremento de desflorestamento e avaliar a existência de perda significativa de informação quando não se utiliza todos os canais polarizados. O classificador Bhattacharyya apresentou acurácia superior em relação ao classificador MAXVER-ICM. As melhores classificações foram obtidas para a polarização dual HH+HV (nas imagens com filtro e sem filtro segmentadas pelo SPRING e SEGSAR). A acurácia mais elevada foi para a segmentação pelo SPRING na imagem sem filtro (*kappa* de 0,5085). No entanto, a acurácia do produtor foi menor em comparação com as outras combinações de polarizações devido ao erro de omissão (E.O.) ter sido maior. Para as demais combinações de canais HH+HV, o menor E.O. foi obtido quando utilizou-se, respectivamente, a segmentação pelo SEGSAR (na imagem com filtro e sem filtro) e segmentação pelo SPRING (na imagem com filtro), porém, em todos estas classificações o erro de inclusão (E.I.) foi maior em relação a classificação de maior *kappa*. Deste modo realizou-se a análise destas quatro classificações, onde se constatou que considerando a cobertura de nuvens na região, os resultados obtidos pelo SEGSAR indicaram que o baixo número de polígonos com E.O. comparado com a segmentação SPRING, e o considerável número de polígonos inicialmente classificados como E.I. os quais foram detectados como novos desflorestamentos pelo PRODES do ano seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior ou realmente devido ao E.O. do PRODES, salientaram a eficácia do segmentador e dos dados microondas. Assim, concluiu-se que o uso de radar no mapeamento de regiões tropicais é uma “ferramenta” de auxílio para imagens ópticas na aquisição de informações referentes à cobertura do solo durante todo o ano. No entanto, os elevados E.I. e em alguns casos E.O. das classificações (provavelmente devido ao acúmulo hídrico no solo alguns dias antes do imageamento do radar, bem como a incidência de vestígios de biomassa (“tocos”) presentes no solo na região de estudo) limitou o uso do radar, sendo necessário também a utilização de imagens ópticas para análise das informações adicionais obtidas.

USE OF MULTIPOLARIZED ALOS/PALSAR IMAGE FOR DETECTION OF INCREMENT OF DEFORESTATION IN THE AMAZON

ABSTRACT

The Amazon forest is a region of rainforest, which has about 5,4 million square kilometers, and with great biodiversity of species on the planet. However, its traditional model of occupation has led to significant levels of increase of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. Through remote sensing, these areas can be constantly monitored, offering rates of control and estimation of deforested areas. Due to the high rainfall rates, humidity and presence of clouds, which characterize the Amazon region climate during the year, there are limitations in optical imaging. The ability of Radar sensors to acquire images through the clouds allows the continuous imaging of areas regardless of weather conditions in the region. In this context, this study evaluated the potential of the full polarized amplitude PLR ALOS/PALSAR L band data to discriminate the deforestation increase over National Forest of Tapajós-PA. The radar image segmentations and classifications with no filter and Gamma 5x5 filter were performed. The MAXVER-ICM and Bhattacharyya (combined with SPRING and SEGSAR segmentations) classifiers were used for all combinations of the multipolarized images: HH, HV, VV, HH + HV, HV + VV, HH + VV and HH + HV + VV. The results were compared with the PRODES thematic map to detect the deforestation increment and the existence of significant information loss when all the polarized channels were not used, and to find the best polarization which characterizes the deforestation. The Bhattacharyya classifier had higher accuracy than MAXVER-ICM classifier. The best classifications were obtained when the HH + HV polarization (with and without filter, segmented by SPRING and SEGSAR) was used. The highest accuracy was obtained for the no filter SPRING (kappa of 0.5085). However, the HH + HV producer's accuracy was minor compared with other combinations of polarization because the error of omission (E.O.) has been higher. For the other channel combinations, the lower E.O. was obtained when the SEGSAR (in the image with filter and with no filter) and SPRING (in the image with filter) segmentations were used but the error of inclusion (E.I.) was higher in relation to classification of higher kappa in all these classifications. There was a detailed analysis of these four classifications. The results showed that the use of radar mapping in tropical regions is an additional powerful tool for the soil cover information acquisition throughout the year. The combined radar and optical data is recommended for the detection of new deforestation (due to water accumulation in the soil a few days before the imaging radar, and the incidence of biomass (stump) in the soil in the region of study), because the high E.I. and in some cases E.O. classifications has limited the use of radar.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1. INTRODUÇÃO.....	33
1.1 Contexto e Justificativa	33
1.2 Convenções Adotadas	40
1.3 Hipótese.....	40
1.4 Objetivos.....	40
1.5 Estrutura do trabalho	41
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	43
2.1 Evolução do desflorestamento na Amazônia Legal.....	43
2.2 Monitoramento de áreas desflorestadas: Projeto PRODES e DETER	47
2.3 Sensoriamento Remoto por Radar	50
2.3.1 Características Gerais.....	50
2.3.2 Parâmetros relacionados ao Sistema Sensor.....	55
2.3.2.1 Frequência ou comprimento de onda (λ).....	55
2.3.2.2 Polarização.....	57
2.3.2.3 Ângulo de Incidência (θ_i)	60
2.3.2.4 Direção de visada	62
2.3.3 Parâmetros Inerentes ao Alvo	63
2.3.3.1 Rugosidade da Superfície	63
2.3.3.2 Constante Dielétrica	64
2.4 Satélite Avançado de Observação da Terra ALOS/PALSAR	65
2.5 Classificação.....	67
2.5.1 Modelagem estatística de dados microondas.....	69
2.5.2 Filtragem do ruído <i>Speckle</i>	70
2.5.3 Classificação estatística MAXVER-ICM.....	71
2.5.4 Classificação por regiões - Distância de Bhattacharyya	73
2.6 Segmentação.....	74
2.6.1 Segmentação SPRING	75
2.6.2 Segmentação SEGSAR	76
2.7 Avaliação da acurácia das classificações	77
3. MATERIAIS E MÉTODOS	83
3.1 Área de Estudo: Região da Floresta Nacional de Tapajós-PA	83
3.2 Materiais.....	87
3.2.1 Imagens ALOS/PALSAR.....	87
3.2.2 Dados auxiliares.....	87

3.3 Softwares e hardware utilizados	92
3.4 Metodologia.....	93
3.4.1 Pré-processamentos.....	94
3.4.2 Análise Exploratória dos dados ALOS/PALSAR	101
3.4.3 Classificações supervisionadas e Segmentações dos dados ALOS/PALSAR	107
3.4.4 Pós-classificação: Análises e comparações com Mapa PRODES de referência .	112
4 . RESULTADOS E DISCUSSÕES	117
4.1 Resultado da análise exploratória	117
4.1.1 Imagem Amplitude convertida para Coeficiente de Retroespalhamento.....	117
4.2 Resultado das classificações supervisionadas e segmentações dos dados ALOS/PALSAR	139
4.2.1 Classificação pelo método MAXVER-ICM.....	140
4.2.1.1 Classificações MAXVER-ICM para a imagem sem filtro	141
4.2.1.2 Classificações MAXVER-ICM para a imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i>	145
4.2.2 Classificações por regiões utilizando a Distância de Bhattacharyya	149
4.2.2.1 Classificações por regiões para a imagem sem filtro	149
4.2.2.1.1 Segmentação pelo SPRING	150
4.2.2.1.2 Segmentação pelo SEGSAR	155
4.2.2.2 Classificações por regiões para a imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i>	161
4.2.2.2.1 Segmentação pelo SPRING	162
4.2.2.2.2 Segmentação pelo SEGSAR	168
4.3 Análise para as classificações HH+HV	178
5 . CONSIDERAÇÕES FINAIS	193
5.1 Conclusões.....	193
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	195
6 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
APÊNDICE A. MATRIZES DE CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES.....	215
APÊNDICE B. MAPAS TEMÁTICOS RESULTANTES DAS CLASSIFICAÇÕES.....	227
APÊNDICE C . ERROS DE OMISSÃO E INCLUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES BHATTACHARYYA PARA OS CANAIS HH+HV.....	249

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1	Fases esquemáticas do processo de desmatamento. Em (a) é ilustrado a presença da floresta primária sem degradação. Em (b), floresta degradada com retirada de madeira e incêndio. Em (c) verifica-se a degradação de intensidade alta, com recorrência de fogo e em (d) ilustra a retirada total da cobertura florestal, caracterizando o corte raso.	36
1.2	Estados que compõem a Amazônia Legal e em vermelho é ilustrado o “arco do desflorestamento”: áreas com maiores concentrações de desmatamento da Amazônia Legal.	37
2.1	Taxas anuais de desflorestamento por estados da Amazônia Legal.	47
2.2	Espectro eletromagnético e as bandas da região de microondas.	51
2.3	Geometria de aquisição de imagens pelos radares.	52
2.4	Figura esquemática ilustrando os tipos e mecanismos de retroespalhamento em ambientes florestais. (a) Retroespalhamento superficial e de interior de dossel; (b) Retroespalhamento de troncos e galhos; (c) Retroespalhamento do solo; (d) Reflexão dupla tronco-solo; (e) Retroespalhamento integrado entre tronco e solo.	54
2.5	Campo Elétrico: Polarização de Ondas eletromagnéticas (a) Horizontal e (b) Vertical.	58
2.6	Relação entre os ângulos de incidência, depressão (no caso de radar aerotransportado) e visada no imageamento por radar.	61
2.7	Comparação de Geometrias de Imageamento.	61
2.8	Brilho da imagem como uma função da topografia.	62
2.9	Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal. Fonte: Modificado de Ulaby et al. (1982).	64
2.10	Esquema do radar ALOS.	65
3.1	Localização geográfica da área de estudo na FLONA de Tapajós-PA. Em destaque é ilustrado a área de estudo com a imagem Landsat TM de 09/11/2006 (composição R5G4B3) e imagem ALOS/PALSAR de 21/10/2006 (composição HH(R)HV(G)VV(B)).	83
3.2	Feições representativas da área de estudo: (a) Floresta Primária; (b) Floresta Secundária; (c) Agricultura; (d) Pasto limpo; (e) Pasto Sujo; (f) Desflorestamento Recente e (g) Solo Exposto.	86
3.3	Precipitação pluviométrica acumulada do mês de Outubro de 2006, medida pelos PCDs mais próximos da área de estudo. A seta em vermelho ilustra a data de imageamento do radar ALOS/PALSAR para a área de estudo.	89

3.4	Mapa de desflorestamento gerado a partir das informações disponibilizadas pelo PRODES do ano base de 2006, referente à cena Landsat-5 TM 227/62 de 09 de Novembro de 2006.	90
3.5	Relação das imagens utilizadas.	91
3.6	Imagem óptica auxiliar: Landsat-5 TM (composição R5G4B3) de 09 de Novembro de 2006, em destaque a área de estudo.	92
3.7	Imagem óptica auxiliar: SPOT-4 (composição R4G1B2) de 31 de Agosto de 2006, em destaque a área de estudo.	92
3.8	Fluxograma da metodologia geral do trabalho.	94
3.9	Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados no Pré-processamento dos dados ALOS/PALSAR.	95
3.10	Média dos <i>pixels</i> ao longo do azimute para um dado range.	97
3.11	Mapa Altimétrico da área de estudo.	98
3.12	Dados ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 em intensidade, reamostrados e registrados: (a) Componente HH; (b) Componente HV; (c) Componente VV e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV).	99
3.13	Recorte da área de estudo: Dados ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 em amplitude, reamostrados, registrados e filtrados com filtro <i>Gamma</i> 5x5: (a) Componente HH filtrada; (b) Componente HV filtrada; (c) Componente VV filtrada e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV) filtrada.	100
3.14	(a) Máscara de desflorestamento acumulado e resíduo; (b) Máscara (a) sobre a imagem ALOS/PALSAR em amplitude a ser classificada e segmentada.	101
3.15	Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para a análise exploratória dos dados.	102
3.16	Dados ALOS/PALSAR convertidos para valores de retroespalhamento (dB) (a) Componente HH em dB; (b) Componente HV em dB; (c) Componente VV em dB e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV).	103
3.17	Imagem ALOS/PALSAR em dB composição R(HH)G(HV)B(VV) com as 13 amostras das classes floresta (amostras na coloração verde, totalizando 1300 <i>pixels</i>) e 13 amostras da classe incremento de desflorestamento (amostras na coloração vermelho, totalizando 1131 <i>pixels</i>) utilizadas na análise exploratória dos dados.	105
3.18	Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para segmentar e classificar os dados ALOS/PALSAR.	107
3.19	(a) Máscara de desflorestamento acumulado 2006, a tonalidade preta representa os dados que serão excluídos do processamento enquanto que a cor branca representa as áreas que serão segmentadas e classificadas; (b) Imagem ALOS/PALSAR em amplitude composição R(HH)G(HV)B(VV); (c) Imagem a ser segmentada e classificada ALOS/PALSAR em amplitude composição R(HH)G(HV)B(VV) resultante da aplicação da máscara (a) na imagem (b). Nas figuras (a), (b) e (c) são ilustradas as amostras das classes floresta (1300 <i>pixels</i>)	

	em verde) e incremento de desflorestamento (1131 <i>pixels</i> em vermelho) utilizadas nas classificações supervisionadas.	109
3.20	Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para analisar, validar e comparar os resultados.	113
3.21	Exemplos de regiões (apontadas pelas setas) onde há discordância entre os mapas do PRODES e as imagens sintéticas TM e ALOS/PALSAR.....	116
4.1	Imagens ALOS/PALSAR HH(R)HV(G)VV(B) em valores de retroespalhamento (dB) com os polígonos de incremento de desflorestamento utilizados na análise exploratória.	118
4.2	Imagem Landsat TM de 09/11/2006, composição 5(R)4(G)3(B), com os polígonos de incremento de desflorestamento utilizados na análise exploratória....	119
4.3	Intervalo de Confiança de 95% para o coeficiente médio de retroespalhamento (dB) nas componentes HH, HV e VV da imagem ALOS/PALSAR para as amostras da classe incremento de desflorestamento. O erro padrão foi obtido dividindo-se o desvio padrão pela raiz quadrada do tamanho da amostra.....	121
4.4	Intervalo de Confiança de 95% para o coeficiente médio de retroespalhamento (dB) nas componentes HH, HV e VV da imagem ALOS/PALSAR para as amostras da classe floresta.	124
4.5	Coeficiente médio de retroespalhamento (dB) e desvio padrão ALOS/PALSAR das componentes HH, HV e VV para as amostras da classe floresta e incremento de desflorestamento da área de estudo.....	126
4.6	Resumo estatístico do intervalo com 95% de confiança para os valores médios de retroespalhamento das classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV.....	127
4.7	Histogramas em dB para as classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH (a;d), HV(b;e) e VV(c;f), onde a linha vermelha ilustra a curva da distribuição normal. Em (g), (h) e (i) são representados os histogramas das sobreposições da curva normal entre as classes floresta (linha preta) e incremento de desflorestamento (linha tracejada vermelha) respectivamente para as polarizações HH, HV e VV.	129
4.8	Histogramas em amplitude para as classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH (a;d), HV(b;e) e VV(c;f), onde a linha vermelha ilustra a curva da distribuição normal. Em (g), (h) e (i) são representados os histogramas das sobreposições da curva normal entre as classes floresta (linha preta) e incremento de desflorestamento (linha tracejada vermelha) respectivamente para as polarizações HH, HV e VV.	130
4.9	Em (a) é ilustrado o dendograma resultante da análise de agrupamento hierárquico realizada com os valores médios de retroespalhamento dos polígonos de incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV. As linhas azuis representam as ligações ocorridas (a uma determinada distância) para formação dos grupos e a linha tracejada vermelha representa a distância de corte	

- definida com base no gráfico de seqüência de agrupamentos da figura 4.9 (b), onde os platôs no sentido vertical sugerem prováveis distâncias de corte. A linha tracejada indica o valor da distância de corte utilizada. 133
- 4.10 Imagens ALOS/PALSAR HH(R)HV(G)VV(B) e Landsat TM de 09/11/2006, composição 5(R)4(G)3(B), com os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos do dendograma da análise de agrupamento hierárquico. (Continua)...136
- 4.11 Diagramas de dispersão das amostras das classes floresta (pontos pretos) e incremento de desflorestamento (pontos vermelhos). (a) Par de polarizações HH+HV; (b) par de polarizações HH+VV; (c) par de polarizações HV+VV. As elipses representam distribuições normais bivariadas (95%) das amostras de floresta (elipse verde) e incremento de desflorestamento (elipse vermelha)... 138
- 4.12 Em (a) classificações MAXVER-ICM com maior valor kappa (0,0718) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude sem filtro e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação..... 144
- 4.13 Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV)..... 145
- 4.14 Em (a) classificações MAXVER-ICM com maior valor kappa (0,1082) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação..... 148
- 4.15 Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV)..... 149
- 4.16 Resultado das segmentações (linhas vermelhas) realizadas no SPRING para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH++HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as composições (R, G, B) para cada combinação de canais..... 151
- 4.17 Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa (0,5085) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude sem filtro segmentadas pelo SPRING e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação..... 154
- 4.18 Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações Bhattacharyya segmentadas pelo SPRING na imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV). 155
- 4.19 Resultado das segmentações (linhas amarelas) realizada no SEGSAR para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH++HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado

	até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).....	157
4.20	Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa (0,4791) a partir da combinação dos três canais HH+HV+VV para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.	160
4.21	Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes kappa das classificações Bhattacharyya segmentadas pelo SEGSAR na imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).	161
4.22	Resultado das segmentações (linhas vermelhas) realizadas no SPRING para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as composições (R, G, B) para cada combinação de canais.....	163
4.23	Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa global (0,4440) a partir da combinação dual HH+HV para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5 e segmentação pelo SPRING e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.	167
4.24	Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes kappa das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5 segmentadas pelo SPRING classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).....	168
4.25	Resultado das segmentações (linhas amarelas) realizadas no SEGSAR para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as composições (R, G, B) para cada combinação de canais.....	170
4.26	Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa global (0,4791) a partir da combinação HH+HV+VV para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5 e segmentação pelo SEGSAR e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.	174
4.27	Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes kappa das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro Gamma 5x5 segmentada pelo SEGSAR classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).	175
4.28	Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes kappa das imagens sem filtro e com filtro Gamma 5x5 classificadas pelo classificador MAXVER-ICM e Bhattacharyya (segmentadas pelo SPRING (SP) e SEGSAR (SS)) classificadas individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV), gerando um total de quarenta e duas classificações. 176	

4.29	Imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) em (a) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (cor vermelha) e 2007 (cor amarela) e em (b) sobreposição da classe nuvem obtida do PRODES 2006.....	179
4.30	Imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (cor vermelha) e 2007 (cor amarela). Em (a) na cor azul claro são ilustrados os polígonos detectados como incremento em 2007 mas que estavam sob nuvem desde 2005 e em (b) é ilustrado pela cor azul claro os polígonos detectados como incremento em 2007 mas que estavam sob nuvem desde 2006.	180
4.31	Classificações Bhattacharyya HH+HV: Em (a) SPRING sem filtro; (b) com filtro <i>Gamma</i> 5x5; (c) SEGSAR na imagem sem filtro e com filtro <i>Gamma</i> 5x5 (d). As letras indicam todos os correspondentes E.I. de cada classificação caracterizados no Anexo C.	181
4.32	Imagens Landsat TM composição R(5)G(4)B(3) de 21/10/2005, 09/11/2006 e 23/07/2007 utilizadas respectivamente pelo PRODES 2005, 2006 e 2007. O círculo em azul ilustra a área em que foram mapeados os polígonos de incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 e detectados como erros de inclusão na classificação realizada.	184
4.33	Exemplo de polígonos representativos dos erros de omissão obtidos em áreas de queimadas para a classificação da figura 4.31 (a). É possível visualizar que as áreas de queimadas possuem comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR.	186
4.34	Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (b), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 os quais estavam sob nuvem nos anos anteriores.	187
4.35	Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (c), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.	190
4.36	Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (d), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.	191
B.1	Classificações MAXVER-ICM a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.....	229
B.2	Classificações MAXVER-ICM a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.	230
B.3	Classificação MAXVER-ICM a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.	231
B.4	Classificações MAXVER-ICM a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.	232

B.5	Classificações MAXVER-ICM a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i> . Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.....	233
B.6	Classificação MAXVER-ICM a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	234
B.7	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação por crescimento de regiões do SPRING. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.....	235
B.8	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação por crescimento de regiões do SPRING. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.	236
B.9	Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SPRING, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.....	237
B.10	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.....	238
B.11	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.....	239
B.12	Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SEGSAR, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.....	240
B.13	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i> e segmentação pelo SPRING. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.....	241
B.14	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i> e segmentação pelo SPRING. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.	242
B.15	Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SPRING, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	243
B.16	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i> e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.....	244

B.17	Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i> e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.	245
B.18	Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SEGSAR, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	246
B.19	Intervalo de confiança de 95%, ordenados por canal, para os coeficientes <i>kappa</i> das imagens sem filtro e com filtro <i>Gamma 5x5</i> classificadas pelo classificador MAXVER-ICM e Bhattacharyya (segmentadas pelo SPRING (SP) e SEGSAR (SS)) classificadas individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV), gerando um total de quarenta e duas classificações.	247
C.1	Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. As letras de “a” até “i” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.3.....	249
C.2	E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.	250
C.3	E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007.....	251
C.4	Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i> segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. As letras de “a” até “v” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.6.....	252
C.5	E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i> segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.	252
C.6	E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i> segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007.	

	Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)	253
C.7	Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. As letras de “a” até “q” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.9.....	256
C.8	E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.	256
C.9	E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)	257
C.10	Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma</i> 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. As letras de “a” até “x” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.12.....	260
C.11	E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma</i> 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.	260
C.12	E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro <i>Gamma</i> 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)	261

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Bandas de Sensores Imageadores Radar..... 56
2.2	Características gerais do modo de imageamento PALSAR do ALOS..... 66
2.3	Matriz de Confusão 79
2.4	Conceitos das classificações baseados no coeficiente <i>Kappa</i> 81
3.1	Características da imagem em modo de operação PLR nível 1.5 87
3.2	Imagens ópticas auxiliares utilizadas no trabalho. 91
3.3	Amostras obtidas a partir do mapa de desflorestamento de 2006 produzido no projeto PRODES. 104
3.4	Classificações MAXVER-ICM realizadas. 110
3.5	Classificações pela Distância de Bhattacharyya realizadas 112
4.1	Estatística dos polígonos de incremento de desflorestamento (<i>D</i>) contendo o número de amostras presentes em cada polígono (<i>N</i>), as médias (\bar{D}) e desvios (σ_D) em dB dos polígonos de incremento de desflorestamento para cada polarização. 117
4.2	Estatística descritiva dos polígonos da classe floresta (<i>F</i>) contendo o número de amostras presentes em cada polígono (<i>N</i>), as médias (\bar{F}) e desvios (σ_F) em dB dos polígonos cada polarização..... 123
4.3	Estatística descritiva para as amostras das classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV. 125
4.4	Distâncias estatísticas JM entre as classes..... 131
4.5	Resultado geral das avaliações das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro. 141
4.6	Resultado geral das avaliações das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5..... 146
4.7	Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SPRING para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV). 150
4.8	Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SPRING..... 152
4.9	Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SEGSAR para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV). 156
4.10	Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR..... 158

4.11	Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SPRING para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).....	162
4.12	Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya utilizando segmentação pelo SPRING para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5.....	164
4.13	Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SEGSAR para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).....	169
4.14	Resultado geral das avaliações das classificações por regiões Bhattacharyya utilizando segmentação pelo SEGSAR para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5.	171
4.15	Maiores valores <i>kappa</i> e acurácia do produtor (A.P.) para os classificadores MAXVER-ICM e Bhattacharyya onde em geral a polarização HV esteve presente. As cores iguais na tabela referem-se as classificações que são iguais entre si ao nível de significância de 5%.....	177
4.16	Números de erros de inclusão e omissão para as classificações Bhattacharyya HH+HV.....	182
A.1	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HH.....	215
A.2	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HV.....	215
A.3	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal VV.....	215
A.4	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV.....	216
A.5	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HV+VV.....	216
A.6	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+VV.....	216
A.7	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV+VV.....	216
A.8	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HH para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5.	217
A.9	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5.	217
A.10	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal VV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma</i> 5x5.	217

A.11	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	217
A.12	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HV+VV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	218
A.13	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+VV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	218
A.14	Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV+VV para a imagem amplitude com filtro <i>Gamma 5x5</i>	218
A.15	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SPRING.....	218
A.16	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SPRING.....	219
A.17	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SPRING.....	219
A.18	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SPRING.....	219
A.19	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SPRING.....	219
A.20	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SPRING.....	220
A.21	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SPRING.....	220
A.22	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SEGSAR.....	220
A.23	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SEGSAR.....	220
A.24	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SEGSAR.....	221
A.25	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SEGSAR.....	221
A.26	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SEGSAR.....	221
A.27	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SEGSAR.....	221
A.28	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SEGSAR.....	222
A.29	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma 5x5</i>	222

A.30	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	222
A.31	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	222
A.32	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	223
A.33	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	223
A.34	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	223
A.35	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SPRING na imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	223
A.36	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	224
A.37	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	224
A.38	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	224
A.39	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	224
A.40	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	225
A.41	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	225
A.42	Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com <i>Gamma</i> 5x5.....	225

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAR	- <i>Synthetic Aperture Radar</i>
PRODES	- Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia
DETER	- Detecção de Desflorestamento em Tempo Real
SPRING	- Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas
ENVISAT	- <i>Environmental Satellite</i>
ALOS	- <i>Advanced Land Observing Satellite</i>
MAPSAR	- <i>Multi-Application Purpose SAR</i>
ESA	- European Space Agency
SPVEA	- Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia
SUDAM	- Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia
PIN	- Programa de Integração Nacional
PROTERRA	- Programa de Redistribuição de Terra
POLAMAZÔNIA	- Programa de Pólos Agropecuários e Agrominerais da Amazônia
INCRA	- Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
dB	- Decibéis
MLME	- Modelo Linear de Mistura Espectral
DMC	- <i>Disaster Monitoring Constellation</i>
RADAR	- <i>Radio Detection and Ranging</i>
JAXA	- <i>Japan Aerospace Exploration Agency</i>
LANDSAT	- Land Remote Sensing Satellite
TM	- Thematic Mapper
SPOT	- Système Pour l'Observation de la Terre
JERS-1	- <i>Japanese Earth Resources Satellite 1</i>
ADEOS	- <i>Advanced Earth Observation Satellite</i>
PRISM	- <i>Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping</i>
AVNIR-2	- <i>Advanced Visible and Near Infrared Radiometer Type 2</i>
PALSAR	- <i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>

FBS	- <i>Fine Beam Single polarization</i>
FBD	- <i>Fine Beam Dual polarization</i>
PLR	- <i>Polarimetric mode</i>
DT	- <i>Direct Transmission</i>
MAXVER	- Máxima Verossimilhança
ICM	- <i>Iterated Conditional Modes</i>
SNR	- <i>Signal to Noise Ratio</i>
MUM	- <i>Merge Using Moments</i>
FLONA	- Floresta Nacional de Tapajós
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Clima
PCD	- Posto de Coleta de Dados
SRTM	- <i>Shutter RADAR Topographic Mission</i>
USGS	- <i>U. S. Geological Survey</i>
GCP's	- <i>Ground Control Points</i>
WPGM	- <i>Weighted pair-group method</i>
E.O.	- Erros de Omissão
E.I.	- Erros de Inclusão
SP	- Segmentação realizada pelo SPRING
SS	- Segmentação realizada pelo SEGSAR
A.P.	- Acurácia do Produtor

1. INTRODUÇÃO

O uso de dados ambientais, adquiridos por intermédio de sensores a bordo de satélites, tem permitido estudos com maior profundidade de investigação e, principalmente, com maior confiabilidade. Em vista disso, tem sido realizado um grande esforço, pela comunidade científica mundial, em pesquisas de monitoramento ambiental por sensores ópticos e de microondas com o intuito de detectar mudanças no ambiente natural (KERR e OSTROVSKY, 2003).

A interpretação visual de produtos de sensores ópticos geralmente é mais fácil em relação às imagens de sensores microondas, porém, os produtos ópticos são extremamente sensíveis às condições atmosféricas. Já os sensores de microondas, entre os quais se incluem os radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR), podem ser utilizados sob quaisquer condições de tempo e visibilidade. Por se tratarem de sistemas ativos, e com maiores comprimentos de onda, os radares imageadores não dependem da reflexão da iluminação solar e das condições atmosféricas e deste modo têm se mostrado uma ferramenta útil no processo de caracterização, inventário e monitoramento florestal. Assim, em áreas de florestas tropicais como a região amazônica, tornam-se fundamentais, pois não sofrem interferências externas como nuvens, fumaça, bruma e chuva, os quais restringem o uso de sensores ópticos (PARADELLA et al., 2005).

Neste contexto, esta dissertação discute o monitoramento florestal por microondas, mais especificamente no estudo de imagens multipolarizadas ALOS/PALSAR para detecção de incremento de desflorestamento na Amazônia.

1.1 Contexto e Justificativa

Por abrigar uma grande variedade de espécies vegetais e animais, as florestas tropicais e subtropicais caracterizam-se como ambiente de alta biodiversidade, tendo um importante papel nos ciclos biogeoquímicos.

A Floresta Amazônica é a maior e a mais diversa região de florestas tropicais no mundo, distribuindo-se por cerca de 5,4 milhões de km² (MALHI et al., 2008), englobando no Brasil os estados do Amazonas, Amapá, Acre, Roraima, Rondônia, Pará, Tocantins Maranhão e Mato Grosso, os quais compreendem a chamada Amazônia Legal. Originalmente, a cobertura florestal dessa região ocupava aproximadamente 4 milhões de km², dos quais atualmente cerca de 82,3% encontram-se preservados (ALVES, 2007; PRODES, 2009).

A ocupação da Amazônia tem levado a um aumento significativo do desflorestamento na Amazônia Legal, e, por se tratar de um fenômeno de natureza bastante complexa não pode ser atribuído a um único fator. As questões mais urgentes em termos da conservação e uso dos recursos naturais da floresta dizem respeito à perda em grande escala de funções críticas da Amazônia frente ao avanço do desflorestamento ligado às políticas de desenvolvimento na região. Estudos evidenciam que esse desflorestamento está intimamente relacionado com o aumento das atividades econômicas em larga escala, especulação de terra ao longo das estradas, crescimento das cidades, aumento da pecuária bovina, exploração madeireira e agricultura - principalmente ligada ao cultivo de soja e algodão (ALENCAR et al., 2004; FEARN SIDE, 2003; LAURANCE et al., 2004).

O termo desflorestamento, de acordo com Alves (2001), pode ser definido como a atividade de derrubada de áreas de florestas pelo homem. Por sua vez, o conceito de desmatamento é mais genérico, podendo ser empregado a derrubada de florestas e outros tipos de vegetação.

O desflorestamento é o processo caracterizado pela retirada da cobertura florestal devido à ação antrópica, no qual inicia-se com a floresta intacta e termina com a conversão completa da floresta original em outros tipos de cobertura. Na Amazônia existem dois processos típicos de desflorestamento: por corte raso (no qual ocorre o corte e queima florestal, consistindo na remoção completa da cobertura florestal em um curto intervalo de tempo) e por degradação florestal progressiva (o qual é mais lento e leva a perda gradual do sistema florestal e de suas funções ecológicas) (INPE, 2008a).

O processo por corte raso normalmente tem início com a “brocagem” (corte de cipós e árvores menores com foice ou machado), que é realizada no final do período chuvoso. As árvores maiores são derrubadas no início da estação seca e a biomassa que permanece no solo após o corte da floresta é geralmente queimada entre Julho e Setembro. Ao final deste processo, a biomassa remanescente (troncos e galhos) pode ser agregada em leiras para queimas subseqüentes que são realizadas até a limpeza da área. A área desflorestada pode ser coberta por culturas agrícolas e pastagem, ou ainda permanecer abandonada por algum tempo, o que permite o crescimento de capoeiras (INPE, 2008b).

No processo de desflorestamento por degradação progressiva, é realizada a extração seletiva de madeira (iniciando em geral pelas madeiras nobres, em seguida as madeiras de menor valor comercial e posteriormente as madeiras menos densas). Após essa extração inicial, as árvores de menor porte são derrubadas, a vegetação rasteira é retirada e realizam-se algumas queimadas enquanto o processo de extração seletiva vai chegando ao fim. Em seguida, inicia-se a implantação de pastagens em meio à floresta remanescente, que neste momento possui aproximadamente metade de seu dossel original (INPE, 2008b).

As sucessivas extrações de madeira promovem a degradação gradual da floresta e a elevação da sua suscetibilidade ao fogo. Isto faz com que, durante as queimas periódicas dos pastos o fogo se alastre e penetre a floresta degradada com facilidade, provocando incêndios recorrentes e cada vez mais intensos. Nesta fase ocorre a perda quase que completa da cobertura florestal, que pode ser substituída por vegetação arbustiva. No estágio final, que corresponde ao corte raso (caracterizado pela perda de toda a cobertura florestal e pela presença de madeira morta no solo), as pastagens são gradativamente introduzidas (INPE, 2008b).

A figura 1.1 ilustra o processo de degradação contínua do desmatamento:

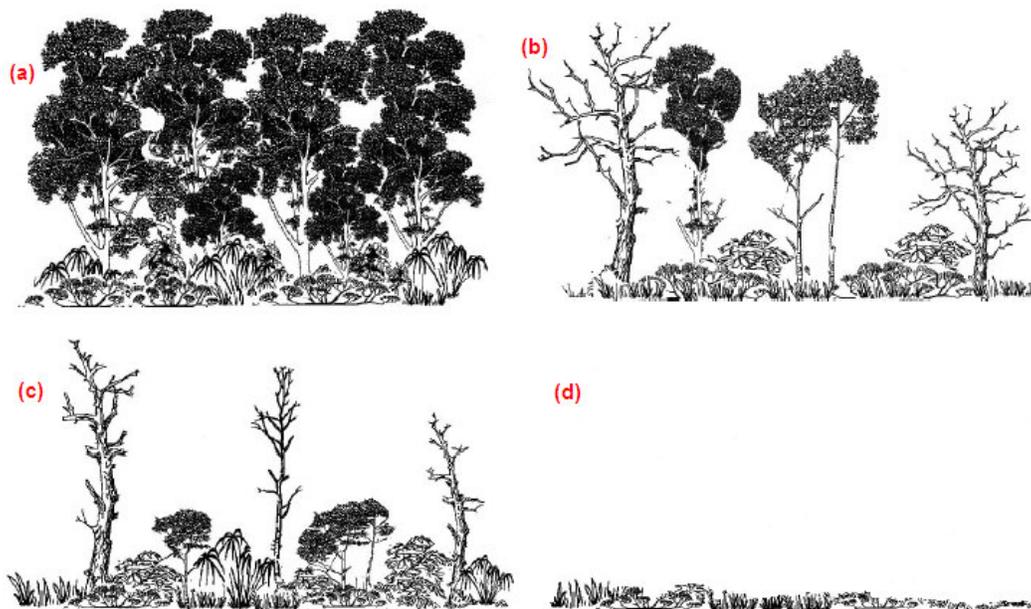


FIGURA 1.1 – Fases esquemáticas do processo de desmatamento. Em (a) é ilustrado a presença da floresta primária sem degradação. Em (b), floresta degradada com retirada de madeira e incêndio. Em (c) verifica-se a degradação de intensidade alta, com recorrência de fogo e em (d) ilustra a retirada total da cobertura florestal, caracterizando o corte raso.

Fonte: Adaptado de Barlow e Peres (2008).

A maior parte do desflorestamento concentra-se ao longo de um “arco” conhecido por “arco do desflorestamento” (FIGURA 1.2). Estas áreas são as mais impactadas da Amazônia Legal e abrangem desde o sudeste do Maranhão, incluindo o norte do Tocantins, o sul do Pará, norte de Mato Grosso, Rondônia, sul do Amazonas, até o sudeste do Acre, concentrando cerca de 524 municípios que juntos possuem uma população com mais de 10 milhões de habitantes (NEPSTAD et al., 2001).



FIGURA 1.2 – Estados que compõem a Amazônia Legal e em vermelho é ilustrado o “arco do desflorestamento”: áreas com maiores concentrações de desmatamento da Amazônia Legal.

Fonte: Adaptado de IBAMA (2008) e IMAZON (2008).

Segundo Roy et al. (2002), grande parte do desflorestamento da Amazônia Legal é oriundo das queimadas. A região concentra mais de 85% das queimadas que ocorrem no Brasil durante o período de estiagem das chuvas, acarretando em impactos locais e regionais no uso da terra, na produtividade e biodiversidade, além de impactos regionais e globais através da modificação do regime hidrológico, ciclos biogeoquímicos e nos processos atmosféricos (LASHOF, 1996; PAGE et al., 2002; SÁ et al., 2003).

Deste modo, torna-se necessário o monitoramento constante de dados referente à floresta amazônica, com o intuito de avaliar seu atual estado e grau de intervenção antrópica. Através do sensoriamento remoto, imagens de satélites podem ser obtidas de maneira sistemática, podendo ser utilizadas para quantificar a magnitude da queima de biomassa em escala global, permitindo também o monitoramento temporal e a espacialização destes eventos (GREGOIRE et al., 2003).

Em virtude das preocupações da comunidade mundial frente aos danos causados ao meio ambiente e com o intuito de monitorar o desflorestamento na Amazônia, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) criou o projeto PRODES (Projeto de Monitoramento do Desflorestamento da Amazônia Legal) e DETER (Sistema de Detecção de Desflorestamento em Tempo Real).

O projeto PRODES foi criado na década de 70 e tem como objetivo realizar o mapeamento e estimativa anual do incremento de desflorestamento na Amazônia Brasileira a partir da interpretação de imagens ópticas obtidas por sensoriamento remoto do satélite Americano Landsat TM. Esta estimativa baseia-se no mapeamento anual de áreas desflorestadas por corte rasos, não inferiores a 6,25 hectares (ha), e possui como premissa o acompanhamento da evolução do desflorestamento bruto da Amazônia Legal por meio do Software de Sistema de processamento de Informações Georeferenciadas (SPRING) (CÂMARA et al., 2006).

O projeto DETER foi criado em 2004 e é um sistema de alerta para fins de fiscalização e controle de desflorestamento. Nesse sistema, são divulgadas mensalmente as estimativas de incremento de desflorestamento da Amazônia, mapeando tanto áreas de corte raso quanto áreas em processo de desflorestamento por degradação florestal superiores a 25 ha a partir de imagens MODIS/TERRA e WFI/CBERS (INPE, 2008b).

Devido à intensa cobertura de nuvens em florestas tropicais, principalmente ao longo dos meses de novembro a março, e por serem regiões bastante úmidas, a extração de informações das imagens por meio de sensores ópticos muitas vezes torna-se insatisfatória, representando um obstáculo para o monitoramento contínuo da região por meio do sensoriamento remoto obtido por sensores passivos (ASNER, 2001).

Visto que as imagens de radar não são afetadas pela cobertura de nuvens, o sensoriamento remoto por microondas tem sido muito útil no mapeamento e monitoramento destas florestas. A utilização de radares de abertura sintética (SAR) tem como finalidade acrescentar informações além das já fornecidas pelos dados ópticos e como outra vantagem à detecção de mudança da cobertura vegetal e a quantificação e qualificação da estrutura do dossel (ROSENQVIST et al., 2003).

Diferentes estudos envolvendo sensores de microondas (como o europeu ERS-1, o japonês JERS-1 e o canadense RADARSAT), têm sido realizados com o intuito de se verificar com uma melhor precisão e maior riqueza de detalhes estas áreas florestais (BALZTER, 2001; DOBSON et al., 1999; DUTRA et al., 1999; LE TOAN et al., 1992; SANTOS et al., 2002; SANTOS et al., 2003). No entanto, esses radares convencionais operam com uma única polarização, ou seja, operam com microondas polarizadas horizontalmente (H) ou verticalmente (V) e registram somente a amplitude do sinal recebido. Já em radares polarimétricos, os quais transmitem ondas em ambas as polarizações (H e V), o sinal detectado pode ter quatro diferentes modos de polarização além de poderem registrar a amplitude e fase do sinal retroespalhado. Como consequência, a capacidade de discriminação de padrões de cobertura de solo, como o incremento de desflorestamento, pode possuir um maior acréscimo de informação quando oferecido por sistemas multipolarizados e polarimétricos, visto que possuem menos limitações para determinadas aplicações do que dados com uma única polarização.

Dentre os radares polarimétricos destacam-se o ENVISAT (*Environmental Satellite*), o RADARSAT-2, o satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) e o MAPSAR (*Multi-Application Purpose SAR*).

Considerando o caráter recente e inovador envolvendo imageamento com radares polarimétricos, o presente trabalho teve por finalidade analisar a discriminação do incremento de desflorestamento (área desflorestada por corte raso há no máximo um ano) na Amazônia Legal a partir de dados obtidos em banda L pelo radar ALOS/PALSAR. Inserido neste objetivo, foram testados métodos de classificação e segmentação de imagens com o intuito de verificar se havia perda significativa de informação mediante o tipo de polarização empregada através do uso de imagens multipolarizadas na floresta tropical.

1.2 Convenções Adotadas

- Dados multipolarizados ou multivariados: É o conjunto de dados composto pelas imagens amplitude das componentes HH, HV e VV, porém, não contém informação de fase. Por conveniência, tal conjunto será representado por HH+HV+VV.
- Dados univariados: É o conjunto de dados composto pela informação de amplitude de apenas um canal (HH,HV ou VV).
- Dados bivariados: É o conjunto de dados composto pela informação de amplitude obtidos da combinação de dois canais (HH+HV, HV+VV ou HH+VV).
- Dados polarimétricos: É o conjunto de dados complexos que além de serem multipolarizados, contém informação de fase nas polarizações HH, HV e VV.
- Incremento de desflorestamento: áreas anteriormente cobertas por floresta primária, floresta sob regime de exploração seletiva, ou floresta em processo de degradação progressiva que foram desflorestadas por corte raso há no máximo 1 ano.
- Floresta: áreas que não sofreram processo de degradação florestal em um período de 1 ano.
- ALOS/PALSAR: Refere-se ao sensor PALSAR do satélite ALOS

1.3 Hipótese

Este trabalho tem por hipótese de que é possível discriminar incremento de desflorestamento na Amazônia com dados multipolarizados do radar ALOS/PALSAR em banda L.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a capacidade de discriminação das imagens multipolarizadas do radar ALOS/PALSAR em banda L para classificação de incremento

de desflorestamento em uma área de estudo localizada na região da Floresta Nacional de Tapajós no Pará.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar o potencial dos dados multipolarizados na discriminação de incremento de desflorestamento, bem como verificar se há perda significativa de informação no mapeamento de desflorestamento com dados PALSAR quando não se utiliza todos os canais de polarização.
- Analisar e caracterizar o comportamento de áreas de floresta e de incremento de desflorestamento em imagens SAR.
- Avaliar e comparar a performance dos classificadores envolvidos utilizando classificação supervisionada.
- Analisar a influência da segmentação da detecção de incremento de desflorestamento.
- Avaliar o potencial da filtragem na detecção de incremento de desflorestamento.
- Analisar a contribuição dos dados SAR em banda L como informação complementar aos dados de incremento de desflorestamento do PRODES.
- Determinação do melhor conjunto (segmentador, classificador, polarização, e existência ou não de filtro) para detecção de incremento de desflorestamento.

Os resultados foram avaliados a partir da análise de concordância com o mapa de desflorestamento produzido a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES.

1.5 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, conforme descritos a seguir:

- Capítulo 1 (Introdução): São apresentadas informações para compreensão inicial do contexto do trabalho. Neste capítulo são apresentadas as justificativas, as convenções adotadas, hipótese e os objetivos desta dissertação.
- Capítulo 2 (Fundamentação teórica): É especificada a fundamentação com os conceitos teóricos e trabalhos anteriores que serviram de base para o desenvolvimento deste estudo. São apresentadas informações relacionadas ao desflorestamento no decorrer dos anos na região amazônica, o projeto PRODES, detecção via sensoriamento remoto por microondas, satélite ALOS/PALSAR, procedimentos de classificação e de segmentação e o método de avaliação da acurácia das classificações.
- Capítulo 3 (Materiais e Métodos): São descritos todos os materiais e metodologias utilizadas neste estudo. São apresentados os dados referentes à área de estudo, às imagens, *softwares* e *hardware* utilizados, bem como os procedimentos metodológicos realizados envolvendo os processamentos de máscaras do PRODES, análise exploratória dos dados, segmentações e classificações supervisionadas.
- Capítulo 4 (Resultados e Discussões): Apresenta os resultados obtidos através da aplicação da metodologia elucidada no capítulo 3, juntamente com avaliações e discussões dos resultados.
- Capítulo 5 (Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros): São feitas as conclusões e considerações finais do trabalho. Este capítulo engloba as principais informações e recomendações de melhorias que podem ser realizadas em trabalhos futuros com o intuito de aprofundamento do estudo de desflorestamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos teóricos e trabalhos anteriores que serviram de base para o estudo, objetivando assim referenciar e promover a compreensão do tema. Esse tópico tem por intuito, auxiliar na análise dos resultados e conclusões sobre o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Evolução do desflorestamento na Amazônia Legal

O processo de ocupação da Amazônia caracterizou-se pela falta de planejamento e conseqüente destruição dos recursos naturais, particularmente das florestas. Ao longo da história da região, a cobertura florestal nativa foi sendo fragmentada, cedendo espaço para as pastagens e culturas agrícolas.

Criada através do Decreto Lei no 5.173, de 27/10/66 (IBGE, 2000), a Amazônia Legal brasileira apresenta uma área de cerca de 5,4 milhões de km² (MALHI et al., 2008), representando 59,1% do território brasileiro e englobando os Estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e parte dos Estados do Maranhão e Tocantins (FERRAZ et al., 2005).

De acordo com Mahar (1979), a partir de uma visão histórica, o desenvolvimento amazônico pode ser dividido em cinco períodos (onde nos três primeiros criaram-se pólos de desenvolvimentos, reforçando a migração e promovendo incentivos do capital privado para o desenvolvimento de pesquisa sobre recursos naturais):

- Primeiro período: estendeu-se de 1870 a 1912, teve como base a extração da borracha e entrou em declínio em 1945.
- Segundo período: iniciou-se com a criação da “Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia” (SPVEA) em 1953, tendo como prioridade o desenvolvimento agrícola para tornar a região auto-suficiente em alimentos e expandir a extração de produtos para exportação.

- Terceiro período: ocorreu entre 1964 e 1970, iniciando-se com a instalação do governo militar, o qual intensificou ainda mais a política de desenvolvimento econômico da região. Em 1967, foi criada a “Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia” (SUDAM) (MAHAR, 1979).
- Quarto período: teve início com a criação pelo regime militar do Programa de Integração Nacional (PIN) em 16 de junho de 1970 (SCHAEFER, 1985), cuja meta central era a proteção do vasto interior brasileiro. O PIN tinha como objetivo assentar milhares de colonos nas terras situadas ao longo das rodovias a serem abertas na Amazônia (MORAN, 1993). Deste modo pretendia-se garantir, de acordo com a visão do governo militar da época, a ocupação dessas fronteiras nacionais e assim assegurar o domínio sobre este vasto território, sabidamente rico em recursos naturais. Com o lançamento do PIN, o governo militar deu início a construção das rodovias Transamazônica e Cuiabá-Santarém e foi complementado com o Programa de Redistribuição de Terra (PROTERRA), cujos objetivos foram facilitar a aquisição de terra, prover condições para os trabalhadores rurais e promover a agroindústria na Amazônia (BECKER, 2005; COSTA, 1997). Nesse período, também foi criado o INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), com a finalidade de promover, coordenar, controlar e executar a colonização e a reforma agrária e ainda o cooperativismo, o associativismo e a eletrificação rural (SCHAEFER, 1985).
- Quinto período: foi caracterizado pela implementação do Segundo Plano de Desenvolvimento Nacional. De acordo com Moran (1993), em consequência da crise do petróleo em 1973 diminuiu-se a construção de estradas pela Amazônia, possibilitando apenas a abertura do acesso principal dessas rodovias. Em decorrência de algumas falhas do PIN e do PROTERRA, em 1974 o governo federal mudou a política de desenvolvimento e criou o programa chamado POLAMAZÔNIA (Programa de Pólos Agropecuários e Agrominerais da Amazônia), o qual favorecia grandes criadores de gado. Em 1976 o INCRA passou a licitar imensas áreas na Amazônia para as firmas colonizadoras - as quais seriam desmembradas em lotes de 100 a 200 hectares cada um - e outras

grandes parcelas de terra para indivíduos e corporação, sobretudo para o desenvolvimento de pecuária extensiva (MORAN, 1993). Porém, em face da curta duração de produtividade e dos altos custos econômicos, esse projeto também foi abandonado ainda na década de 70 (SCHAEFER, 1985).

Nas décadas anteriores a 1990 os conceitos ecológicos e de preservação do meio ambiente muitas vezes eram restritos a discussões acadêmicas e não alcançavam a população, as quais eram incentivadas por políticas governamentais a remover as formas de vegetação nativa. Projetos de caráter desenvolvimentista, como o “Avança Brasil”, que estabeleceu corredores de fluxo de produção na região para estimular a exportação de grãos, fizeram com que o desflorestamento fosse considerado por muitos como um benefício, significando que as áreas da região tinham algum uso melhor do que a manutenção da biodiversidade (BECKER, 2005).

Diante das “políticas desenvolvimentistas” mencionadas, vários trabalhos exploram o interesse em avaliar os impactos climáticos e ambientais na Amazônia em decorrência do desflorestamento (CORREIA et al., 2006; COSTA e FOLEY, 2000; LEAN et al., 1996; MANZI e PLANTON 1996; NOBRE et al., 1991), onde diversos estudos apontam uma forte relação entre os programas de desenvolvimento governamental (como a abertura de estradas oficiais), com o desflorestamento da região Amazônica (CHOMITZ e THOMAS, 2001; FERREIRA et al., 2005; NEPSTAD et al., 2001; SOARES FILHO et al., 2004).

Laurence et al. (2001) antecipou que a construção de mais estradas ligando áreas com grande concentração de pessoas a áreas remotas da Amazônia brasileira poderia levar a impactos graves. Estudos de Pedlowski et al. (1997) em Rondônia, já indicavam que a expansão das atividades do uso da terra é consequência do aumento populacional e do desflorestamento, sendo a instalação de pequenos sítios, criação de gado, mineração e serrarias as principais atividades responsáveis por essa perda da biodiversidade.

Soares Filho (2001) realizou um estudo sobre a fragmentação da paisagem florestal em função da estrutura e da dinâmica fundiária no norte de Mato Grosso. Os resultados indicaram que o desflorestamento da região teve início a partir das faixas marginais das

estradas BR-163 (Cuiabá-Santarém), irradiando-se pela região a partir das estradas vicinais dos projetos de colonização. A venda dos lotes pelos colonos originais e a conseqüente compra desses por fazendeiros ocasionaram a agregação dos lotes. Com o aumento do desflorestamento na região, houve o aumento de áreas contínuas com alguma atividade agrícola e a conseqüente fragmentação de áreas florestadas.

Com o intuito de se avaliar as mudanças na Amazônia brasileira, entre 1980 e 1995, Cardille e Foley (2003) constataram que várias alterações ocorreram em razão da atividade agrícola durante o período avaliado, sendo que áreas usadas para a agricultura de baixa produção foram transformadas em áreas de pastagem.

Nepstad et al. (2000) cita que a Amazônia nas últimas décadas vem sofrendo com impactos ambientais pela influência da expansão da pecuária insustentável facilitada pela venda de terras baratas em áreas de florestas e com abertura de estradas, expandindo a fronteira de degradação. De acordo com Fearnside (2005), embora o desflorestamento na Amazônia brasileira seja por inúmeras razões, a implantação de pastagem para criação de gado é a causa predominante. As fazendas de médio e grande porte são responsáveis por cerca de 70% das atividades de desflorestamento. O comércio de carne bovina é apenas uma das fontes de renda que faz com que o desflorestamento seja lucrativo. Assim, uma das causas da degradação da floresta é resultado do corte seletivo e dos incêndios (facilitados pelo corte seletivo). Os impactos do desflorestamento incluem a perda de biodiversidade e a redução da ciclagem da água e precipitação, contribuindo assim para o aquecimento global.

Em estudo realizado por Alves et al. (1999), foram observadas as modificações do microclima e do regime hidrológico devido ao desflorestamento na Amazônia. A área de estudo foi a região de Ji-Paraná-RO. Os resultados apontaram que o desflorestamento reduziu a precipitação em 10%, diminuiu a evapotranspiração real em 24% e, também, acarretou uma amplitude térmica da temperatura do ar em cerca de 1,6°C.

Diante desse cenário de crescimento da ocupação e do uso do solo da Amazônia, evidencia-se a diminuição das áreas florestais, que se reverte em preocupação dos mais diversos setores da sociedade, inclusive do próprio governo.

2.2 Monitoramento de áreas desflorestadas: Projeto PRODES e DETER

Desde a década de 70, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem realizando a avaliação de áreas desflorestadas da Amazônia Brasileira. Através do projeto PRODES (Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia), desenvolvido pelo próprio Instituto, é possível obter a estimativa anual de incremento de desflorestamento na Amazônia Brasileira, ou seja, a variação de desflorestamento de uma região em relação à mesma área no ano anterior.

A figura 2.1 apresenta a evolução das taxas anuais de desflorestamento por estado até o ano de 2007. Os estados do Mato Grosso, Pará e Rondônia apresentaram historicamente as maiores taxas de desflorestamento. Estes estados, com um processo de ocupação desordenada e acelerada desde a década de 70, apresentam as maiores taxas de desflorestamento entre 1990 e 2006 (INPE, 2008c).

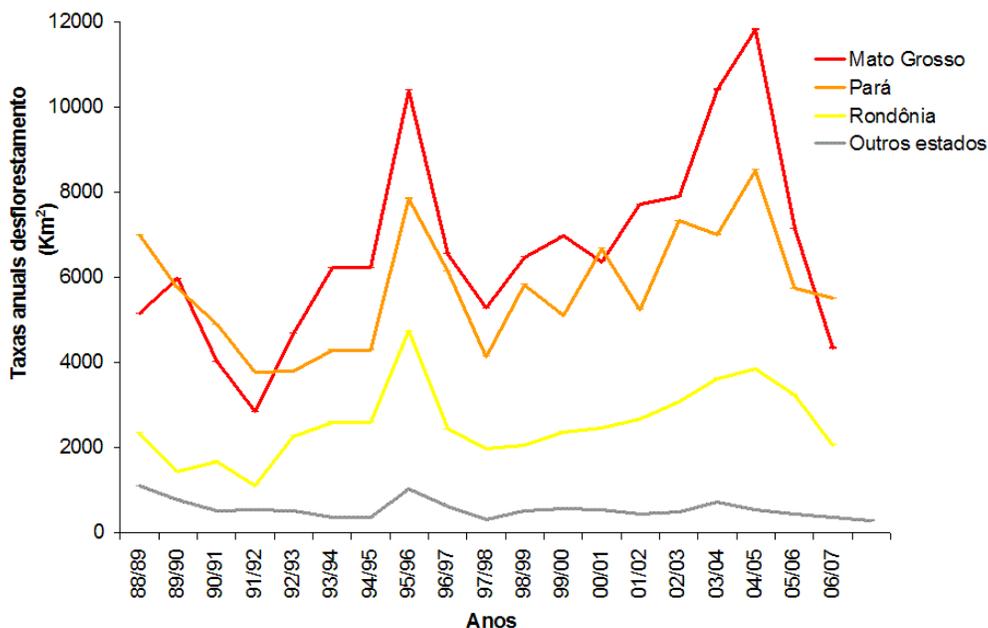


FIGURA 2.1 – Taxas anuais de desflorestamento por estados da Amazônia Legal.
Fonte: Adaptado de INPE (2008c).

O projeto PRODES disponibiliza via *internet* as imagens Landsat TM utilizadas, os mapas de desflorestamento referentes a cada cena Landsat TM na escala 1:250.000 e os

mosaicos estaduais na escala 1:500.000. No PRODES são utilizadas imagens Landsat TM, bandas 3 (0,63 - 0,69 μm), banda 4 (0,76 - 0,90 μm) e banda 5 (1,55 - 1,75 μm), do período seco (julho, agosto ou setembro). Até o final da década de 90, a metodologia de mapeamento dessas áreas desmatadas era realizada através da interpretação visual das imagens Landsat e os resultados eram digitalizados com o intuito de se totalizar o cálculo dessas áreas. No final da década de 90, utilizando-se imagens TM de 1997, iniciou-se o desenvolvimento de uma metodologia automatizada denominada PRODES Digital (DUARTE et al., 1999; SHIMABUKURO et al., 1997; SHIMABUKURO et al., 1998).

No período entre 1988 e 2002, o mapeamento do desflorestamento por corte raso foi realizado a partir da interpretação visual de imagens Landsat TM adquiridas no período seco. A metodologia analógica empregada neste período consistia na delimitação de áreas desflorestadas não inferiores a 6,25 ha em overlays sobrepostos às imagens Landsat TM impressas na escala 1:250.000. A partir de 2003, o mapeamento do incremento de desflorestamento passou a ser realizado com o uso de procedimentos automatizados de extração de informação de imagens digitais, o que permitiu gerar dados mais confiáveis quanto ao georeferenciamento.

Neste método, sistematizado por Câmara et al. (2006), pondera-se o desflorestamento total pelos dias da estação seca do ano da imagem e da estação seca do ano anterior, desprezando-se a ocorrência de desflorestamento na estação chuvosa, diluindo-se assim as distorções geradas pela diferença de datas de aquisição das imagens. No início desta fase digital, o processo de interpretação das imagens Landsat TM era constituído das seguintes etapas: (1) aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (SHIMABUKURO e SMITH, 1991) para a geração das imagens fração de vegetação, solo e sombra, tendo como resultado imagens que realçam determinados alvos no terreno; (2) reamostragem das imagens fração solo ou sombra de 30m para 60m; (3) segmentação por crescimento de regiões (BINS et al., 1996) das imagens fração solo ou sombra obtidas do MLME; (4) aplicação do classificador estatístico não-supervisionado ISOSEG; (5) atribuição de classes temáticas aos agrupamentos gerados automaticamente pelo classificador (mapeamento de classes); (6) e edição matricial na

escala 1:100.000 com o intuito de se garantir a qualidade do mapa de desflorestamento final. Neste processo é realizada a discriminação entre áreas de floresta e áreas que foram desmatadas no período entre a estimativa do ano anterior e a estimativa do ano base não inferiores a 6,25 ha (incremento de desflorestamento) (CÂMARA et al., 2006).

A partir de 2006 a metodologia empregada no projeto PRODES sofreu algumas alterações:

- As imagens fração deixaram de ser reamostradas antes da segmentação e desta forma, todo o processamento passou a ser realizado com dados com resolução original (30m).
- Devido à influência da cobertura por nuvens na estimativa da área de incremento de desflorestamento, o projeto PRODES adotou a estratégia de processar apenas as partes das imagens que estivessem livres de nuvens, implicando na análise de um número maior de imagens, pois para compor a área equivalente a uma cena Landsat TM pode ser necessário utilizar duas ou mais imagens de datas diferentes, inclusive de outros sensores, como CCD CBERS-2 e DMC (*Disaster Monitoring Constellation*) (CÂMARA et al., 2006).

Os mapas temáticos de cobertura do solo referentes a cada cena Landsat TM utilizada na estimativa são disponibilizados para as classes: hidrografia, floresta, não-floresta (cerrado, afloramento rochoso, entre outros), desflorestamento total (desflorestamento acumulado antes da estimativa do ano corrente), desflorestamento (incremento de desflorestamento observado nas imagens do no ano base), nuvem (área coberta por nuvem nas imagens do ano base) e resíduo (desflorestamento observado no ano base que deveria ter sido detectado no ano anterior, ou ainda antes) (CÂMARA et al., 2006).

No entanto, visto que os resultados são anuais e muitas vezes de ação informativa, ou seja, quando os fatos já aconteceram, a análise do desflorestamento feita por meio do projeto PRODES em algumas vezes se torna insuficiente do ponto de vista de se fornecer uma base para ação governamental. Como os dados são agregados por estado e publicados um ano após as ocorrências dos eventos de desflorestamento, o governo

pode apenas através do DETER se antecipar à dinâmica de mudança de uso da terra na Amazônia e executar medidas preventivas. No entanto, tal projeto detecta apenas áreas desflorestadas superiores a 25 ha a partir de imagens ópticas.

Deste modo, torna-se imprescindível complementar os dados do PRODES e DETER com outras iniciativas que permitam ao Estado uma ação preventiva de combate às atividades ilegais de desflorestamento. Nesse sentido, o satélite ALOS surge como uma opção para o monitoramento e acompanhamento do desflorestamento, visto que entre diferentes fatores possui um período de revisitas da área imageada em torno de quarenta e seis dias e não sofre interferências atmosféricas das nuvens na região tropical.

2.3 Sensoriamento Remoto por Radar

2.3.1 Características Gerais

Os radares (*Radio Detection and Ranging* - Radar) são definidos como sistemas sensores ativos para a detecção e localização de alvos que geram sua própria radiação na faixa das microondas e realizam detecção em faixas de rádio e medição de distância, cujos comprimentos de onda variam de 1 cm a 1,5 m (0.3 a 300 Ghz) (SABINS, 1996).

Seu princípio de funcionamento baseia-se na medição do tempo de propagação que uma radiação eletromagnética, emitida pelo próprio radar, leva para atingir um alvo e retornar. Assim, são denominados sensores ativos, pois emitem radiação eletromagnética e captam a porção dessa radiação que é espalhada pelos alvos na direção do sensor. A posição do alvo é determinada convertendo-se o tempo de propagação em distância radial e estabelecendo sua direção como a de apontamento da antena (VAN DER SANDEN, 1997). A figura 2.2 ilustra as diferentes regiões do espectro eletromagnético, e as bandas espectrais da região de microondas.

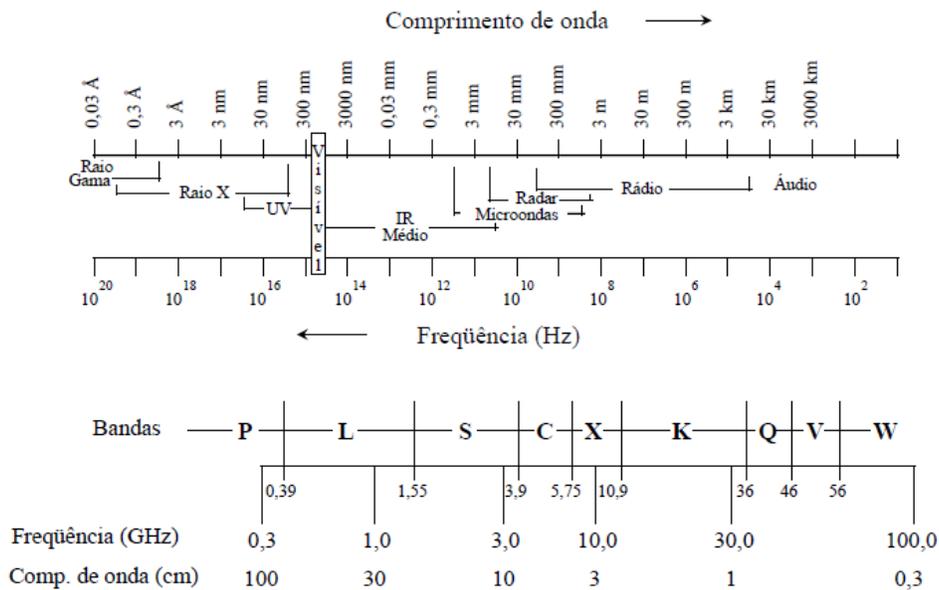


FIGURA 2.2 – Espectro eletromagnético e as bandas da região de microondas.
 Fonte: Modificada de Dallemand et al. (1993).

Quando se pretende extrair informações de uma imagem de radar, é necessário considerar que a mesma possui dois tipos de propriedades (OLIVER e QUEGAN, 1998). A primeira relaciona-se com as características do alvo, onde os parâmetros que influem no sinal de retorno estão diretamente relacionados com as propriedades geométricas e dielétricas dos objetos, como umidade do solo, rugosidade da superfície, relevo, estrutura da vegetação e quantidade de água presente nas folhas verdes (PARADELLA et al., 2000; ULABY et al., 1982). A segunda propriedade é referente às características instrumentais do sistema, a qual dependendo da configuração, a capacidade de discriminação de um determinado alvo na imagem pode ser melhor ou pior. Deste modo, os atributos do sinal retroespalhado são: o comprimento de onda (λ) (correspondendo à distância que a onda trafega no tempo requerido para gerar um ciclo), a amplitude (a qual se refere ao máximo desvio em altura da onda e é um indicador da intensidade do sinal) e a fase (parâmetro que descreve a posição de um ponto de vibração no senóide e direção de movimento em relação a um datum ou posição de referência, variando de 0 a 2π) (VAN DER SANDEN, 1997).

O sinal emitido na região espectral das microondas pode penetrar em dosséis vegetais e no solo e geralmente mostram serem produtos mais promissores de se avaliar, por exemplo, biomassa lenhosa do que sensores ópticos (KASISCHKE et al., 1997). Assim, é possível obter informações sobre a superfície da Terra, mesmo que esteja coberta por vegetação. Tal característica permite obter informações do interior dos dosséis vegetais, tornando esses sensores uma ferramenta auxiliar para estudos da superfície terrestre (ULABY et al., 1981).

O tamanho da antena utilizada pelo radar determina a largura do pulso de microondas transmitido e, conseqüentemente, a resolução na direção do voo. Como ilustrado na figura 2.3, a direção da linha de voo é chamada de azimutal (em azimute) e a direção ortogonal ou transversal é denominada alcance (*range*). Há dois extremos que limitam a faixa de imageamento: a região mais próxima da plataforma, a qual é a primeira a penetrar a onda e é denominada de alcance próximo (*near range*), e a região mais afastada, chamada de alcance distante (*far range*).

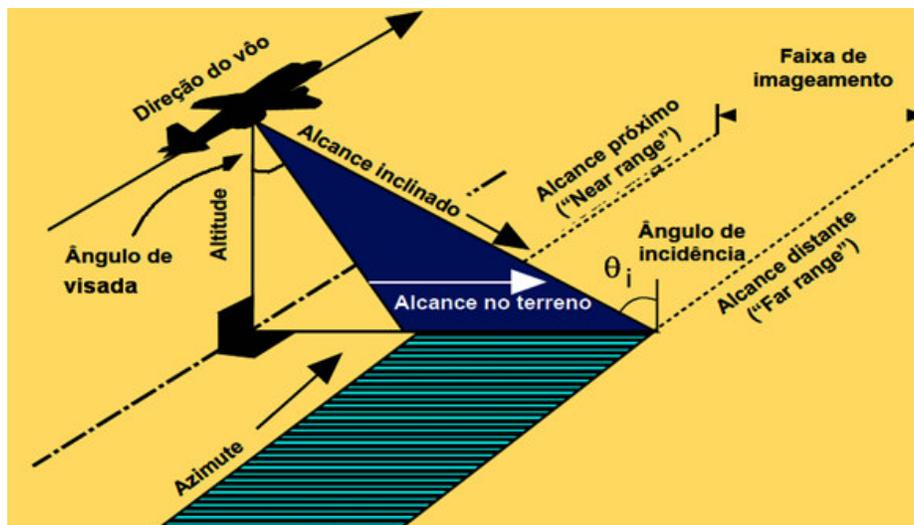


FIGURA 2.3 – Geometria de aquisição de imagens pelos radares.
Fonte: Modificada de Almeida (2008).

O alcance inclinado (*slant range*) de um ponto é a distância inclinada deste ponto ao sensor. Já o alcance no terreno (*ground range*) é o afastamento desse mesmo ponto em relação à projeção da plataforma no solo. Ângulo de visada é a denominação dada ao ângulo medido a partir do nadir até um ponto considerado e o ângulo de incidência é o

ângulo formado pela direção perpendicular à superfície terrestre e o feixe incidente do sinal de onda emitido.

Os primeiros radares imageadores eram do tipo radar de abertura real que, por trabalhar com as dimensões efetivas da antena, apresentavam limitações na resolução espacial das imagens geradas. Já os radares de abertura sintética (SAR) são utilizados para melhorar a resolução azimutal, aproveitando o próprio deslocamento da plataforma, através da gravação e combinação dos sinais refletidos, para simular uma antena cujo comprimento seria muitas vezes maior que o da antena realmente utilizada (DOBSON et al., 1992). A antena do radar ilumina uma região no solo e conforme a plataforma com a antena se desloca, uma faixa é iluminada no solo. Durante o deslocamento da antena o sensor SAR transmite pulsos de rádio frequência, modulados linearmente em frequência. O sinal eco, produzido pelo retroespalhamento da energia transmitida incidente na superfície da terra, é recebido pela antena do sensor SAR e é enviado ao receptor do radar que gera o vídeo bruto (*raw data*), o qual é processado e gera a imagem da cena imageada (TOMIYASU, 1978).

Ulaby et al. (1986a) e Lewis et al. (1998) estabeleceram a relação fundamental entre as características do sistema de radar, do alvo, e do sinal que é transmitido pela antena, o qual interage com o alvo e novamente retorna para a antena, através da seguinte equação (Equação 2.1):

$$P_R = P_T (\sigma^o A) \left(\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right) \quad (2.1)$$

onde a potência do sinal recebido (P_R), é diretamente proporcional à potência do sinal transmitido (P_T), ao coeficiente de retroespalhamento (σ^o), a área efetiva da abertura da antena (A), ao ganho da antena (G), ao comprimento de onda do radar (λ) e a $1/4\pi^3 R^4$, onde R é distância em *range* entre o radar e o alvo, considerando a transmissão e a recepção da energia de forma isotrópica. O coeficiente de retroespalhamento σ^o , que é adimensional, está diretamente relacionado aos parâmetros dos alvos, enquanto que os demais termos da equação do radar se relacionam com os parâmetros do sensor.

Na região de microondas, um dossel pode ser caracterizado por um conjunto de elementos difusores ocupando um certo volume no espaço, colocados sobre uma superfície difusora constituída pelo solo. O coeficiente de retroespalhamento é representado pela soma das contribuições do próprio dossel, do retroespalhamento direto do solo e de múltiplos espalhamentos entre os elementos difusores do dossel e os da superfície do solo (ULABY et al., 1984). A figura 2.4 mostra as contribuições do retroespalhamento de um dossel.

De acordo com Leckie e Ranson (1998), em uma imagem SAR a interação do sinal de microondas com as florestas pode ocorrer de diferentes formas, mas em geral é composta pela combinação das respostas geradas através dos diferentes mecanismos de espalhamento incluindo a contribuição direta do solo, do tronco, da copa das árvores, da interação copa-solo e da reflexão dupla tronco-solo. No entanto, alguns trabalhos incluem ainda o retroespalhamento tronco-solo atenuado pelo dossel vegetal e espalhamentos múltiplos provenientes dos galhos (Le Toan et al., 1992).

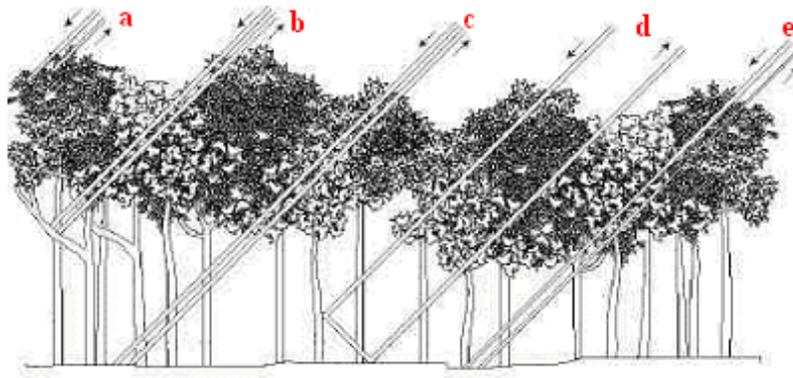


FIGURA 2.4 – Figura esquemática ilustrando os tipos e mecanismos de retroespalhamento em ambientes florestais. (a) Retroespalhamento superficial e de interior de dossel; (b) Retroespalhamento de troncos e galhos; (c) Retroespalhamento do solo; (d) Reflexão dupla tronco-solo; (e) Retroespalhamento integrado entre tronco e solo.

Fonte: Modificado de Ulaby et al. (1984) e Kuplich (2003).

De acordo com Rosenqvist (1997), a radiação nas microondas é transmitida a partir da antena de radar que em seguida recebe os sinais refletidos pela superfície da terra. Deste modo, o valor do σ^0 é a razão da energia espalhada em relação ao sinal enviado.

Usualmente os valores do σ^0 , por serem razões de potência, são expressos em decibéis (dB) e geralmente variam de -18dB até maiores de 0dB. Assim, em áreas com pouca vegetação, grande parte dos sinais é perdido (pouco espalhamento do sinal) e como resultado os valores do σ^0 são baixos (alvos escuros na imagem de radar). Pela mesma razão, rios e lagos são difusamente refletidos e aparecem como alvos extremamente escuros na imagem (alta reflexão especular e baixo retroespalhamento do sinal). Entretanto, áreas com florestas tem alto retroespalhamento e conseqüentemente altos valores de σ^0 .

Segundo Ulaby et al. (1986b), os fatores que influenciam no comportamento do coeficiente de retroespalhamento são os parâmetros do sistema sensor e parâmetros do alvo. Assim, os principais parâmetros que definem o sistema sensor na faixa de microondas são: a frequência ou o comprimento de onda, a polarização, o ângulo de incidência e o azimute de visada. Tais parâmetros definem o tipo de informação contida no sinal de retorno e o tipo de interação entre a energia incidente e os alvos (BRISCO e BROWN, 1998). Já os parâmetros do alvo que influem no sinal de retorno estão principalmente relacionados com as suas propriedades geométricas e dielétricas (ULABY e BATLIVALA, 1976). Tais parâmetros serão especificados a seguir.

2.3.2 Parâmetros relacionados ao Sistema Sensor

2.3.2.1 Frequência ou comprimento de onda (λ)

De acordo com Ulaby et al. (1986a), a magnitude do coeficiente de retroespalhamento dos alvos depende diretamente da frequência ou comprimento de onda, pois esta define a ordem de grandeza dos efeitos da constante dielétrica e da rugosidade superficial dos alvos (LEWIS et al., 1998).

O retroespalhamento de um alvo é o resultado do espalhamento superficial e/ou volumétrico. Em geral, a forma superficial do alvo irá determinar o tipo de espalhamento, sendo que o tamanho e a densidade dos elementos vegetais têm relação direta no tipo de interação com as microondas incidentes e todos esses fatores são fortemente influenciados pelo comprimento de onda (JPL, 1986; KUPLICH, 2003).

Segundo Le Toan et al. (1992) e Kuplich (2003), a penetração depende do comprimento de onda e das condições dielétricas do meio. Penetrações maiores são obtidas para frequências mais baixas, sendo que a umidade interfere nesse processo por aumentar a constante dielétrica do meio, tornando-o mais opaco à radiação da onda eletromagnética. A Tabela 2.1 apresenta a relação entre os nomes das bandas de radar e os respectivos comprimentos de onda e frequência

TABELA 2.1 – Bandas de Sensores Imageadores Radar.

Banda	λ (cm)	Frequência (GHz)
X	2,4 a 3,8	8 a 12,5
C	3,8 a 7,5	4 a 8
S	7,5 a 15	2 a 4
L	15 a 30	1 a 2
P	75 a 133	0,2 a 0,4

Fonte: Jensen, 2000.

A radiação na banda X praticamente não penetra o dossel e como consequência a interação ocorre na superfície com folhas e pequenos galhos. Em estudos aplicados ao mapeamento geológico básico, é comum a utilização de radares operantes nas bandas X, C e em alguns casos L. Na banda C a penetração é um pouco maior e a interação se dá com folhas e galhos maiores. Nos maiores comprimentos de onda, como nas bandas L e P, dependendo da densidade, estrutura e umidade da vegetação, o pulso emitido pode penetrar o dossel e chegar ao solo. Nestes comprimentos de onda, há maior interação com troncos e galhos maiores (DOBSON, 2000; KASISCHKE et al., 1997).

Os sinais emitidos nas bandas L e P são capazes de penetrar o dossel de uma floresta e serem refletidas pelos troncos e galhos das árvores, o que faz com que a penetração seja útil para a avaliação da biomassa de áreas muito extensas como a região amazônica. No entanto, a relação entre retroespalhamento e biomassa torna-se limitada a partir de certos valores de biomassa, no fenômeno conhecido como saturação do retroespalhamento, uma função do comprimento de onda utilizado (IMHOFF, 1995; LUCKMAN et al., 1997).

Em regiões de floresta tropical a saturação da biomassa ocorre em torno de 100 T ha⁻¹ para banda P e L (ARAÚJO et al., 1999; RIGNOT et al., 1997) e em torno de 20 T ha⁻¹

para banda C (IMHOFF, 1995). Assim, para comprimentos de onda menores, como bandas X e C, a saturação ocorre a níveis muito baixos de biomassa, evidenciando que em aplicações relacionadas à área de floresta tropical é desejável o uso de radares que operam nas bandas L e P (ROSENQVIST et al., 2003). No entanto, Kuplich et al. (2003) sugere que através do uso da textura SAR, juntamente com retroespalhamento, é possível contornar o problema da saturação e aumentar os valores máximos de biomassa florestal estimados com dados SAR.

Atualmente os sensores orbitais RADARSAT-1,2, ERS-1,2 e SIR-C emitem sinais na banda C, enquanto que o JERS-1 e ALOS-PALSAR operam em banda L.

2.3.2.2 Polarização

A polarização é uma importante fonte de informação dos alvos, onde a energia em microondas tem um componente polarizado definido pelo vetor campo elétrico (E), freqüentemente linear, ou seja, horizontal (H) ou vertical (V). Outros possíveis estados de polarização incluem as ondas circulares e elípticas, as quais descrevem orientações angulares do vetor campo elétrico e sua variação no tempo.

Na figura 2.5 é ilustrado em (a) a polarização da onda eletromagnética com transmissão e recepção horizontal (HH) e em (b) a polarização da onda eletromagnética com transmissão e recepção vertical (VV).

As imagens de radar podem ser formadas em polarização única, dual ou quad-pol. Uma polarização única ou univariada ocorre quando existe apenas um tipo de combinação de sinal transmitido e recebido pelo radar, como por exemplo HH. Uma polarização dual ou bivariada ocorre quando existem duas combinações de sinais transmitidos e recebidos, por exemplo, HH e HV. Finalmente uma polarização do tipo quad-pol ou multipolarizada ocorre quando existem as quatro combinações de sinais transmitidos e recebidos, como por exemplo HH, HV, VH e VV. Um maior número de combinações de sinais transmitidos e recebidos pelos radares pode contribuir para melhorar a capacidade de interpretação de imagens SAR, facilitando a identificação de feições no terreno.

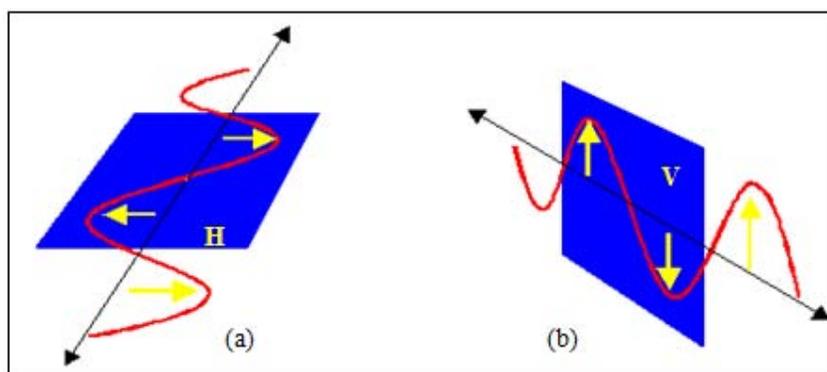


FIGURA 2.5 – Campo Elétrico: Polarização de Ondas eletromagnéticas (a) Horizontal e (b) Vertical.

Segundo Paradella et al. (2005) os radares imageadores não polarimétricos, ou seja os radares polarizados linearmente como o ERS-1, JERS-1, RADARSAT-1 e ERS- 2, são mais comuns e em geral operam com um único canal e com uma única antena de polarização fixa, tanto para a transmissão como para a recepção do sinal de microondas, registrando assim somente a amplitude do sinal recebido (componentes V e/ou H). Radares multipolarizados ou polarimétricos, possuem quatro diferentes modos de detecção dos sinal: transmite H e recebe H (HH), transmite V e recebe V (VV), transmite H e recebe V (HV) e transmite V e recebe H (VH).

Radares convencionais os quais operam em um único canal, não têm a capacidade de medir as propriedades totais de polarização dos alvos descritas pelas assinaturas polarimétricas. Tais informações são sintetizadas somente através de radares polarimétricos, pois além de serem multipolarizados (transmitem ondas em ambas as polarizações H e V), registram também a amplitude e a fase do sinal recebido. Desta forma, a onda dispersa (a qual é uma quantidade vetorial composta por uma amplitude e uma fase) é representada apenas por uma grandeza escalar (amplitude ou intensidade). Assim, para garantir que toda a informação da onda dispersa seja mantida, sua polarização deve ser medida através de uma representação vetorial, onde através de radares imageadores polarimétricos torna-se possível medir a amplitude e a fase relativa de todas as componentes das antenas de transmissão e recepção, para todos os elementos de resolução de uma cena (ULABY e ELACHI, 1990).

O grau de penetração da onda em um alvo é influenciado pela polarização utilizada pelo sistema (DALLEMAND et al., 1993). A polarização HH é mais sensível a difusores dispostos horizontalmente e a polarização VV aos dispostos verticalmente (PARADELLA, 1996). Numa vegetação que possua estrutura predominantemente vertical, como as gramíneas, a atenuação pode ser mais significativa para a polarização VV do que para polarização HH, o que significa maior penetração de ondas horizontalmente polarizadas (ALLEN e ULABY, 1984).

Búfalo (2005), mostrou que dados em uma única polarização (banda L canal HH) podem apresentar limitações para discriminar novos desflorestamentos, especialmente áreas recém desflorestadas (ALMEIDA FILHO et al., 2005).

Rignot et al. (1997) e Saatchi et al. (2000), testaram diferentes frequências e polarizações para discriminar padrões de cobertura do solo em áreas de floresta tropical e na maioria nos casos constatou-se que dados em uma única polarização podem ser limitados para detectar algumas feições.

Aboud Neta et al. (2009) constatou que com a utilização de polarização dual, foi possível obter uma melhoria na classificação de uso e cobertura da terra em comparação com polarização HH do JERS-1. A combinação dos dois canais formando a polarização dual HH+HV e HV+VV fez com que as regiões de interesse fossem melhores classificadas e o erro de classificação menor possível.

Dependendo do estudo que se esteja realizando, se faz necessário o uso de diferentes polarizações e frequências. Aboud Neta et al. (2009) constatou que a combinação da polarização dual HV+VV produziu melhores resultados para o mapeamento florestal com as classes: floresta primária, secundária, solo nu, agricultura, florestas degradadas, pasto e pasto sujo, diferentemente do estudo de Dutra et al. (2009) onde a melhor combinação foi obtida nos canais HH+HV (porém o valor da acurácia global foi inferior). No entanto, o conjunto de classes não levava em consideração as classes pasto e pasto sujo além de classificações contextuais.

Em estudos realizados com imagens polarimétricas e multipolarizadas com combinações de diferentes frequências, obteve-se uma maior capacidade de discriminação de padrões de cobertura do solo, inclusive desflorestamento (HOEKMAN e QUIÑONES, 2002). Deste modo, SAR polarimétricos, os quais fornecem uma quantidade maior de informação sobre a superfície imageada devido ao fato de se obter diferentes componentes em amplitudes bem como informação de fase do sinal de retorno são alvos de um crescente campo de pesquisa (DEGRANDI et al., 1992; HOEKMAN e QUIÑONES, 2002; ISRAELSSON e SYLVANDER, 1992; LEE e GRUNES, 1992; VAN DER SANDEN e HOEKMAN, 1999; ZALOTI et al., 2006).

2.3.2.3 Ângulo de Incidência (θ_i)

Ângulo de incidência (θ_i) é um dos principais fatores que influenciam o retroespalhamento e a aparência dos objetos na imagem uma vez que este determina os efeitos de relevo. É o ângulo formado pela direção perpendicular à superfície terrestre e o feixe incidente do sinal de onda emitido, como ilustrado na figura 2.6. Quanto mais larga a faixa maior será o intervalo de ângulos de incidência ao longo da mesma. Este ângulo aumenta do início da faixa imageada (*near range*), onde tende a produzir valores mais elevados de retroespalhamento, em direção ao final da faixa imageada (*far range*) (LOWMAN et al., 1987). Segundo Santos et al. (2001), a magnitude deste ângulo tem relação direta com o sombreamento, e relação inversa com os efeitos de deslocamento e inversão do relevo.

O ângulo de incidência varia de acordo com o tipo de terreno imageado. A altitude do sistema exerce um efeito grande sobre a geometria de imageamento do SAR, pois altera o ângulo de incidência e, assim, a geometria do imageamento. Os sistemas orbitais operam entre 600-800 km, enquanto os sistemas aerotransportados operam entre 3-12 km. A maior altitude dos sistemas orbitais significa que os ângulos de incidência são geralmente mais agudos, ou seja, sistemas aerotransportados conseguem cobrir um intervalo maior de ângulos de incidência (15°-60°) que os sistemas orbitais (37°-40°). Na figura 2.7 é ilustrada a geometria de imageamento. Terrenos planos geralmente requerem baixos ângulos de incidência para que se detalhem variações topográficas

pequenas, uma vez que com uma alta incidência estas pequenas variações não seriam detectadas e a superfície apareceria lisa ao sensor. Deste modo o aconselhável são ângulos de incidência variando entre 25-45°, para terrenos com relevo intermediário indica-se ângulos entre 20-35° e em terrenos montanhosos sugere-se ângulos de incidência variando entre 40-59° (SINGHROY e SAINT-JEAN, 1999).

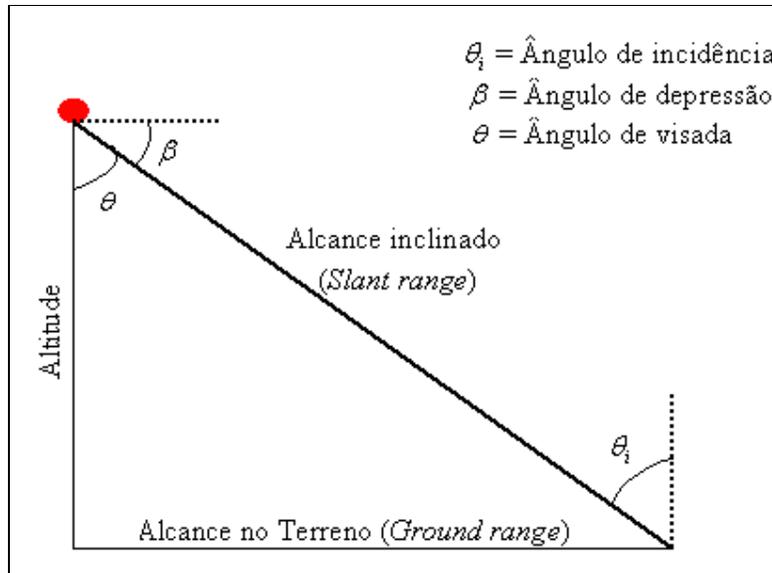


FIGURA 2.6 – Relação entre os ângulos de incidência, depressão (no caso de radar aerotransportado) e visada no imageamento por radar.
 Fonte: Lewis et al. (1998).

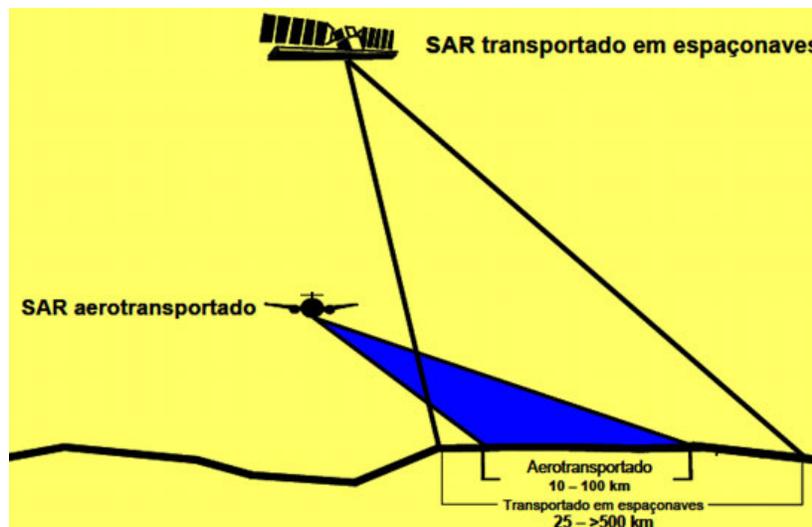


FIGURA 2.7 – Comparação de Geometrias de Imageamento.
 Fonte: Adaptado de CCRS (2007).

A declividade do local pode produzir um efeito significativo sobre o brilho da imagem, pois causa alterações nos ângulos de incidência local, conforme ilustrado na figura 2.8. Um ângulo de incidência local pequeno resulta em retroespalhamentos mais brilhantes e ângulo de incidência local grande resulta em retroespalhamentos mais escuros. No entanto, os efeitos radiométricos induzidos pela declividade são úteis em algumas aplicações como geomorfologia e geologia.

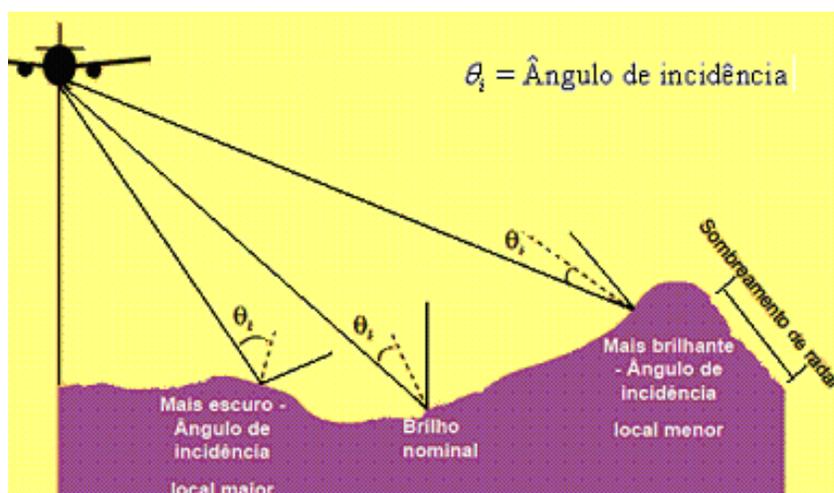


FIGURA 2.8 – Brilho da imagem como uma função da topografia.
Fonte: Adaptado de CCRS (2007).

2.3.2.4 Direção de visada

A direção de visada é um parâmetro definido como o ângulo entre o norte geográfico e a direção de apontamento do feixe de iluminação do radar em sentido perpendicular à direção de movimento da plataforma (LEWIS et al., 1998).

O mecanismo de imageamento em radares é realizado através da geometria de visada lateral, uma vez que se a antena transmissora dos sinais de ondas fosse apontada para nadir, alvos à direita e à esquerda da plataforma afastados igualmente em relação ao sensor não seriam distinguidos, pois seus sinais refletidos retornariam à antena receptora juntos. Deste modo, feições com direção perpendicular ou com ângulo agudo com a direção de visada são realçadas pelo efeito de “luz e sombra”. Já as feições orientadas paralelamente com a direção de visada não produzem realces nem sombras, de forma que estas são mascaradas nas imagens de radar (SABINS, 1996).

2.3.3 Parâmetros Inerentes ao Alvo

2.3.3.1 Rugosidade da Superfície

O tipo de rugosidade irá determinar a intensidade do retroespalhamento do radar dentro da célula de resolução. Na análise de imagens de microondas, a superfície é separada em diferentes regimes de rugosidade, sendo este um importante atributo na análise do terreno (DIERKING, 1999). A divisão inclui desde feições como montanhas, vales e encostas, que geralmente são responsáveis pelos efeitos de *layover* e *foreshortening* até componentes de pequena escala, os quais são determinados pelas feições texturais de superfície próximas ao comprimento de onda do radar (LEWIS et al., 1998).

Ulaby et al. (1982), classifica as superfícies quanto à rugosidade em três categorias: lisa (quando a superfície reflete boa parte da energia incidente de forma especular, com ângulo de reflexão igual e oposto ao ângulo de incidência), intermediária (a energia incidente é refletida pela superfície de uma forma mais difusa, entretanto não homogênea) e rugosa (a energia incidente é retroespalhada em todas as direções de forma mais homogênea), como ilustrado na figura 2.9.

Segundo Elachi (1987), a rugosidade é sempre definida em relação ao comprimento de onda da energia incidente sobre a superfície. Portanto, a aparência do mesmo alvo pode ser menos ou mais rugosa ou lisa, em duas imagens obtidas em comprimentos de onda distintos.

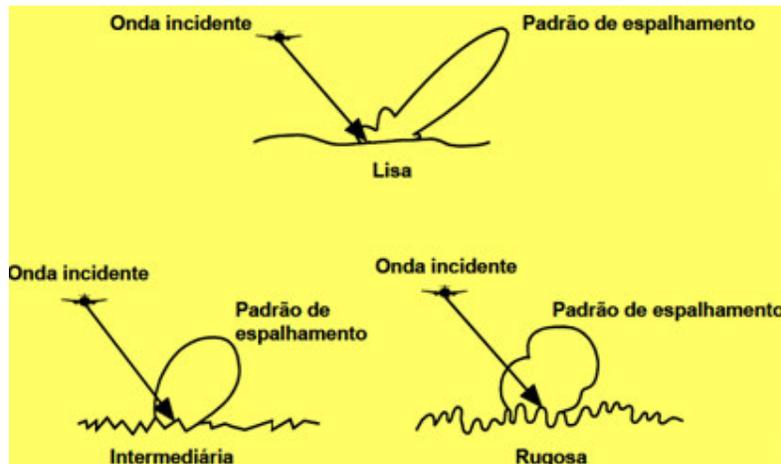


FIGURA 2.9 – Modelo de padrões de espalhamento para uma superfície horizontal.
 Fonte: Modificado de Ulaby et al. (1982).

2.3.3.2 Constante Dielétrica

O sinal de retroespalhamento do radar é influenciado pela umidade do solo e da vegetação. A constante dielétrica influencia fortemente a interação da radiação eletromagnética com a superfície do terreno, alterando a capacidade do material em absorver, refletir e transmitir energia na faixa de microondas (LEWIS, 1998).

O teor de umidade de um material pode alterar suas propriedades elétricas, afetando o modo como esse material aparece numa imagem de radar. Materiais idênticos podem variar na aparência em momentos ou locais diferentes, de acordo com a quantidade de água que contém. A refletividade da maioria da vegetação e superfícies naturais aumenta com o aumento do seu teor de umidade. Um elevado conteúdo de umidade resulta em uma constante dielétrica alta, e conseqüentemente em um alto sinal de retorno. Já um conteúdo de umidade baixo implica em uma constante dielétrica baixa e um baixo sinal de retorno (HOEKSTRA e DELANEY, 1974).

Além disso, medidas dos valores de retroespalhamento em áreas com solo exposto indicam alto grau de sensibilidade à umidade em ângulos de incidência próximos ao nadir (ULABY e BATLIVALA, 1976). Observações similares foram descritas em áreas vegetadas (ULABY, 1975), embora a presença da vegetação tenda a reduzir a sensibilidade do coeficiente de retroespalhamento na variação da umidade do solo.

2.4 Satélite Avançado de Observação da Terra ALOS/PALSAR

Lançado em 24 de Janeiro de 2006 pela Agência Espacial Japonesa (JAXA), o satélite para observação da Terra ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), foi desenvolvido para contribuir com pesquisas relacionadas ao sensoriamento remoto, uso e cobertura do solo, monitoramento de desastres e análise de recursos naturais, podendo ser empregado como busca no incremento de informações sobre as tecnologias de observação da Terra adquiridas no desenvolvimento e utilização de seus antecessores JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satellite*) e ADEOS (*Advanced Earth Observation Satellite*) (SHIMADA, 2007). A plataforma possui 3.5m de largura por 4.5m de comprimento e 6.5m de altura com um peso bruto de aproximadamente 4 toneladas, o que faz dele um dos maiores satélites de observação da Terra (JAXA, 2008).

O ALOS descreve uma órbita circular heliossíncrona a 692 km de altitude, com um período de revisita a um mesmo ponto do planeta de 46 dias. Conforme esquemático na figura 2.10, é caracterizado por possuir três sensores, o PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), com 2,5 metros de resolução espacial com a finalidade de calcular com precisão a elevação da Terra por meio de três sistemas ópticos, o AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*), com resolução espacial de 10 metros e funcionalidade de observar a cobertura da superfície terrestre e o PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), o qual é um radar imageador de abertura sintética que opera em banda L (23,6 cm) e possibilita a observação da Terra independente do horário e condição climática (IBGE, 2007).

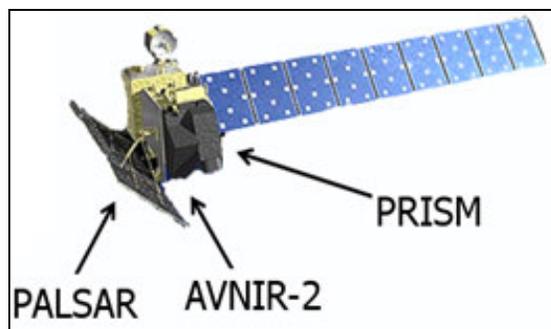


FIGURA 2.10 – Esquema do radar ALOS.
Fonte Modificado de JAXA (2008).

Neste estudo, serão utilizadas imagens do PALSAR. Na Tabela 2.2 são apresentadas as características gerais do sensor.

TABELA 2.2 – Características gerais do modo de imageamento PALSAR do ALOS.

Modo	Fino		ScanSar	Polarimétrico
Frequência	1270 MHz (Banda L)			
Chirp Bandwidth	28 MHz	14 MHz	14 MHz, 28 MHz	14 MHz
Polarização	HH ou VV (FBS)	HH + HV ou VV + VH (FBD)	HH ou VV	HH + HV + VH + VV (PLR)
Ângulo de incidência	8° ~ 60° (34.3°)	8° ~ 60° (34.3°)	18° ~ 43°	8° ~ 60° (21.5°)
Resolução em alcance (range)	7m ~ 44m (10m)	14m ~ 88m (20m)	100m (multilook)	24m ~ 89m (30m)
Largura da faixa	40km ~ 70km (65 km)	40km ~ 70km (65 km)	250km ~ 350km (350 km)	20km ~ 65km (25 km)
Taxa de transmissão de dados	240 Mbps	240 Mbps	120 Mbps ou 240 Mbps	240 Mbps

Fonte: IBGE, 2007.

O PALSAR possui resolução espacial que varia de 10 a 100 metros e capacidade de operação em cinco modos de operações diferentes: o modo de polarização Fino com feixe único - FBS (*Fine Beam Single polarization*), modo de polarização Fino com feixe duplo - FBD (*Fine Beam Dual polarization*), modo Polarimétrico – PLR (*Polarimetric mode*), modo ScanSar (*ScanSar mode*) e modo de transmissão direta – DT (*Direct Transmission*). O uso de um arranjo de antenas permite também que a fase relativa do sinal que chega à antena seja registrada e transformada em informação sobre a superfície (ROSENQVIST et al., 2007).

Os dados captados pelo modo de operação PLR são disponíveis em três níveis de processamento, 1.0, 1.1 e 1.5, onde cada um destes possui diferentes graus de correção radiométrica e geométrica.

Os dados em nível 1.0 são os sinais captados pelo sensor sem processamento e reconstrução, porém acompanhados pelos coeficientes de correção geométrica e radiométrica. O nível 1.1 apresenta os dados no formato complexo, ou seja, contém informação sobre a radiometria e fase do sinal em geometria *slant range* e são

processados com compressão nas direções de *range* e azimute. Já os dados em nível de processamento 1.5 possuem projeção cartográfica e processamento *MultiLook*.

Dentre as melhorias em relação ao radar que o precedeu (JERS-1) destacam-se: melhor capacidade polarimétrica (JERS-1 possuía apenas polarização HH), melhor resolução espacial (18 metros para o JERS-1) e calibração de efeitos atmosféricos.

Neste trabalho foi empregado uma imagem ALOS/PALSAR em amplitude, modo de operação PLR e nível de operação 1.5 a qual será mais detalhada na seção 3.2.1.

2.5 Classificação

Classificação de imagens é uma das principais aplicações das imagens de sensoriamento remoto e tem como finalidade a identificação dos diferentes padrões de cobertura do solo para a confecção de mapas temáticos. É o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos.

Um classificador é um algoritmo que tem por intuito identificar, no espaço de atributos, as composições dos diversos materiais que lhe deram origem, de modo a associar, a cada *pixel* da imagem, uma classe representativa de uma cena homogênea. Assim, o resultado final de um processo de classificação é uma imagem digital que constitui um mapa de "*pixels*" classificados, representados por símbolos gráficos ou cores.

Inúmeros classificadores foram desenvolvidos para a classificação de imagens ópticas e de microondas, desde os mais simples, que se valem apenas do fatiamento das imagens de acordo com os valores dos níveis de cinza, até os mais complexos, baseados em redes neurais e nas distribuições estatísticas características das imagens a serem classificadas (CORREIA, 1999; DUTRA e HUBER, 1999; VIEIRA, 1996). No entanto, a grande parte dos programas de processamento de imagens disponíveis foi elaborada para processamento de imagens ópticas multiespectrais, onde a maioria dos classificadores é *pixel a pixel* e cada *pixel* é classificado sem considerar sua vizinhança. Contudo, em função da grande variância introduzida pelo ruído *speckle*, esses classificadores não funcionam bem em imagens SAR.

Quando se deseja aplicar métodos de classificação estatística em imagens obtidas por microondas, é necessário o conhecimento das propriedades estatísticas do dado utilizado, devido ao fato de os dados de radar possuírem propriedades específicas que devem ser consideradas em processos automáticos de extração de informação.

Dentre as diferentes técnicas de classificação em diversos trabalhos com aplicação de imagens SAR, são utilizados classificadores estatísticos supervisionados e não-supervisionados (GUERRA, 2008). Nos trabalhos de Hoekman e Quiñones (2002) e Freitas et al. (2001), foi utilizado o classificador MAXVER, o qual emprega os estimadores de máxima verossimilhança, com uso de funções de densidade de probabilidade mais adequadas aos dados SAR e deste modo obteve-se bons resultados.

Alguns trabalhos mostram que o resultado da classificação realizada por algoritmos próprios para classificação de imagens SAR são mais precisos, o que pode ser constatado quando os resultados por eles obtidos são comparados com verdade terrestre. Essa melhora está diretamente relacionada, entre outros fatores, a uma modelagem mais adequada dos dados SAR (FRERY et al.,1997; NEZRY et al.,1996).

Neste trabalho foram empregados dois métodos de classificação: método de classificação supervisionado por Máxima Verossimilhança (MAXVER) associado ao método ICM (*Iterated Conditional Modes*) e o método supervisionado da Mínima Distância de Bhattacharyya, sendo relacionados respectivamente à classificação supervisionada baseada em modelagem estatística e classificação supervisionada por regiões.

Segundo Campbell (1996), a classificação supervisionada pode ser informalmente definida como o processo no qual amostras de identidade conhecida são utilizadas para classificar *pixels* de identidade desconhecida. Neste processo, um analista identifica na imagem as classes de informação de seu interesse e separa regiões que melhor representem estas classes. Dentro destas regiões é separado áreas de treinamento que contêm os *pixels* que serão utilizados como representantes da classe e a partir destes *pixels* são extraídas determinadas características das classes, que serão usadas para a classificação dos demais *pixels*.

2.5.1 Modelagem estatística de dados microondas

Vieira (1996) e Correia (1999) apresentaram abordagens de classificação estatística específicas para dados SAR. Os classificadores que adotam técnicas estatísticas requerem modelos tanto para os *pixels* quanto para as classes.

O modelo multiplicativo é comumente adotado na explicação do comportamento estatístico de dados obtidos com radiação coerente e considera modelos distintos para áreas com diferentes graus de homogeneidade. Este modelo supõe que o valor observado em cada *pixel* é a ocorrência de uma variável aleatória $Z=XY$, onde X representa a variável aleatória modelando o retroespalhamento, Y representa a variável aleatória modelando o ruído *speckle* e Z representa a variável aleatória modelando o retorno medido. A combinação de diferentes distribuições de X e Y produz diferentes distribuições para o retorno medido Z, e os fatores que podem alterar a distribuição das variáveis aleatórias X e Y são: o tipo de detecção (linear ou quadrática), o número de *looks* e o grau de homogeneidade da área (FRERY et al., 1997; VIEIRA, 1996; YANASSE et al., 1995).

Segundo Frery et al. (1997), para imagens SAR em intensidade em uma polarização, o retorno *multilook* medido (Z) possui as distribuições $\Gamma(n, n/\beta)$, $K_I(\alpha, \lambda, n)$ e $G_I^\circ(\alpha, \gamma, n)$ respectivamente para áreas homogêneas, heterogêneas e extremamente heterogêneas. Para imagens SAR em amplitude em uma polarização, o retorno *multilook* medido (Z) possui as distribuições $\Gamma^{1/2}(n, n/\beta)$, $K_A(\alpha, \lambda, n)$, $G_A^\circ(\alpha, \lambda, n)$, respectivamente para áreas homogêneas, heterogêneas e extremamente heterogêneas.

O parâmetro n (número equivalente de *looks*), presente em todas as distribuições derivadas do modelo multiplicativo, corresponde ao número de *pixels* que devem ser somados, de modo a se obter a mesma quantidade de informação que a soma dos *pixels* da imagem original, que apresentam informação redundante. O parâmetro α está relacionado ao grau de homogeneidade da área (CORREIA, 1999).

2.5.2 Filtragem do ruído *Speckle*

Conforme citado, as imagens geradas pelos sistemas SAR apresentam um ruído multiplicativo denominado *speckle*, o qual é gerador de dificuldades na análise das imagens (tanto visual quanto automática) e é resultado da radiação coerente usada para gerar as imagens. O ruído *speckle* provoca uma grande variação nos valores de intensidade de cada ponto da cena, conferindo um aspecto granuloso à imagem e dificultando a interpretação dos dados e discriminação dos alvos a serem classificados.

O ruído é resultante das interferências construtivas e destrutivas da energia retroespalhada pelo alvo e é o principal complicador do processo de segmentação e classificação de imagens de radar, sendo esta a causa da baixa eficiência dos segmentadores desenvolvidos para imagens que contêm ruído aditivo (SOUZA JR., 2005).

Segundo Raney (1998), uma forma de reduzir o aspecto granuloso nas imagens é através de filtros redutores de *speckle*, os quais são aplicados com a finalidade de suavizar as variações de alta frequência com o mínimo de perda de informação textural, de bordas e de alvos pontuais, e com a manutenção da média de áreas homogêneas.

Através do processamento *multilook* se consegue reduzir o aspecto granuloso da imagem. Tal processamento consiste em dividir a abertura sintética da antena em alguns setores chamados de *looks* ou visadas e processá-los independentemente, para em seguida somar cada um destes *looks*. No entanto, como consequência deste processo, tem-se a degradação da resolução azimutal da imagem.

As imagens *multilook* podem ser representadas em formatos complexos ou na forma de imagens amplitude ou intensidade. Uma imagem intensidade de “n” *looks* é a média das intensidades de “n” imagens de um *look*, enquanto que a imagem amplitude de “n” *looks* é a raiz quadrada da média das intensidades de “n” imagens de um *look*.

Além da técnica *multilook*, diversos filtros espaciais redutores de *speckle* foram propostos a fim de aumentar a razão sinal/ruído (SNR - *Signal to noise ratio*) das imagens SAR. Um exemplo desses filtros é o *Gamma*, um filtro adaptativo que altera a

imagem ruidosa com base nas estatísticas extraídas localmente em cada *pixel*, preservando o valor médio e as bordas das imagens. De acordo com CCRS (2007), esse filtro é apropriado para imagens que possuam distribuições estatísticas *Gamma* ou derivadas, como por exemplo, raiz da *Gamma*, que nas imagens Amplitude estão associadas a regiões homogêneas tais como áreas agrícolas.

2.5.3 Classificação estatística MAXVER-ICM

O classificador de Máxima Verossimilhança (MAXVER) é um dos classificadores estatísticos mais comumente conhecidos e utilizados (DUTRA e HUBER, 1999; RICHARDS, 1995). É um método de classificação pontual, supervisionado, com baixo custo computacional de execução e implementação.

De acordo com Vieira et al.(1996), as principais etapas da classificação MAXVER são:

- Selecionar as amostras das classes envolvidas na tarefa de classificação, para o treinamento do classificador;
- Selecionar as amostras para treinamento do método de classificação;
- Associar uma função de distribuição de probabilidade para cada uma das classes;
- Classificar cada *pixel* da imagem segundo a classe com maior verossimilhança

Por ser um classificador *pixel a pixel*, dado uma imagem com N *pixels*, cada *pixel* (descrito pelo seu vetor de atributos x) será classificado como sendo da classe ω_j se (Equação 2.2):

$$g_j(x) > g_k(x) \quad \text{para todo } j \neq k, \quad (2.2)$$

onde g_j é denominada função discriminante para a classe ω_j e j, k varia de 1 até o número total de classes da imagem.

A qualidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada à capacidade com que as funções de distribuição de probabilidade descrevem o comportamento estatístico das

diferentes classes. A escolha de uma função de distribuição de probabilidade que melhor se ajuste às amostras de cada classe é realizada a partir de um teste qui-quadrado de ajuste, para em seguida atribuir ao *pixel* à classe que retorne a máxima verossimilhança da função de distribuição de probabilidade selecionada (CORREIA, 1998).

Se os dados seguem uma distribuição Gaussiana multivariada, a função discriminante pode ser definida como (Equação 2.3):

$$g_j(x) = -\frac{1}{2}(x - m_j)^t \Sigma_j^{-1}(x - m_j) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_j| + \ln P(\omega_j), \quad (2.3)$$

onde m_j e Σ_j correspondem ao vetor de média e a matriz de covariância e $P(\omega_j)$ é a probabilidade a priori da classe j . As médias e matrizes de covariância das classes de interesse são estimadas a partir de amostras conhecidas. As probabilidades a priori são geralmente consideradas iguais e desprezadas no cálculo da função de comparação (DUTRA e HUBER, 1999).

Trabalhos a respeito dos dados SAR propõem diferentes funções de distribuição de probabilidade, como proposto em Correia (1998), Freitas et al. (2005), Frery et al. (2007), Frery et al. (1997), Lee et al. (1994a) e Lee et al. (1994b). No caso da classificação MAXVER de dados SAR monopolarizados em intensidade *multilook*, propõem-se as distribuições derivadas do modelo multiplicativo (Γ , K_I e G_I), a Normal Restrita e outras distribuições *ad hoc* (Normal, LogNormal, Beta e Weibull) que também podem obter bom ajuste em determinadas condições (FRERY et al., 2007).

Após a classificação MAXVER, a qual atribui classes aos *pixels* através dos valores de níveis digitais, é aplicado o algoritmo baseado na teoria de campos Markovianos ICM. Enquanto o classificador MAXVER associa classes considerando apenas pontos individuais da imagem, o classificador MAXVER-ICM considera também a dependência espacial na classificação, ou seja, além do vetor de atributos do *pixel*, a informação contextual de vizinhança. A aplicação do ICM pode melhorar a

classificação realizada com o MAXVER, pois este classificador pressupõe que pixels próximos pertencem à mesma classe (CORREIA et al., 1998; VIEIRA, 1996).

Assim, considerando iguais as probabilidades a priori de cada classe, a função discriminante pode ser definida por (Equação 2.4):

$$g_j(x) = -\frac{1}{2}(x - m_j)^t \Sigma_j^{-1} (x - m_j) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_j| + \beta \# \{t \in \delta_x : \omega_t = \omega_x\}, \quad (2.4)$$

onde β é um parâmetro real que quantifica a influência das classes vizinhas sendo estimado iterativamente, # representa o número de elementos de um conjunto, t denota a coordenada de um *pixel* e δ_x é o conjunto de coordenadas em torno da posição de x.

Deste modo, o algoritmo atribui classes a um determinado *pixel*, considerando a vizinhança iterativamente. Este processo é finalizado quando a porcentagem de mudança estipulada pelo usuário é satisfeita ou após um número pré-definido de iterações.

Maior enfoque sobre os classificadores MAXVER-ICM podem ser obtidos em Correia (1999) e Vieira (1996).

2.5.4 Classificação por regiões - Distância de Bhattacharyya

O classificador supervisionado por regiões da medida de distância de *Bhattacharyya* tem por intuito medir a separabilidade estatística entre um par de classes espectrais e conseqüentemente a distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais (INPE 2006; MATHER, 2004).

O classificador de regiões utilizando a distância de *Bhattacharyya*, implementado no SPRING, faz a suposição da Gaussianidade das classes. Neste caso, esta distância média é dada por (RICHARDS, 1995) (Equação 2.5):

$$B_{ki} = \frac{1}{8} (\mu_k - \mu_i)^t \left[\frac{\Sigma_k + \Sigma_i}{2} \right]^{-1} (\mu_k - \mu_i) + \frac{1}{2} \ln \frac{\left| \frac{\Sigma_k + \Sigma_i}{2} \right|}{\sqrt{|\Sigma_k| |\Sigma_i|}}, \quad (2.5)$$

Onde μ_k , μ_i e Σ_k , Σ_i são respectivamente as médias e covariâncias das classes k e i .

Por ser um classificador por regiões, este método de classificação utiliza como parâmetro uma imagem segmentada, a partir da qual envolve uma fase de aquisição e análise de amostras fornecidas, visando aperfeiçoar o mapeamento final.

2.6 Segmentação

A segmentação é normalmente o primeiro passo na análise de uma imagem, tendo como premissa a idéia de segmentar algum objeto dividindo a imagem em partes ou blocos considerados homogêneos de acordo com algum critério de uniformidade, como média, intensidade, contraste ou textura, sendo finalizada quando os objetos de interesse tiverem sido separados. Diversas são as técnicas de segmentação utilizadas e geralmente são baseadas no valor numérico de cada *pixel*, na análise de textura e no histograma da imagem (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Em geral, a segmentação é baseada em duas características dos tons de cinza de uma imagem: a descontinuidade e a similaridade. O método da descontinuidade baseia-se na mudança abrupta dos valores de cinza e o método da similaridade fundamenta-se pela agregação de *pixels* em função da sua semelhança com os *pixels* vizinhos (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Diversos métodos foram desenvolvidos para avaliar e comparar o desempenho de algoritmos de segmentação do ponto de vista de suas limitações, vantagens e aplicabilidade em relação às regiões (CAVES et al., 1998; DELVES et al., 1992; QUEGAN et al., 1988) e às bordas (NEUBERT et al., 2001; PRATT, 1991; ROMÁN-ROLDÁN et al., 2001).

Diferentes algoritmos de segmentação de imagens têm sido propostos com o intuito de prover de forma automática o particionamento de uma imagem, entre os quais podem ser citados o algoritmo de crescimento de regiões presente no SPRING (SPRING, 1996), MUM (*Merge Using Moments*) (COOK et al., 1994), RWSEG (WHITE, 1986) e o SegSAR (SOUSA JR, 2005).

Neste trabalho, foram utilizados dois métodos de segmentações: um pelo SPRING e outro através do segmentador multiníveis SEGSAR. Os métodos foram utilizados com o intuito de se avaliar a classificação de incremento de desflorestamento e conseqüentemente a existência ou não de perda de informações devido aos canais multipolarizados utilizados.

2.6.1 Segmentação SPRING

A técnica de segmentação utilizada no SPRING é o crescimento de regiões, onde através da segmentação particiona-se a imagem em regiões que devem corresponder às áreas de interesse da aplicação. Estas regiões são consideradas um conjunto de *pixels* contíguos, distribuídos bidirecionalmente e que apresentam certa uniformidade.

No processo por crescimento de regiões ocorre o agrupamento de dados, onde somente as regiões espacialmente adjacentes podem ser agrupadas. Esta técnica é desenvolvida a partir de um “*pixel* semente” o qual é inicialmente rotulado como uma região distinta e um critério de similaridade é calculado para cada par de regiões, critério este baseado em um teste estatístico de hipótese entre as médias das regiões. O crescimento continua até que sejam encontrados *pixels* que não se adaptem ao critério de similaridade, e então o processo pára. Uma nova região inicia-se, cuja média inicial é o valor do novo “*pixel* semente”. Para realizar este processo de segmentação no SPRING é necessária a definição de um limiar de similaridade e um limiar de área (SPRING, 1996; BINS et al, 1996).

O limiar de similaridade é o limiar abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e então agrupadas. É o valor da distância Euclidiana mínima entre as médias

das regiões consideradas. O segundo limiar é o valor da área mínima dado em número de *pixels* para que uma região seja individualizada (BINS et al, 1996).

2.6.2 Segmentação SEGSAR

O segmentador SEGSAR é um segmentador hierárquico, que utiliza técnicas de crescimento de regiões, agrupamento de regiões, ajuste de bordas e separação de regiões não homogêneas. É multi-nível (utiliza o critério hierárquico de pirâmide), multi-banda (pode ter várias bandas como entrada fornecendo informações para segmentação) e realiza teste de bordas, teste de homogeneidade para regiões e entre regiões, e o método de compressão de imagem por pirâmide gaussiana. Maiores detalhes podem ser encontrados em Souza Jr. (2005).

Os resultados apresentados por Aboud Neta et al. (2009), Dutra et al. (2007, 2008, 2009) e Thiel et al. (2006), demonstraram que segmentadores multi-níveis podem ser mais adequados aos tipos de dados SAR, onde o resultado da classificação dos trabalhos descritos apresentou valores de acurácia considerados muito bom e excelentes de acordo com o critério de Landis e Koch (1977).

Os parâmetros de entrada do segmentador SEGSAR são: o modelo de representação dos dados (manchas ou textura), o tipo de imagem (óptica ou SAR), a similaridade e a área mínima (ambas usadas nos testes de crescimento e de agrupamento de regiões), o coeficiente de variação (utilizado no teste de homogeneidade de regiões), o nível de confiança adotados nos testes e o número máximo de compressões desejado (SCOFIELD et al., 2007).

O processo de segmentação inicia-se com a compressão dos dados pelo critério de pirâmide gaussiana, onde na base da pirâmide encontra-se a imagem original sem compressão. No próximo nível após a base, a imagem é comprimida, sendo cada *pixel* da imagem formado pela média de quatro *pixels* da imagem anterior. Este processo continua até atingir o nível N desejado.

O processo de crescimento de regiões começa na imagem mais comprimida onde cada *pixel* é considerado como uma região. Os *pixels* são listados de forma aleatória para ter início o processo de crescimento de regiões pelo primeiro *pixel* da lista e posteriormente o teste de agrupamento de *pixel* com região. Após o término dos testes de agrupamento, tem-se uma imagem segmentada a partir da imagem com resolução mais degradada, devido às compressões aplicadas sobre a imagem original.

O próximo passo é a descompressão dos dados, onde as regiões formadas na segmentação passam a ser representadas pelo quádruplo do número de pixels. Devido ao aumento da resolução da imagem, as bordas geradas podem ser grosseiras, sendo necessário aplicar o teste de ajuste de bordas para melhorar a segmentação inicial. Ao término da sucessiva descompressão até a imagem original, a segmentação passa pelo teste de área mínima para identificar se existem regiões menores que o limiar e assim é finalizada.

2.7 Avaliação da acurácia das classificações

Com o intuito de prever os resultados das classificações, antes de realizar as classificações supervisionadas é possível fazer uma análise a respeito das separabilidades estatísticas entre as classes de estudo. Deste modo, torna-se essencial a utilização de algum tipo de medida estatística que forneça o grau de agrupamento ou separação das classes.

Dentre as medidas de distâncias existentes, utilizou-se neste trabalho a distância de *Jeffries-Matusita*, também conhecida como distância JM (SWAIN, 1972).

A distância JM expressa medidas estatísticas de separabilidade entre duas distribuições (DUTRA e HUBER, 1999). Assim, para distribuições gaussianas, a distância JM entre as classes k e i é expressa pela equação 2.6:

$$JM_{ki} = \sqrt{2(1 - e^{-B_{ki}})} \quad , \quad JM \in [0, \sqrt{2}] \quad (2.6)$$

onde B_{ki} representa a distância de Bhattacharyya entre as classes k e i e é dada pela equação 2.5.

A grande vantagem da distância JM é que o grau de separabilidade entre as classes é determinado por um único número, que varia de $[0, \sqrt{2}]$. Desta forma, não é necessário visualizar todas as classes simultaneamente, para inferir sobre a respectiva separabilidade das mesmas. Além disso, a distância JM é um ótimo indicativo de como será o resultado da classificação supervisionada. Quanto mais próximo de $\sqrt{2}$, menor a confusão entre as classes, o que acarretará um bom resultado de classificação.

Após a realização das classificações, a avaliação dos resultados é realizada com base na análise da exatidão (acurácia), porém independentemente dos métodos e dados utilizados a acurácia dos resultados devem ser analisadas, para que então seja possível julgá-los confiáveis ou não (GABOARDI, 2003).

Neste trabalho foi utilizado o Coeficiente de Concordância *Kappa*, descrito em Hudson e Ramm (1987), para realizar o teste da classificação, bem como os testes de hipóteses bilaterais, para comparação das matrizes de confusão das classificações obtidas.

Comparando-se a imagem classificada com amostras de teste específicas ou com imagens verdade que estejam co-registradas, pode-se obter uma matriz de confusão, onde são apresentadas as quantidades e/ou percentagem de *pixels* classificados correta e incorretamente em cada classe. Deste modo, pode-se inferir da matriz de confusão tanto os erros de inclusão ou comissão quanto os erros de exclusão ou omissão (CONGALTON e GREEN, 1999). Além disso, a matriz de erro permite também calcular outras medidas de exatidão como a exatidão total ou acurácia global (STORY e CONGALTON, 2007).

Por erro de inclusão (erro do consumidor ou usuário) entende-se a probabilidade de ser aceito como bom um mapa ruim e por erro de omissão (erro do produtor) a probabilidade de ser rejeitado um mapa bom. No erro de omissão, os *pixels* são omitidos de sua correta classe e associados à outra classe. Já no erro de comissão os *pixels* são

erroneamente incluídos em uma dada classe quando na verdade deveriam ser associados à outra classe.

Deste modo, índices de concordância como o coeficiente *Kappa* podem ser calculados a fim de se obter a acurácia temática. Porém, como este coeficiente determina a concordância esperada a posteriori, a concordância esperada somente poderá ser determinada após a construção da matriz de erros, e esta por sua vez é obtida após a verificação dos resultados obtidos na classificação digital (COHEN, 1960; ROSENFELD e FITZPATRICK-LINS, 1986).

Este coeficiente tem a vantagem de levar em consideração todos os elementos da matriz de confusão e não somente os elementos da diagonal. Além disso, supõe que parte do acerto total poderia ser devido ao acaso e, portanto o coeficiente *Kappa* estima a proporção de acerto que efetivamente ocorre.

O *Kappa* assume valores menores ou iguais a 1, podendo inclusive assumir valores negativos. Quando todas as amostras são corretamente classificadas, ou seja, todos os elementos da matriz de confusão fora da diagonal possuem valor nulo, o coeficiente *Kappa* possui valor 1. Valores de *Kappa* pequenos indicam que a classificação não obteve bons resultados (Landis e Koch, 1977).

A Tabela 2.3 mostra, esquematicamente, uma matriz de confusão.

TABELA 2.3 – Matriz de Confusão

		CLASSIFICAÇÃO				Total
		1	2	...	c	
R E F E R Ê N C I A	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1c}	x_{1+}
	2	x_{21}	x_{22}			x_{2+}
	⋮	⋮		⋮		⋮
	c	x_{c1}			x_{cc}	x_{c+}
Total		x_{+1}	x_{+2}	...	x_{+c}	N

Cada elemento x_{ij} representa o número de amostras que sendo verdadeiramente da classe i foram, após a classificação, atribuídas à classe j . O total marginal x_{i+} indica o número de amostras da classe i , e x_{+j} o número total de amostras que foram atribuídas à classe j e N representa o número total de amostras. Os elementos da diagonal representam as amostras corretamente classificadas.

A partir dos elementos da matriz de confusão (Tabela 2.3), são estimados o Coeficiente de Concordância *Kappa* (Equação 2.8) e sua variância (Equação 2.11).

$$\hat{k} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2} \quad (2.8)$$

onde, θ_1 representa a exatidão global, dada pela Equação 2.9 e θ_2 representa a proporção de unidades que concordam por pura casualidade, admitindo-se nesse caso a independência entre a classificação e a referência e é dado pela Equação 2.10 onde é representado pela somatória dos produtos das proporções marginais das linhas e colunas da matriz (Brites et al., 1996).

$$\theta_1 = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{N} \quad (2.9)$$

e

$$\theta_2 = \frac{\sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{N^2} \quad (2.10)$$

A Variância do *Kappa* pode ser estimada por:

$$VAR_{\hat{k}} = \frac{1}{N} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4 - 4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (2.11)$$

onde θ_3 é definido por:

$$\theta_3 = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii} (x_{i+} + x_{+i})}{N^2} \quad (2.12)$$

e θ_4 é definido por:

$$\theta_4 = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c x_{ij} (x_{j+} + x_{+i})}{N^3} \quad (2.13)$$

Landis e Koch (1977) sugeriram uma conceituação para o resultado da classificação em função do valor de *Kappa* obtido (Tabela 2.4).

TABELA 2.4 – Conceitos das classificações baseados no coeficiente *Kappa*.

<i>Kappa</i>	Conceito
$k < 0$	Péssimo
$0 < k < 0,2$	Ruim
$0,2 < k < 0,4$	Razoável
$0,4 < k < 0,6$	Bom
$0,6 < k < 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k < 1$	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

Mediante os valores obtidos a partir dos coeficientes de concordância *Kappa* e de suas respectivas variâncias, torna-se possível testar a hipótese de igualdade de duas matrizes de confusão, baseado na estatística “z” definida pela Equação 2.12 (SMITS et al., 1999).

$$z = \frac{\hat{K}_1 - \hat{K}_2}{\sqrt{\hat{\sigma}_{K_1}^2 + \hat{\sigma}_{K_2}^2}} \quad (2.14)$$

onde \hat{K}_1 e \hat{K}_2 são os estimadores dos coeficientes de concordância *Kappa* relativos a duas matrizes de erro independentes das quais queira se verificar a igualdade a um nível de significância α . Para um número total de pixels suficientemente elevado, a estatística z terá distribuição aproximadamente Normal (CONGALTON e GREEN, 1999).

Para realizar os testes de hipóteses são estabelecidos o nível de significância (α) desejado, geralmente 1%, 5% ou 10% e as hipóteses nula (H_0) e alternativa (H_1), sendo geralmente $H_0: K_1 = K_2$ e $H_1: K_1 \neq K_2$. O nível de significância α representa a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira.

Obtidos os coeficientes *Kappa* e suas respectivas variâncias, é calculado o valor de z conforme a Equação 2.12. A esse valor de z calculado, é associado um valor-p, também denominado de nível de significância experimental ou descritivo (SPIEGEL, 1984), que indica a probabilidade correspondente ao valor da estatística calculada e que representa o máximo nível de significância para o qual se pode aceitar a hipótese nula.

A hipótese nula é aceita ou rejeitada a partir da comparação do valor-p com o nível de significância adotado. Se o valor-p for maior que o nível de significância adotado, H_0 será aceito e em caso contrário, rejeitado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado os materiais e metodologias utilizadas neste estudo. São descritos especificamente a área de estudo, os dados e *softwares* e *hardware* utilizados bem como os procedimentos metodológicos realizados envolvendo os processamentos de máscaras do PRODES, as segmentações e as classificações supervisionadas.

3.1 Área de Estudo: Região da Floresta Nacional de Tapajós-PA

A área de estudo desse trabalho está situada dentro da área da Floresta Nacional (Flona) de Tapajós no oeste do Estado do Pará, ao sul da cidade de Santarém, entre as latitudes S 02° 39' 26" a S 03° 31' 24" e longitude O 54° 37' 58" a Oeste 55° 14' 22" (FIGURA 3.1).

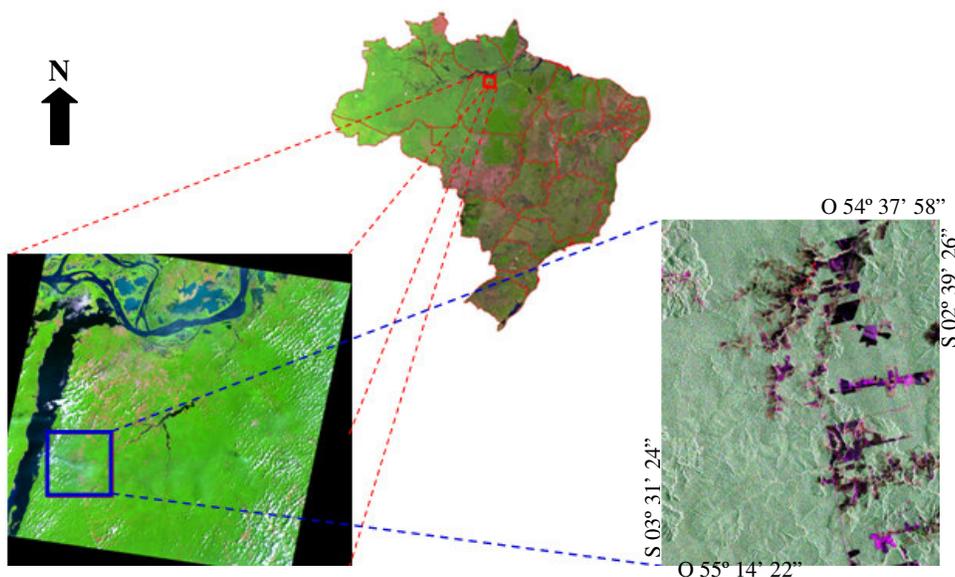


FIGURA 3.1 – Localização geográfica da área de estudo na FLONA de Tapajós-PA. Em destaque é ilustrado a área de estudo com a imagem Landsat TM de 09/11/2006 (composição R5G4B3) e imagem ALOS/PALSAR de 21/10/2006 (composição HH(R)HV(G)VV(B)).

O índice de precipitação pluviométrica anual varia entre 1800 a 2800 mm, com volume médio anual de 1911 mm. O período chuvoso é bem distribuído, sendo chuvoso no primeiro semestre e com baixa intensidade no restante do ano. A região possui clima

quente e úmido com média térmica máxima anual variando entre 31°C a 33°C e média mínima variando entre 24°C a 25°C (ZEE BR-163, 2008).

A FLONA de Tapajós é uma unidade de conservação federal criada pelo decreto N.º 73.684 – de 19 de fevereiro de 1974. Abrange uma área aproximada de 544 mil hectares, localizados em terras de quatro municípios: Aveiro, Belterra, Rurópolis e Placas no oeste do estado do Pará (COHENCA, 2007). Tem como limite norte a área urbana do município de Belterra, a leste a rodovia BR 163 - Santarém/Cuiabá, a oeste o Rio Tapajós e ao sul os rios Tinga e Cupari.

O relevo é plano a suavemente ondulado composto em sua maioria por rochas sedimentares e altimetria entre 50 a 200m, com altitude máxima de 280m (SANTOS et al., 2003). A vegetação é composta basicamente por Florestas Ombrófilas densas e por algumas áreas de Floresta Secundária em diferentes estágios de sucessão (SHIMABUKURO et al., 1997).

Em menor proporção podem ser encontradas Floresta Ombrófila aberta, Floresta Estacional, Savana e Campinarana. Devido às modificações antrópicas nas últimas décadas, a região apresenta significativa formação de áreas de vegetação secundária denominada Capoeiras, concentrando-se principalmente nas áreas desflorestadas ao longo da rodovia BR-163.

A área de estudo apresenta várias regiões desmatadas ao longo dos anos, sendo na maior parte devido à ocupação da agricultura de subsistência e pecuária. As atividades agrícolas são basicamente ligadas à produção de grãos, como o arroz, milho e cultivo de soja, tendo a produção desta última aumentado nos últimos anos devido ao crescimento na demanda do mercado exterior, principalmente com relação à China (VENTURIERI, 2007).

As áreas desflorestadas concentram-se principalmente ao longo da rodovia BR-163 e adjacências. Desde 2001, com a construção de um porto graneleiro e com diversos incentivos, a produção de grãos tem se alastrado aos arredores de Santarém, no norte da BR-163. A região sofre assim um acelerado processo de desflorestamento para a

instalação da agricultura mecanizada. Segundo dados do INPE (2008a), a extensão total do incremento de desflorestamento para a cena da área de estudo (Órbita 227/Ponto 62) foi de aproximadamente 198.34 Km² entre 2003/2004, 116.24 Km² entre 2004/2005, 83.84 Km² entre 2005/2006, 127.51 Km² entre 2006/2007, 130.57 Km² entre 2007/2008 e 194.97 Km² entre 2008/2009. Para toda a Amazônia Legal, as taxas de desflorestamento foram de 27.772 Km² entre 2003/2004, 19.014 Km² entre 2004/2005, 14.196 Km² entre 2005/2006, 11.633 Km² entre 2006/2007, 12.911 Km² entre 2007/2008 e 7.008 Km² entre 2008/2009.

Devido à grande gama de trabalhos realizados na região pelo INPE, assim como a disponibilidade de imagens SAR do ALOS/PALSAR, bem como dados relativos a trabalhos de campo e a diversidade das classes de ocupação do solo existentes como florestas primárias, pastagem e vegetação em diversos estágios de regeneração, a área foi escolhida como estudo para detecção do desflorestamento.

A figura 3.2 ilustra feições representativas da área de estudo obtidas por meio de trabalho de campo realizado em Outubro de 2005, sendo utilizadas como informação complementar na verificação de desflorestamento.

A classe Floresta Primária representa florestas que não sofreram degradação florestal ou que a ação humana não provocou significativas alterações das suas características originais de estrutura. A classe Floresta Secundária são aquelas resultantes de um processo natural de regeneração da vegetação em áreas onde no passado houve corte raso da floresta primária, e também florestas degradadas ou exploradas. A classe Agricultura abrange principalmente plantações de soja, enquanto a classe Pastagem (pasto limpo e pasto sujo) representa os terrenos preparados para pecuária. A classe Desflorestamento Recente estão associados os desflorestamentos ocorridos a menos de um ano. Finalmente, à classe Solo Exposto, estão associados terrenos sem cobertura vegetal, os quais podem ter sido preparados para algum tipo de cultivo.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

FIGURA 3.2 – Feições representativas da área de estudo: (a) Floresta Primária; (b) Floresta Secundária; (c) Agricultura; (d) Pasto limpo; (e) Pasto Sujo; (f) Desflorestamento Recente e (g) Solo Exposto.
Fonte: Adaptado de Dutra et al. (2007).

3.2 Materiais

Neste trabalho foram utilizados dados ALOS/PALSAR multipolarizados em amplitude, imagens Landsat-5 TM e um mapa temático de desflorestamento gerado a partir das informações disponibilizadas pelo PRODES.

3.2.1 Imagens ALOS/PALSAR

Neste estudo foi empregada uma imagem ALOS/PALSAR em amplitude, modo de operação PLR e nível de operação 1.5. Essa imagem foi fornecida pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA). Na tabela 3.1, são apresentadas as principais características da imagem ALOS/PALSAR utilizada.

TABELA 3.1– Características da imagem em modo de operação PLR nível 1.5

Formato	Multilook
Número de Looks	4
Geometria	<i>Ground Range</i>
Modo de Aquisição	Polarimétrico (PLR)
Polarização	HH/HV/VH/VV
Data/Hora de Aquisição:	
Início do imageamento	21/10/2006 as 02:20:48
Fim do imageamento	21/10/2006 as 02:20:56
Resolução Espacial	30 m
Espaçamento entre <i>pixels</i>	12 m (range) x 12 m (azimute)
Ângulo de incidência	24°
Ângulo off-nadir	21,5°
Faixa de Imageamento:	
Largura aproximada	34,8 km
Comprimento aproximado	63,6 km
Altitude do sensor	698,522 km
Passagem	Ascendente

3.2.2 Dados auxiliares

Em regiões de floresta tropical, a elevada quantidade de precipitação pluviométrica é uma das principais causas de concentração de umidade dos alvos, podendo esta umidade influenciar na capacidade de discriminação dos mesmos (ULABY et al., 1986a).

Na figura 3.3 é apresentada a quantidade acumulada de precipitação da área de estudo. O gráfico foi construído a partir dos dados obtidos nos Postos de Coleta de Dados (PCD) mais próximos da área de estudo e disponibilizados pelo CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Clima). Os dados referem-se ao mês de Outubro de 2006, época em que foram adquiridos os dados ALOS/PALSAR.

As precipitações acumuladas foram registradas nas seguintes estações pluviométricas:

- Estação Santarém: localizada na latitude -2.41° e longitude -54.74° no município de Santarém-PA, distante aproximadamente 90 km a Norte do centro da área de estudo.
- Estação Altamira: localizada na latitude -3.22° e longitude -52.16° no município de Altamira-PA, a aproximadamente 191 km a Sudeste da região estudada.
- Estação Boca do Inferno: localizada na latitude -1.57° e longitude -54.82° no município de Alenquer-PA, a aproximadamente 140 km a Norte do centro da área de estudo.

A quantidade de precipitação acumulada nos municípios de Santarém, Altamira e Alenquer no mês de Outubro de 2006 foi estimada respectivamente em 64, 44 e 71mm, sendo a quantidade de precipitação acumulada até a data do imageamento SAR de 21 de Outubro de 2006 respectivamente em 64, 32 e 53mm (FIGURA 3.3). Nos três dias antecedentes ao imageamento, foram registrados índices acumulados nas estações de Santarém, Altamira e Alenquer respectivamente em torno de 32, 7 e 19mm, o que poderá ter ocasionado o aumento das constantes dielétricas do solo e da vegetação, e conseqüentemente podendo influenciar na discriminabilidade de alvos quando se utiliza dados de radar (HASHIMOTO et al., 1997). A seta em vermelho ilustra a data de imageamento do radar ALOS/PALSAR para a área de estudo.

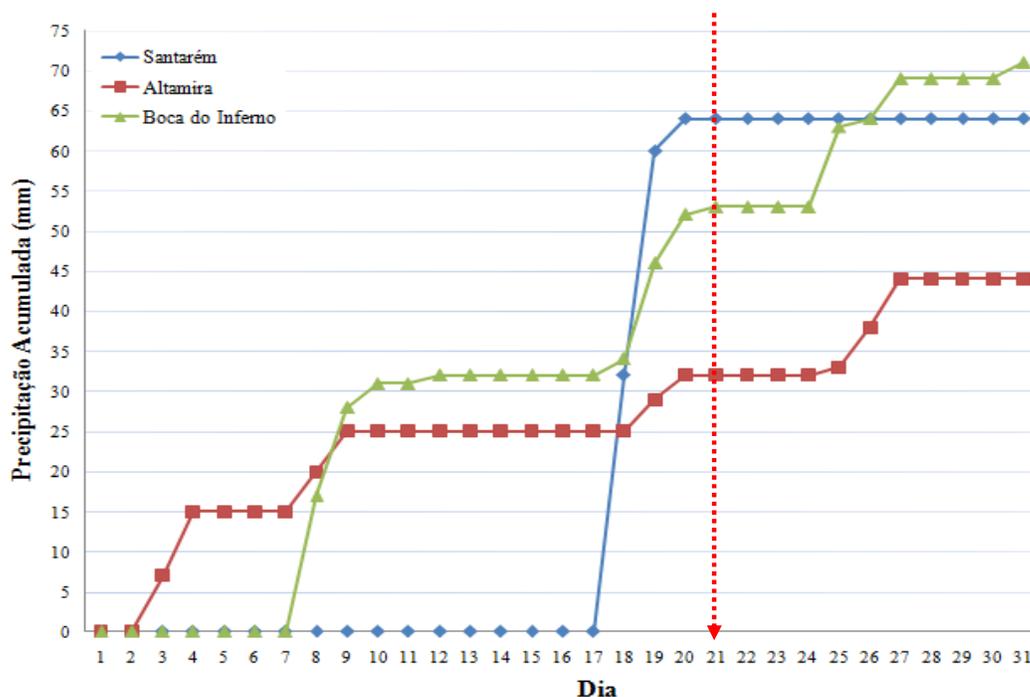


FIGURA 3.3 – Precipitação pluviométrica acumulada do mês de Outubro de 2006, medida pelos PCDs mais próximos da área de estudo. A seta em vermelho ilustra a data de imageamento do radar ALOS/PALSAR para a área de estudo.

Foram utilizadas três imagens Landsat-5 TM (Órbita 227/Ponto 62) e uma imagem SPOT-4 (Órbita 689/Ponto 356) para auxiliar nas análises das classificações realizadas. Estas imagens foram adquiridas respectivamente nos dias 03 de Setembro de 2005, 21 de Agosto de 2006, 21 de Junho de 2007 e 31 de Agosto de 2006. As datas das imagens auxiliares utilizadas, correspondem as datas mais próximas anterior e posterior a passagem do satélite ALOS/PALSAR (21 de Outubro de 2006).

Além disso, foram utilizadas as imagens sintéticas disponibilizadas pelo PRODES 2005, 2006 e 2007. Utilizou-se o mapa de desflorestamento do ano base de 2006, referente à cena Landsat TM 227/62 de 21 de Outubro de 2005 (PRODES 2005) e 09 de Novembro de 2006 (PRODES 2006). Tal mapa de desflorestamento de 2006 (FIGURA 3.4) foi adotado como dado de referência nas amostragens e avaliações realizadas, onde a classe “incremento de desflorestamento” foi mapeada a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006 referentes ao processamento e interpretação da imagem Landsat-5 TM (227/62) de 09 de Novembro de 2006. Como análise

complementar das classificações realizadas, utilizou-se também a imagem Landsat TM de 23 de Julho de 2007, referente ao PRODES 2007.

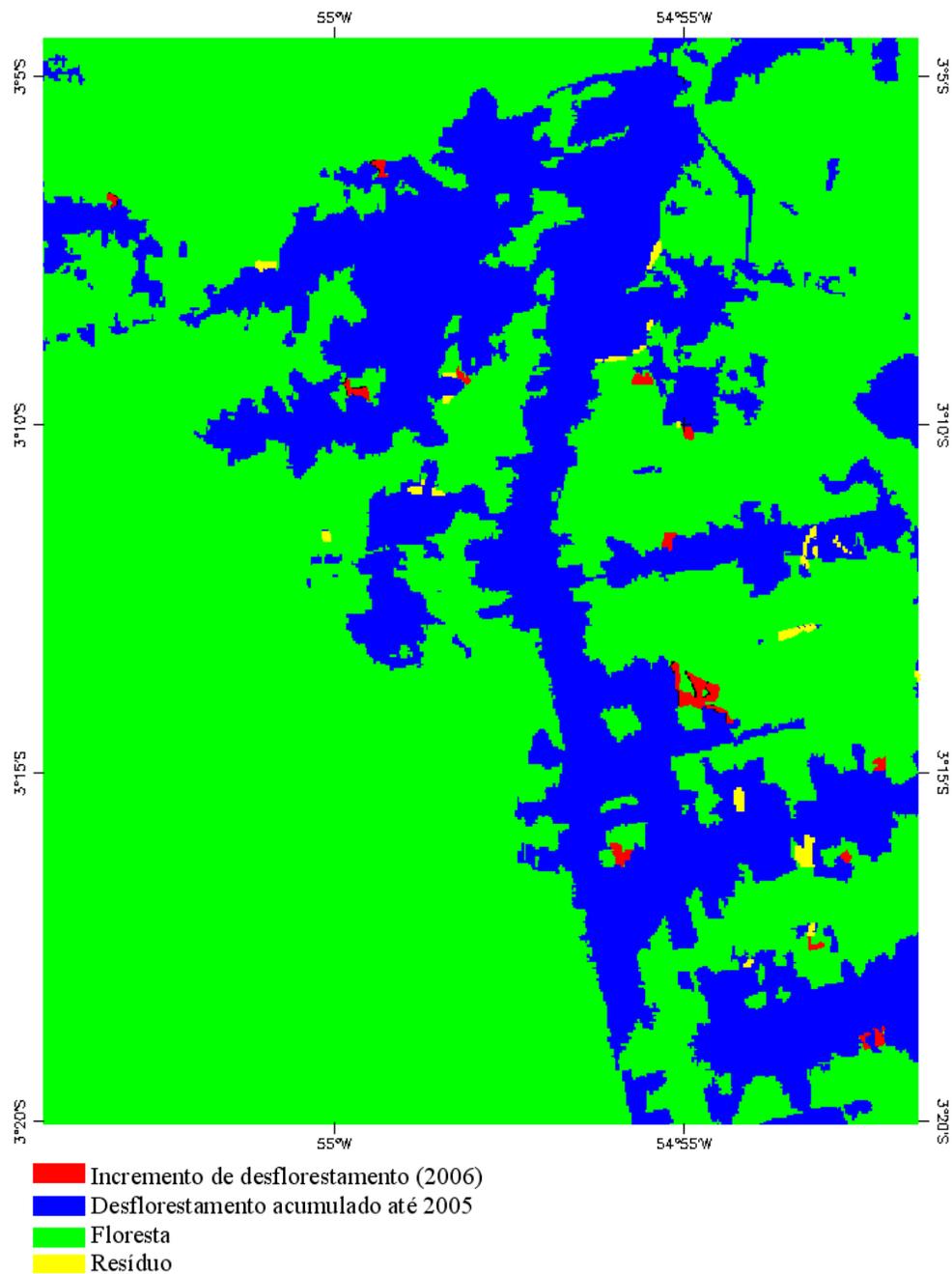


FIGURA 3.4 – Mapa de desflorestamento gerado a partir das informações disponibilizadas pelo PRODES do ano base de 2006, referente à cena Landsat-5 TM 227/62 de 09 de Novembro de 2006.

As imagens sintéticas Landsat-5 TM (227/62) consistem na composição das bandas TM3, TM4 e TM5 com projeção Lat/Long, Datum SAD69 e resolução de 30 metros expressa em grau decimal, registrada em relação à imagem Landsat ETM+/Geocover.

A tabela 3.2 e figura 3.5 apresentam a relação das imagens ópticas auxiliares utilizadas como informação complementar na análise das classificações realizadas com a imagem microondas ALOS/PALSAR de 21/10/2006.

TABELA 3.2 – Imagens ópticas auxiliares utilizadas no trabalho.

Imagens ópticas auxiliares	Data de aquisição da Imagem	Órbita/Ponto	Resolução Espacial
Imagem Landsat-5 TM	03/09/2005 21/08/2006 21/06/2007	227/62	30 m
Imagem SPOT-4	31/08/2006	689/356	10 m
Imagem Landsat-5 TM sintética disponibilizada pelo PRODES	21/10/2005 09/11/2006 23/07/2007	227/62	30 m

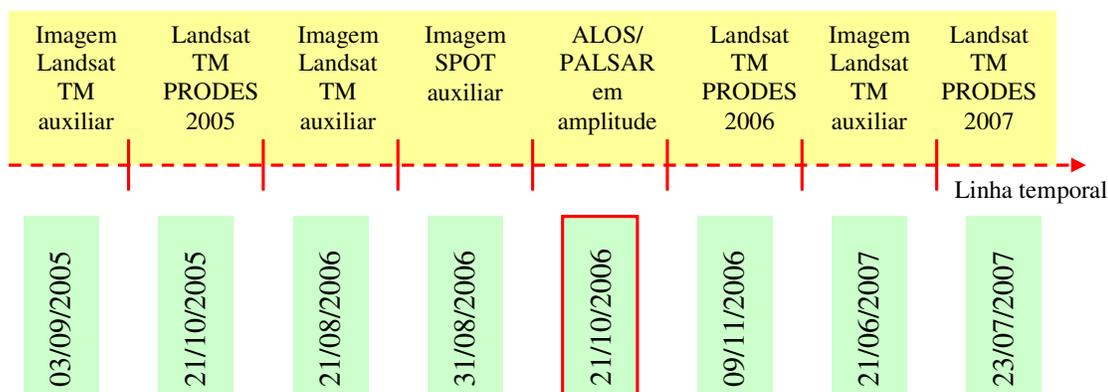


FIGURA 3.5 – Relação das imagens utilizadas.

As figuras 3.6 e 3.7 ilustram exemplos das imagens auxiliares utilizadas. São apresentados respectivamente a imagem óptica Landsat-5 TM sintética de 09 de Novembro de 2006 com composição R(5)G(4)B(3) utilizada pelo PRODES no mapeamento de incremento de desflorestamento de 2006 (onde é possível evidenciar a elevada quantidade de nuvens na região) e a imagem óptica SPOT-4 de 31 de Agosto de 2006 com composição R(4)G(1)B(2).

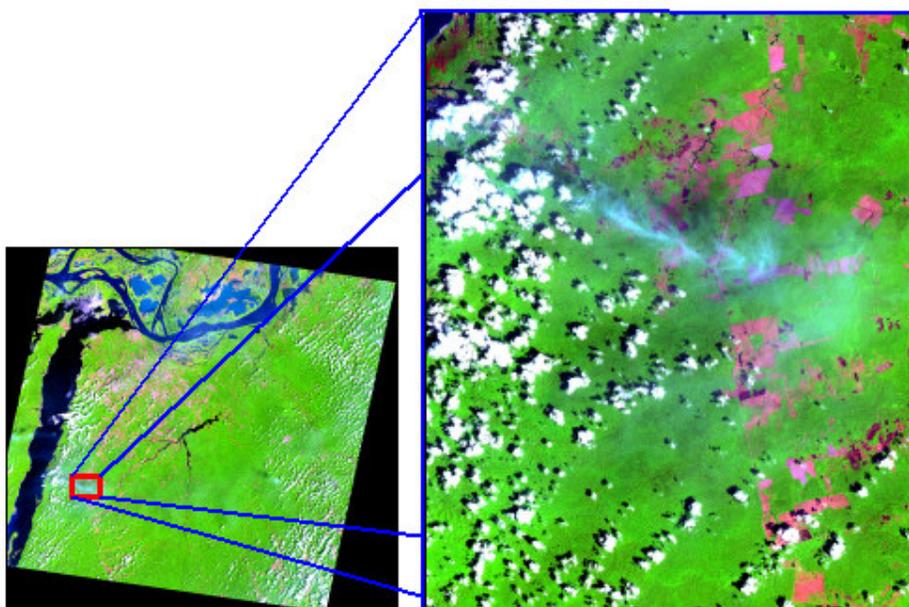


FIGURA 3.6 – Imagem óptica auxiliar: Landsat-5 TM (composição R5G4B3) de 09 de Novembro de 2006, em destaque a área de estudo.

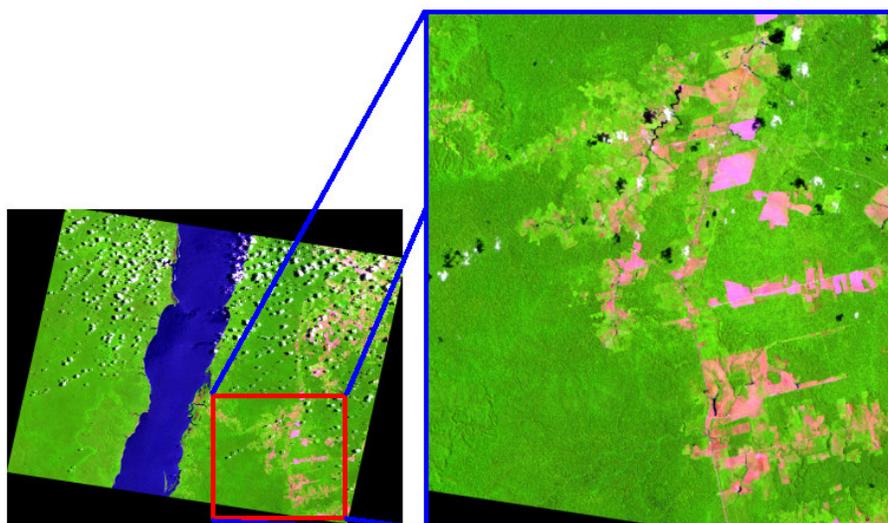


FIGURA 3.7 – Imagem óptica auxiliar: SPOT-4 (composição R4G1B2) de 31 de Agosto de 2006, em destaque a área de estudo.

3.3 Softwares e hardware utilizados

Os aplicativos utilizados para o processamento dos dados foram:

- *ASF Tools MapReady 2.1;*

- ENVI 4.5;
- SPRING 5.0;
- ArcGis 9.2;
- *Polarimetric SAR Classifier 0.7* (CORREIA, 1998) e
- SEGSAR (SOUSA JR., 2005).

Os parâmetros associados à geometria de aquisição das imagens foram obtidos a partir do aplicativo *ASF Tools MapReady 2.1*.

Os pré-processamentos como recortes, registros, filtragem *Gamma* bem como as validações das classificações finais foram realizadas no ENVI 4.5.

O SIG ArcGis 9.2, juntamente com o ENVI 4.5 foram utilizados para elaboração das máscaras de desflorestamento acumuladas geradas mediante arquivos shapefile disponibilizados pelo projeto PRODES.

As classificações contextuais MAXVER/ICM foram obtidas via aplicativo *Polarimetric SAR Classifier 0.7*.

As segmentações foram realizadas utilizando-se o segmentador SEGSAR e a segmentação do *software* SPRING 5.0, onde foram utilizadas como informação de entrada nas classificações por regiões pela distância de *Bhattacharyya* realizadas no SPRING 5.0.

Todos os processamentos foram realizados em um microcomputador com processador Intel Pentil 4, com velocidade de processamento de 3.4 GHz, memória RAM de 2GBytes, capacidade do HD de 80 GBytes e sistema operacional Windows XP.

3.4 Metodologia

A metodologia empregada no mapeamento do incremento de desflorestamento na área de estudo, teve por finalidade a aplicação de diferentes técnicas de classificação e

segmentação de imagens SAR. O procedimento metodológico pode ser dividido em quatro etapas, conforme o fluxograma da metodologia geral ilustrado na figura 3.8.

Cada uma das quatro etapas da metodologia empregada será elucidada nas seções 3.4.1 à 3.4.4.

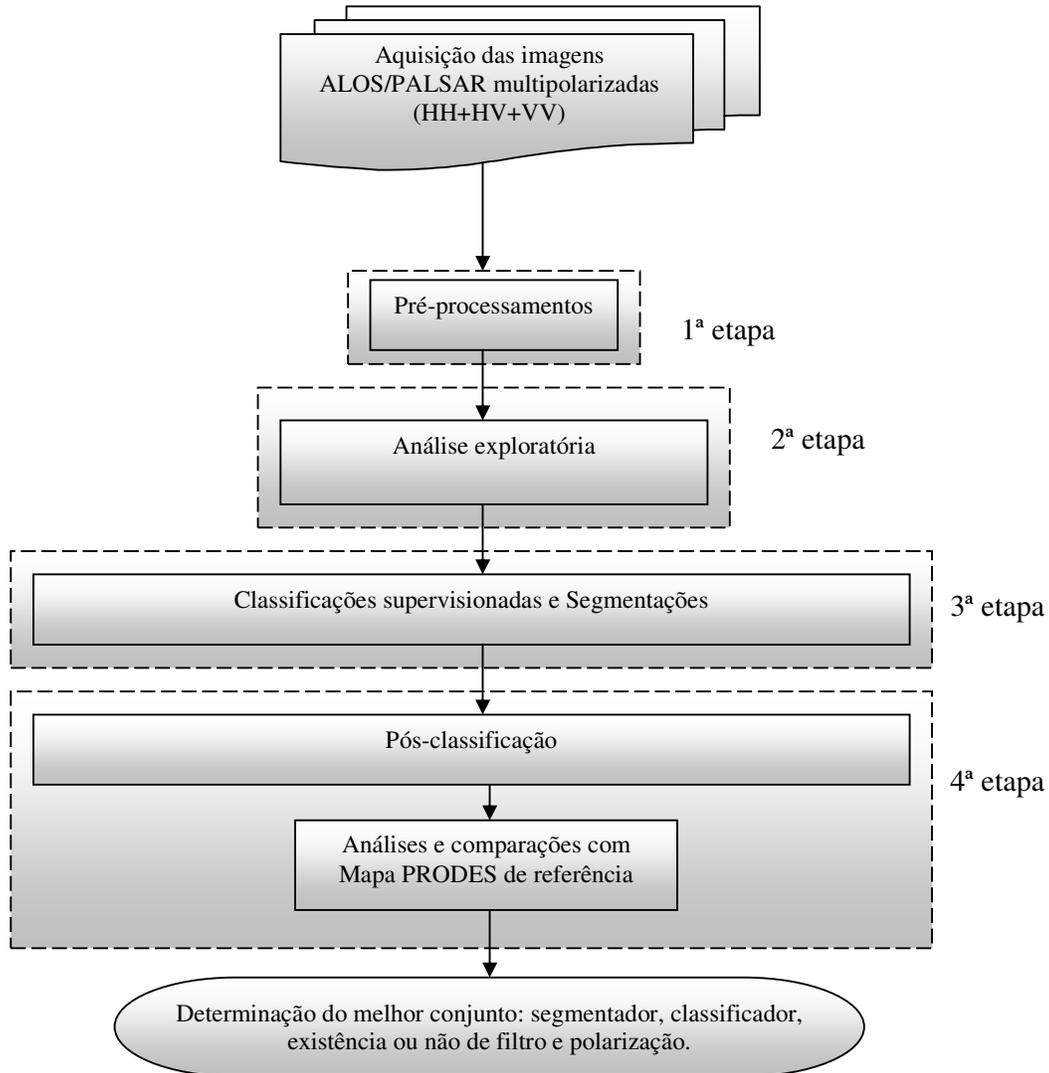


FIGURA 3.8 – Fluxograma da metodologia geral do trabalho

3.4.1 Pré-processamentos

A primeira etapa da metodologia versou nos pré-processamentos da imagem ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006. Entre os pré-processamentos realizados

estão: recorte da área de estudo, média dos *pixels* ao longo do azimute para um dado range (com a finalidade de verificar a calibração do padrão de antena), conversão dos dados de amplitude para intensidade, reamostragem por média, registro, filtragem *Gamma* 5x5, conversão dos dados de intensidade para amplitude e geração de Máscaras de Desflorestamento acumulado para posterior classificação.

A figura 3.9 apresenta a seqüência de procedimentos realizados nesta etapa da metodologia.

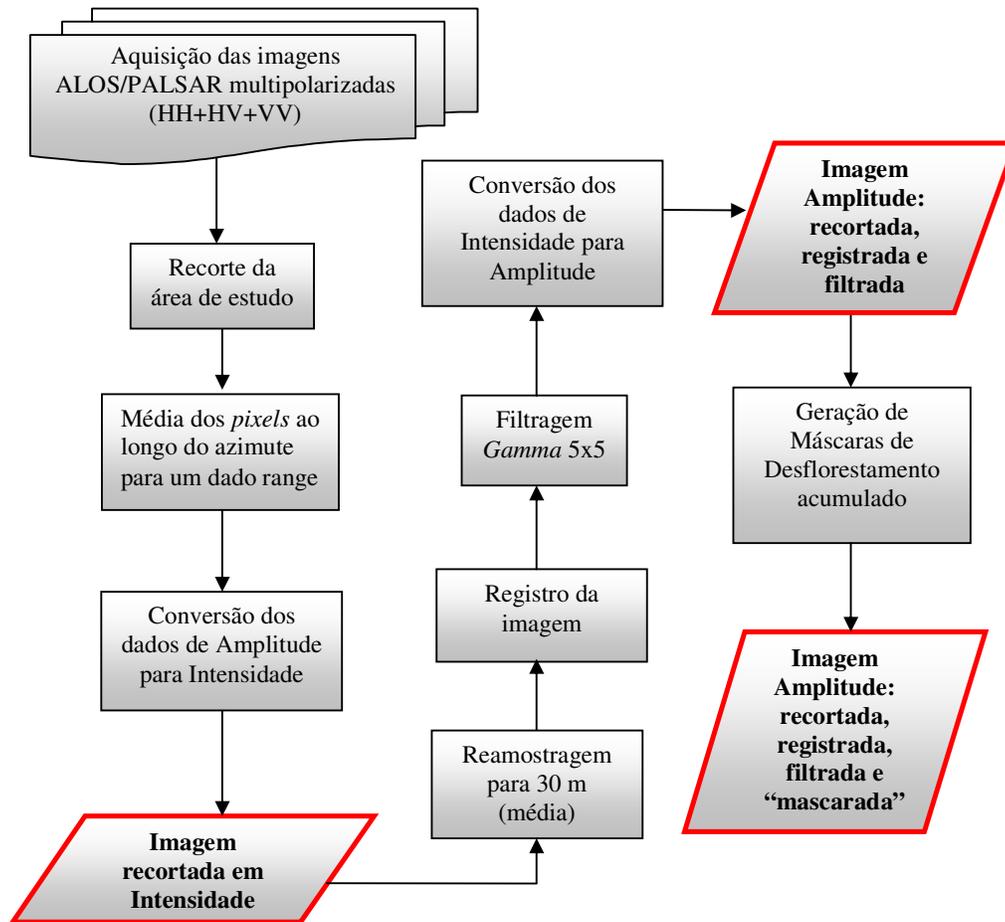


FIGURA 3.9 – Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados no Pré-processamento dos dados ALOS/PALSAR.

De posse das imagens ALOS/PALSAR multipolarizadas em amplitude, foi realizado o recorte da área de estudo obtendo-se uma imagem de 966 linhas por 776 colunas. O

recorte foi realizado tendo como base a maior concentração dos polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006. O passo seguinte consistiu na verificação da média dos *pixels* ao longo do azimute para um dado range, com a finalidade de constatação da calibração do padrão de antena, uma vez que a JAXA periodicamente realiza a calibração do sensor PALSAR o que torna suas imagens com baixo nível de interferência e efeitos indesejados.

O “efeito do padrão de antena” é causado pela variação do ângulo de incidência entre o *Near Range* e o *Far Range*, sendo esse aumento do ângulo proporcional ao aumento da distância entre o sensor e alvo imageado, provocando a distorção gradual na iluminação da imagem na direção de *Range*. Como um SAR orbital opera sobre uma faixa imageada com uma variação pequena entre os ângulos de incidência, a iluminação neste tipo de imagem é mais uniforme. Deste modo, esse “efeito do padrão de antena” é mais intenso em imagens aerotransportadas do que em orbitais (MORAIS, 1998).

Os gráficos da figura 3.10 apresentam a média dos *pixels* ao longo do azimute para um dado range para as diferentes componentes HH, HV e VV da imagem ALOS/PALSAR utilizada neste trabalho. Para construção dos gráficos, utilizou-se o recorte da imagem em amplitude da área de estudo. De acordo com a figura, é possível verificar que as extremidades da imagem para todas as componentes não possuem decréscimos atípicos na resposta radiométrica dos alvos, ou seja, não há variações notáveis do ângulo de incidência entre o *Near Range* e o *Far Range* e conseqüentemente não existe distorção gradual na iluminação da cena. Deste modo, baseado nos resultados apresentados por Borner et al. (2007) e Shimada et al. (2007), a imagem foi considerada adequada para este estudo.

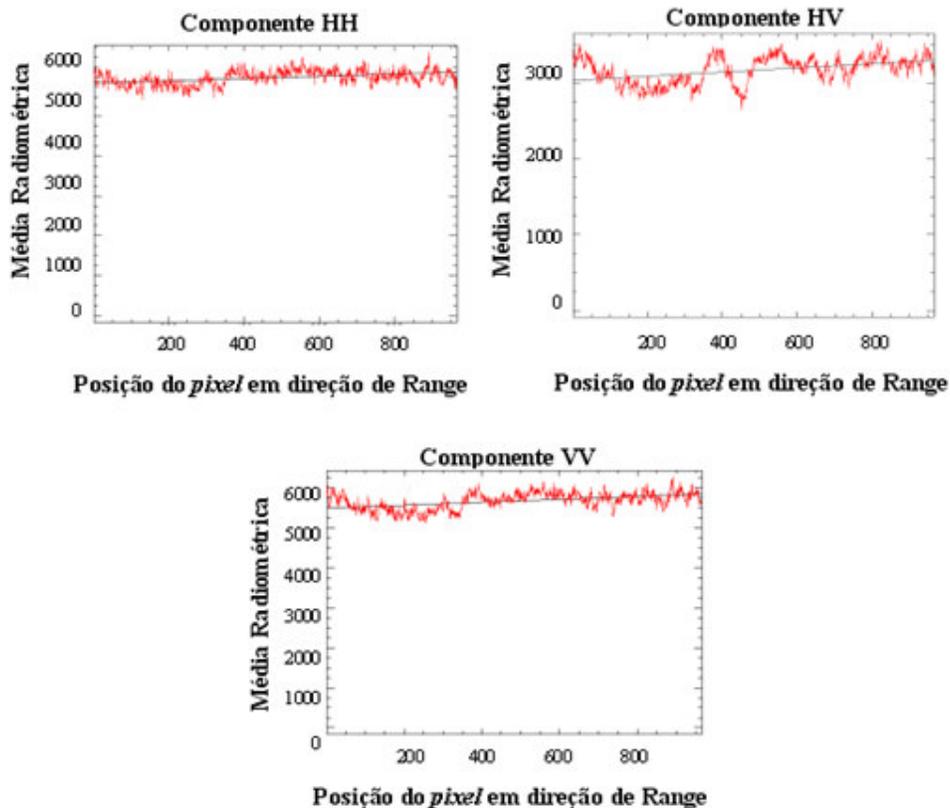


FIGURA 3.10 – Média dos *pixels* ao longo do azimuth para um dado range.

Na fase seguinte, para que a reamostragem dos dados para 30m fosse realizada, os dados ALOS/PALSAR multipolarizados foram anteriormente convertidos de amplitude para intensidade (intensidade = amplitude²), uma vez que os dados *multilooks* devem ser gerados a partir da imagem em intensidade.

A reamostragem para 30m foi efetuada a partir da aplicação de média nas direções de alcance e azimuth. A reamostragem por média teve por intuito além da redução do ruído *speckle* (OLIVER e QUEGAN, 1998), garantir a compatibilidade entre as imagens Landsat-5 TM (espaçamento entre *pixel* de 30m x 30m) utilizadas como referência no mapa PRODES e as imagens ALOS/PALSAR (espaçamento entre *pixel* de 12m x 12m). Deste modo, além de facilitar a coleta de amostras a partir do mapa produzido no projeto PRODES, a reamostragem auxiliou nas análises de concordância entre este mapa e os dados temáticos resultantes das classificações, além de reduzir o tempo computacional na segmentação.

Conforme ilustrado na figura 3.11, realizou-se a análise do mapa altimétrico obtido mediante dados SRTM (*Shutter RADAR Topographic Mission*) disponibilizados através do projeto TOPODATA (desenvolvido pelo INPE) e USGS (*U. S. Geological Survey*). Mediante análise, decidiu-se pelo registro da imagem ao invés de ortorretificação, pois devido às características topográficas da área de estudo não se faz necessário a geocodificação dos dados como forma de correção geométrica com o intuito de minimizar as distorções impostas pela geometria de visada lateral.

Após a reamostragem, os dados ALOS/PALSAR foram registrados com base na imagem Landsat-5 TM de 09 de Novembro de 2006, a partir da qual foram obtidos 50 GCP's (*Ground Control Points*) obtendo um erro quadrático médio em *pixels* de 0.32. A imagem SAR foi registrada pelo método polinomial através do polinômio de 1º grau utilizando o interpolador Vizinheiro mais Próximo para reamostragem das imagens.

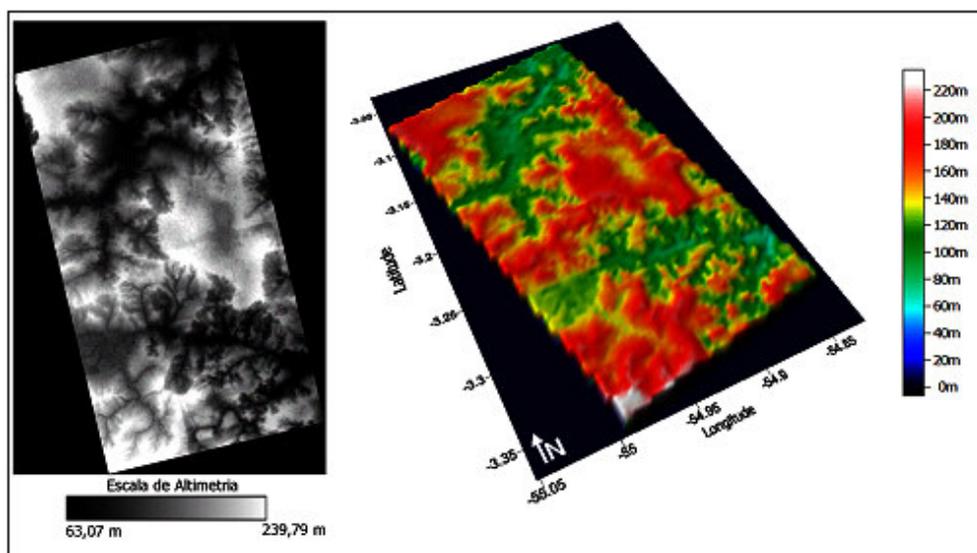


FIGURA 3.11 – Mapa Altimétrico da área de estudo.

A figura 3.12 ilustra a imagem em intensidade ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 com as componentes reamostradas e registradas.

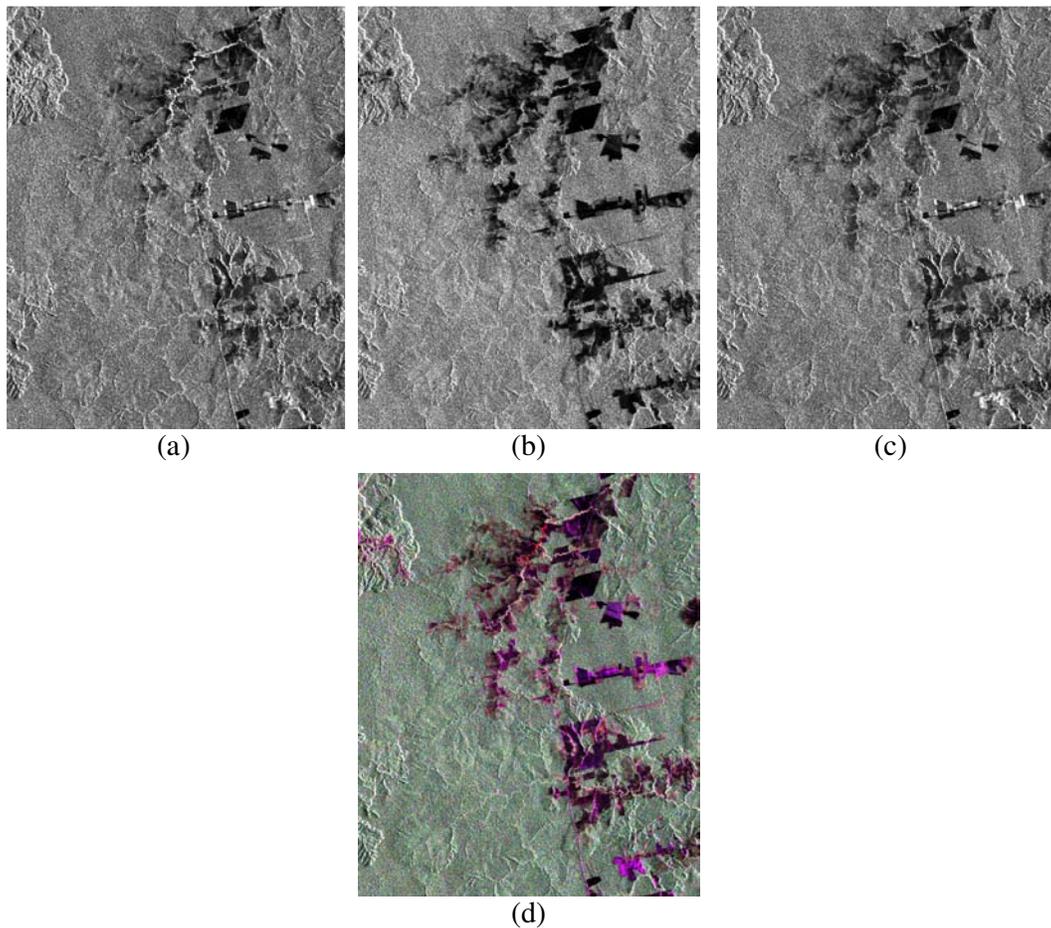


FIGURA 3.12 – Dados ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 em intensidade, reamostrados e registrados: (a) Componente HH; (b) Componente HV; (c) Componente VV e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV).

Após o registro da imagem, com base em testes de classificação e inspeções visuais decidiu-se aplicar o filtro adaptativo *Gamma* 5x5 com o intuito de comparar o resultado da classificação e obter uma melhoria na redução do ruído *speckle*, embora a reamostragem por média já tivesse sido realizada.

Na fase seguinte, os dados foram convertidos de intensidade para amplitude (amplitude = $\sqrt{\text{intensidade}}$) e utilizados nas classificações.

A figura 3.13 ilustra a imagem em amplitude ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 após a filtragem *Gamma* 5x5 e conversão dos dados para amplitude.

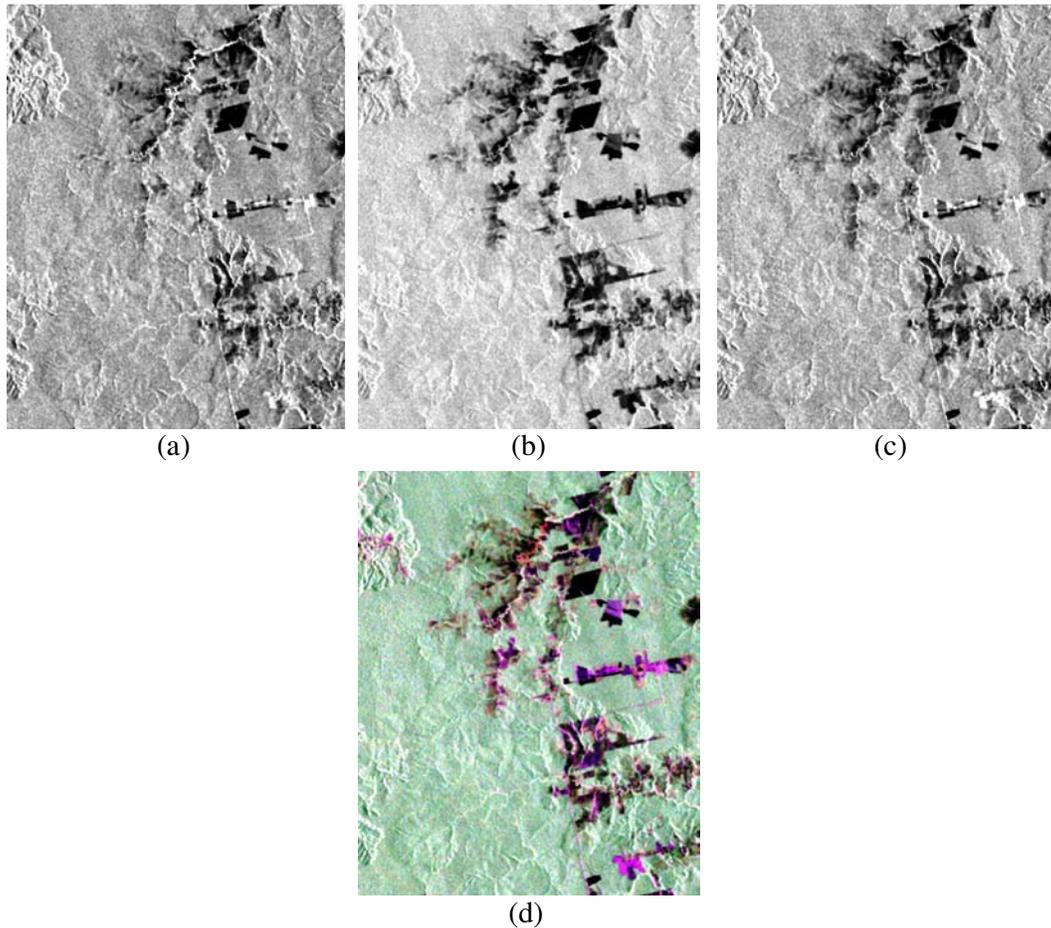


FIGURA 3.13 – Recorte da área de estudo: Dados ALOS/PALSAR de 21 de Outubro de 2006 em amplitude, reamostrados, registrados e filtrados com filtro *Gamma* 5x5: (a) Componente HH filtrada; (b) Componente HV filtrada; (c) Componente VV filtrada e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV) filtrada.

Devido ao processo de reamostragem por média e filtragem *Gamma* 5x5, a distribuição estatística da imagem original foi alterada devido à transformação nos níveis de cinza da imagem. Assim, o número equivalente de *looks* das imagens reamostradas e filtradas passou a ser alto (acima de 10) fazendo com que a distribuição fosse normalizada (FRERY, 1993). A verificação da normalidade dos dados é discutida com mais detalhes na seção 4.1.

O passo seguinte consistiu na elaboração da máscara de desflorestamento composta pelas classes “desflorestamento acumulado” e “resíduo”, obtido mediante arquivo

shapefile disponibilizado pelo PRODES, com o intuito de “mascarar” no processamento de classificação e segmentação as áreas desmatadas anteriormente.

A figura 3.14 (a) mostra a máscara de desflorestamento acumulado e resíduo, onde a tonalidade branca representa as áreas classificadas e a coloração preta as áreas já desmatadas que não foram levadas em consideração no processo de classificação e segmentação. A figura 3.14 (b) ilustra a máscara (a) sobre a imagem ALOS/PALSAR em amplitude a ser classificada e segmentada.

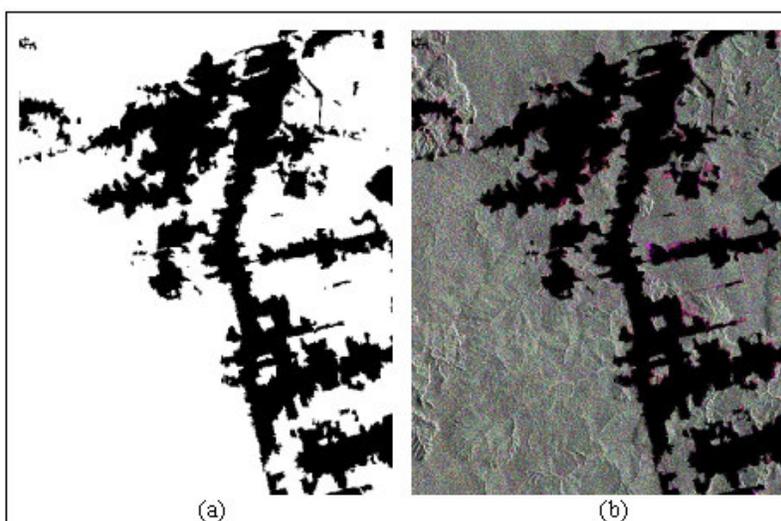


FIGURA 3.14 – (a) Máscara de desflorestamento acumulado e resíduo; (b) Máscara (a) sobre a imagem ALOS/PALSAR em amplitude a ser classificada e segmentada.

3.4.2 Análise Exploratória dos dados ALOS/PALSAR

Com o objetivo de caracterizar o comportamento das classes floresta e incremento de desflorestamento, realizou-se a análise exploratória dos dados.

A figura 3.15 apresenta o fluxograma com a seqüência de procedimentos realizados nesta etapa do trabalho.

Primeiramente, realizou-se a conversão da imagem em amplitude para valores de σ^0 , e deste modo os valores de retroespalhamento foram convertidos para dB.

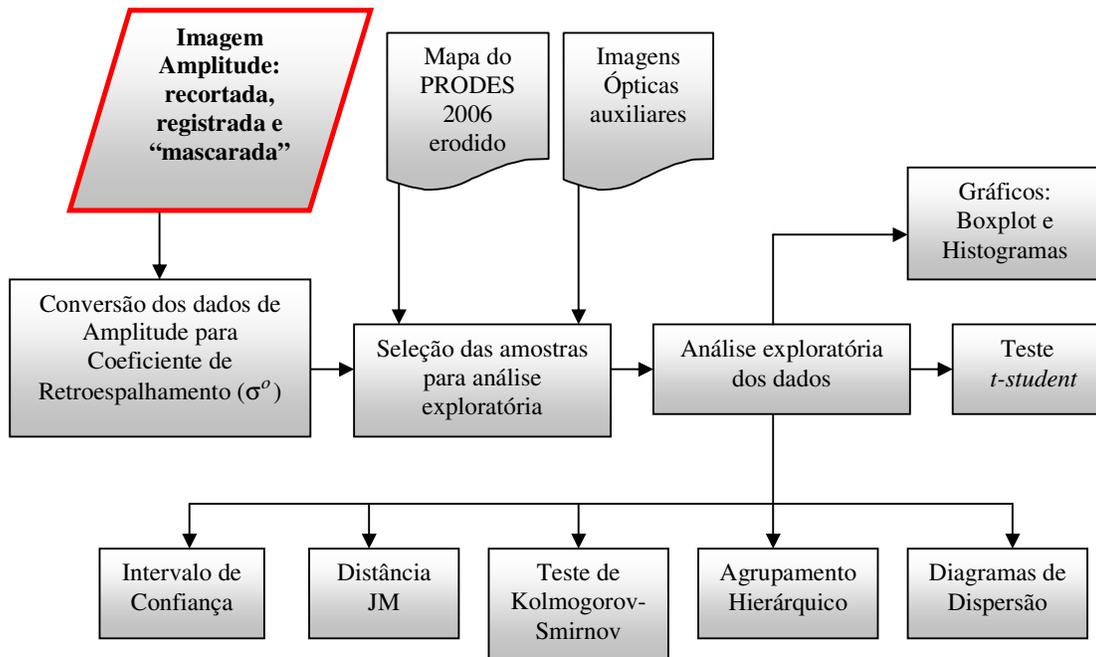


FIGURA 3.15 – Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para a análise exploratória dos dados.

De acordo com Rosenqvist (2007), para os produtos ALOS/PALSAR com nível de processamento 1.5 a conversão da imagem em amplitude para coeficiente de retroespalhamento (σ^o) é dada pela equação:

$$\sigma^o = 10 * \log_{10}[A^2] + CF, \quad (3.1)$$

onde A representa a imagem em amplitude e CF é uma constante de calibração definida por -83.0 dB.

A figura 3.16 ilustra as imagens ALOS/PALSAR convertidas para valores de retroespalhamento (dB).

A partir das imagens ópticas auxiliares e do mapa produzido a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006, foram obtidas as amostras de floresta e incremento de desflorestamento utilizadas na análise exploratória e classificação. Para evitar a amostragem de *pixels* próximos às bordas das classes, regiões onde podem existir erros de omissão e inclusão na classificação, devido ao deslocamento entre o mapa PRODES de referência e as imagens ALOS/PALSAR utilizadas na classificação

(conforme será ilustrado na seção 3.4.4), o mapa do projeto PRODES foi submetido à aplicação de filtros morfológicos de erosão. As dimensões das janelas dos filtros foram definidas com base na interpretação visual do mapa do PRODES sobreposto às imagens Landsat TM e a imagem ALOS/PALSAR.

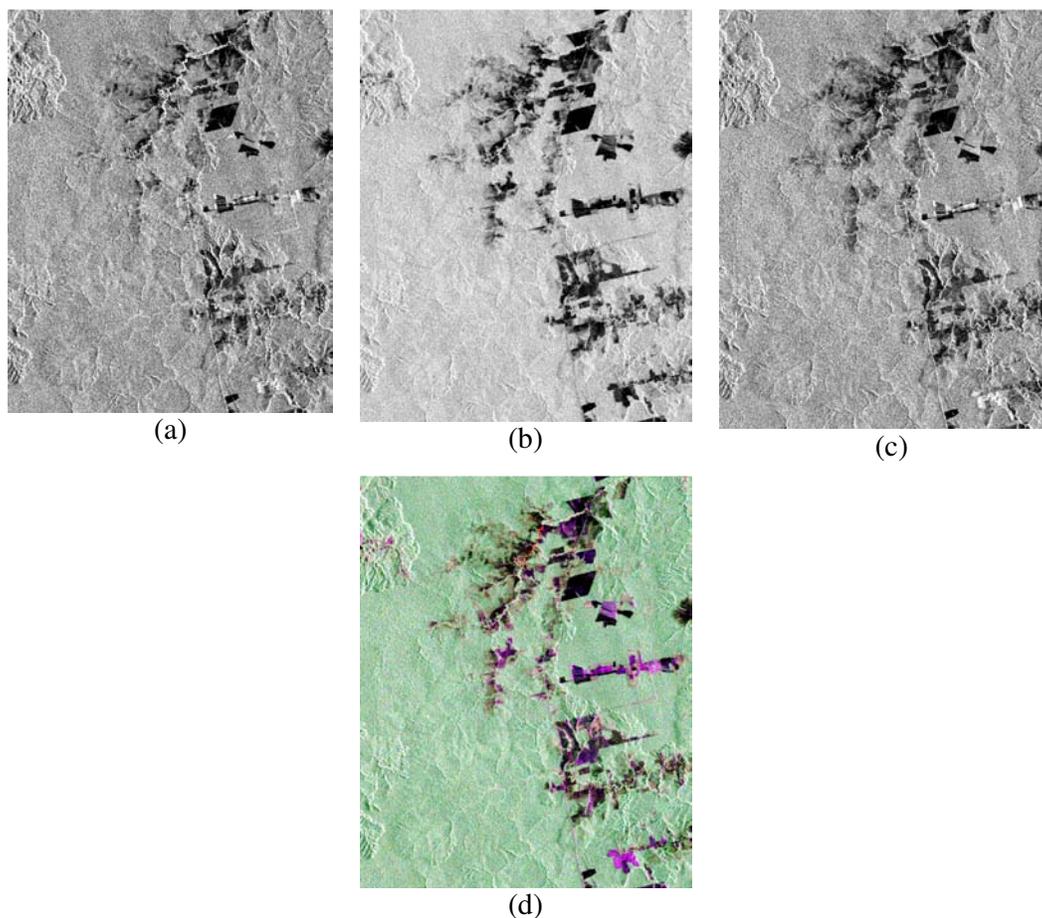


FIGURA 3.16 – Dados ALOS/PALSAR convertidos para valores de retroespalhamento (dB) (a) Componente HH em dB; (b) Componente HV em dB; (c) Componente VV em dB e (d) Composição R(HH)G(HV)B(VV).

Originalmente, a classe incremento de desflorestamento possuía um total de 2462 *pixels* distribuídos em 14 polígonos e a classe floresta um total de 544061 *pixels* distribuídos em 483 polígonos. À classe incremento de desflorestamento aplicou-se um filtro de erosão com dimensão 3x3, e, à classe floresta um filtro com dimensão 5x5. A aplicação do filtro de erosão eliminou 1179 *pixels* da classe incremento de desflorestamento (47,88% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento original) e 53622 *pixels* da

classe floresta (9,85% da classe de floresta original). Deste modo, da classe incremento de desflorestamento restou um total de 1283 *pixels* (52,12% da classe incremento de desflorestamento original) e da classe floresta um total de 490439 *pixels* (91,02% da classe de floresta original).

Na tabela 3.3 encontram-se informações sobre as amostras de floresta e incremento de desflorestamento utilizadas na análise exploratória e classificação. Com o auxílio do mapa erodido do PRODES 2006 e das imagens ópticas auxiliares, foram obtidas as amostras de floresta. Para a seleção de amostras da classe incremento de desflorestamento, foram realizadas amostragens de forma automática em cada um dos polígonos de incremento do mapa de referência erodido, para que a seleção não fosse tendenciosa. Deste modo, nem todos os polígonos de incremento disponibilizados pelo PRODES foram utilizados como amostra. Os 14 polígonos originalmente disponibilizados foram fragmentados de forma automática em porções menores gerando 20 polígonos, dos quais utilizou-se 13 levando em consideração a máxima distância visual entre eles (FIGURA 3.17), totalizando 1131 *pixels* (equivalente a 88,15% da quantidade de *pixels* da classe erodida).

TABELA 3.3 – Amostras obtidas a partir do mapa de desflorestamento de 2006 produzido no projeto PRODES.

Classe	Filtro de erosão		Número de amostras obtidas na análise exploratória
Floresta	5x5	Eliminação de 53622 <i>pixels</i> (9,85% da classe original), restando 490439 <i>pixels</i>	1300 <i>pixels</i> /13 polígonos
Incremento de Desflorestamento	3x3	Eliminação de 1179 <i>pixels</i> (47,88% da classe original), Restando 1283 <i>pixels</i>	1131 <i>pixels</i> /13 polígonos (88,15% do total de <i>pixels</i> da classe erodida)

Na figura 3.17 é ilustrado a imagem ALOS/PALSAR convertida para dB composição R(HH)G(HV)B(VV) com as amostras dos 13 polígonos da classe floresta (1300 *pixels*) e os 13 polígonos (1131 *pixels*) da classe incremento de desflorestamento utilizadas na

análise exploratória e classificação dos dados, os quais serão descritos mais detalhadamente da seção 4.

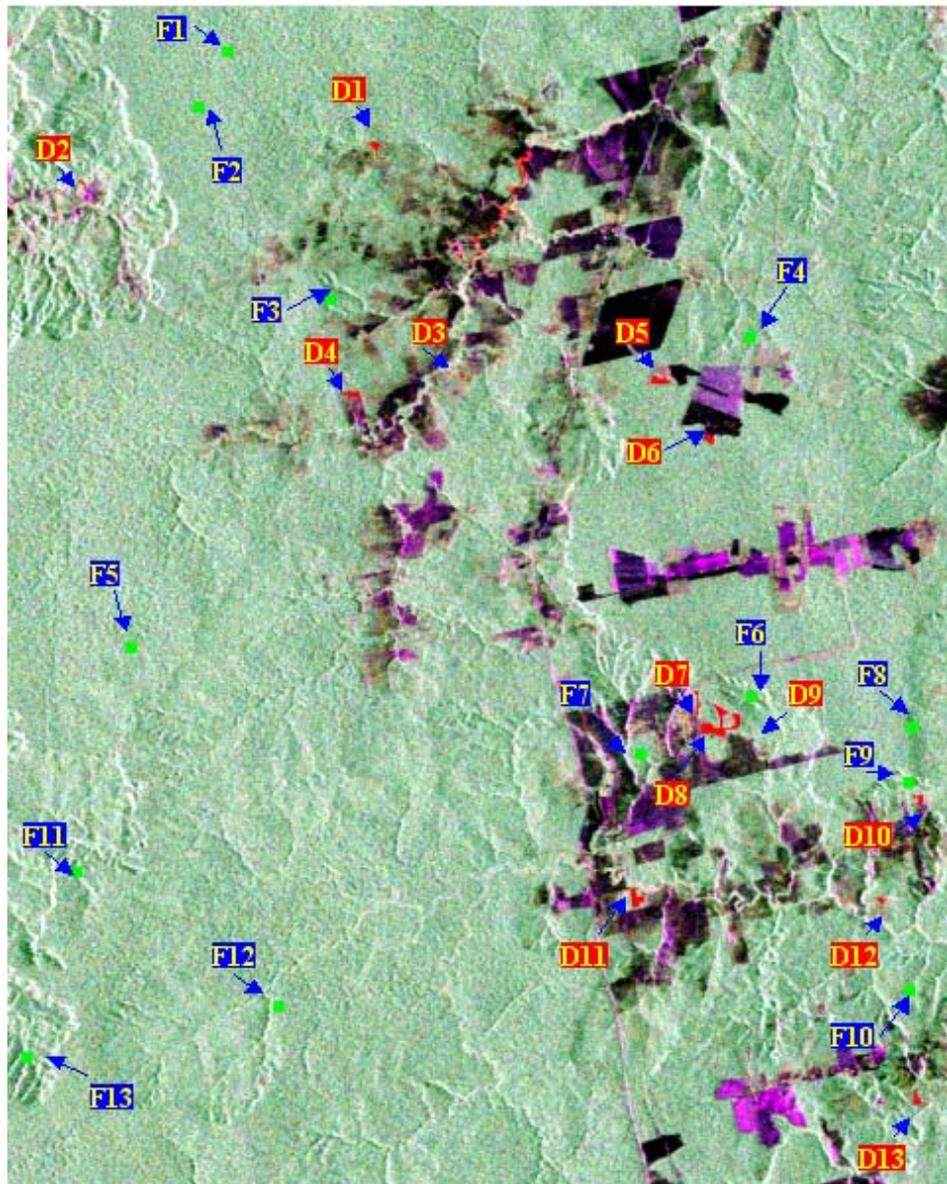


FIGURA 3.17 – Imagem ALOS/PALSAR em dB composição R(HH)G(HV)B(VV) com as 13 amostras das classes floresta (amostras na coloração verde, totalizando 1300 *pixels*) e 13 amostras da classe incremento de desflorestamento (amostras na coloração vermelho, totalizando 1131 *pixels*) utilizadas na análise exploratória dos dados.

Mediante a coleta das amostras, a próxima etapa consistiu na construção de gráficos de auxílio (*Boxplot* e histogramas) para a análise preliminar do dado multipolarizado em

valores de retroespalhamento com a finalidade de investigar o comportamento da classe floresta e incremento de desflorestamento.

Como informação de análise complementar, foi aplicado o teste *t-student* (WONNACOTT e WONNACOTT, 1980) com o intuito de comparar os valores médios de retroespalhamento dos conjuntos de amostras de floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV. Além de investigar o comportamento das classes de estudo, a análise exploratória consistiu também em constatar a separabilidade entre as classes com base na distância estatística JM e do Intervalo de Confiança. A distância JM foi calculada a partir dos valores médios e desvios-padrão dos coeficientes de retroespalhamento das classes e o cálculo do Intervalo de Confiança foi realizado para valores médios de retroespalhamento das classes de estudo.

Como análise integrante e com o intuito de prever o comportamento da classe incremento de desflorestamento, realizou-se o teste de Komolgorov-Smirnov e a análise de agrupamento hierárquico (HAIR JR. et al., 1998; LANDIM, 2000). O teste de Komolgorov-Smirnov foi aplicado para verificar a provável distribuição gaussiana do dado. Já a análise de agrupamento, foi realizada com a finalidade de inferir informações em relação a provável heterogeneidade da classe incremento de desflorestamento devido as diferentes classes de uso da terra existentes dentro desta classe, o que poderia implicar na menor acurácia da classificação devido aos erros de omissão e inclusão. Deste modo, o agrupamento foi realizado com o objetivo de particionar o conjunto de dados em grupos relativamente homogêneos, porém, com grande variação entre os grupos de incremento de desflorestamento. Esta técnica tem por base o cálculo de uma matriz de coeficientes de similaridade entre os dados, os quais podem ser medidas de correlação, distância ou medidas de associação (HAIR JUNIOR et al., 1998). Assim, os valores médios de σ^0 dos polígonos erodidos de incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV foram utilizadas como variáveis de entrada e o agrupamento pareado proporcionalmente ponderado (weighted pair-group method, WPGM) foi o método utilizado para formar os grupos. Neste método, a distância entre dois grupos é calculada como a distância média entre todos os pares de objetos constantes no grupo e o número de componentes é utilizado como peso. Como coeficiente de similaridade

utilizou-se a distância métrica de Chebychev, a qual adota como medida a máxima distância entre dois objetos encontrada em uma das dimensões (STATISTICA, 2001).

Por fim, construiu-se diagramas de dispersão para os pares de polarizações das classes floresta e incremento de desflorestamento com o intuito de presumir a combinação de canais em que ocorre uma melhor separabilidade entre as classes.

3.4.3 Classificações supervisionadas e Segmentações dos dados ALOS/PALSAR

Nesta etapa foram realizadas todas as classificações e segmentações dos dados ALOS/PALSAR mediante as imagens provenientes da etapa de pré-processamento e amostras da análise exploratória dos dados.

A figura 3.18 ilustra o fluxograma com a seqüência de procedimentos realizados nesta etapa de trabalho.

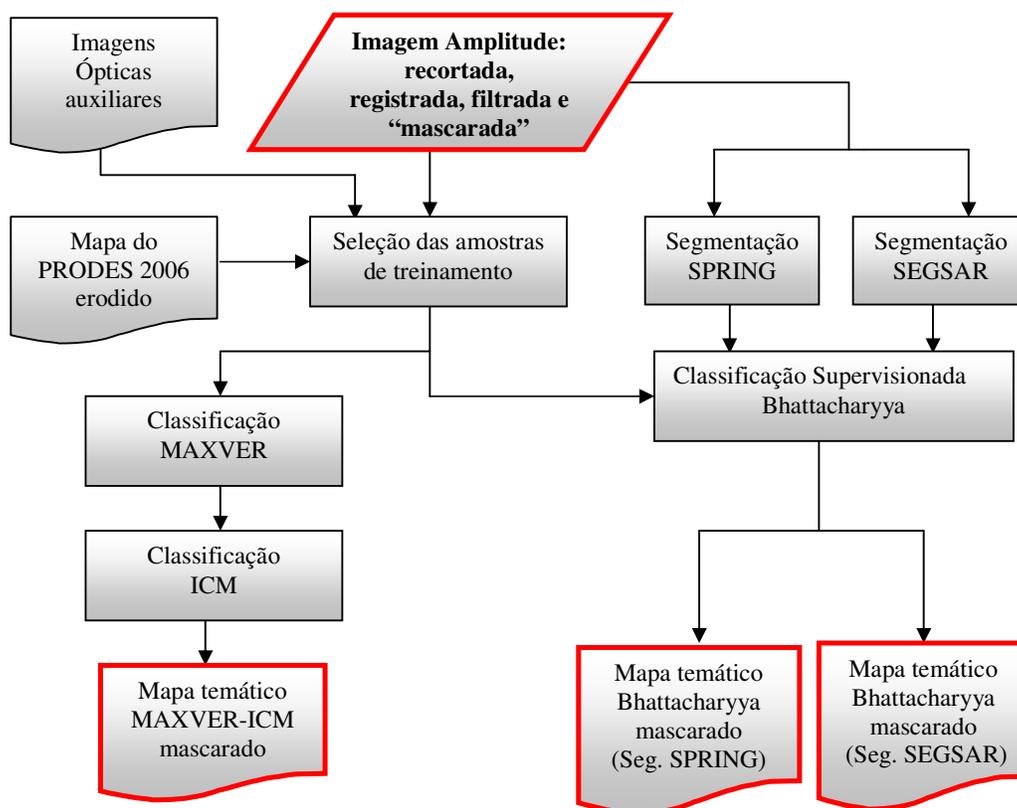


FIGURA 3.18 – Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para segmentar e classificar os dados ALOS/PALSAR.

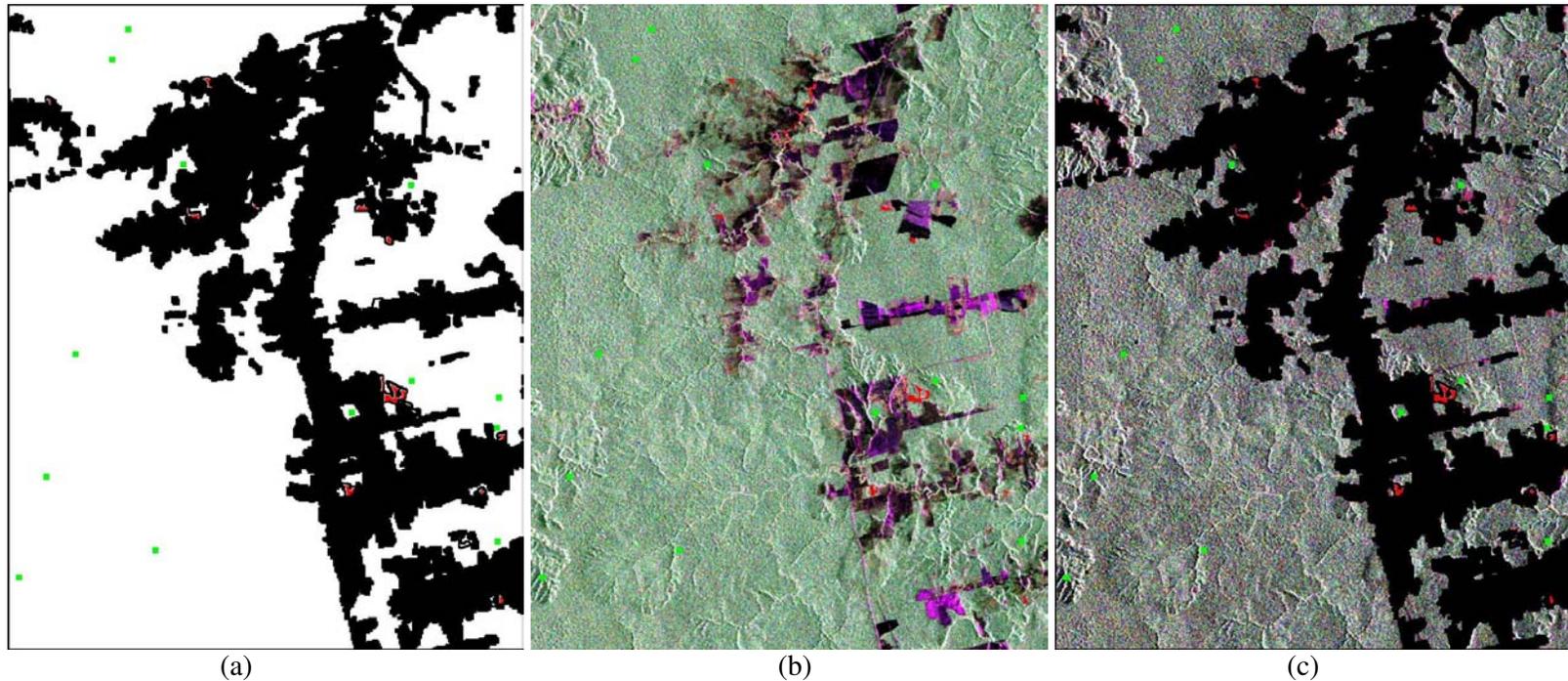
Assim como no projeto PRODES, as classes de interesse foram definidas como “incremento de desflorestamento” e “floresta”. A classe “floresta” pode incluir florestas primárias (inalteradas) e florestas perturbadas (florestas sob regime de exploração de madeira, florestas em processo de degradação progressiva, florestas afetadas por incêndios, entre outras). A classe “incremento de desflorestamento” pode incluir diferentes tipos de classes de uso do solo as quais foram desflorestadas por corte raso há no máximo um ano.

A partir da aplicação da máscara da figura 3.14 (a), obteve-se a imagem a ser classificada (FIGURA 3.14 (b)) a qual desconsiderou os desflorestamentos acumulados até 2005 (ano anterior ao ano base).

Com a finalidade de avaliar se há perda significativa de informação no mapeamento de desflorestamento com dados PALSAR quando não se utiliza todos os canais de polarização, foram testados os classificadores automáticos: estatístico com informação contextual MAXVER-ICM e classificador por regiões da Distância de Bhattacharyya.

As amostras utilizadas para treinar os classificadores foram as mesmas utilizadas na análise exploratória (FIGURA 3.17), as quais foram extraídas a partir do mapa erodido do PRODES 2006 com o auxílio das imagens Landsat-5 TM. Utilizaram-se 1131 amostras de treinamento da classe incremento de desflorestamento (distribuídas em 13 polígonos) e 1300 amostras de treinamento da classe floresta (distribuídas em 13 polígonos) como ilustrado na figura 3.19.

Através do classificador *Polarimetric SAR Classifier 0.7*, realizou-se a classificação MAXVER-ICM mediante recorte “mascarado” multipolarizado em amplitude. Primeiramente, foi realizada a classificação por máxima verossimilhança e em seguida empregou-se o algoritmo ICM utilizando um dos dois critérios de parada: 8 iterações ou 5% de mudanças. As imagens multipolarizadas em amplitude foram classificadas individualmente (HH, HV, VV) com o ajuste de diferentes distribuições associadas para cada classe (VIEIRA, 1996), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto em amplitude (HH+HV+VV) com o uso da distribuição Normal multivariada. O mesmo procedimento foi realizado para a imagem com filtro *Gamma 5x5*.



(a) Máscara de desflorestamento acumulado 2006, a tonalidade preta representa os dados que serão excluídos do processamento enquanto que a cor branca representa as áreas que serão segmentadas e classificadas; (b) Imagem ALOS/PALSAR em amplitude composição R(HH)G(HV)B(VV); (c) Imagem a ser segmentada e classificada ALOS/PALSAR em amplitude composição R(HH)G(HV)B(VV) resultante da aplicação da máscara (a) na imagem (b). Nas figuras (a), (b) e (c) são ilustradas as amostras das classes floresta (1300 *pixels* em verde) e incremento de desflorestamento (1131 *pixels* em vermelho) utilizadas nas classificações supervisionadas.

Foram obtidos um total de 7 classificações para a imagem sem filtro *Gamma 5x5*, sendo uma classificação para os três canais em conjunto (HH+HV+VV), três classificações para os dois canais combinados (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e três classificações para um canal (HH, HV, VV). Do mesmo modo obteve-se 7 classificações para a imagem com filtro *Gamma 5x5*.

A Tabela 3.4 apresenta a relação das classificações MAXVER-ICM realizadas.

TABELA 3.4 – Classificações MAXVER-ICM realizadas.

Polarização utilizada na classificação	Imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i>
HH	Não
HV	Não
VV	Não
HH+HV	Não
HV+VV	Não
HH+VV	Não
HH+HV+VV	Não
HH	Sim
HV	Sim
VV	Sim
HH+HV	Sim
HV+VV	Sim
HH+VV	Sim
HH+HV+VV	Sim

Através do software SPRING realizou-se a classificação por regiões da Distância de Bhattacharyya, mediante recorte “mascarado” multipolarizado em amplitude. Como o classificador Bhattacharyya necessita de uma imagem segmentada conforme citado na seção 2.5.4, foram testados os segmentadores SEGSAR e segmentação do SPRING.

Na segmentação realizada no SEGSAR para a imagem sem filtro, utilizou-se os seguintes parâmetros: nível de compressão da imagem igual a 5, modelo de representação dos dados como mancha (*cartoon*), similaridade de 1decibel (dB), área mínima de 60 *pixels*, número equivalente de *looks* igual a 10, nível de confiança de 95% e formato da imagem em amplitude. Para a segmentação na imagem com filtro *Gamma 5x5*, o número equivalente de *looks* utilizado foi de 23. Os limiares foram estipulados

com base em diversos testes almejando encontrar os valores que visualmente melhor se adequassem a segmentação das diferentes feições da imagem, bem como o cuidado de se levar em consideração um mapeamento de área mínima mapeada de áreas desflorestadas através do ALOS/PALSAR que fosse inferior ao de 6,25 ha mapeada pelo PRODES. Deste modo, como a imagem foi reamostrada por média para a mesma resolução da Landsat TM (30m x 30m) utilizada no PRODES, para o limiar estipulado de 60 *pixels* de área mínima, foi possível um mapeamento através do ALOS/PALSAR de áreas não inferiores a 5,4 ha, equivalente a uma área mínima de 0,054 Km² (ou 54000 m²).

Para a segmentação por crescimento de regiões realizada no SPRING, utilizou-se os limiares de 9 níveis de cinza para a similaridade e 60 para a área mínima em *pixels*. O limiar de similaridade 9 foi escolhido por ser o que visualmente melhor se aproximou da segmentação realizada no SEGSAR para similaridade de 1dB.

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) realizou-se uma segmentação, resultando em um total de 14 segmentações na imagem sem filtro (7 segmentações pelo SPRING e 7 segmentações pelo SEGSAR) e 14 segmentações na imagem com filtro *Gamma 5x5*.

As imagens foram classificadas individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV), o mesmo ocorrendo para a imagem com filtro *Gamma 5x5*, produzindo um total de 14 classificações para a imagem sem filtro (7 devido à segmentação pelo SPRING e 7 devido à segmentação pelo SEGSAR) e 14 classificações para a imagem com filtragem *Gamma 5x5*.

A Tabela 3.5 apresenta a relação das classificações realizadas pela Distância de Bhattacharyya.

TABELA 3.5 – Classificações pela Distância de Bhattacharyya realizadas

Polarização utilizada na classificação	Tipo de Segmentação	Imagem com filtro <i>Gamma 5x5</i>
HH	SPRING	Não
HV	SPRING	Não
VV	SPRING	Não
HH+HV	SPRING	Não
HV+VV	SPRING	Não
HH+VV	SPRING	Não
HH+HV+VV	SPRING	Não
HH	SEGSAR	Não
HV	SEGSAR	Não
VV	SEGSAR	Não
HH+HV	SEGSAR	Não
HV+VV	SEGSAR	Não
HH+VV	SEGSAR	Não
HH+HV+VV	SEGSAR	Não
HH	SPRING	Sim
HV	SPRING	Sim
VV	SPRING	Sim
HH+HV	SPRING	Sim
HV+VV	SPRING	Sim
HH+VV	SPRING	Sim
HH+HV+VV	SPRING	Sim
HH	SEGSAR	Sim
HV	SEGSAR	Sim
VV	SEGSAR	Sim
HH+HV	SEGSAR	Sim
HV+VV	SEGSAR	Sim
HH+VV	SEGSAR	Sim
HH+HV+VV	SEGSAR	Sim

3.4.4 Pós-classificação: Análises e comparações com Mapa PRODES de referência

A validação das classificações foi realizada mediante a obtenção das matrizes de confusão, utilizando-se como referência o mapa de desflorestamento produzido pelo PRODES referente ao ano de 2006.

A partir das matrizes de confusão, realizaram-se as análises de exatidão das classificações com base no coeficiente de concordância *Kappa* de cada classificação, bem como a análise dos erros de omissão e inclusão e acurácias do produtor e do usuário. Os testes de hipótese unilaterais, usando como parâmetro a estatística *z*

derivada dos estimadores dos coeficientes *Kappa*, foram utilizados para verificar a igualdade entre classificações ao nível de significância de 5%.

A figura 3.20 apresenta a seqüência de procedimentos realizados nesta etapa do trabalho, consistindo nas validações, análises e comparações dos resultados.

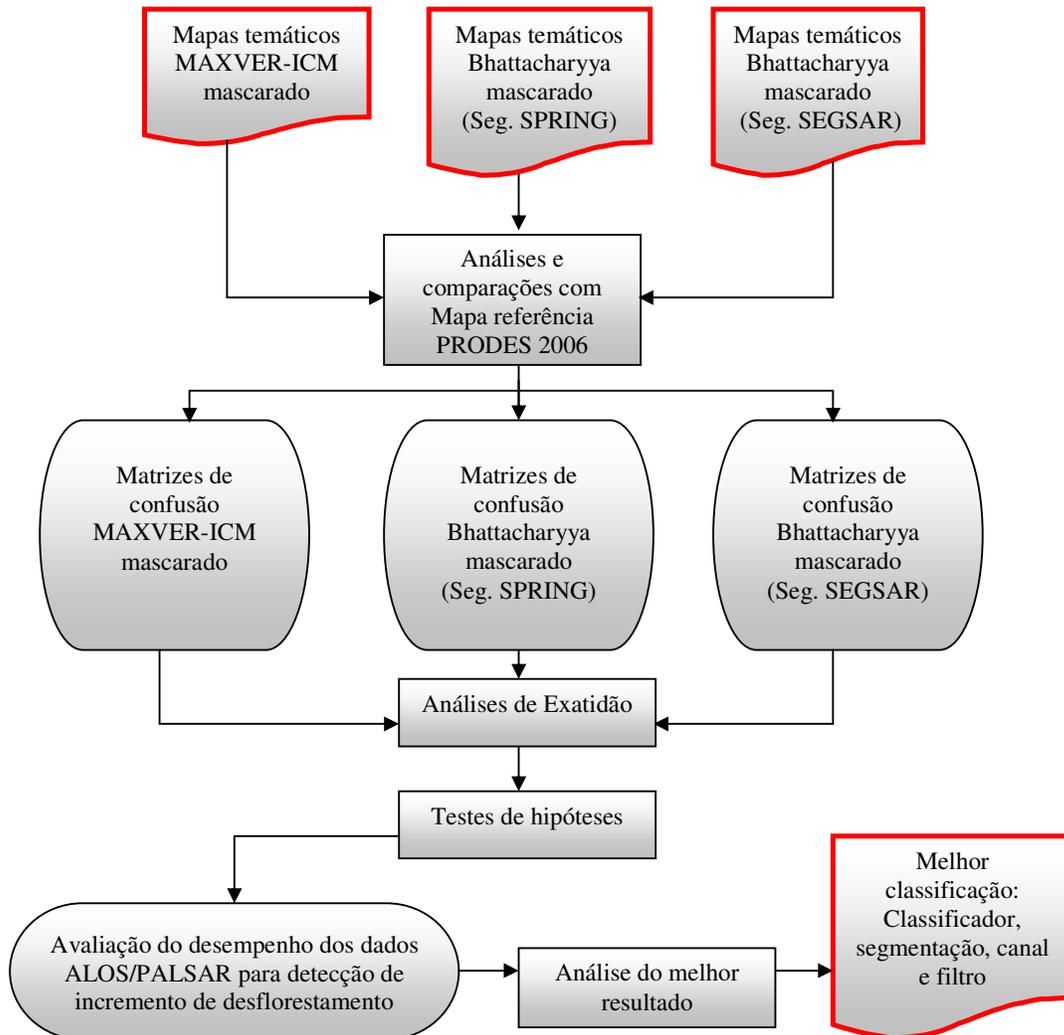


FIGURA 3.20 – Fluxograma da seqüência de procedimentos realizados para analisar, validar e comparar os resultados.

A validação dos resultados das classificações foi realizada a partir da análise de concordância com o mapa de referência do PRODES 2006. Este mapa temático foi previamente submetido à aplicação do filtro morfológico de erosão com o intuito de evitar a amostragem de *pixels* próximos às bordas das classes, regiões onde podem

existir erros de classificação, minimizando assim as discordâncias entre as bordas das classes do mapa original do PRODES e os limites de feições identificadas nas imagens sintéticas Landsat-5 TM e nas imagens ALOS/PALSAR.

Os erros próximos às bordas estão relacionados ao deslocamento entre o mapa PRODES de referência e as imagens ALOS/PALSAR utilizadas na classificação. Em geral, o problema do deslocamento pode ser devido aos erros de aquisição de GCP's acarretando distorções no co-registro das imagens utilizadas no PRODES ao longo dos anos (fazendo com que o erro de registro fosse acumulativo e conseqüentemente acarretando no deslocamento dos dados), aos erros de edição dos mapas do PRODES e por fim o fato da classe “desflorestamento acumulado” dos mapas do PRODES até 2006 terem sido geradas a partir de imagens Landsat TM reamostradas para 60m o que produziu bordas pouco detalhadas em relação às bordas das feições observadas nas imagens sintéticas Landsat TM e ALOS/PALSAR.

A figura 3.21 mostra exemplos de regiões onde há discordância de *pixels* entre o mapa do PRODES e as imagens Landsat TM e ALOS/PALSAR. Tal discrepância deve-se ao deslocamento aleatório em média de dois ou três *pixels* (30m). Embora esses deslocamentos sejam admissíveis na escala de publicação de 1:250.000 do PRODES, podem ser prejudiciais em análises de concordância *pixel a pixel*, acarretando no aumento de erros de inclusão e omissão, o que justifica a aplicação de filtros de erosão.

As figuras 3.21 (a), (e) e (i) correspondem ao mapa do PRODES 2006 sobreposto aos recortes da imagem sintética Landsat TM (composição R5G4B3) de 09/11/2006 e as figuras 3.21 (b), (f) e (j) ilustram o mapa do PRODES 2006 sobre o recorte da imagem ALOS/PALSAR (composição R(HH)G(HV)B(VV)) de 21/10/2006. As figuras (c), (g) e (k) evidenciam exemplos das classificações Bhattacharyya com segmentação SPRING realizadas sobre os recortes da imagem ALOS/PALSAR, enquanto que as figuras (d), (h) e (l) mostram os resultados da classificação MAXVER-ICM realizadas no recorte.

Nas figuras 3.21 (a), (b), (e) e (f), a seta ilustra exemplos de áreas onde há discordância entre os mapas do PRODES e a imagem sintética TM e ALOS/PALSAR. É possível

evidenciar áreas desflorestadas (apontadas pela seta) que foram incorretamente classificadas como floresta no mapa do PRODES.

No exemplo de recorte (i) é possível visualizar o deslocamento dos *pixels* do polígono de incremento de desflorestamento obtido através do PRODES, fazendo com que áreas de floresta (indicadas pela seta) fossem incorretamente classificadas como incremento de desflorestamento.

As figuras 3.21 (c), (d), (g) e (h); e as figuras 3.21 (k) e (l) mostram respectivamente erros de inclusão e erros de omissão (apontados pela seta), da classe incremento de desflorestamento.

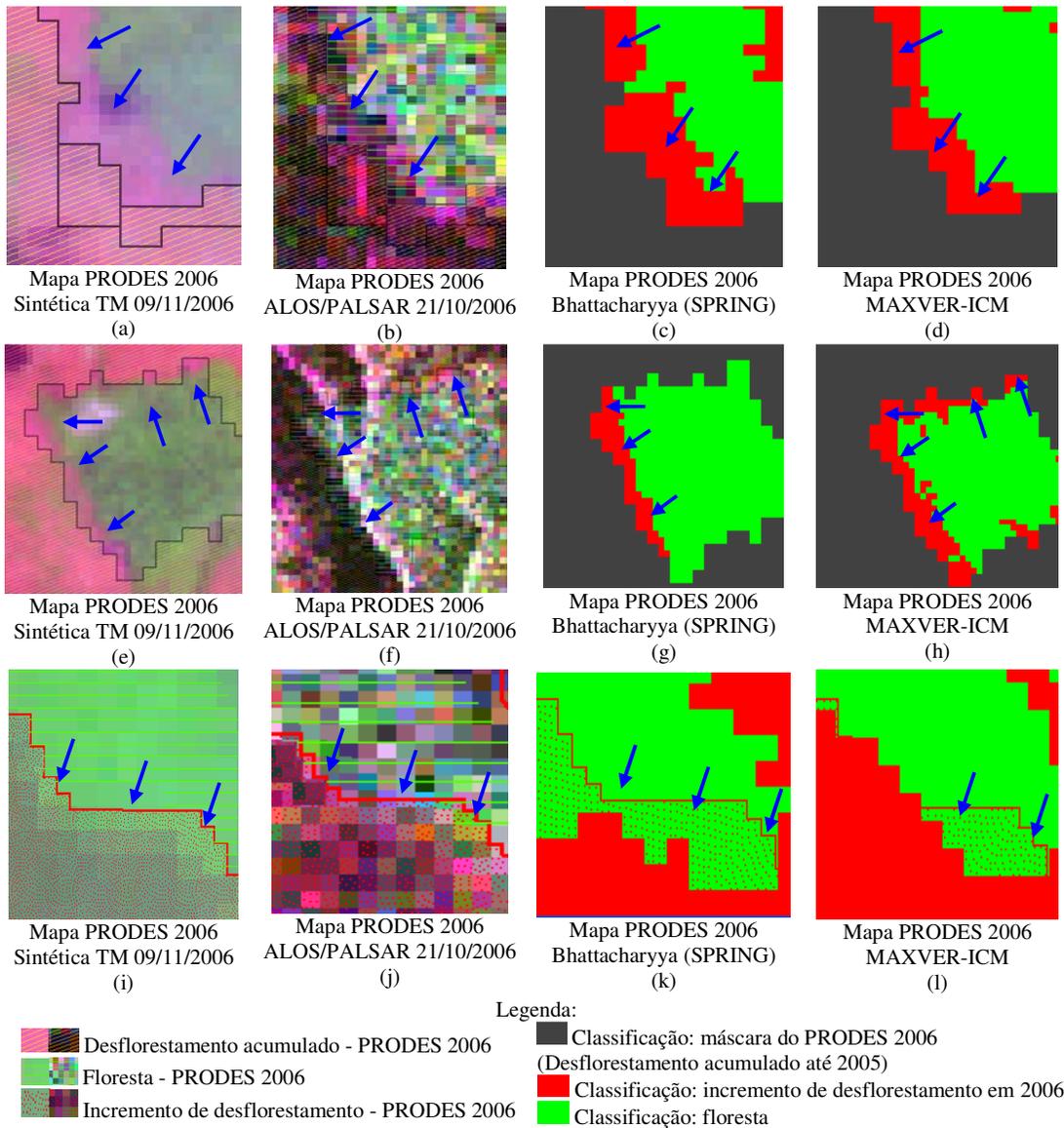


FIGURA 3.21 – Exemplos de regiões (apontadas pelas setas) onde há discordância entre os mapas do PRODES e as imagens sintéticas TM e ALOS/PALSAR.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos mediante análise exploratória realizada, bem como os resultados obtidos das classificações e segmentações juntamente com avaliações e discussões.

4.1 Resultado da análise exploratória

4.1.1 Imagem Amplitude convertida para Coeficiente de Retroespalhamento

A figura 4.1 e 4.2 ilustram os polígonos de incremento de desflorestamento (1131 *pixels*) utilizados na análise exploratória e descritos na seção 3.4.2. Na figura 4.1, são ilustrados os polígonos na imagem ALOS/PALSAR já convertida para valores de retroespalhamento (dB) e na figura 4.2 é evidenciado o polígono correspondente na imagem Landsat TM utilizada pelo PRODES 2006.

Na tabela 4.1 é apresentada a estatística descritiva para cada um dos polígonos da classe incremento, onde são apresentados os valores médios de retroespalhamento em dB e o desvio padrão do valor médio nas polarizações HH, HV e VV.

TABELA 4.1 – Estatística dos polígonos de incremento de desflorestamento (D) contendo o número de amostras presentes em cada polígono (N), as médias (\bar{D}) e desvios (σ_D) em dB dos polígonos de incremento de desflorestamento para cada polarização.

D	N	HH		HV		VV	
		\bar{D}	σ_D	\bar{D}	σ_D	\bar{D}	σ_D
1	77	-7,131	1,24	-14,115	1,386	-9,012	1,422
2	29	-5,906	1,288	-12,866	1,057	-7,831	1,373
3	38	-6,864	1,438	-14,212	1,179	-8,571	1,219
4	96	-7,533	1,308	-14,874	1,837	-8,669	1,462
5	97	-5,585	1,342	-13,789	1,369	-7,284	1,085
6	59	-10,266	2,415	-19,507	3,679	-10,557	2,173
7	62	-5,714	1,12	-12,883	1,562	-7,608	1,265
8	371	-6,539	2,598	-13,965	2,043	-7,9165	1,501
9	12	-9,863	1,075	-18,593	1,437	-11,526	1,003
10	61	-6,045	1,796	-12,938	2,331	-7,629	1,676
11	138	-7,99	1,778	-13,991	1,935	-8,852	1,865
12	36	-6,321	0,802	-13,649	1,053	-8,143	1,266
13	55	-8,307	1,098	-15,57	1,507	-10,023	1,522

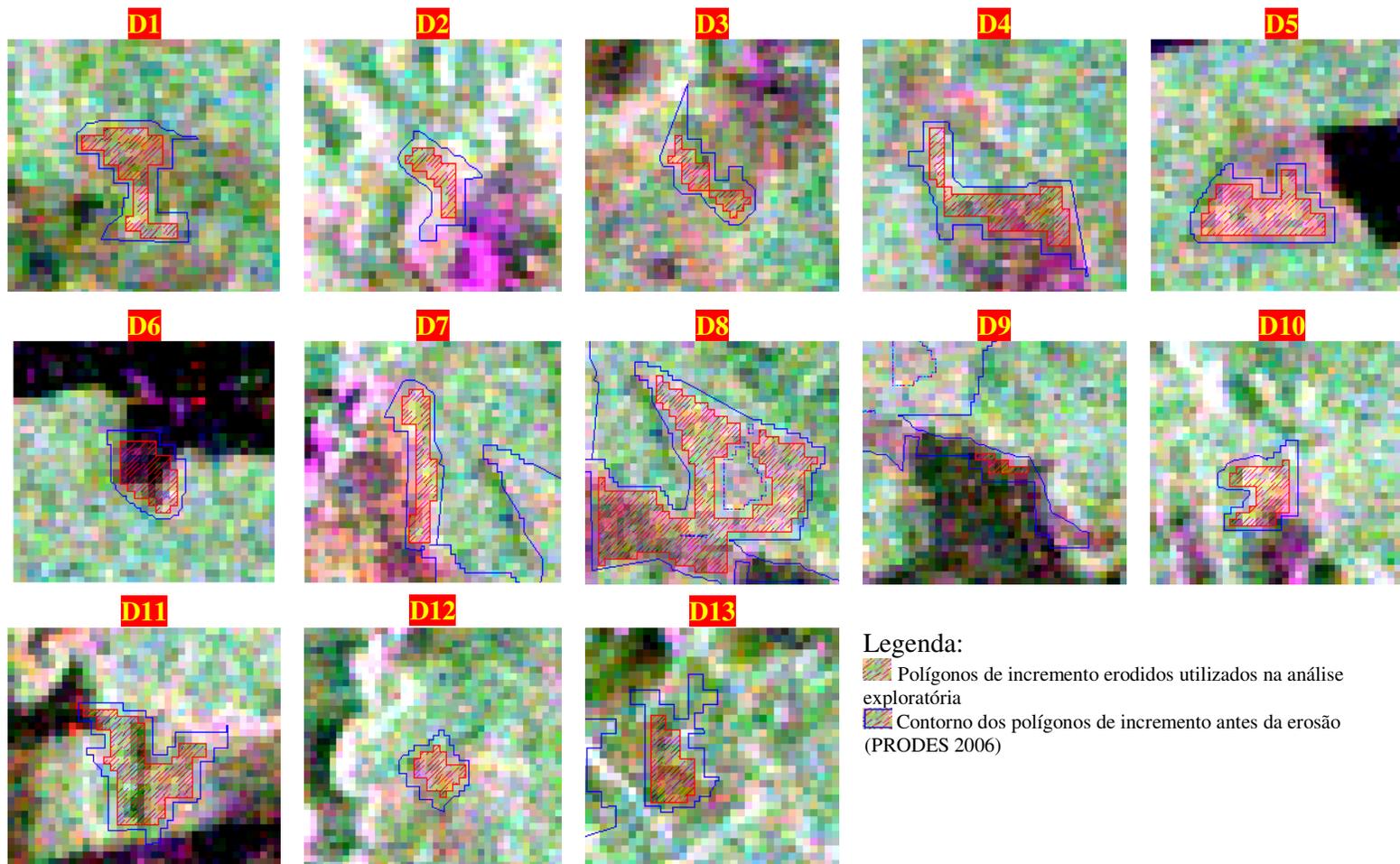


FIGURA 4.1 – Imagens ALOS/PALSAR HH(R)HV(G)VV(B) em valores de retroespalhamento (dB) com os polígonos de incremento de desflorestamento utilizados na análise exploratória.

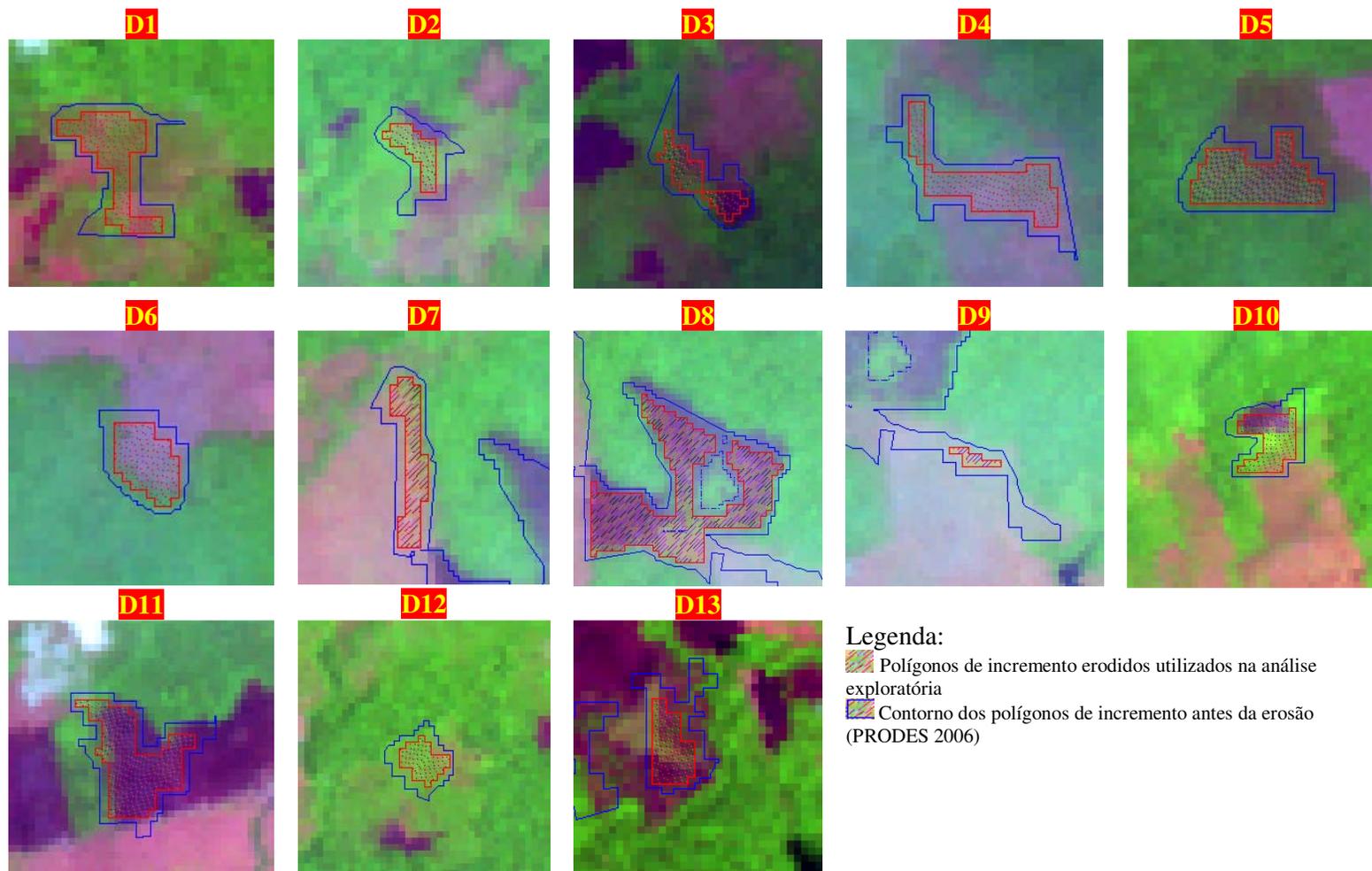


FIGURA 4.2 – Imagem Landsat TM de 09/11/2006, composição 5(R)4(G)3(B), com os polígonos de incremento de desflorestamento utilizados na análise exploratória.

Da tabela 4.1 é possível extrair que para a polarização HH, o polígono de desflorestamento D5 apresentou o maior valor médio de retroespalhamento, quando comparado com os outros polígonos, tendo comportamento similar na imagem de polarização VV. Para o canal HV, o polígono D2 apresentou o maior valor médio, valor este próximo ao dos polígonos D7 e D10. Por outro lado, tanto para a polarização HH quanto para HV, o polígono D6 apresentou os menores valores de σ^0 (área mais escura da figura 4.1). Para o canal VV, o menor valor foi encontrado para o polígono D9. Assim, na polarização HH os valores médios dos polígonos de incremento de desflorestamento variaram entre -5,585dB a -10,266dB. No canal HV, a variação foi entre -12,866dB a -19,507dB e para a polarização VV a variação ocorreu entre -7,284dB a -11,526dB. Dependendo no ângulo de visada utilizado na aquisição dos dados, pode ocorrer uma variação entre os valores de retroespalhamento encontrados através banda L.

O desvio padrão (σ_D) apresentado na tabela 4.1, é uma medida de dispersão ao redor do valor médio de retroespalhamento (\bar{D}). Assim, é possível inferir que a maior dispersão para a polarização HH ocorreu no polígono D8. Para os canais HV e VV o polígono D6 apresentou o maior valor, sendo a dispersão de HV superior ao do canal VV. Deste modo, quanto maior a variação existente poderão ocorrer erros de omissão e inclusão na região do polígono em comparação com o mapa de referência.

Como informação complementar, a figura 4.3 mostra o intervalo de confiança (I.C.) de 95% para os valores médios de retroespalhamento dos polígonos de incremento de desflorestamento. A construção do I.C. leva em consideração o erro padrão, o qual é obtido dividindo-se o desvio padrão pela raiz quadrada do tamanho da amostra. Assim, nota-se que para a polarização HH, HV e VV, os polígonos D6 e D9 apresentaram as maiores amplitudes de intervalo de confiança. Nota-se ainda que o polígono D8, apesar de possuir alta variabilidade (TABELA 4.1), possui um dos menores erros padrões (e conseqüentemente menores I.C.) de acordo com a figura 4.3, devido ao elevado número de amostras no polígono.

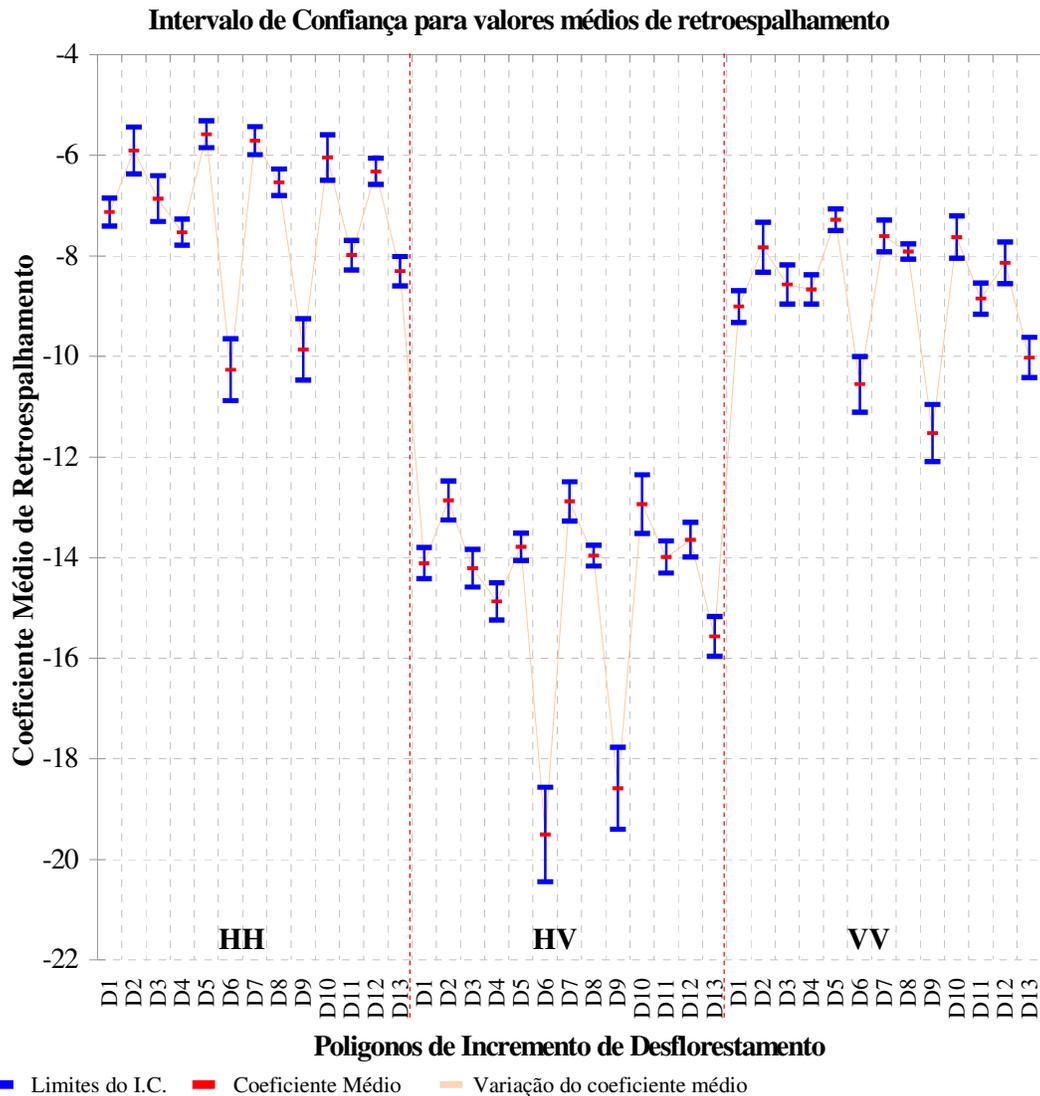


FIGURA 4.3 – Intervalo de Confiança de 95% para o coeficiente médio de retroespalhamento (dB) nas componentes HH, HV e VV da imagem ALOS/PALSAR para as amostras da classe incremento de desflorestamento. O erro padrão foi obtido dividindo-se o desvio padrão pela raiz quadrada do tamanho da amostra.

Shimabukuro et al. (2006) utilizou imagens JERS-1 para discriminar cobertura e uso do solo na região amazônica (em uma área localizada ao sul do estado de Rondônia), encontrando os valores de retroespalhamento em torno de -12,5dB e -15,5dB para a classe desflorestamento, -9dB e -13dB para áreas de savana, -6,5dB e -8,5dB para áreas de floresta e -4,5dB e -7,5dB para áreas de vegetação alagada.

Wang et al. (2009) utilizou imagens multitemporais ALOS/PALSAR para caracterizar culturas alagadas de arroz no sudeste da China, região frequentemente com nuvens e precipitação durante a época de cultivo do arroz. Para a polarização HH, os valores de retroespalhamento encontrados oscilaram entre -6dB e -11dB (próximos aos valores encontrados na tabela 4.1, onde conforme ilustrado na seção 3.1, na área de estudo as atividades agrícolas são basicamente ligadas à produção de grãos) e para o canal HV os valores variaram entre -19dB e -27dB.

Búfalo (2005) empregou imagens JERS-1 para discriminar incrementos de desflorestamento em uma área localizada no estado do Acre e outra no Mato Grosso. Os valores médios de retroespalhamento encontrados variaram entre -15,28dB para a classe desflorestamento e -6,95dB a -7,02dB para a classe floresta.

Rignot et al. (1997) utilizou dados SIR-C (polarização HH e banda L) no mapeamento de desflorestamentos e floresta secundária na região de Porto Velho no estado de Rondônia, encontrando valores médios de retroespalhamento entre -9,2dB a -10,6dB em áreas desflorestadas e em torno de -7,4dB para a classe floresta.

Na tabela 4.2 é apresentado a estatística descritiva para os polígonos da classe floresta (ilustrados na figura 3.17). São apresentados os valores médios de retroespalhamento em dB e o desvio padrão do valor médio nas polarizações HH, HV e VV. É possível extrair que para as polarizações HH, HV e VV o polígono de floresta F9 apresentou o maior valor médio de retroespalhamento quando comparado com os outros polígonos. Por outro lado, o polígono F8 apresentou o menor valor de σ^0 para os canais HH, HV e VV. Deste modo, na polarização HH os valores médios dos polígonos de floresta variaram entre -4,62 dB a -9,126 dB. No canal HV, a variação foi entre -11,425 dB a -13,983 dB e para a polarização VV a variação ocorreu entre -6,491 dB a -9,599 dB.

TABELA 4.2 – Estatística descritiva dos polígonos da classe floresta (F) contendo o número de amostras presentes em cada polígono (N), as médias (\bar{F}) e desvios (σ_F) em dB dos polígonos cada polarização.

F	N	HH		HV		VV	
		\bar{F}	σ_F	\bar{F}	σ_F	\bar{F}	σ_F
1	100	-7,432	1,372	-12,253	1,346	-7,263	1,42
2	100	-7,583	1,421	-12,474	1,208	-7,775	1,414
3	100	-6,805	3,334	-12,529	1,483	-7,852	1,373
4	100	-8,33	1,05	-13,365	1,284	-8,495	1,263
5	100	-7,203	2,749	-12,827	1,228	-8,299	1,108
6	100	-7,482	1,84	-12,672	1,654	-7,705	1,677
7	100	-7,402	1,174	-12,619	1,217	-8,07	1,344
8	100	-9,126	1,098	-13,983	1,379	-9,599	1,341
9	100	-4,62	4,758	-11,425	1,921	-6,491	2,162
10	100	-6,98	2,735	-12,499	1,258	-8,05	1,216
11	100	-7,011	2,709	-12,241	2,638	-7,326	3,046
12	100	-6,885	2,132	-12,117	1,521	-6,864	1,395
13	100	-7,862	2,805	-12,732	2,62	-7,97	2,817

Ainda de acordo com a tabela 4.2, evidencia-se que a maior dispersão para a polarização HH ocorreu no polígono F9, enquanto que para os canais HV e VV o polígono F11 apresentou o maior valor de dispersão (sendo a dispersão de VV maior que no canal HV).

A figura 4.4 mostra o intervalo de confiança (I.C.) de 95% para os valores médios de retroespalhamento dos polígonos da classe floresta. Na polarização HH o polígono F9 apresentou a maior amplitude de intervalo de confiança. Já para as polarizações HV e VV, os maiores intervalos foram encontrados nos polígonos F11 e F13.

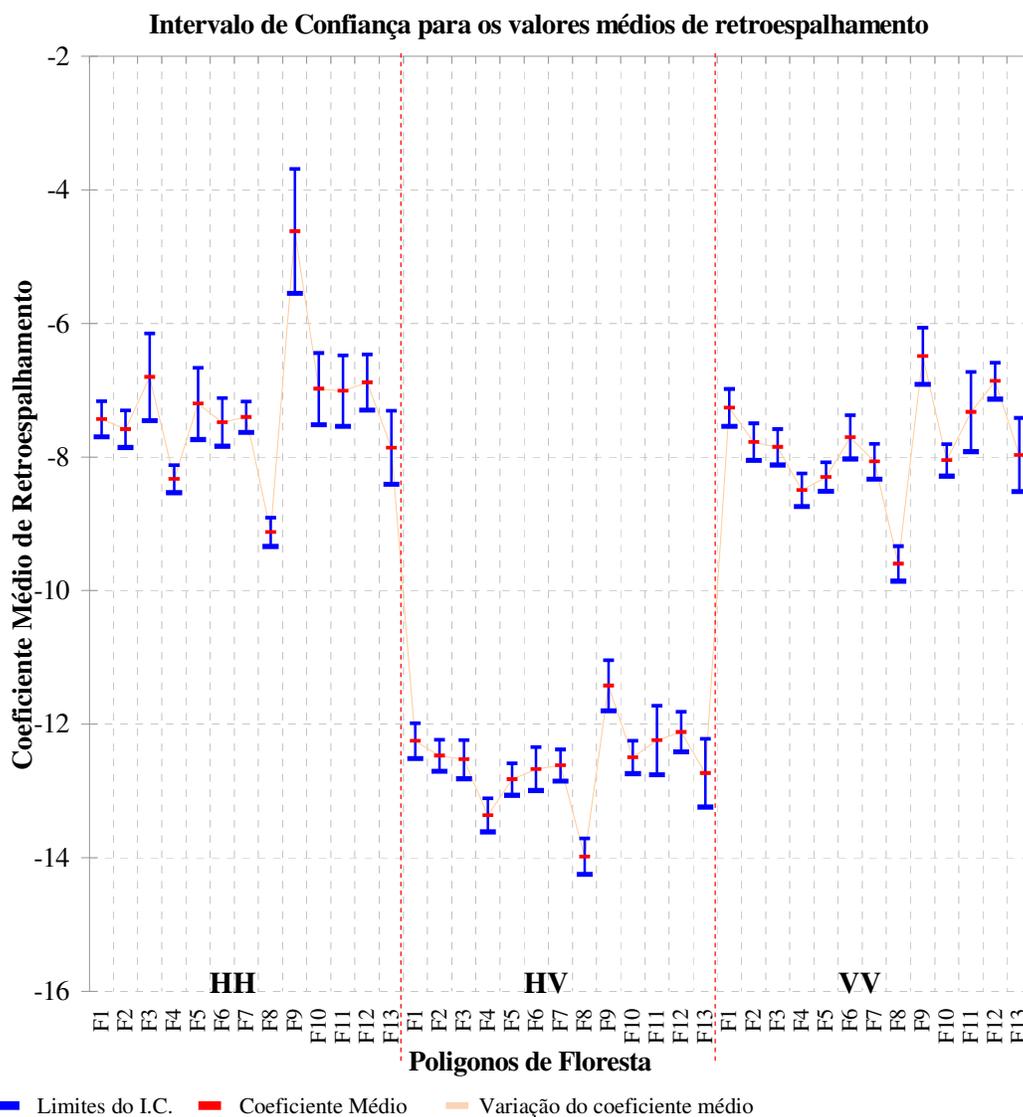


FIGURA 4.4 – Intervalo de Confiança de 95% para o coeficiente médio de retroespalhamento (dB) nas componentes HH, HV e VV da imagem ALOS/PALSAR para as amostras da classe floresta.

Na tabela 4.3 e figura 4.5, pode ser observado o coeficiente médio de retroespalhamento e os desvios em dB do conjunto de amostras de floresta e incremento de desflorestamento. Através de um teste *t-student* a um nível de significância de 5% e análise do gráfico *boxplot* da figura 4.5 e do intervalo com 95% de confiança da figura 4.6, pode-se inferir que os valores médios de retroespalhamento do conjunto de amostras de floresta é superior ao do conjunto de amostras de incremento de desflorestamento nos canais HV e VV. Como pode ser observado na tabela 4.3 e figura

4.6, a resposta média do σ^0 dos incrementos de desflorestamento na polarização HH (-7,103dB) é superior ao da classe floresta (-7,53 dB), reforçando estudos realizados que indicam que o elevado retorno em banda L e polarização HH pode ser produzidos em desflorestamentos recentes, pois são áreas onde o processo de remoção da biomassa residual ainda não foi concluído (ALMEIDA FILHO et al., 2007; GUERRA, 2008; RIGNOT et al., 1997).

Os altos valores de retroespalhamento na polarização HH, possivelmente se justifica ao fato de haverem galhos e troncos remanescentes nas áreas desflorestadas, produzindo deste modo um alto retorno devido à interação do sinal de radar com o solo e com estes vestígios de desmates que permanecem derrubados sobre o terreno logo após o corte e queima da floresta.

Nas imagens de polarização HV, os valores médios de σ^0 foram de -12,590dB para a classe floresta e -14,310dB para a classe incremento de desflorestamento. Nas imagens VV os valores foram em média de -7,827dB (floresta) e -8,387dB (incremento). Os resultados obtidos são coerente aos valores encontrados em Hashimoto et al. (1997), onde as florestas densas dispõem de elevados valores de σ^0 , enquanto que nas florestas abertas, pastos, savanas e áreas agrícolas (possíveis focos de desflorestamento) os valores de σ^0 mostram-se mais baixos (áreas mais escuras na imagem de radar). Assim, de um modo geral, o coeficiente de retroespalhamento tende a aumentar com a consolidação da superfície vegetal (IMHOFF, 1995).

TABELA 4.3 – Estatística descritiva para as amostras das classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV.

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
Floresta HH	-7,533	1,836	-14,762	-7,617	-0,338
Floresta HV	-12,590	1,761	-18,318	-12,639	-5,765
Floresta VV	-7,827	1,908	-14,222	-7,980	-1,388
Incremento de Desflorestamento HH	-7,103	1,853	-15,088	-6,918	-2,171
Incremento de Desflorestamento HV	-14,310	2,411	-24,830	-13,945	-9,036
Incremento de Desflorestamento VV	-8,387	1,764	-15,085	-8,239	-3,686

Pela Figura 4.5 pode-se observar a grande variabilidade dos pixels, e a provável dificuldade em se discriminar o incremento de desflorestamento com base em um único pixel, visto que o *boxplot* refere-se ao desvio padrão (o qual é uma medida de variabilidade individual). Já pela figura 4.6, a qual apresenta os intervalos de confiança dos valores médios de retroespalhamento gerados com base no erro padrão (razão entre o desvio padrão e a raiz quadrada do tamanho da amostra), podemos dizer que as classes de incremento de desflorestamento e floresta podem ser separadas desde que sejam computadas as médias de um número suficientemente grande de pixels. Desde modo, as análises das figuras 4.5 e 4.6 indicam que os classificadores pontuais (pixel a pixel) provavelmente produzirão resultados inferiores aos classificadores por regiões, sugerindo que, no caso desta dissertação, a classificação por regiões Bhattacharyya provavelmente apresentará resultados superiores em relação à classificação MAXVER-ICM, desde que se tenha uma segmentação adequada da imagem.

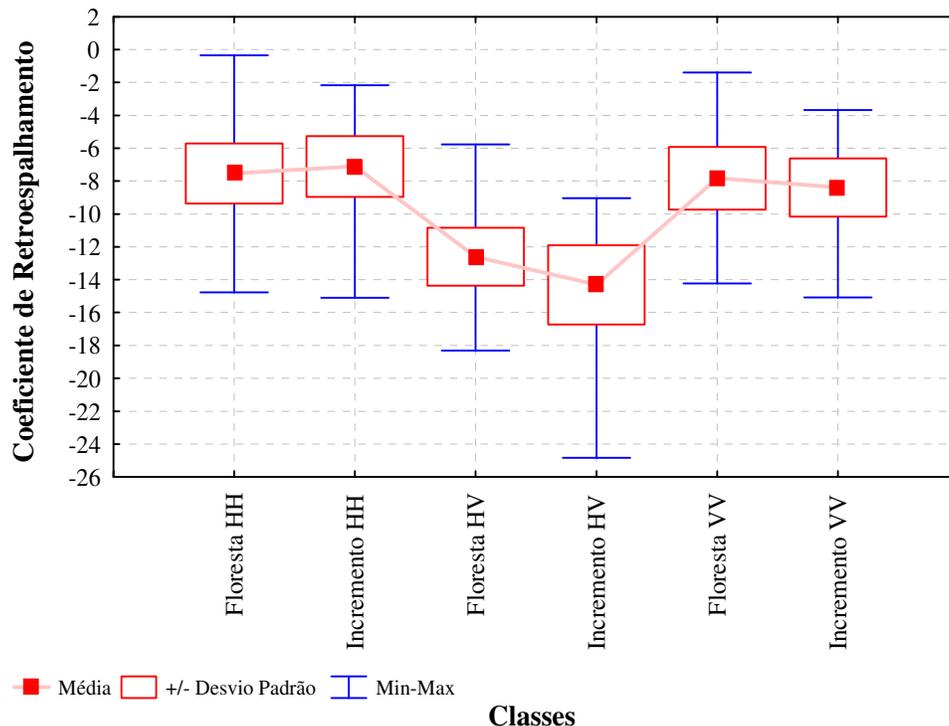


FIGURA 4.5 – Coeficiente médio de retroespalhamento (dB) e desvio padrão ALOS/PALSAR das componentes HH, HV e VV para as amostras da classe floresta e incremento de desflorestamento da área de estudo.

Ainda, a figura 4.5 alude a dificuldade em separar com apenas um canal as classes floresta e incremento, pois há sobreposição no desvio do coeficiente de retroespalhamento dos dois conjuntos. Para as amostras coletadas, a figura 4.5 e a tabela 4.3 indicam que a dispersão da classe incremento é superior ao da classe floresta na polarização HV, sendo estatisticamente igual a significância de 5% para o canal HH.

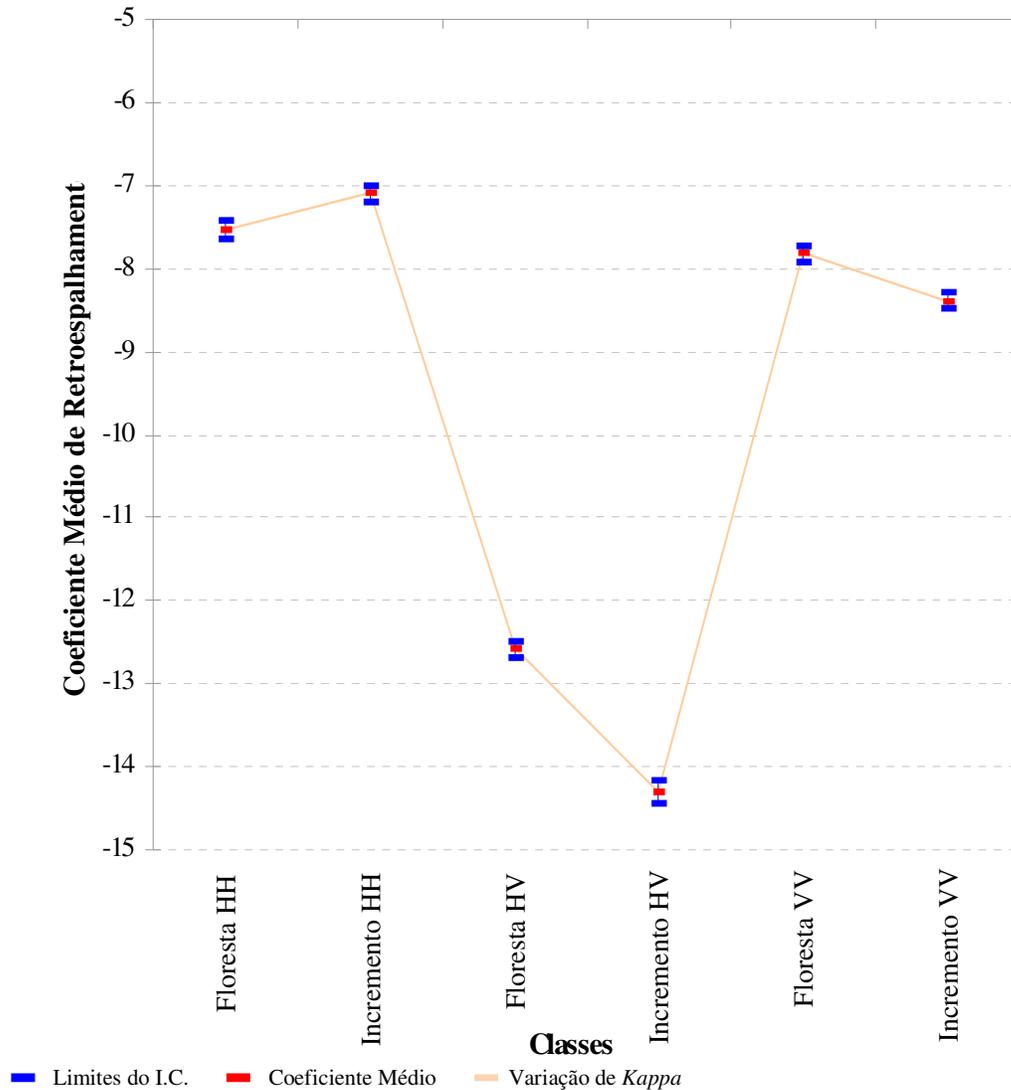


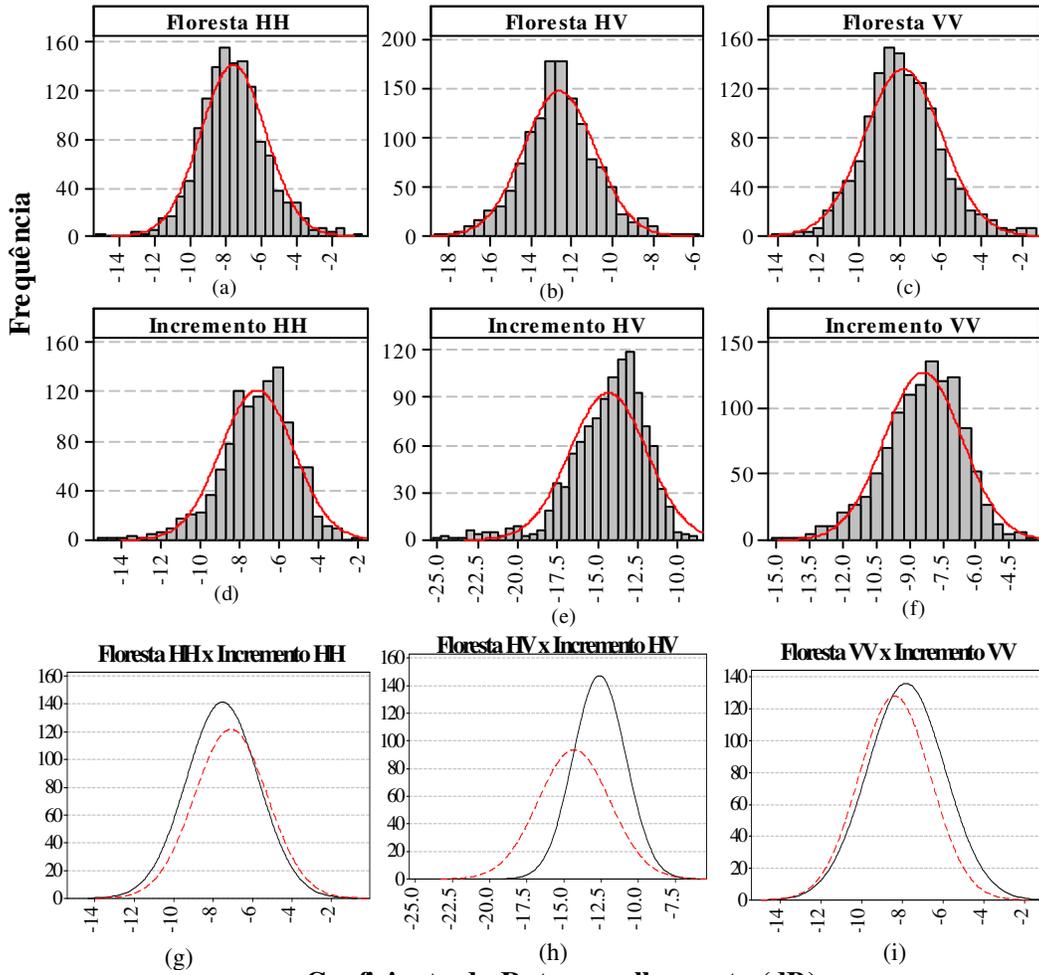
FIGURA 4.6 – Resumo estatístico do intervalo com 95% de confiança para os valores médios de retroespalhamento das classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV.

Na figura 4.6, pode-se observar que o retorno na polarização horizontal (HH) tanto para a classe floresta quanto para a classe incremento de desflorestamento é maior do que na

polarização vertical (VV), o que pode estar relacionado à ocorrência de dosséis homogêneos, com a maior parte dos galhos orientados horizontalmente. Ainda, evidencia-se que tanto para a classe floresta quanto para a classe incremento, os valores de σ^o provavelmente são mais intensos nas imagens de polarização dupla (HH e VV) do que os existentes nas imagens de polarização cruzada (HV), o que corrobora com o apresentado por Almeida Filho et al. (2008), provavelmente devido a perda de sinal ocasionada pela despolarização da onda. A análise visual do I.C. confirma ainda que os valores médios de retroespalhamento observados nas polarizações HV e VV para a classe floresta foram significativamente maiores do que os valores médios associados às classes incremento de desflorestamento.

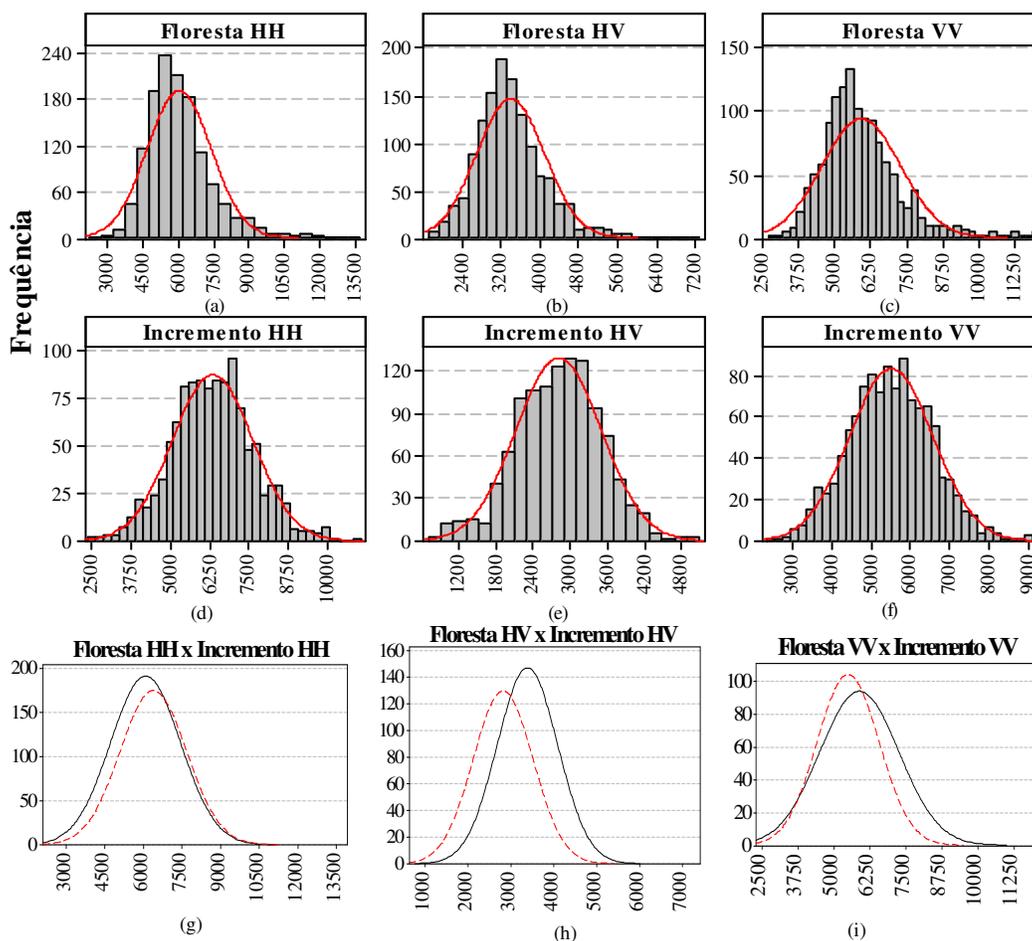
A título de comparação, nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os histogramas (com curva da normal em vermelho) das classes floresta e incremento de desflorestamento para as três polarizações (para os dados em dB e em amplitude, respectivamente).

Com base nos histogramas das figuras e da tabela 4.3, evidencia-se que para o canal HH (figuras 4.7 e 4.8 (a) e (b)) as duas classes possuem coeficientes médios de retroespalhamento próximos (o que pode ser ilustrado na sobreposição da curva normal entre as classes da figura 4.7 e 4.8 (g)), o mesmo ocorrendo para o canal VV (histogramas (c), (f), e (i)), mostrando com isso a dificuldade em se separar áreas de floresta e áreas desflorestadas com apenas um canal. Para o canal HV (figuras 4.7 e 4.8 (b) e (e)), o coeficiente médio de retroespalhamento entre a classe floresta e a classe incremento de desflorestamento se distanciam um pouco mais (o que pode ser ilustrado na sobreposição da curva normal entre as classes da figura 4.7 e 4.8 (h)), sugerindo que no uso da classificação com apenas um canal, provavelmente o canal HV discriminará com melhor êxito áreas de floresta e áreas de incremento de desflorestamento em comparação com as polarizações HH e VV, comprovando o exposto em Guerra (2008) e Almeida Filho et al. (2008).



Coeficiente de Retrospalhamento (dB)

FIGURA 4.7 – Histogramas em dB para as classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH (a;d), HV(b;e) e VV(c;f), onde a linha vermelha ilustra a curva da distribuição normal. Em (g), (h) e (i) são representados os histogramas das sobreposições da curva normal entre as classes floresta (linha preta) e incremento de desflorestamento (linha tracejada vermelha) respectivamente para as polarizações HH, HV e VV.



Amplitude (Radiometria)

FIGURA 4.8 – Histogramas em amplitude para as classes floresta e incremento de desflorestamento nas polarizações HH (a;d), HV(b;e) e VV(c;f), onde a linha vermelha ilustra a curva da distribuição normal. Em (g), (h) e (i) são representados os histogramas das sobreposições da curva normal entre as classes floresta (linha preta) e incremento de desflorestamento (linha tracejada vermelha) respectivamente para as polarizações HH, HV e VV.

A tabela 4.4 ilustra os valores obtidos da distância JM para cada par de classes. Inferiu-se que a separabilidade para discriminar floresta e incremento de desflorestamento é menor quando se utiliza a polarização HH (distância JM aproximada de 0,11655), sugerindo deste modo que ocorra uma maior confusão entre as classes desta imagem, o que pode ser evidenciado nas figuras 4.7 e 4.8 (a), (d) e (g) onde os histogramas das duas classes são quase que totalmente justapostos. Comportamento semelhante ocorre para o uso do canal VV (distância JM aproximada de 0,16164), onde os histogramas das

duas classes também são quase que totalmente justapostos, o que pode ser visualizado nas figuras 4.7 e 4.8 (c), (f) e (i). Para a polarização HV, a distância JM apresentou um valor significativamente mais elevado em relação aos outros canais (0,45099), comprovando o elucidado anteriormente de que no uso de apenas um canal, o uso da polarização HV permite uma maior separabilidade das classes em relação aos outros canais univariados, o que pode ser evidenciado nas figuras 4.7 e 4.8 (b), (e) e (h) onde o histograma da classe floresta está mais a direita do que o histograma da classe incremento de desflorestamento, indicando valores mais elevados de retroespalhamento para esta classe e conseqüentemente alvos mais claros na imagem em relação aos alvos de incremento de desflorestamento.

TABELA 4.4 – Distâncias estatísticas JM entre as classes.

Polarização	Distância JM
HH	0,11655
HV	0,45099
VV	0,16164
HH+HV	1,19897
HV+VV	1,00873
HH+VV	0,23716
HH+HV+VV	1,20178

Para a polarização dual, as menores distâncias JM encontradas e conseqüentemente as menores separabilidades e maiores confusões entre as classificações, foram encontradas quando a polarização HV não esteve presente na combinação de canais. Deste modo, para a combinação HH+VV a distância JM foi de 0,23716. A combinação HH+HV apresentou a maior distância JM para dois canais (distância de 1,19897), valor este próximo da combinação HH+HV+VV (distância de 1,20178), sugerindo que no uso de tal combinação ocorrerá uma melhor separabilidade das classes em relação às outras combinações. Para a combinação HV+VV, a distância encontrada foi de 1,00873.

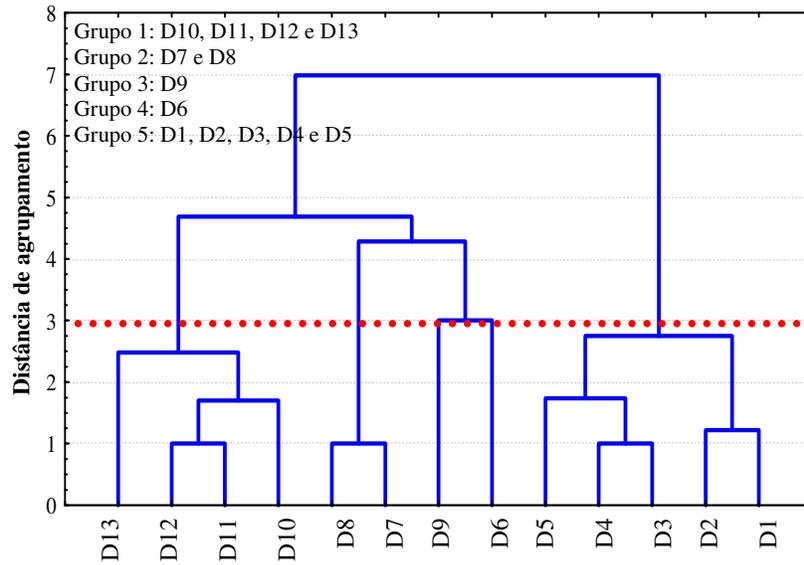
A análise dos histogramas das figuras 4.7 e 4.8 sugerem ainda que a maioria dos conjuntos de amostras dos polígonos são normalmente distribuídos, fato este provavelmente devido à reamostragem por média na qual eleva o número de *looks* (número equivalente de *looks* após a reamostragem de aproximadamente 10) e por

consequência a aproximação da distribuição da imagem SAR amplitude em uma distribuição Gaussiana (OLIVER e QUEGAN, 1998). Conforme citado na seção 3.4.2, realizou-se o teste de Komolgorov-Smirnov (MASSEY, 1951) o qual evidenciou que 76,92% dos polígonos de incremento de desflorestamento descritos na tabela 4.1 são ajustados por uma distribuição normal nas três polarizações a um nível de significância de 1%.

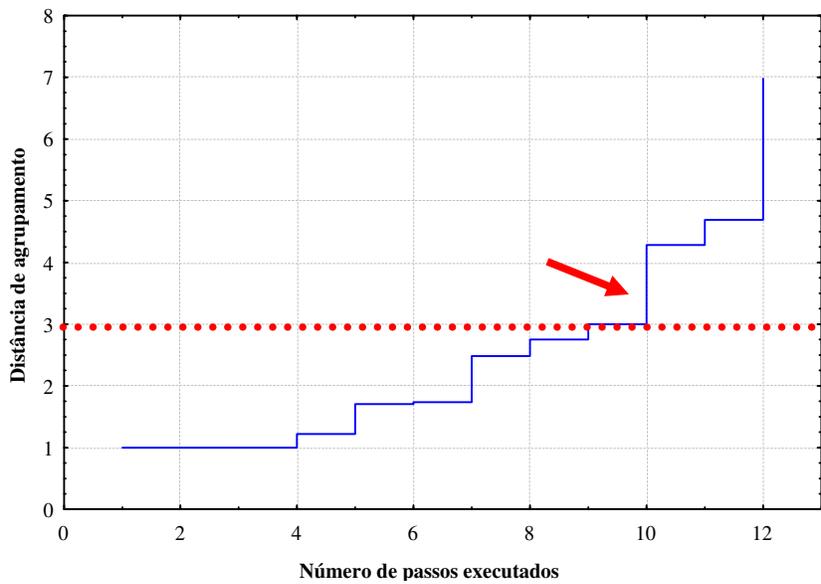
A figura 4.9 (a) ilustra o dendograma resultante da análise de agrupamento hierárquico realizada com os polígonos de incremento de desflorestamento. De acordo com o dendograma, os polígonos podem ser discriminados em cinco grupos de acordo com critérios de homogeneidade entre si:

- Grupo 1: Compreendendo quatro polígonos de incremento de desflorestamento (D10, D11, D12 e D13)
- Grupo 2: englobando dois polígonos (D7 e D8);
- Grupo 3 e 4: compreendendo cada um apenas um polígono de incremento de desflorestamento (respectivamente D9 e D6);
- Grupo 5: composto por cinco polígonos (D1, D2, D3, D4 e D5).

A distância de corte do dendograma foi definida com base no gráfico de seqüência de agrupamentos ilustrado na figura 4.9 (b). Este gráfico indica a seqüência e o coeficiente de similaridade com o qual ocorreu a formação dos grupos. Neste contexto, uma indicação para a distância de corte é dada por um platô no sentido vertical (representado pela seta vermelha), que corresponde ao agrupamento de objetos com baixa similaridade, ou seja, indica que os grupos formados em passos posteriores serão menos homogêneos. Assim, a distância de corte, ilustrada pela linha tracejada vermelha na figura 4.9 (b), é definida na base do platô vertical.



(a)



(b)

FIGURA 4.9 – Em (a) é ilustrado o dendrograma resultante da análise de agrupamento hierárquico realizada com os valores médios de retroespalhamento dos polígonos de incremento de desflorestamento nas polarizações HH, HV e VV. As linhas azuis representam as ligações ocorridas (a uma determinada distância) para formação dos grupos e a linha tracejada vermelha representa a distância de corte definida com base no gráfico de seqüência de agrupamentos da figura 4.9 (b), onde os platôs no sentido vertical sugerem prováveis distâncias de corte. A linha tracejada indica o valor da distância de corte utilizada.

O elevado número de grupos obtidos a partir da análise de agrupamento hierárquico, sugere a heterogeneidade da classe incremento, o que implica na dificuldade de definir um comportamento que caracterize os incrementos de desflorestamento, podendo representar um fator que dificulte a discriminação desta classe. A evidência desta heterogeneidade sugere que exista desflorestamento em diferentes estágios (como corte, queimada, crescimento de vegetação entre outros), e dependendo do estágio deste processo podem apresentar diferentes tipos de cobertura e de comportamento, podendo ser um fator que dificulte a discriminação desta classe ocasionando erros de inclusão e omissão.

Na figura 4.10, é ilustrado o caráter heterogêneo da classe incremento de desflorestamento dos dados ALOS/PALSAR em amplitude através da ilustração dos grupos apresentados no dendograma da figura 4.9.

Os polígonos de incremento de desflorestamento D1, D2, D3, D4, D5, D6, D10 e D11 são áreas detectadas como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2006 mas que estavam sob nuvem na imagem óptica analisada pelo PRODES no ano anterior (2005).

Mediante análise das imagens auxiliares, dados de campo da região e informações disponibilizadas pelo PRODES, inferiu-se as seguintes informações sobre as áreas desflorestadas utilizadas na análise exploratória:

- Grupo 1: De acordo com a figura 4.10 (a), (b), (c) e (d), provavelmente represente áreas de queimada onde é possível visualizar o comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR, sugerindo a influência do teor hídrico do solo devido às chuvas anteriores a data do imageamento pelo radar.
- Grupo 2: Devido ao formato dos polígonos da figura 4.10 (e) e (f), bem como as respostas e assinaturas espectrais ilustradas, provavelmente os polígonos correspondam a regiões que estão sendo preparadas para cultivo agrícola, hipótese reforçada pelos dados de campo na região que indicam no local áreas de plantio. O polígono D8 parece ilustrar uma área de queimada ou com umidade, onde o solo está sendo preparado, já o polígono D7 tem características

de solo com palha (ROJAS, 2004) devido a área não possuir cobertura vegetal, mas provavelmente com a presença de resquícios de culturas agrícolas. A tonalidade clara na imagem SAR, indica que provavelmente há troncos ou galhos no local provocando o efeito de duplo rebatimento (*double bounce*).

- Grupo 3: O polígono D9 é localizado próximo ao grupo 2. Pela figura 4.10 (g) a área apresenta indícios de solo parcialmente exposto.
- Grupo 4: Pelas respostas espectrais, a figura 4.10 (h) provavelmente represente uma área com ocorrência expressiva de solo exposto (devido a textura lisa), onde já tenha ocorrido corte, queima e limpeza da região
- Grupo 5: Mediante as figuras 4.10 (i), (j), (k), (l) e (m), provavelmente o grupo 5 represente áreas desflorestadas que foram abandonadas e cobertas por capoeiras onde há a presença de cicatrizes de fogo. Note que todos os polígonos deste grupo estavam cobertos por nuvem no período anterior, podendo o desflorestamento ter ocorrido há mais de 1 ano.

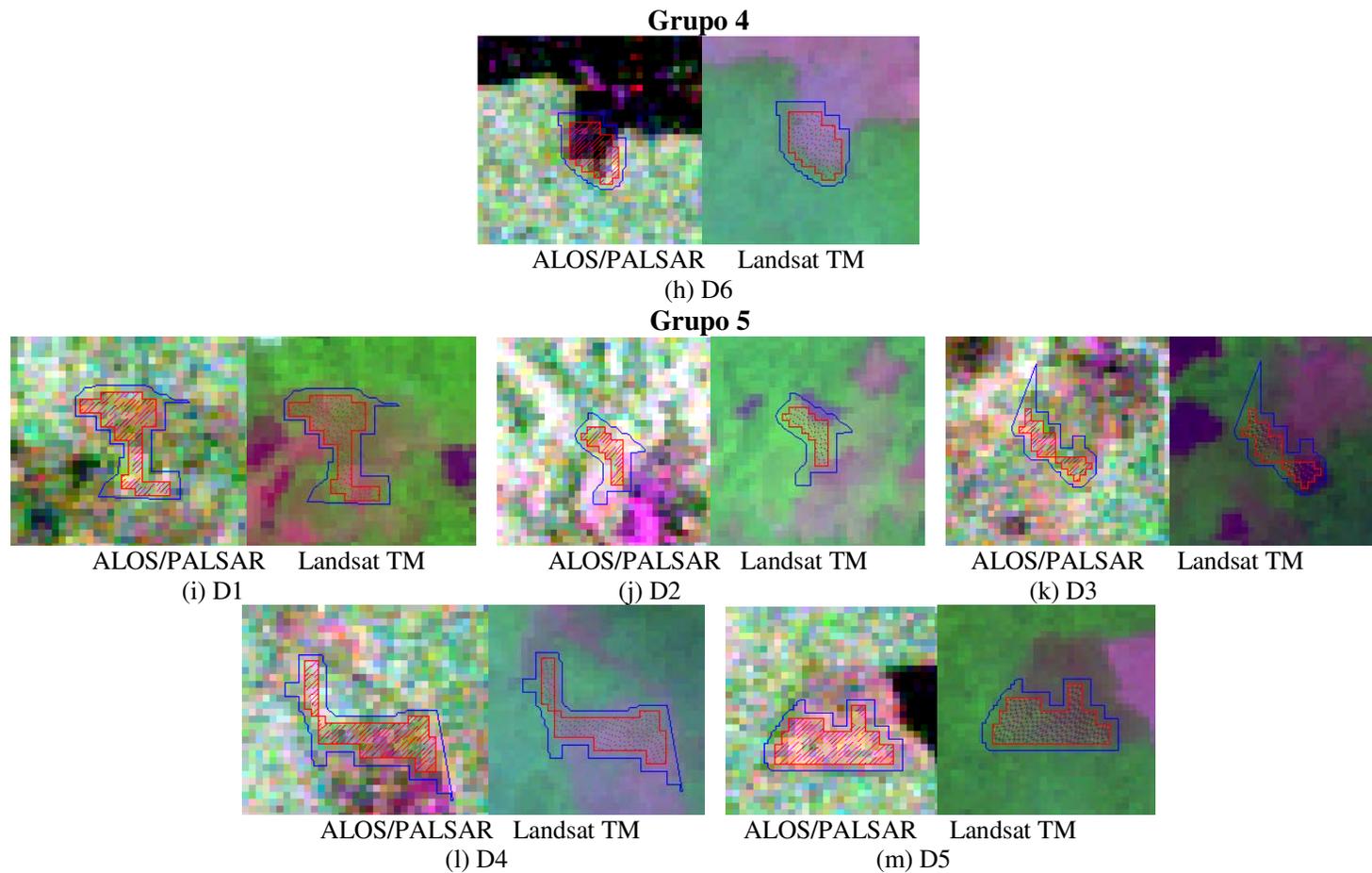


FIGURA 4.10 – (Continua) Imagens ALOS/PALSAR HH(R)HV(G)VV(B) e Landsat TM de 09/11/2006, composição 5(R)4(G)3(B), com os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos do dendograma da análise de agrupamento hierárquico.

Como análise complementar, na figura 4.11 é apresentado o diagrama de dispersão para os pares de polarizações das classes floresta e incremento de desflorestamento. As elipses representam as distribuições normais bivariadas com nível de confiança de 95%, as quais permitem inferir que embora haja uma considerável sobreposição entre as distribuições, quando a polarização HV está presente ocorre uma melhor separabilidade das classes floresta e incremento, sendo o par de polarizações HH+HV (figura 4.11 (a)) e HV+VV (figura 4.11 (c)) provavelmente onde as amostras são melhores discriminadas. Como na figura 4.11 (a) a sobreposição elíptica em relação a figura 4.11 (c) parece ser menor, pode-se inferir que na composição bivariada HH+HV ocorrerá uma melhor separabilidade em relação a HV+VV.

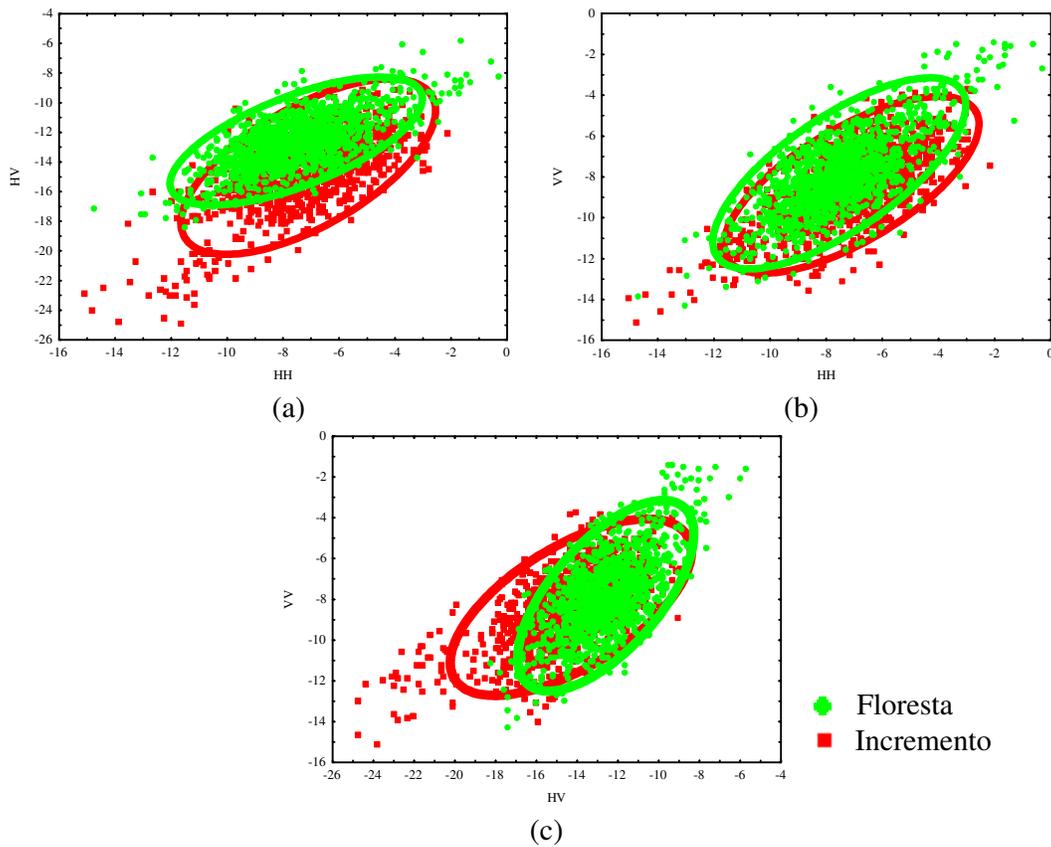


FIGURA 4.11 – Diagramas de dispersão das amostras das classes floresta (pontos pretos) e incremento de desflorestamento (pontos vermelhos). (a) Par de polarizações HH+HV; (b) par de polarizações HH+VV; (c) par de polarizações HV+VV. As elipses representam distribuições normais bivariadas (95%) das amostras de floresta (elipse verde) e incremento de desflorestamento (elipse vermelha).

4.2 Resultado das classificações supervisionadas e segmentações dos dados ALOS/PALSAR

Nessa seção são descritos e analisados os resultados obtidos com todas as classificações supervisionadas realizadas. Para tanto, os resultados apresentados juntamente com as respectivas análises e discussões foram divididos em dois tópicos considerando os dois algoritmos de classificação empregados (MAXVER-ICM e Bhattacharyya). Cada tópico foi dividido em sub-tópicos de acordo com a utilização da imagem com filtro e sem filtro *Gamma* 5x5 e o uso da segmentação pelo segmentador do SPRING e do SEGSAR.

No Apêndice A encontram-se as matrizes de confusão para todas as classificações realizadas (imagem amplitude classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV)). No Apêndice B são apresentados todos os mapas temáticos para estas classificações, bem como o intervalo com 95% de confiança para o coeficiente *kappa* de todas as classificações ordenadas por canal. Finalmente, no Apêndice C são ilustrados os polígonos de erros de omissão e inclusão para a melhor combinação de canais encontrada (classificador, segmentação e existência ou não de filtro na imagem) de acordo com a acurácia *kappa*. Portanto, os resultados das classificações estão assim divididos:

- MAXVER-ICM sem filtro: matrizes A.1 até A.7 e mapas temáticos de B.1 até B.3;
- MAXVER-ICM com filtro *Gamma* 5x5: matrizes A.8 até A.14 e mapas temáticos B.4 até B.6;
- Bhattacharyya sem filtro com segmentação SPRING: matrizes A.15 até A.21 e mapas temáticos B.7 até B.9;
- Bhattacharyya sem filtro com segmentação SEGSAR: matrizes A.22 até A.28 e mapas temáticos B.10 até B.12;

- Bhattacharyya com filtro *Gamma* 5x5 segmentação SPRING: matrizes A.29 até A.35 e mapas temáticos B.13 até B.15 e
- Bhattacharyya com filtro *Gamma* 5x5 segmentação SEGSAR: matrizes A.36 até A.42 e mapas temáticos B.16 até B.18.

Neste capítulo são apresentados os resultados gerais das classificações organizados nas tabelas subseqüentes, as quais contêm os valores dos parâmetros estatísticos (coeficiente *Kappa* global (\hat{k}), conceito de acordo com o critério de Landis e Koch (1977) e a variância do *kappa* ($\hat{\sigma}_k^2$)) para as classificações, obtidos a partir das matrizes de confusão geradas na validação das classificações. Para a classe incremento de desflorestamento é ilustrado a acurácia do produtor (A.P. = % dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento do mapa temático de referência do PRODES 2006 que foram corretamente classificados), o *kappa* da classe e os erros de inclusão e omissão para as classificações realizadas.

Foram construídos intervalos com 95% de confiança para o coeficiente *Kappa* em cada classificação. Os intervalos de confiança foram obtidos a partir dos coeficientes *Kappa* estimados (\hat{k}) e seus respectivos valores de desvios padrão ($\hat{\sigma}_k$), os quais permitiram a realização de testes de hipóteses a fim de verificar igualdades entre o coeficiente de concordância das classificações, dado o nível de significância de 5%. Para tanto, foram consideradas comparações entre um mesmo classificador e classificador diferente. As hipóteses de igualdade entre as classificações foram validadas ou invalidadas com base nas comparações do nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) com os valores-p associados a cada teste, conforme explicado na seção 2.7.

4.2.1 Classificação pelo método MAXVER-ICM

As classificações a partir do método MAXVER-ICM foram realizadas através do *software Polarimetric Classifier 0.7*, desenvolvido por Correia (1999).

Na classificação das amplitudes individuais com diferentes distribuições associadas a cada classe, aplicou-se um teste de aderência qui-quadrado a fim de verificar quais as

distribuições estatísticas que melhor se ajustariam para as classes floresta e incremento de desflorestamento. Como o esperado, conforme o teste realizado de Komolgorov-Smirnov na análise exploratória, o teste determinou que as amostras de florestas e incremento de desflorestamento são ajustadas por uma distribuição normal nas polarizações HH, HV e VV a um nível de significância de 5%.

4.2.1.1 Classificações MAXVER-ICM para a imagem sem filtro

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) obteve-se um total de 7 classificações para a imagem amplitude.

A tabela 4.5 mostra os resultados para a classificação MAXVER-ICM da imagem amplitude sem filtro.

TABELA 4.5 – Resultado geral das avaliações das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro.

MAXVER-ICM (sem filtro)							
	Kappa Global \hat{k} (k)	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,0013	Ruim	0	54,87	0,0006	99,68	45,13
HV	0,0506	Ruim	0,33	61,26	0,0264	97,10	38,74
VV	0,0002	Ruim	0	95,09	0,0001	99,73	4,71
HH+HV	0,0718	Ruim	0,49	76,07	0,0377	95,98	23,93
HV+VV	0,0258	Ruim	0,08	73,89	0,0131	98,43	26,11
HH+VV	0,0073	Ruim	0,01	71,71	0,0037	99,37	28,29
HH+HV+VV	0,0586	Ruim	0,32	80,05	0,0304	96,70	19,95

A análise da tabela 4.5 permite concluir que: para a área de estudo e as amostras utilizadas das classes floresta e incremento de desflorestamento, os baixos valores do *kappa* global (e do *kappa* da classe incremento de desflorestamento) bem como os altos erros de inclusão, fizeram com que a classificação pontual não fosse considerada eficiente para o dado SAR utilizado.

O uso de classificações univariadas apresentou os piores resultados em comparação com o mapa temático verdade do PRODES 2006 (conforme explanado na seção 4.1 da análise exploratória dos dados), tendo o canal VV o menor acerto (*kappa* de 0,0002) e

conseqüentemente a menor acurácia global (a menor soma do total de *pixels* corretamente classificados dividido pelo número total de *pixels* da matriz de confusão).

Na classificação do canal HH, 54,87% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento do mapa temático de referência do PRODES 2006 foram corretamente classificados (Anexo A.1). Para a polarização HV, houve 61,26% de acerto e no canal VV a acurácia do produtor foi de 95,09%. No entanto, para todas as polarizações o erro de inclusão foi considerado elevado, tendo o canal VV o maior erro de inclusão (99,73%), contudo com o menor erro de omissão (4,71%), o que justifica a porcentagem de acertos deste canal. Embora a acurácia do produtor na polarização VV tenha sido elevado, o resultado não pode ser considerado satisfatório, visto que devido ao fato de ter-se obtido o maior erro de inclusão, provavelmente tenha ocorrido uma “superestimação” do classificador nesse canal (o que pode ser visualizado no mapa temático da classificação no Anexo B.1 (c)), o mesmo possivelmente ocorrendo para os erros de omissão, fazendo com que a omissão fosse a menor em comparação com as outras polarizações e conseqüentemente o acerto no canal VV maior em relação aos outros canais.

Ainda, de acordo com a tabela 4.5 é possível extrair que a polarização HH apresentou o maior erro de omissão, confirmando estudo realizado por Búfalo (2005) o qual demonstrou a limitação do canal para detectar desflorestamentos recentes.

A polarização cruzada HV, em comparação com os outros canais univariados, apresentou o menor erro de inclusão (97,10%), sugerindo a importância do uso da polarização cruzada para discriminar incremento de desflorestamento, confirmando o apresentado por Guerra (2008). Porém, a limitação do uso de apenas um canal fica evidente quando se analisa o erro de omissão que foi relativamente alto (38,74%).

Para as classificações bivariadas, o pior resultado foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+VV (71,71% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados), a qual apresentou o maior erro de inclusão (99,37%) e omissão (28,29%) para classificação com dois canais.

Das sete classificações realizadas pelo classificador MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro, o maior valor de *kappa* (global e para a classe incremento de desflorestamento) foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+HV (76,07% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados). Entretanto, embora o erro de inclusão da classe incremento de desflorestamento tenha sido o menor dentre todas as sete classificações (95,98%), ainda assim é elevado, implicando em que o resultado da classificação fosse considerado insatisfatório (conceito ruim) de acordo com o critério de Landis e Koch (1977). A figura 4.12 ilustra em (a) o mapa temático desta classificação (*kappa* de 0,0718) e em (b) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.

Embora os resultados obtidos com a classificação MAXVER-ICM tenham sido considerados insatisfatórios, devido ao baixo valor de *kappa* e alto erro de inclusão, evidenciou-se que a acurácia dos resultados aumenta a medida que há um acréscimo do número de canais de um para dois e em geral quando a polarização cruzada está presente nas classificações, fazendo com que o erro de inclusão para desflorestamentos recentes diminua.

Aboud Neta (2009), utilizando classificação contextual e por regiões no mapeamento de uso e cobertura do solo na região da Flona Tapajós-PA, constatou que a presença do canal HV nos produtos de polarização dual providenciou melhores resultados. No estudo realizado, verificou-se que os produtos de polarização dual HV+VV obtiveram a melhor combinação para o mapeamento florestal da área de estudo mediante as classes floresta primária, secundária, solo nu, agricultura, florestas degradadas, pasto e pasto sujo, diferentemente do estudo de Dutra et al. (2008) onde a melhor combinação foi obtida para os canais HH+HV onde o conjunto de classes era o mesmo com exceção das classes pasto e pasto sujo. Deste modo, evidencia-se que em geral a polarização dual se sobressai em relação as demais classificações e a melhor combinação depende da aplicação que se deseja evidenciar e dos tipos de classes envolvidas.

Na classificação MAXVER-ICM dos dados multivariados, onde a acurácia do produtor foi de 80,05%, embora o resultado do mapa temático seja visualmente semelhante ao da

classificação bivariada HH+HV (respectivamente Anexo B.3 e B.2 (a)), pode-se inferir da tabela 4.5 que o resultado foi pior em comparação com a polarização dual ($kappa$ de 0,0586). Deste modo, provavelmente o acréscimo do canal VV (o qual apresentou o pior $kappa$ por classe para o desflorestamento), contribui para que a acurácia fosse inferior.

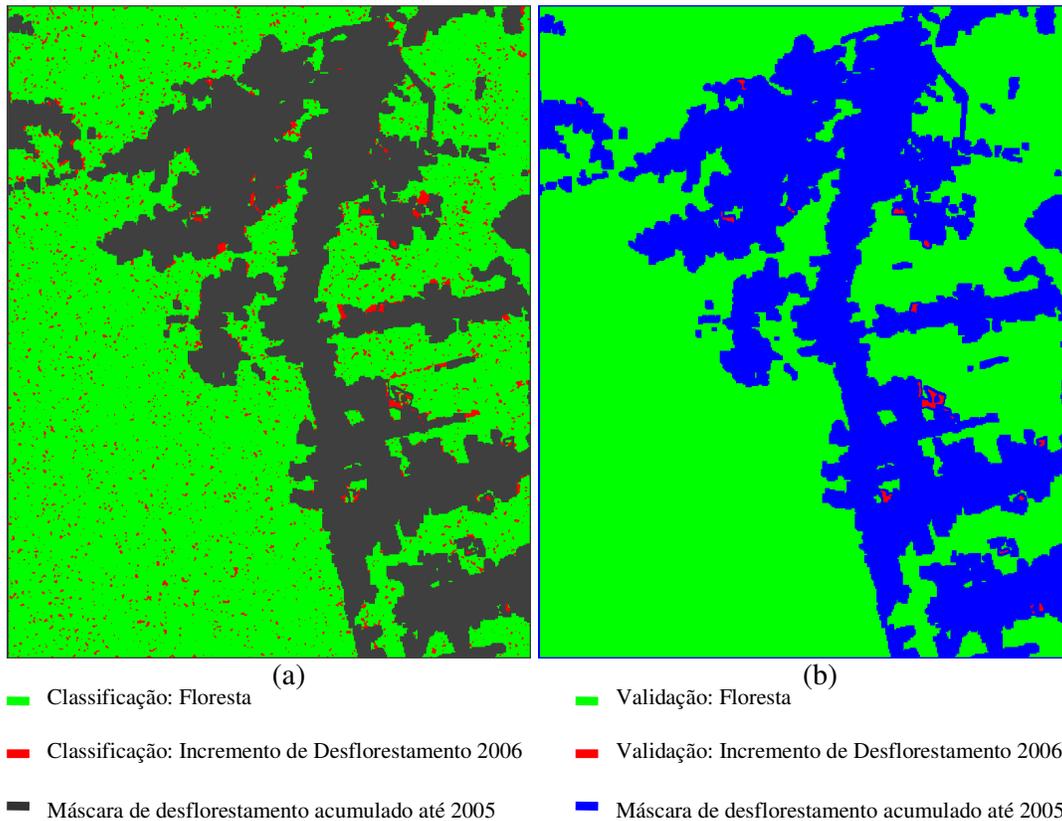


FIGURA 4.12 – Em (a) classificações MAXVER-ICM com maior valor $kappa$ (0,0718) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude sem filtro e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

A figura 4.13 mostra os intervalos com 95% de confiança para cada um dos coeficientes $kappa$ obtidos da tabela 4.5. Realizou-se um teste z bilateral com o intuito de comparar as matrizes de confusão das classificações realizadas, onde foi possível inferir que ao nível de significância de 5% nenhuma das matrizes de confusão das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro são estatisticamente iguais.

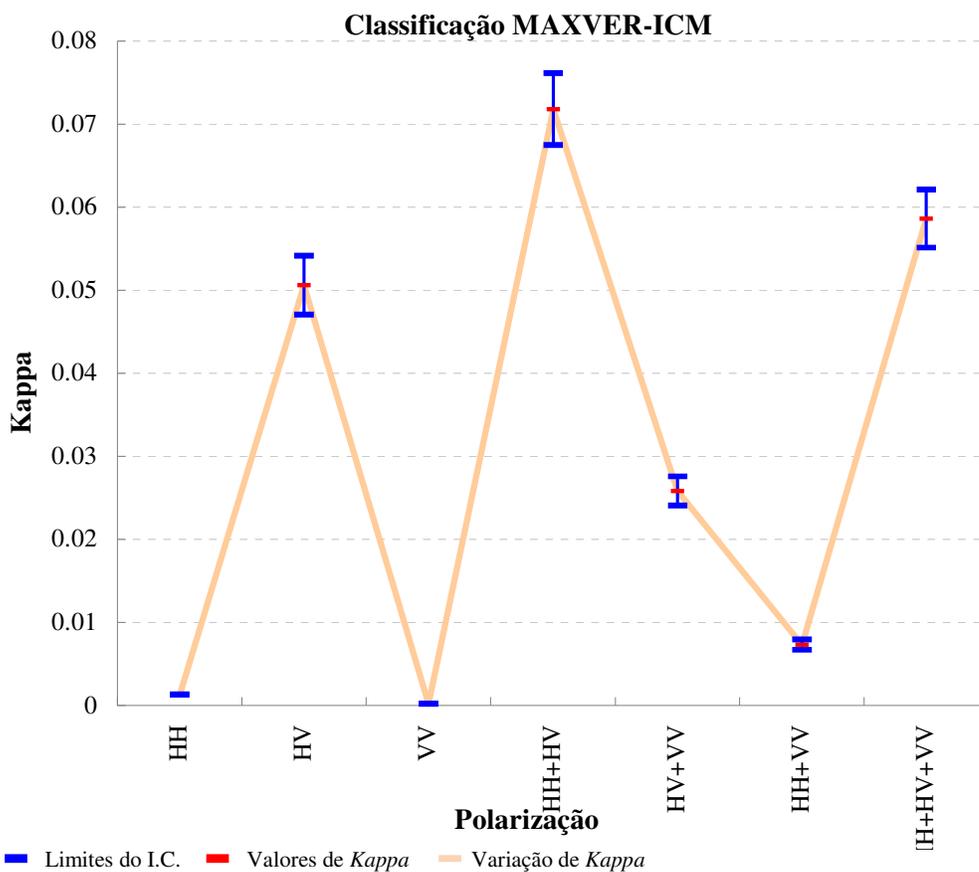


FIGURA 4.13 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

4.2.1.2 Classificações MAXVER-ICM para a imagem com filtro *Gamma 5x5*

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) obteve-se um total de 7 classificações para a imagem com filtro *Gamma 5x5*.

A tabela 4.6 mostra os resultados para a classificação MAXVER-ICM da imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

Assim como para a análise das classificações MAXVER-ICM realizada anteriormente, as informações da tabela 4.6 permitem concluir que a classificação pontual não foi considerada satisfatória para o dado SAR utilizado (conceito ruim) devido ao baixo valor de *kappa* (Landis e Koch, 1977).

TABELA 4.6 – Resultado geral das avaliações das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5.

MAXVER-ICM (com filtro <i>Gamma</i> 5x5)							
	Kappa Global \hat{k}	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,0027	Ruim	0,01	47,39	0,0013	99,61	52,61
HV	0,0673	Ruim	0,51	66,10	0,0355	96,20	33,90
VV	0,0018	Ruim	0	68,59	0,0009	99,65	31,41
HH+HV	0,1082	Ruim	0,89	88,07	0,0576	93,99	11,93
HV+VV	0,0567	Ruim	0,34	71,08	0,0296	96,79	28,92
HH+VV	0,0215	Ruim	0,06	68,51	0,0109	98,65	31,49
HH+HV+VV	0,0994	Ruim	0,76	88,39	0,0527	94,49	11,61

O uso de classificações univariadas apresentou os piores resultados em comparação com o mapa temático verdade do PRODES 2006 (assim como para a imagem sem filtro analisada anteriormente), tendo o canal VV o menor acerto (*kappa* de 0,0018).

Para a imagem amplitude classificada individualmente, a acurácia do produtor para a classe incremento de desflorestamento na polarização HH foi de 47,39% (Anexo A.8), 66,10% para o canal HV e de 68,59% para VV. Similarmente as classificações da seção 4.2.1.1, para todas as polarizações o erro de inclusão foi considerado elevado, apresentando o canal VV o maior erro (99,65%). No entanto, notou-se que a utilização do filtro *Gamma* 5x5 diminuiu os erros de inclusão em comparação com as classificações MAXVER-ICM para a imagem sem filtro, e em alguns casos (como HH+HV e HH+HV+VV), diminuiu também os erros de omissão.

Na análise do erro de omissão, evidencia-se que o uso de apenas um canal, no geral, é maior em comparação com os canais classificados aos pares e em conjunto. A polarização HH novamente elucidou a limitação do canal para detectar desflorestamentos recentes, apresentando o maior erro de omissão. A polarização cruzada HV, em comparação com os outros canais univariados, apresentou o menor erro de inclusão (96,20%).

Para a imagem classificada aos pares, novamente o pior resultado foi obtido quando o canal HV não esteve presente. Assim, a combinação de canais HH+VV (*kappa* de 0,0215 e acurácia do produtor de 68,51%), apresentou o maior erro de inclusão (98,65%) e omissão (31,49%) para classificação com dois canais.

Embora baixo, o maior valor de *kappa* (global e para a classe incremento de desflorestamento) foi obtido quando se utilizou os pares de polarização HH+HV (88,07% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados). A figura 4.14 ilustra em (a) o mapa temático para esta classificação (*kappa* de 0,1082, Anexo B.5 (a)) e em (b) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.

A classificação dos três canais em conjunto, apresentou valor *kappa* próximo, mas inferior (0,0994) ao da polarização dual HH+HV. Do mesmo modo que na classificação sem filtro, o acréscimo do canal VV causou a diminuição da acurácia final do resultado, visto que individualmente apresentou o menor acerto em comparação ao mapa do PRODES 2006.

A figura 4.15 mostra os intervalos de confiança de 95% para cada um dos coeficientes *kappa* obtidos da tabela 4.6.

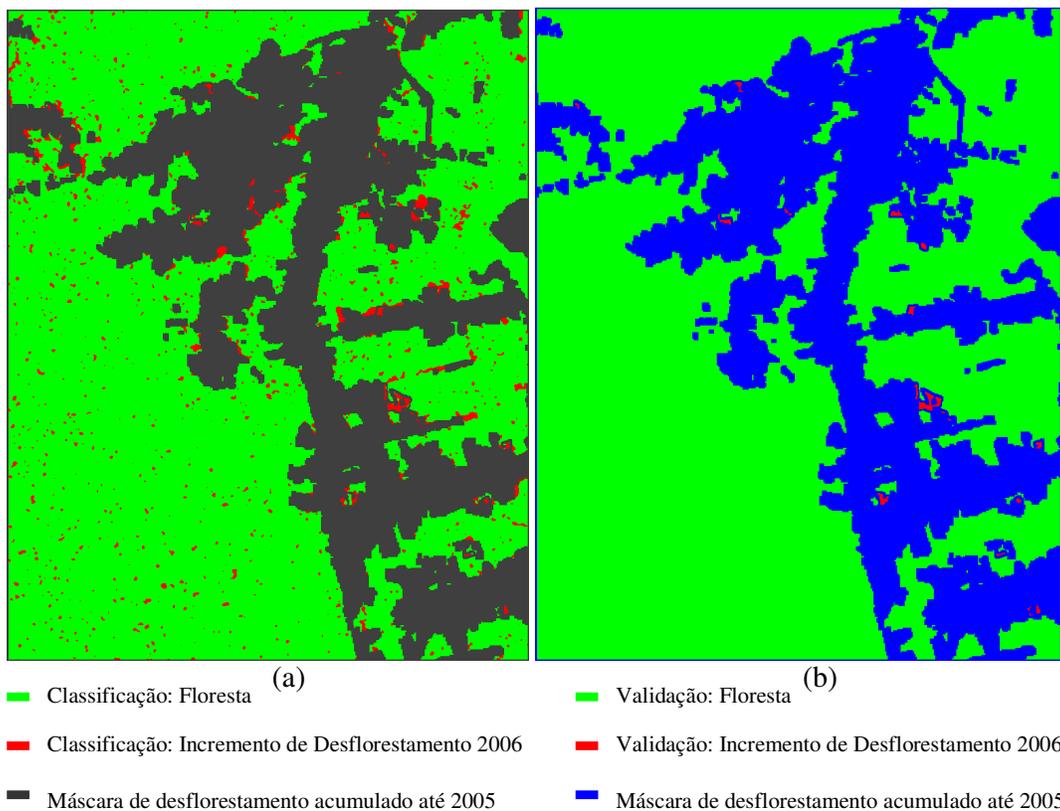


FIGURA 4.14 – Em (a) classificações MAXVER-ICM com maior valor kappa (0,1082) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

O teste z determinou que as seguintes matrizes de confusão das classificações MAXVER-ICM são iguais ao nível de significância de 5%:

- Matriz de confusão da imagem com filtro canal HV (*kappa* de 0,0673) e matriz de confusão da classificação para a imagem sem filtro polarização dual HH+HV (*kappa* de 0,0718). Logo, os resultados indicam que a informação do canal HV da imagem com filtro é equivalente à informação da polarização dual HH+HV.
- Matriz de confusão do conjunto de canais HH+HV+VV na imagem sem filtro (*kappa* 0,0586) e matriz de confusão bivariada HV+VV para a imagem filtrada (*kappa* de 0,0567).

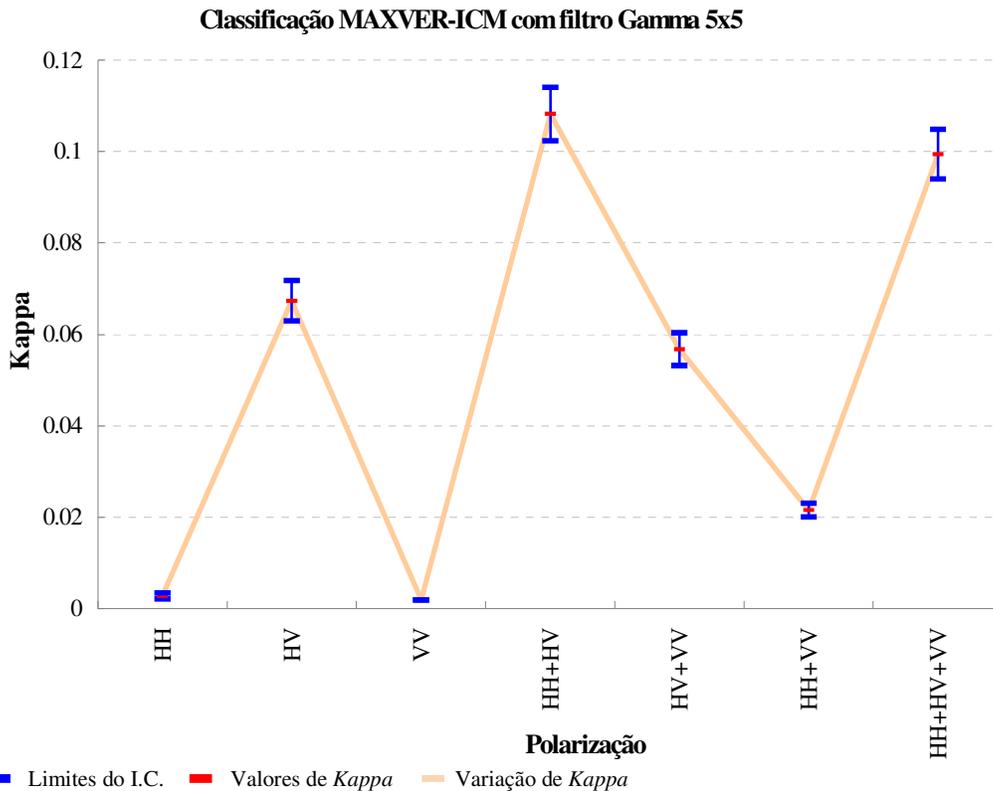


FIGURA 4.15 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

4.2.2 Classificações por regiões utilizando a Distância de Bhattacharyya

Com as amostras da classe floresta e incremento de desflorestamento selecionadas (seção 3.4.2), foram geradas 28 classificações por regiões (14 para a imagem amplitude sem filtro e 14 para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*) as quais serão descritas a seguir.

4.2.2.1 Classificações por regiões para a imagem sem filtro

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) obteve-se um total de 14 classificações, oriundas das 7 segmentações realizadas pelo SPRING e 7 segmentações pelo SEGSAR.

4.2.2.1.1 Segmentação pelo SPRING

A título de informação complementar na comparação com a segmentação pelo SEGSAR, na tabela 4.7 são elucidados o tempo de processamento para a realização da segmentação por crescimento de regiões no SPRING bem como o número de regiões (segmentos) obtidos para cada polarização.

TABELA 4.7 – Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SPRING para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).

Canal da segmentação	Número de regiões	Tempo aproximado de processamento
HH	1597	1 minuto e 9 segundos
HV	1570	1 minuto e 4 segundos
VV	1621	1 minuto e 53 segundos
HH+HV	1492	1 minuto e 14 segundos
HV+VV	1533	1 minuto e 19 segundos
HH+VV	1568	1 minuto e 16 segundos
HH+HV+VV	1457	1 minuto e 5 segundos

Da tabela, evidencia-se que para a segmentação individual, o canal VV apresentou o maior número de segmentos (1621) seguido pelo canal HH e HV. Para as combinações aos pares, o canal HH+VV apresentou o maior número de regiões (1568) seguido pelas combinações HV+VV e HH+HV. Finalmente, a segmentação para o conjunto de canais HH+HV+VV apresentou o menor número de regiões (1457) em comparação com as já citadas. Pode-se concluir ainda que com exceção dos dados multivariados (HH+HV+VV), à medida em que se aumentou o número de canais, o tempo aproximado de processamento da segmentação pelo SPRING também aumentou.

Na figura 4.16 é ilustrado as segmentações (linhas vermelhas) realizadas para cada canal de polarização e classificadas individualmente (a) HH, (b) HV, (c) VV, aos pares (d) HH+HV, (e) HV+VV, (f) HH+VV e em conjunto (g) HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).

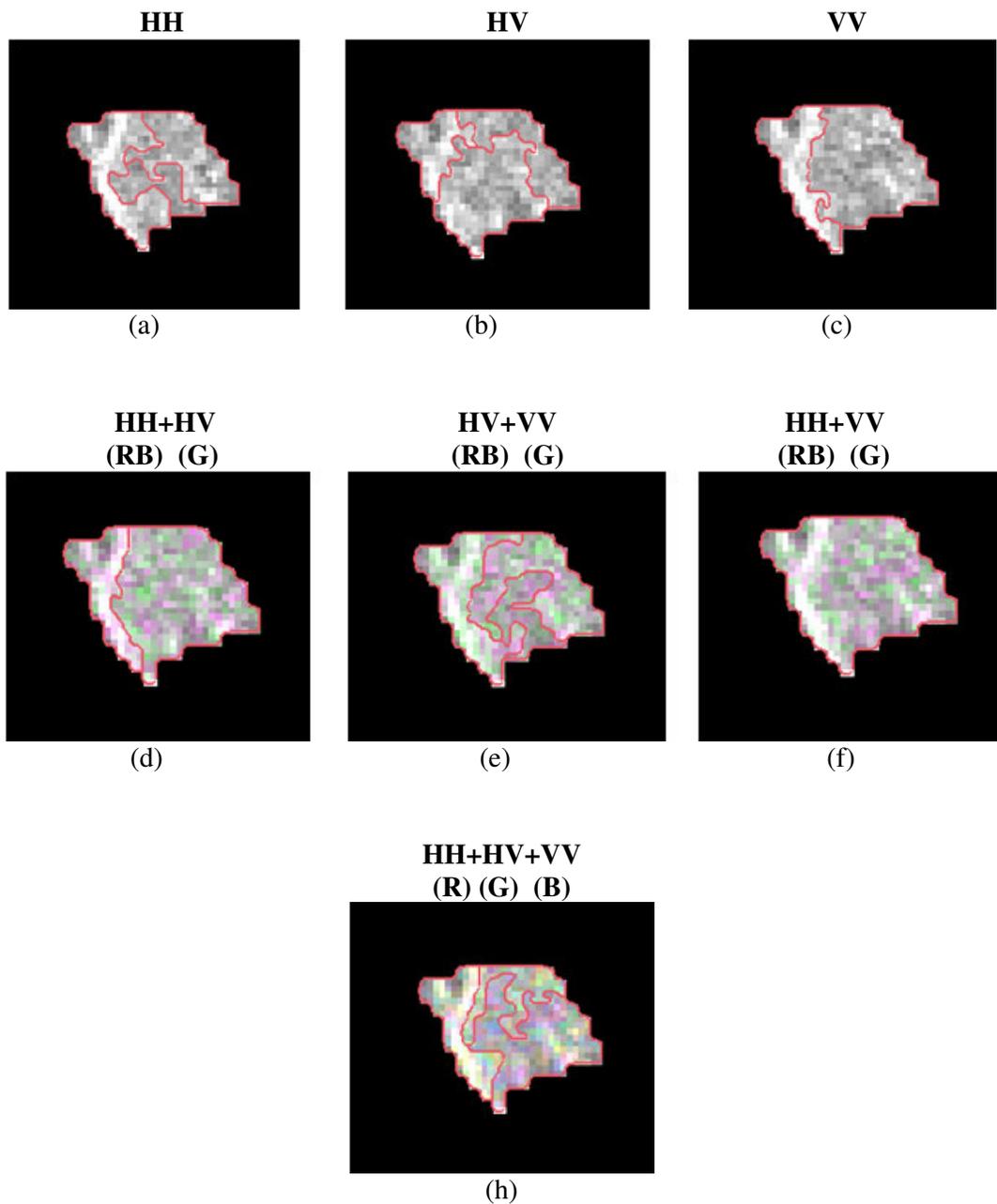


FIGURA 4.16 – Resultado das segmentações (linhas vermelhas) realizadas no SPRING para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as respectivas composições (R, G, B) para cada combinação de canais.

Na tabela 4.8, são evidenciados os resultados para a classificação Bhattacharyya com segmentação pelo SPRING.

TABELA 4.8 – Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SPRING.

Bhattacharyya (sem filtro – segmentação SPRING)							
	Kappa Global \hat{k}	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,1602	Ruim	4,43	36,09	0,1034	89,42	63,91
HV	0,4212	Bom	12,64	50,35	0,3629	63,54	49,65
VV	0,3289	Razoável	13,25	36,09	0,3036	69,46	63,91
HH+HV	0,5085	Bom	12,97	57,29	0,4580	54,06	42,71
HV+VV	0,4399	Bom	13,51	49,10	0,3995	59,90	50,90
HH+VV	0,3692	Razoável	15,27	36,09	0,3798	61,86	63,91
HH+HV+VV	0,5086	Bom	12,91	57,52	0,4567	54,19	42,48

É possível inferir que a classificação por regiões apresentou resultados melhores em comparação com a classificação pontual MAXVER-ICM de acordo com o *kappa* global.

Nas classificações realizadas com apenas um canal, o pior resultado foi obtido para a polarização HH (*kappa* de 0,1602) onde 36,09% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados, comprovando o apresentado nas classificações anteriores de que o canal HH possui limitações para a detecção de incremento de desflorestamento, visto que o erro de omissão foi o maior dentre as classificações Bhattacharyya (63,91%). Para a polarização VV, o classificador por regiões apresentou melhoras em relação ao canal HH, fazendo com que os erros de inclusão fossem menores. Em comparação com o mapa temático do PRODES 2006, o canal HV apresentou o melhor resultado dentre as classificações univariadas (*kappa* de 0,4212), onde para a classe incremento de desflorestamento a acurácia do produtor foi de 50,35%.

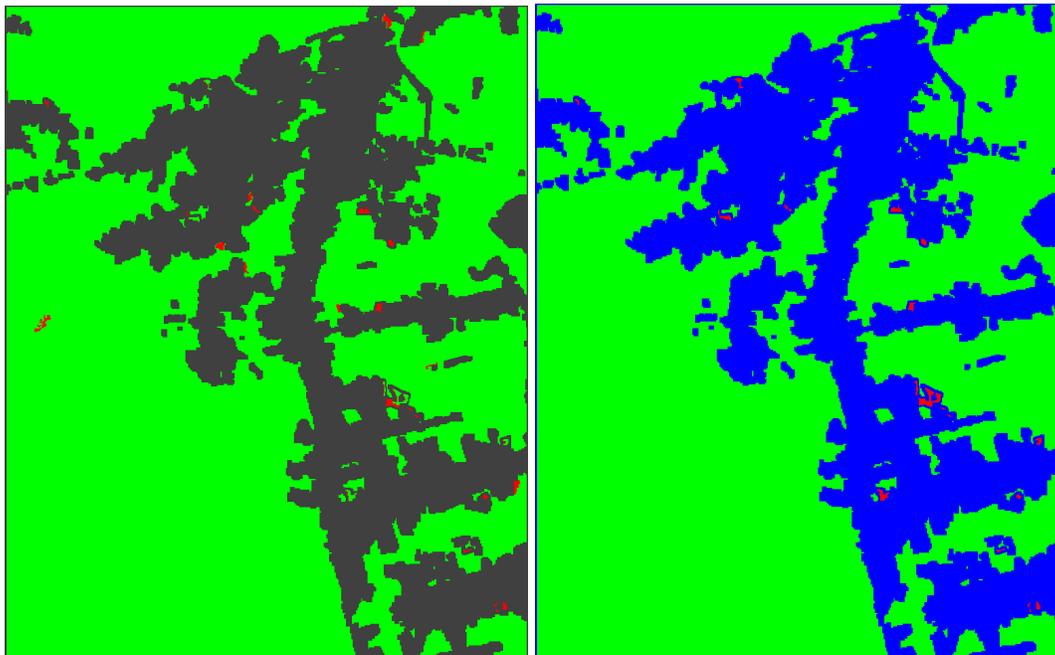
Para as classificações bivariadas, o pior resultado foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+VV (*kappa* de 0,3692 onde 36,09% dos *pixels* da classe

incremento de desflorestamento foram corretamente classificados). Tal combinação apresentou o maior erro de inclusão (61,86%) e omissão (63,91%) para classificação com dois canais.

Das classificações realizadas pelo classificador Bhattacharyya, o maior valor de *kappa* para a classe incremento de desflorestamento foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+HV (*kappa* da classe de 0,4580). De acordo com o critério de Landis e Koch (1977), o *kappa* global da classificação foi de 0,5085, onde a acurácia do produtor foi de 57,29%. A classificação para os três canais em conjunto (HH+HV+VV), apresentou valores próximos aos obtidos para a polarização dual HH+HV. Deste modo, realizou-se o teste z com o intuito de determinar quais as matrizes de confusão das classificações Bhattacharyya para a imagem sem filtro são iguais ao nível de significância de 5%, onde obteve-se que as seguintes matrizes são equivalentes:

- Matriz de confusão do canal HV (*kappa* de 0,4212) e polarização dual HV+VV (*kappa* de 0,4399), sugerindo que a informação do canal HV é equivalente à informação da polarização dual HV+VV.
- Matriz de confusão do conjunto HH+HV+VV (*kappa* 0,5086) e matriz de confusão da classificação HH+HV (*kappa* de 0,5085), indicando que a informação do canal VV pouco influenciou no resultado desta classificação.

A figura 4.17 ilustra em (a) o mapa temático para a classificação Bhattacharyya HH+HV (ANEXO B.8 (a)) e em (b) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.



<p>(a)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005 	<p>(b)</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Validação: Floresta ■ Validação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005
---	--

FIGURA 4.17 – Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa (0,5085) a partir de dados bivariados HH+HV para a imagem amplitude sem filtro segmentadas pelo SPRING e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

A figura 4.18 mostra os intervalos de confiança de 95% para cada um dos coeficientes *kappa* obtidos da tabela 4.8.

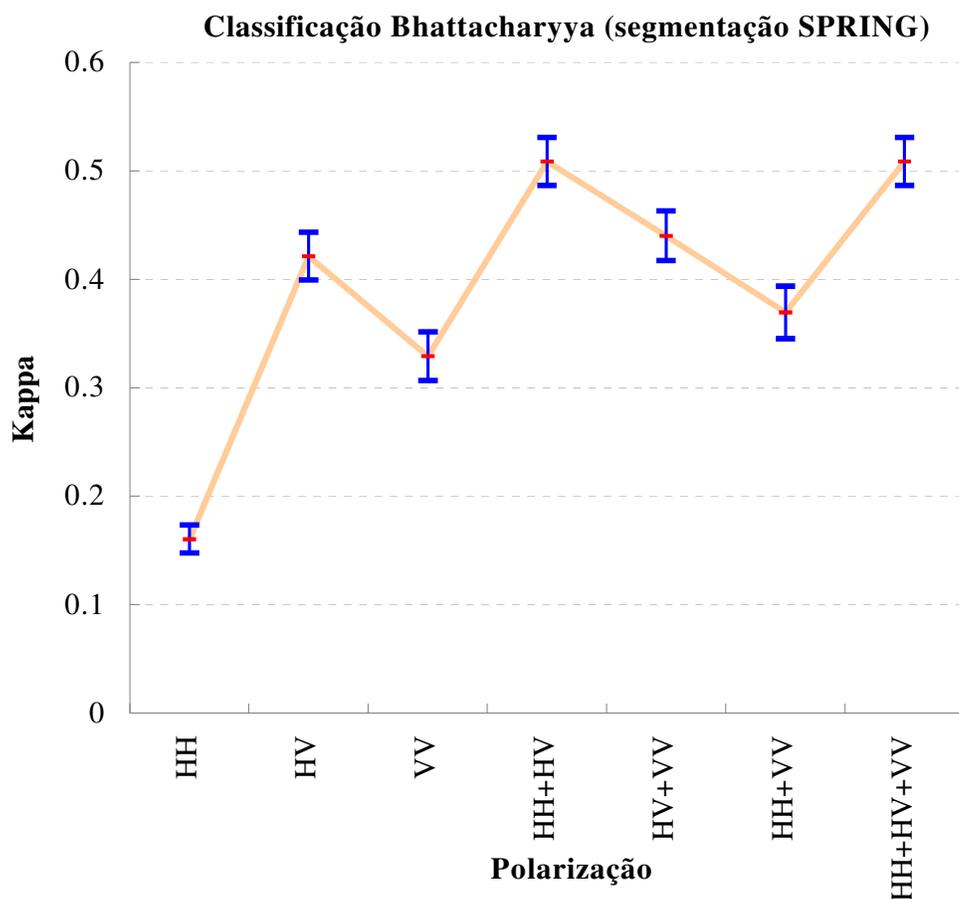


FIGURA 4.18 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações Bhattacharyya segmentadas pelo SPRING na imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

4.2.2.1.2 Segmentação pelo SEGSAR

A título de informação complementar na comparação com a segmentação pelo SPRING, na tabela 4.9, são apresentados o tempo de processamento para a realização da segmentação pelo segmentador SEGSAR bem como o número de regiões (segmentos) obtidos para cada polarização.

Da tabela, evidencia-se que para a segmentação individual, o canal HH apresentou o maior número de segmentos (1070) seguido pelo canal VV e HV. Para as combinações aos pares, o canal HH+HV apresentou o maior número de regiões (1486) seguido pelas

combinações HV+VV e HH+VV. Finalmente, a segmentação para o conjunto de canais HH+HV+VV apresentou o maior número de regiões (1682) em comparação com as já citadas. Pode-se concluir ainda que, à medida que se aumentou o número de canais, o tempo aproximado de processamento da segmentação pelo SEGSAR também aumentou, sendo um valor considerado muito superior em relação ao SPRING para os mesmos parâmetros de entrada.

TABELA 4.9 – Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SEGSAR para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).

Canal da segmentação	Número de regiões	Tempo aproximado de processamento
HH	1070	50 minutos
HV	1021	47 minutos
VV	1060	48 minutos
HH+HV	1486	1 hora e 25 minutos
HV+VV	1433	1 hora e 30 minutos
HH+VV	1420	1 hora e 35 minutos
HH+HV+VV	1682	2 horas e 25 minutos

Na figura 4.19 é ilustrado o resultado das segmentações (linhas amarelas) realizadas no SEGSAR para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (a) HH, (b) HV, (c) VV, aos pares (d) HH+HV, (e) HV+VV, (f) HH+VV e em conjunto (g) HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).

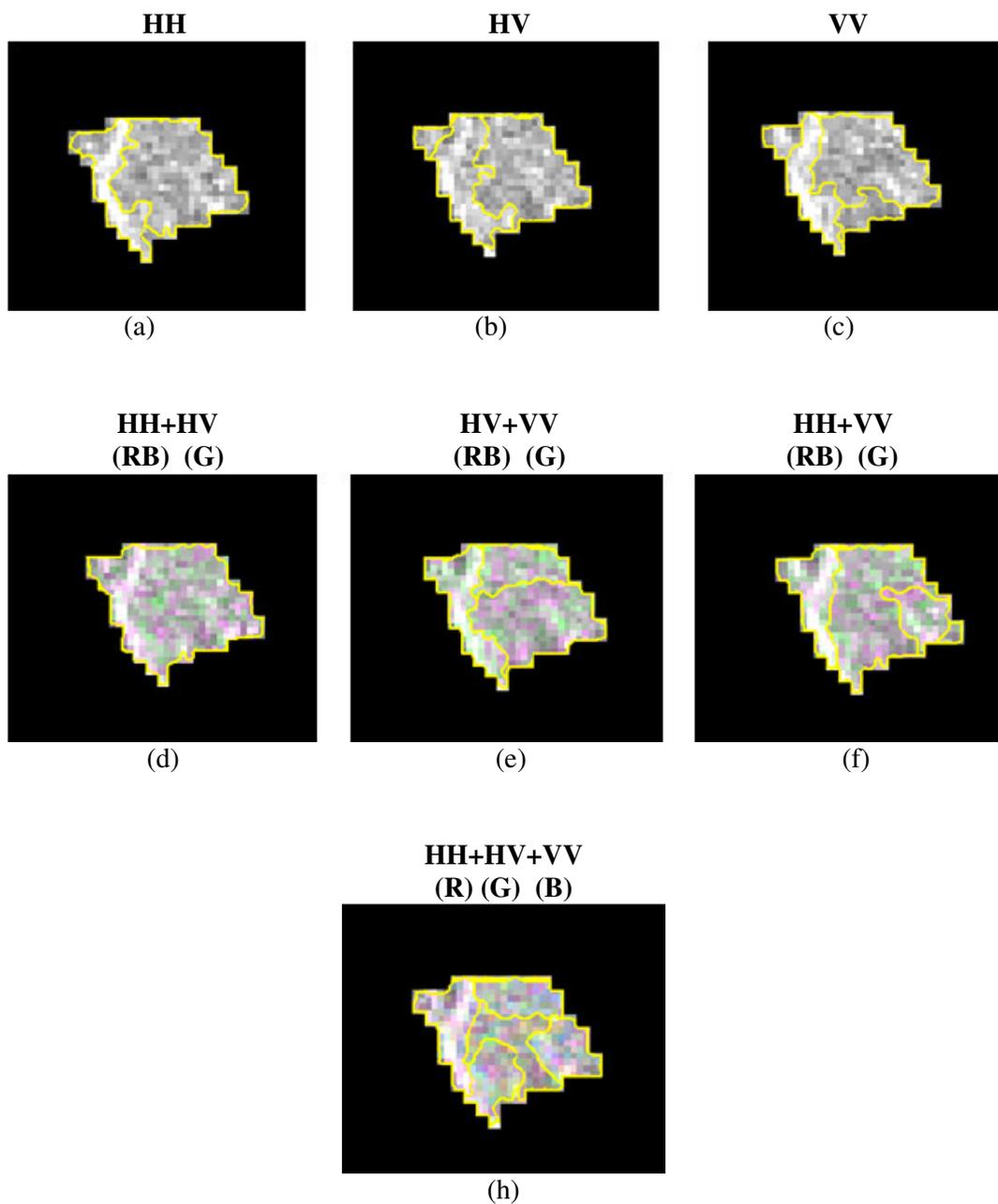


FIGURA 4.19 – Resultado das segmentações (linhas amarelas) realizada no SEGSAR para a imagem amplitude sem filtro, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as respectivas composições (R, G, B) para cada combinação de canais.

Na tabela 4.10, são evidenciados os resultados para a classificação Bhattacharyya com segmentação pelo SEGSAR.

TABELA 4.10 – Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR.

Bhattacharyya (sem filtro – segmentação SEGSAR)							
	Kappa Global \hat{k}	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,2219	Razoável	2,87	92,99	0,1260	87,17	7,01
HV	0,2442	Razoável	3,09	100	0,1391	85,87	0
VV	0,1843	Ruim	2,33	84,96	0,1034	89,43	15,04
HH+HV	0,3862	Razoável	6,23	92,83	0,2439	75,41	7,17
HV+VV	0,3102	Razoável	4,38	100	0,1836	81,43	0
HH+VV	0,2854	Razoável	4,69	83,55	0,1722	82,57	16,45
HH+HV+VV	0,4791	Bom	7,12	99,84	0,3151	68,31	0,16

Da tabela é possível inferir que a classificação por regiões com segmentação SEGSAR apresentou erros de omissão menores em comparação com os mesmos canais para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SPRING (TABELA 4.8), fazendo com que a acurácia do produtor fosse maior. No entanto, com exceção do canal HH, os erros de inclusão para a segmentação do SEGSAR foram maiores.

Nas classificações realizadas com apenas um canal, o pior resultado foi obtido para a polarização VV (*kappa* de 0,1843), onde 84,96% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados e o erro de omissão considerado o maior dentre as classificações univariadas (15,04%). Para a polarização HH, o segmentador SEGSAR obteve melhoria no *kappa* em relação a segmentação do SPRING. Tal melhoria está associada em sua maior parte na diminuição dos erros de omissão pelo segmentador, onde houve um decréscimo de 56,9%. Novamente o canal HV apresentou o melhor resultado em comparação com o mapa temático do PRODES 2006 (*kappa* de 0,2442), onde para a classe incremento de desflorestamento a acurácia do produtor foi de 100%.

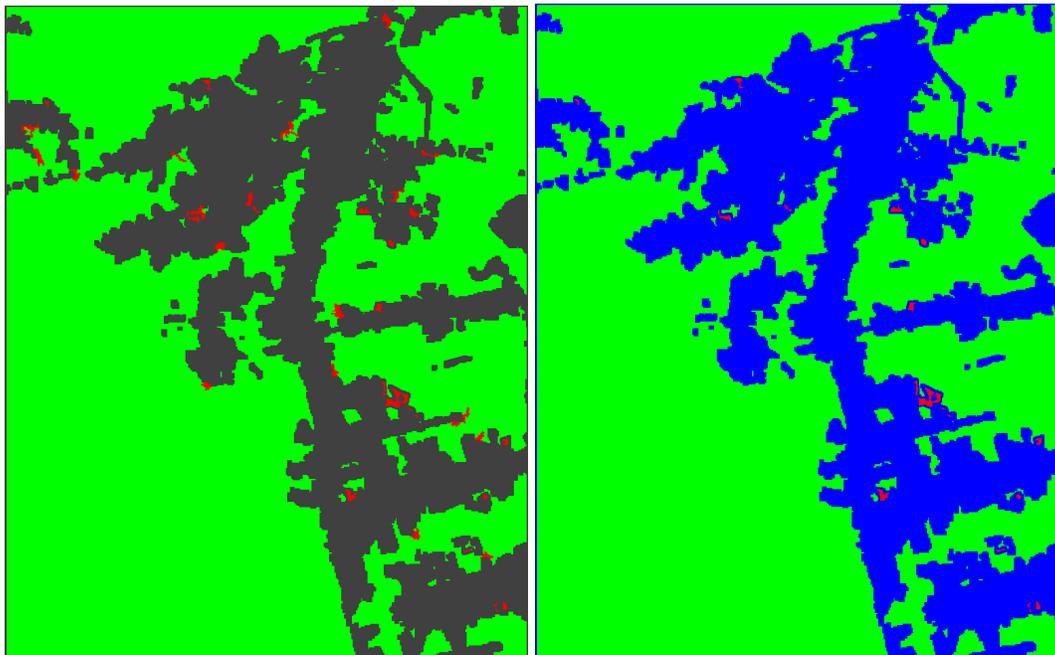
Assim como na segmentação pelo SPRING, para as classificações bivariadas o pior resultado foi obtido quando o canal HV não esteve presente. A combinação de canais HH+VV apresentou o maior erro de inclusão (82,57%) e omissão (16,45%) para as classificações com dois canais. O maior valor de *kappa* (global e para a classe incremento de desflorestamento) foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+HV (*kappa* de 0,3862) onde a acurácia do produtor foi de 92,83%.

A classificação com maior valor *kappa* foi obtida quando utilizou-se os três canais em conjunto (*kappa* de 0,4791), onde o erro de inclusão foi considerado menor em relação as outras classificações utilizando o SEGSAR e o erro de omissão próximo de zero.

De acordo com os valores de *kappa* e variância de *kappa*, o teste z determinou que as seguintes matrizes de confusão são iguais ao nível de significância de 5%:

- Matriz de confusão da classificação da polarização dual HH+HV (*kappa* de 0,3862) segmentada pelo SEGSAR e matriz da classificação HH+VV segmentada pelo SPRING (*kappa* de 0,3692).
- Matriz de confusão da classificação HV+VV (*kappa* de 0,3102) segmentada pelo SEGSAR e matriz univariada VV segmentada pelo SPRING (*kappa* de 0,3289).

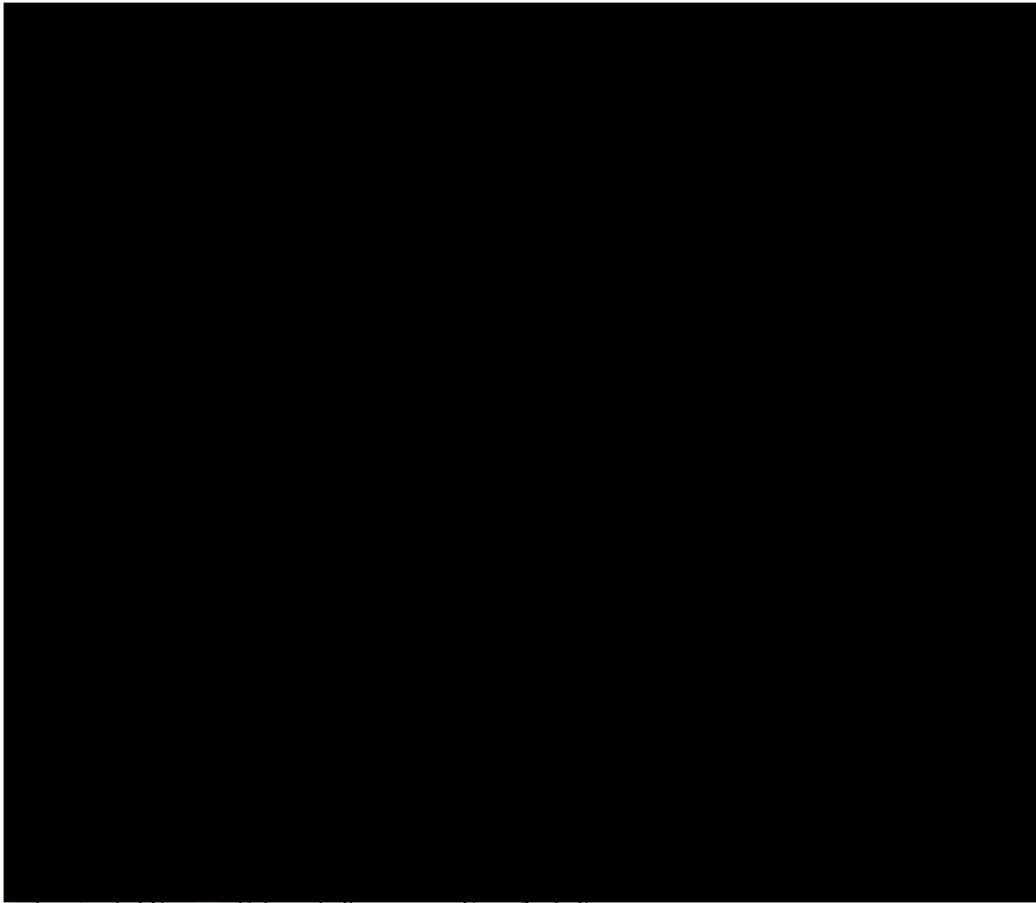
O teste z evidenciou-se ainda que a matriz de confusão de maior *kappa* (HH+HV+VV) não é significativamente igual ao nível de significância de 5% ao de nenhuma outra com segmentação pelo SEGSAR. Assim, a figura 4.20 ilustra em (a) o mapa temático para esta classificação (ANEXO B.12) e em (b) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.



- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Classificação: Floresta (a) ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005 | <ul style="list-style-type: none"> ■ Validação: Floresta (b) ■ Validação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005 |
|--|---|

FIGURA 4.20 – Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor kappa (0,4791) a partir da combinação dos três canais HH+HV+VV para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

A figura 4.21 mostra os intervalos de confiança de 95% para cada um dos coeficientes *kappa* obtidos da tabela 4.10.



■ Limites do I.C. ■ Valores de *Kappa* ■ Variação de *Kappa*

FIGURA 4.21 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações Bhattacharyya segmentadas pelo SEGSAR na imagem amplitude sem filtro classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

4.2.2.2 Classificações por regiões para a imagem com filtro *Gamma 5x5*

Para cada combinação de canais (individualmente, aos pares e em conjunto) obteve-se um total de 14 classificações, resultantes de um total de 14 segmentações para a imagem com filtro *Gamma 5x5*, sendo 7 segmentações pelo SPRING e 7 segmentações pelo SEGSAR.

4.2.2.2.1 Segmentação pelo SPRING

A título de informação complementar na comparação com a segmentação pelo SEGSAR, na tabela 4.11 é elucidado o tempo de processamento para a realização da segmentação por crescimento de regiões no SPRING bem como o número de regiões (segmentos) obtidos para cada polarização para a imagem filtrada.

TABELA 4.11 – Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SPRING para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).

Canal da segmentação	Número de regiões	Tempo aproximado de processamento
HH	1506	1 minuto e 16 segundos
HV	1571	1 minuto e 9 segundos
VV	1526	1 minuto e 11 segundos
HH+HV	1486	1 minuto e 17 segundos
HV+VV	1511	1 minuto e 18 segundos
HH+VV	1443	1 minuto e 11 segundos
HH+HV+VV	1545	1 minuto e 19 segundos

Da tabela, evidencia-se que a segmentação univariada HV apresentou o maior número de segmentos (1571) seguido pelo canal VV e HH. Para as combinações aos pares, o canal HV+VV apresentou o maior número de regiões (1511) seguido pelas combinações HH+HV e HH+VV. Finalmente, a segmentação para o conjunto de canais HH+HV+VV apresentou um total de 1545 segmentos, resultado maior em comparação com as combinações bivariadas. Pode-se concluir ainda que, diferentemente da imagem sem filtro, na imagem com filtro *Gamma* 5x5 à medida que se aumentou o número de canais o número de segmentos tendeu a diminuir. Em comparação com a tabela 4.7, constatou-se que para o canal HH+HV o número de segmentos diminuiu com a utilização do filtro.

Na figura 4.22 é ilustrado o resultado das segmentações (linhas vermelhas) realizadas no SPRING para a imagem amplitude filtrada, classificada individualmente (a) HH, (b) HV, (c) VV, aos pares (d) HH+HV, (e) HV+VV, (f) HH+VV e em conjunto (g) HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).

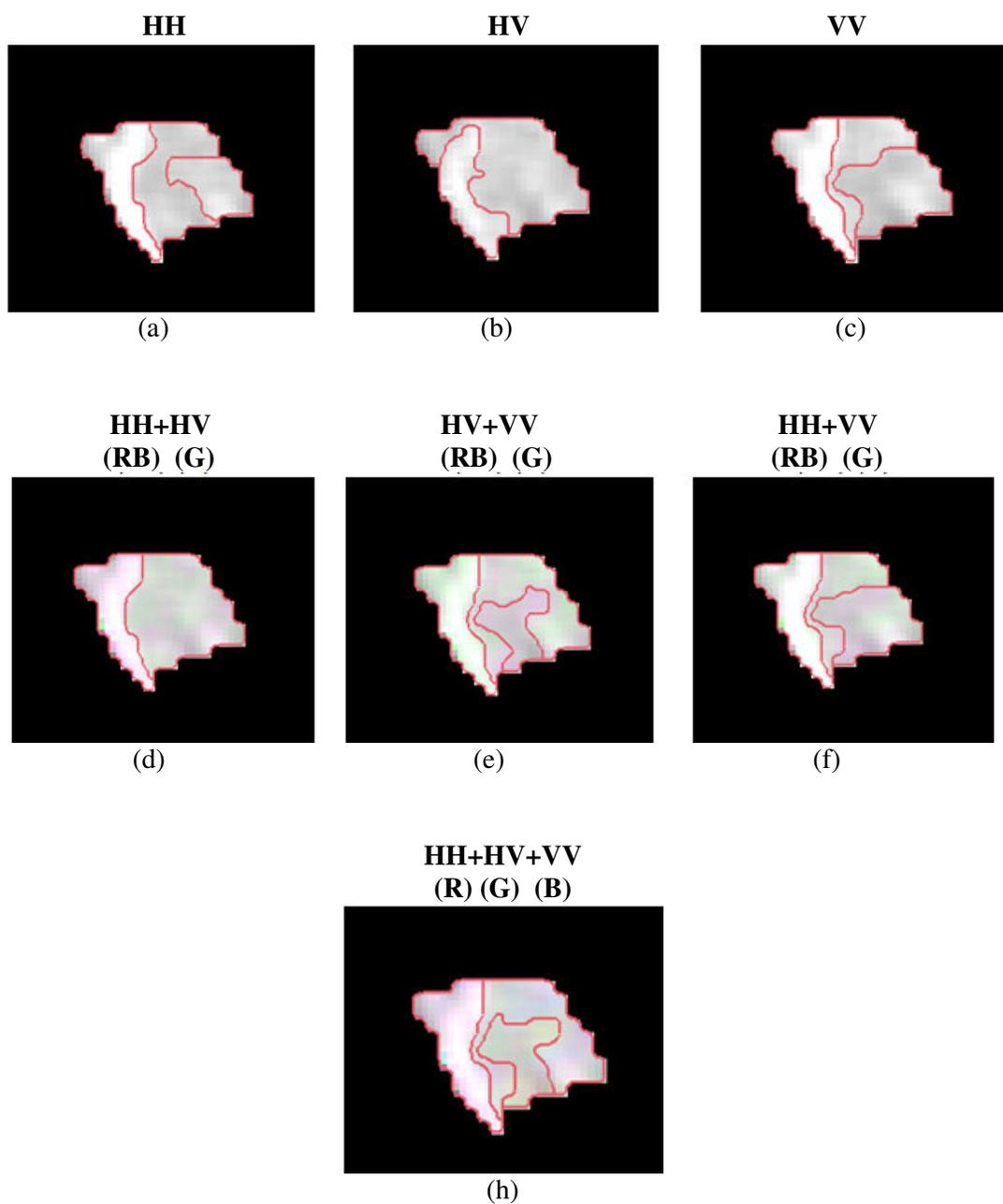


FIGURA 4.22 – Resultado das segmentações (linhas vermelhas) realizadas no SPRING para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as respectivas composições (R, G, B) para cada combinação de canais.

Na tabela 4.12, são evidenciados os resultados para a classificação Bhattacharyya com segmentação pelo SPRING na imagem filtrada.

TABELA 4.12 – Resultado geral das avaliações das classificações Bhattacharyya utilizando segmentação pelo SPRING para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5.

Bhattacharyya (com filtro <i>Gamma</i> 5x5 – segmentação SPRING)							
	Kappa Global \hat{k} (<i>k</i>)	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,3418	Razoável	13,91	36,09	0,3261	67,21	63,91
HV	0,4101	Bom	11,28	54,95	0,3278	67,04	45,05
VV	0,2895	Razoável	11,16	36,09	0,2429	75,52	63,91
HH+HV	0,4440	Bom	7,35	90,80	0,2939	70,42	9,20
HV+VV	0,4188	Bom	10,93	57,91	0,3286	66,96	42,09
HH+VV	0,4406	Bom	11,76	56,51	0,3617	63,66	43,49
HH+HV+VV	0,4421	Bom	7,32	90,80	0,2923	70,59	9,20

É possível inferir que a classificação por regiões para a imagem filtrada, com exceção das classificações para o canal HH e combinação dual HH+VV, apresentou resultados piores em comparação com a classificação Bhattacharyya para a imagem sem filtro (TABELA 4.8) de acordo com o *kappa* global. Tal fato deve-se provavelmente à elevação do número equivalente de *looks* devido a reamostragem inicial por média (conforme elucidado na seção 4.1.1), onde obteve-se a diminuição do ruído *speckle* e deste modo os resultados da tabela 4.12 confirmam que o filtro após esta reamostragem pouco contribuiu para a melhoria das classificações.

Comparando os resultados da tabela 4.12 com os da tabela 4.8, pode-se inferir que com exceção do canal HH, a utilização do filtro *Gamma* 5x5 promoveu o aumento dos erros de inclusão.

Nas classificações realizadas com apenas um canal, o pior resultado foi obtido para a polarização VV (*kappa* de 0,2895) onde 36,09% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados. Para o canal HH, houve uma

diminuição de 22,21% dos erros de inclusão em comparação com a imagem sem filtro segmentada pelo SPRING.

O canal HV novamente apresentou o melhor resultado para as classificações univariadas em comparação com o mapa temático do PRODES 2006 (*kappa* de 0,4101). Para a classe incremento de desflorestamento a acurácia do produtor foi de 54,95%, valor maior em comparação com o mesmo canal na imagem sem filtro (devido ao erro de omissão ter diminuído 4,6%).

Para as classificações bivariadas, o pior resultado foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HV+VV (*kappa* de 0,4188), onde apenas 57,91% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados. A acurácia do produtor foi cerca de 8,81% maior em comparação com o mesmo canal na imagem sem filtro (devido ao menor erro de omissão na imagem filtrada), porém, a utilização do filtro promoveu o aumento do erro de inclusão em 7,06%. Para a combinação de canais HH+VV (*kappa* de 0,4406), o erro de omissão para a classe incremento de desflorestamento diminuiu 20,42%, fazendo com que o *kappa* para a classe fosse o maior em comparação com os outros canais (*kappa* da classe de 0,3617).

Juntamente com a combinação dos três canais, a polarização dual HH+HV apresentou o menor erro de omissão, diminuindo em cerca de 33,51% em comparação com a imagem sem filtro, fazendo com que se obtivesse o maior valor de *kappa* global (*kappa* de 0,4440), onde a acurácia do produtor foi de 90,80%. No entanto, o erro de inclusão aumentou em cerca de 16,36% em relação ao mesmo canal para a imagem sem filtro. A classificação dual HH+VV e a combinação dos três canais em conjunto HH+HV+VV (*kappa* de 0,4421), apresentaram valores próximos aos obtidos para a polarização dual HH+HV.

O teste z determinou que as seguintes matrizes de confusão das classificações Bhattacharyya e segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma* 5x5 são iguais ao nível de significância de 5%:

- Matriz de confusão do canal HH com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,3418) equivalente as matrizes da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada VV (*kappa* de 0,3289) e bivariada HH+VV (*kappa* de 0,3692).
- Matriz de confusão do canal HV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,4101) equivalente a matriz da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada HV (*kappa* de 0,4212).
- Matriz de confusão do canal VV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,2895) equivalente a matriz da imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR na polarização dual HH+VV (*kappa* de 0,2854).
- Matriz de confusão da polarização dual HH+HV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,4440) equivalente as matrizes da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada HV (*kappa* de 0,4212) e bivariada HV+VV (*kappa* de 0,4399).
- Matriz de confusão da polarização dual HV+VV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,4188) equivalente as matrizes da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada HV (*kappa* de 0,4212) e bivariada HV+VV (*kappa* de 0,4399) e do canal HV (*kappa* de 0,4101) na imagem filtrada segmentada pelo SPRING.
- Matriz de confusão da polarização dual HH+VV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,4406) equivalente as matrizes da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada HV (*kappa* de 0,4212) e bivariada HV+VV (*kappa* de 0,4399) e das matrizes também na imagem com filtro segmentada pelo SPRING nos canais HH+HV (*kappa* de 0,4440) e HV+VV (*kappa* de 0,4188).
- Matriz de confusão da polarização dual HH+HV+VV com segmentação SPRING para a imagem com filtro *Gamma 5x5* (*kappa* de 0,4421) equivalente

as matrizes da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização univariada HV ($kappa$ de 0,4212) e bivariada HV+VV ($kappa$ de 0,4399) e das matrizes na imagem com filtro segmentada pelo SPRING nos canais HH+HV ($kappa$ de 0,4440) e HH+VV ($kappa$ de 0,4406).

A figura 4.23 ilustra em (a) o mapa temático para a classificação de maior $kappa$ global e menor erro de omissão HH+HV (ANEXO B.14 (a)) e em (b) o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.

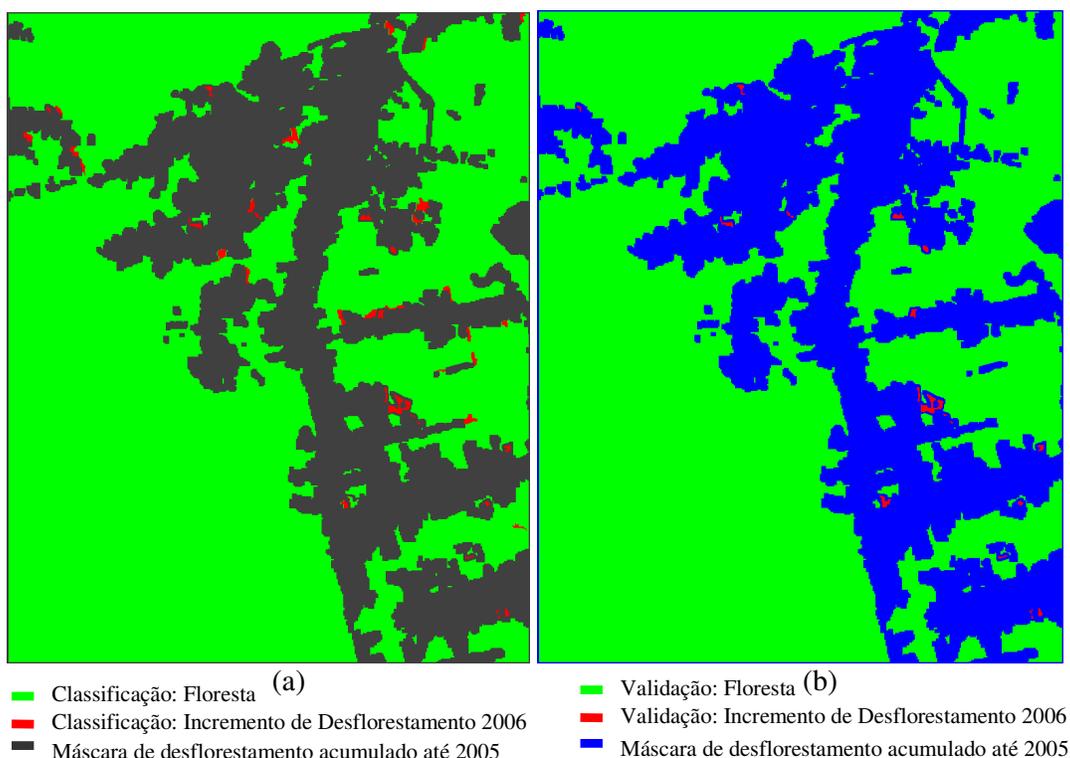


FIGURA 4.23 – Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor $kappa$ global (0,4440) a partir da combinação dual HH+HV para a imagem amplitude com filtro Γ 5x5 e segmentação pelo SPRING e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

A figura 4.24 mostra os intervalos de confiança de 95% para cada um dos coeficientes $kappa$ obtidos da tabela 4.12.

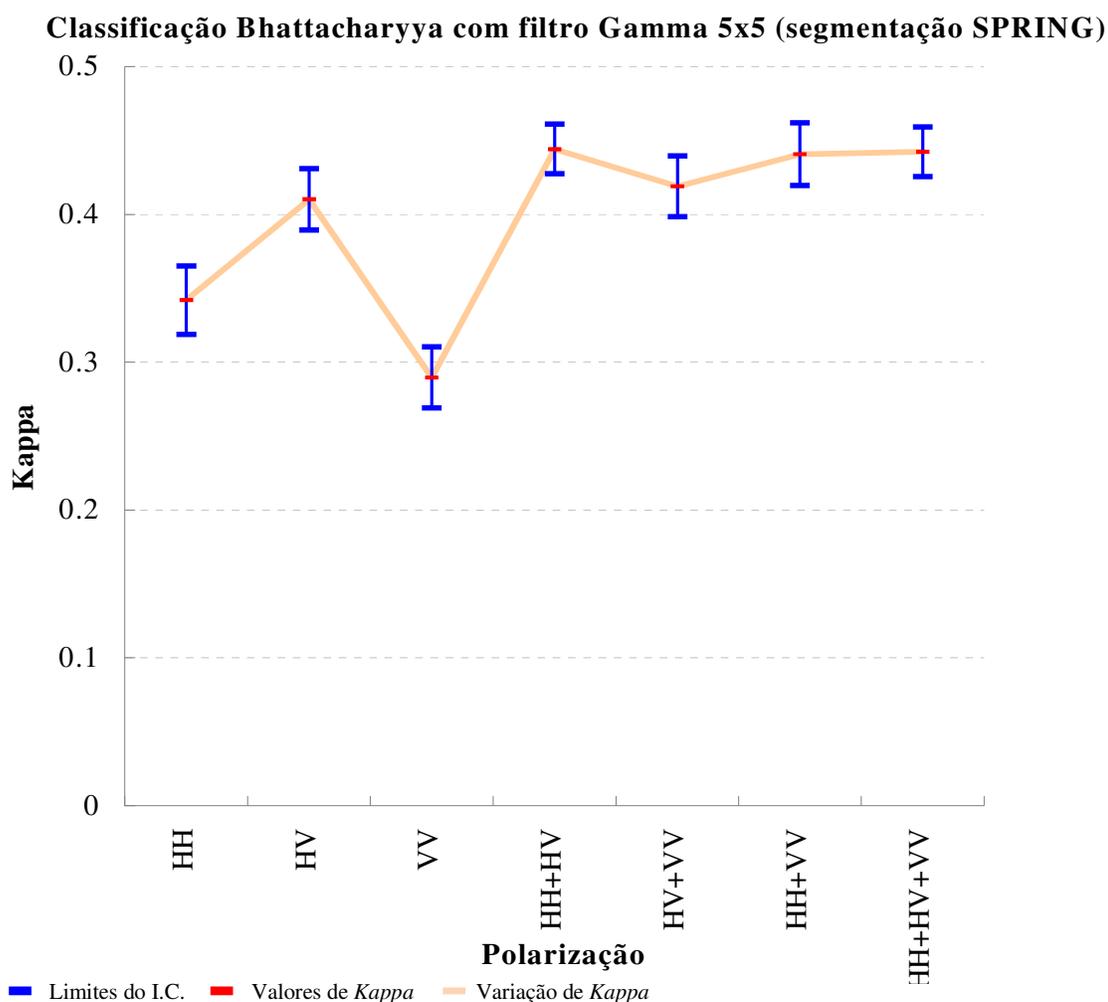


FIGURA 4.24 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 segmentadas pelo SPRING classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

4.2.2.2.2 Segmentação pelo SEGSAR

Para comparação com a segmentação pelo SPRING, na tabela 4.13, são apresentados o tempo de processamento para a realização da segmentação pelo segmentador SEGSAR bem como o número de regiões (segmentos) obtidos para cada polarização.

Da tabela, evidencia-se que: assim como para a segmentação SEGSAR da imagem sem filtro, para as segmentações individuais, o canal HH apresentou o maior número de

segmentos (1022) seguido pelo canal VV e HV. Para as combinações aos pares, o canal HH+HV apresentou o maior número de regiões (1417) seguido pelas combinações HV+VV e HH+VV. Finalmente, a segmentação para o conjunto de canais HH+HV+VV apresentou o maior número de regiões (1561) em comparação com as já citadas. Pode-se concluir ainda que a medida em que se aumentou o número de canais, o tempo aproximado de processamento da segmentação pelo SEGSAR também aumentou, sendo um valor considerado muito superior em relação ao SPRING para os mesmos parâmetros de entrada, porém inferior ao da segmentação realizada pelo SEGSAR na imagem sem filtro, visto que o número de segmentos também foi inferior.

TABELA 4.13 – Número de regiões e tempo de processamento da segmentação realizada pelo SEGSAR para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5, classificada individualmente (HH, HV, VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+VV+HV).

Canal da segmentação	Número de regiões	Tempo aproximado de processamento
HH	1022	41 minutos
HV	970	35 minutos
VV	987	40 minutos
HH+HV	1417	56 minutos
HV+VV	1383	53 minutos
HH+VV	1338	55 minutos
HH+HV+VV	1561	1 hora e 12 minutos

Na figura 4.25 é ilustrado o resultado das segmentações (linhas amarelas) realizadas no SEGSAR, classificada individualmente (a) HH, (b) HV, (c) VV, aos pares (d) HH+HV, (e) HV+VV, (f) HH+VV e em conjunto (g) HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B).

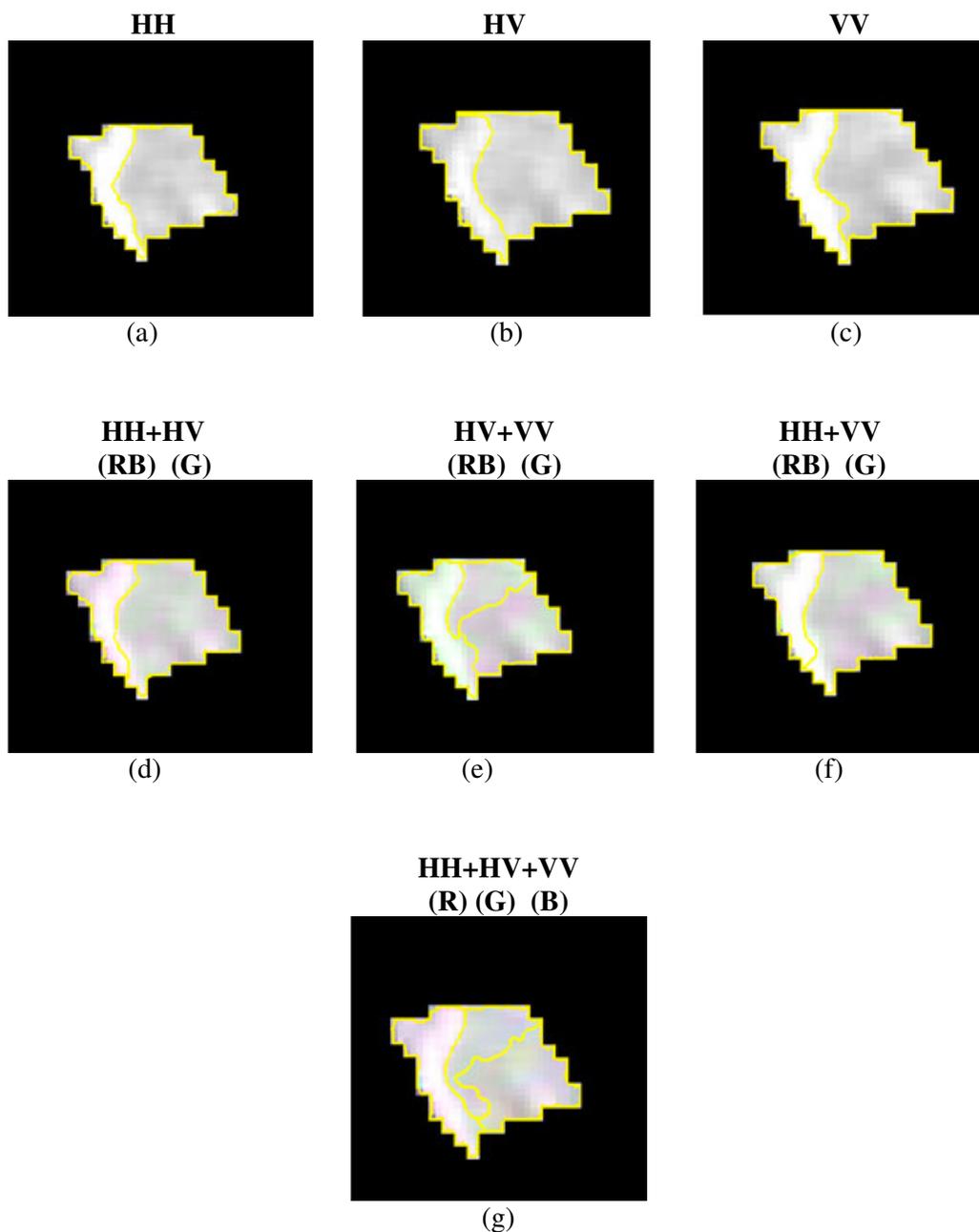


FIGURA 4.25 – Resultado das segmentações (linhas amarelas) realizadas no SEGSAR para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5, classificada individualmente (a)HH, (b)HV, (c)VV, aos pares (d)HH+HV, (e)HV+VV, (f)HH+VV e em conjunto (g)HH+HV+VV. Em preto encontra-se a máscara de desmatamento acumulado até 2005 e ao fundo a imagem ALOS/PALSAR com as composições (R, G, B) para cada combinação de canais.

Na tabela 4.14, são evidenciados os resultados para a classificação SEGSAR na imagem com filtro.

TABELA 4.14 – Resultado geral das avaliações das classificações por regiões Bhattacharyya utilizando segmentação pelo SEGSAR para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

Bhattacharyya (com filtro <i>Gamma 5x5</i> – segmentação SEGSAR)							
	Kappa Global \hat{k} (<i>k</i>)	Conceito	$\hat{\sigma}_k^2$ (10^{-5})	Classe incremento de desflorestamento			
				A.P. (%)	Kappa	Erro de inclusão (%)	Erro de omissão (%)
HH	0,1493	Ruim	1,92	72,64	0,0833	91,43	27,36
HV	0,1730	Ruim	1,76	100	0,0947	90,29	0
VV	0,1578	Ruim	2,14	71,71	0,0888	90,89	28,29
HH+HV	0,3454	Razoável	5,21	96,96	0,2101	78,78	3,04
HV+VV	0,3189	Razoável	4,78	95,32	0,1915	80,64	4,68
HH+VV	0,4428	Bom	6,91	96,18	0,2876	71,05	3,82
HH+HV+VV	0,4697	Bom	7,30	95,87	0,3111	68,71	4,13

É possível evidenciar que, com exceção das classificações para o canal HV+VV e HH+VV, as classificações por regiões para a imagem filtrada e segmentação pelo SEGSAR apresentaram resultados piores em comparação com a classificação Bhattacharyya para a imagem sem filtro com segmentação pelo SEGSAR (TABELA 4.10) de acordo com o *kappa* global. Do mesmo modo que na análise descrita pela segmentação do SPRING, a utilização do filtro promoveu o aumento dos erros de inclusão.

Nas classificações realizadas com apenas um canal, o canal HV novamente apresentou o melhor resultado em comparação com o mapa temático do PRODES 2006 (*kappa* de 0,1730). No entanto, apesar do erro de omissão ter sido nulo provocando uma acurácia para a classe incremento de 100%, o erro de inclusão foi considerado alto (90,29%). O pior resultado foi obtido para a polarização HH (*kappa* de 0,1493) onde 72,64% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados, acarretando em um aumento de 20,35% dos erros de omissão e 4,26% dos erros de inclusão em comparação com a segmentação realizada pelo SEGSAR na imagem sem

filtro. Para o canal VV, o aumento do erro de omissão foi de 13,25% e do erro de inclusão de 1,46%.

Para as classificações bivariadas, bem como para a imagem com filtro segmentada pelo SPRING, o pior resultado foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HV+VV ($kappa$ de 0,3189), onde 95,32% dos *pixels* da classe incremento de desflorestamento foram corretamente classificados. A acurácia do produtor foi cerca de 4,68% menor em comparação com o mesmo canal na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR (devido ao menor erro de omissão na imagem sem filtro), porém, neste caso a utilização do filtro promoveu a diminuição do erro de inclusão em 0,79%, fazendo com que o valor $kappa$ fosse próximo ao encontrado na tabela 4.10 para a imagem sem filtro ($kappa$ de 0,3102).

Apesar da polarização dual HH+HV ter obtido o segundo maior acerto de *pixels* para a classe incremento de desflorestamento (96,96%), diferentemente dos resultados anteriores o melhor resultado para a polarização dual foi obtido quando se utilizou a combinação de canais HH+VV ($kappa$ de 0,4428), a qual para a classe incremento de desflorestamento diminuiu cerca de 12,63% dos erros de omissão e 11,52% dos erros de inclusão em comparação com a imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR, fazendo com que a acurácia do produtor fosse de 96,18%. A polarização dual HH+HV apresentou diminuição de 4,13% dos erros de omissão e aumento de 3,37% dos erros de inclusão em comparação com a imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR.

A classificação com maior valor $kappa$ foi obtida quando utilizou-se a combinação dos três canais HH+HV+VV ($kappa$ de 0,4697), a qual obteve o menor erro de inclusão para segmentação SEGSAR na imagem com filtro *Gamma* 5x5 (68,71%). O erro de omissão foi cerca de 3,97% superior em relação a segmentação SEGSAR na imagem sem filtro.

Do mesmo modo que nas classificações sem filtro, da tabela 4.14 é possível inferir ainda que a segmentação realizada pelo SEGSAR na imagem filtrada, apresentou erros de omissão menores em comparação com os mesmos canais para a imagem amplitude com filtro segmentada pelo SPRING.

O teste z determinou que as seguintes matrizes de confusão das classificações Bhattacharyya segmentadas pelo SEGSAR para a imagem com filtro *Gamma* 5x5 são iguais ao nível de significância de 5%:

- Matrizes de confusão do canal HH (*kappa* de 0,1493), HV (*kappa* de 0,1730) e VV (*kappa* de 0,1578) são equivalentes a matriz da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização HH (*kappa* de 0,1602).
- Matriz de confusão da polarização dual HH+HV (*kappa* de 0,3454) equivalente as matrizes segmentadas pelo SPRING na imagem sem filtro polarização univariada VV (*kappa* de 0,3289) e na imagem com filtro canal HH (*kappa* de 0,3418).
- Matriz de confusão da polarização dual HV+VV (*kappa* de 0,3189) equivalente a matriz da imagem sem filtro segmentada pelo SPRING na polarização VV (*kappa* de 0,3289) e a matriz segmentada pelo SEGSAR na imagem sem filtro canal HV+VV (*kappa* de 0,3102).
- Matriz de confusão da polarização HH+VV (*kappa* de 0,4428) equivalente as matrizes das imagens segmentadas pelo SPRING na imagem sem filtro polarização HV (*kappa* de 0,4212) e HV+VV (*kappa* de 0,4399) e na imagem com filtro canal HH+HV (*kappa* de 0,4440), HH+VV (*kappa* de 0,4406) e HH+HV+VV (*kappa* de 0,4421).
- Matriz de confusão do conjunto de canais HH+HV+VV (*kappa* de 0,4697) equivalente a matriz da imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para o conjunto HH+HV+VV (*kappa* de 0,4791).

A figura 4.26 ilustra em (a) o mapa temático da classificação de maior *kappa* HH+HV+VV (ANEXO B.18) obtida da tabela 4.14, a qual ao nível de significância de 5% não é estatisticamente igual ao de nenhuma outra classificação da tabela. Em (b) encontra-se o mapa do PRODES 2006 utilizado na validação das classificações.

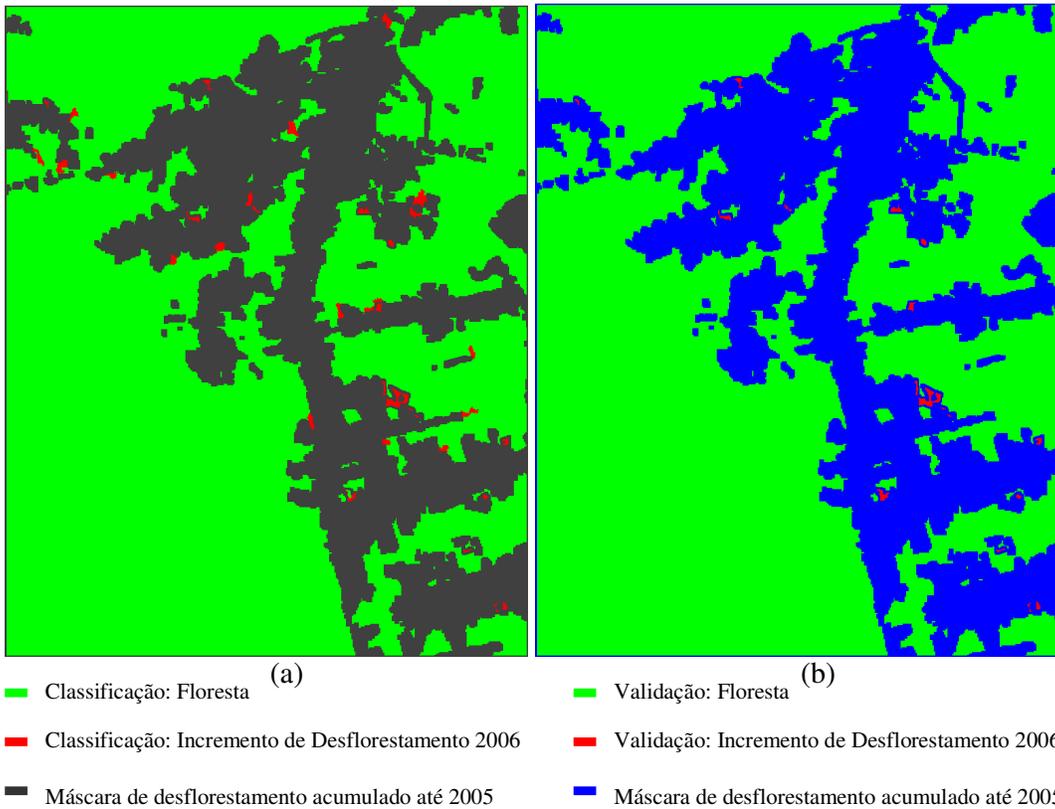


FIGURA 4.26 – Em (a) classificações Bhattacharyya com maior valor $kappa$ global (0,4791) a partir da combinação HH+HV+VV para a imagem amplitude com filtro Γ 5x5 e segmentação pelo SEGSAR e em (b) Mapa PRODES 2006 utilizado na validação.

A figura 4.27 mostra os intervalos de confiança de 95% para cada um dos coeficientes $kappa$ obtidos da tabela 4.14.

Classificação Bhattacharyya com filtro Gamma 5x5 (segmentação SEGSAR)

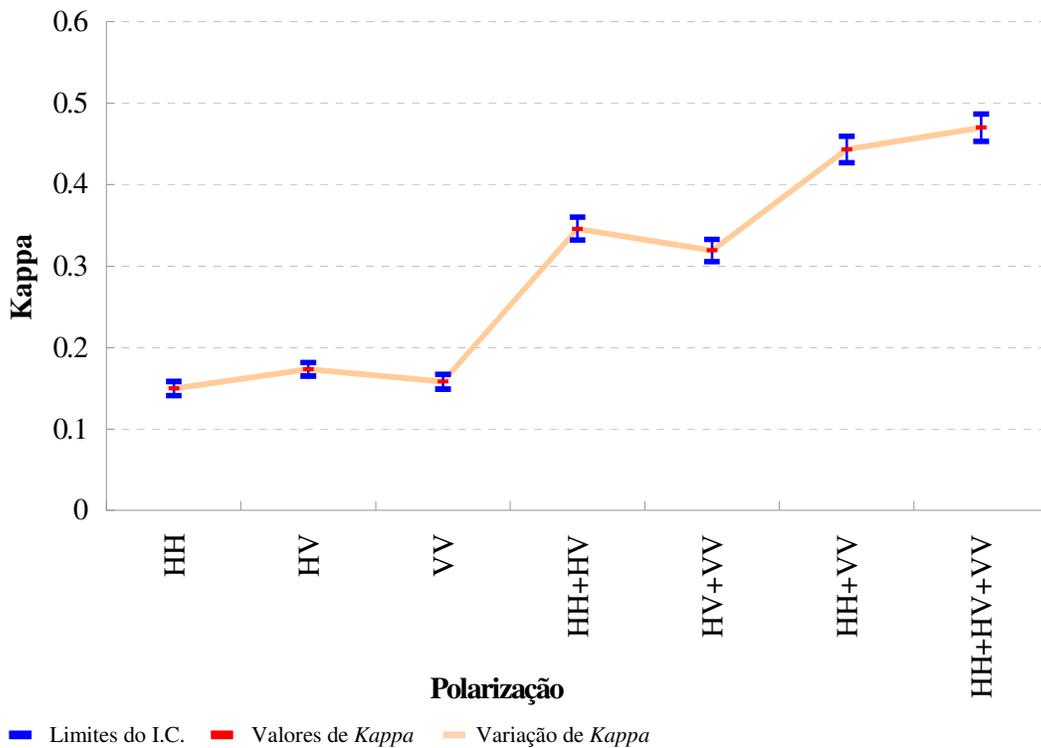
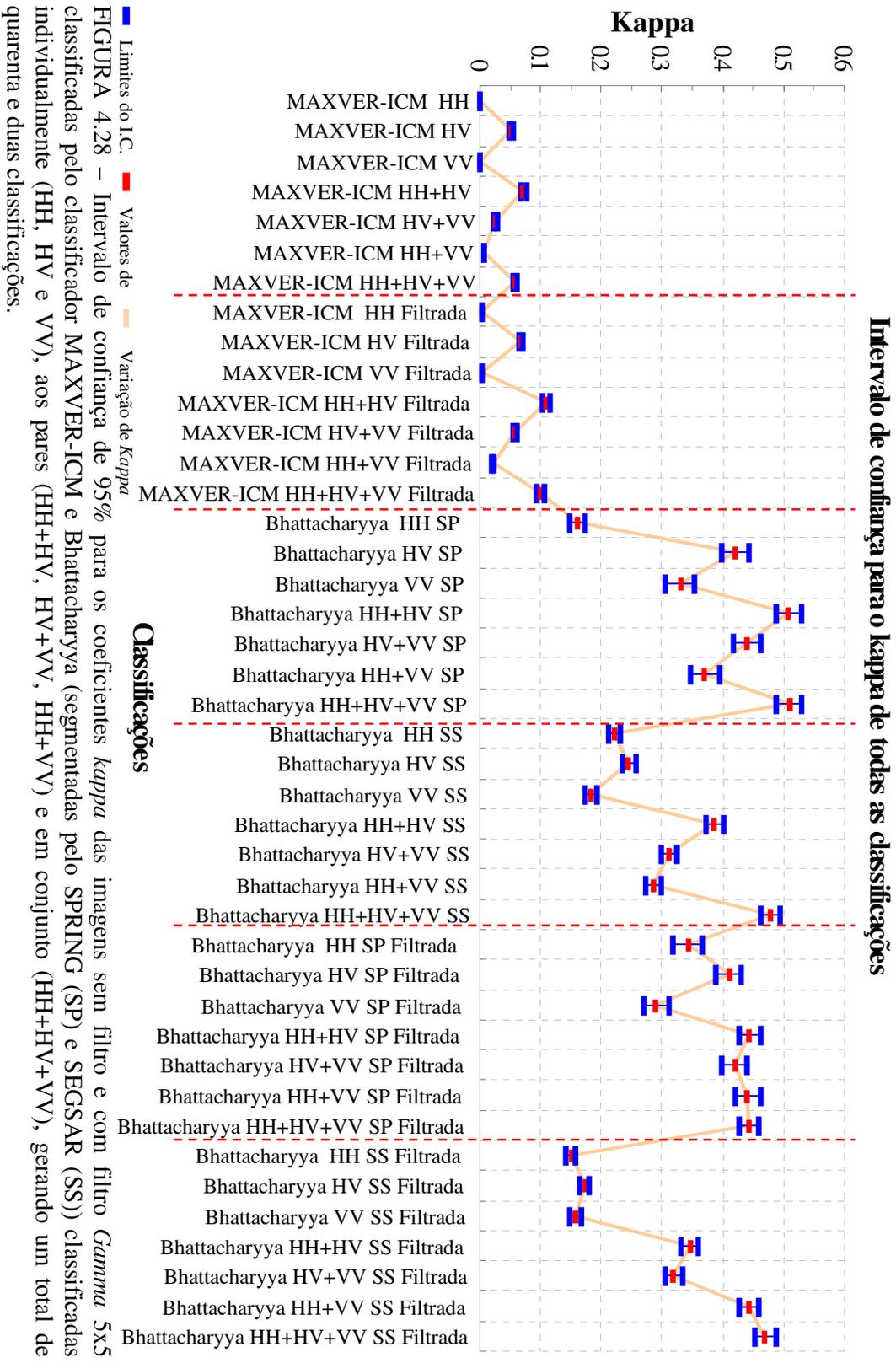


FIGURA 4.27 – Intervalo de confiança de 95% para os coeficientes *kappa* das classificações Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR classificada individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV).

Na figura 4.28 é ilustrado o intervalo de confiança com 95% para o coeficiente *kappa* de todas as classificações. Diante dos resultados apresentados, evidenciou-se que as melhores classificações, de acordo com a validação do mapa gerado a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES 2006, foram obtidas quando a polarização HV esteve presente. Comprovou-se ainda que em geral, os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou a polarização dual HH+HV.



No Anexo B.19 encontra-se o intervalo de confiança com 95% para o coeficiente *kappa* de todas as classificações ordenados por canal.

A tabela 4.15 apresenta os valores *kappa* e acurácia do produtor para os classificadores MAXVER-ICM e Bhattacharyya (SPRING e SEGSAR) para as imagens sem filtro (N) e com filtro (S) para um (HV), dois (HH+HV) e três canais (HH+HV+VV) onde em geral a presença da polarização HV obteve os maiores valores de índices *kappa*. As cores iguais na tabela indicam as classificações que são estatisticamente iguais entre si ao nível de significância de 5%, as demais classificações foram consideradas estatisticamente diferentes ao nível de confiança de 95%.

TABELA 4.15 – Maiores valores *kappa* e acurácia do produtor (A.P.) para os classificadores MAXVER-ICM e Bhattacharyya onde em geral a polarização HV esteve presente. As cores iguais na tabela referem-se as classificações que são iguais entre si ao nível de significância de 5%.

Classificador	Filtro S/N	3 Canais (HH+HV+VV)		2 Canais (HH+HV)		1 Canal (HV)	
		<i>Kappa</i>	A.P. (%)	<i>Kappa</i>	A.P. (%)	<i>Kappa</i>	A.P. (%)
MAXVER-ICM	N	0,0586	80,05	0,0718	76,07	0,0506	61,26
	S	0,0994	88,39	0,1082	88,07	0,0673	66,10
Bhattacharyya SPRING	N	0,5086	57,52	0,5085	57,29	0,4212	50,35
	S	0,4421	90,80	0,4440	90,80	0,4101	54,95
Bhattacharyya SEGSAR	N	0,4791	99,84	0,3862	92,83	0,2442	100
	S	0,4697	95,87	0,3454	96,96	0,1730	100

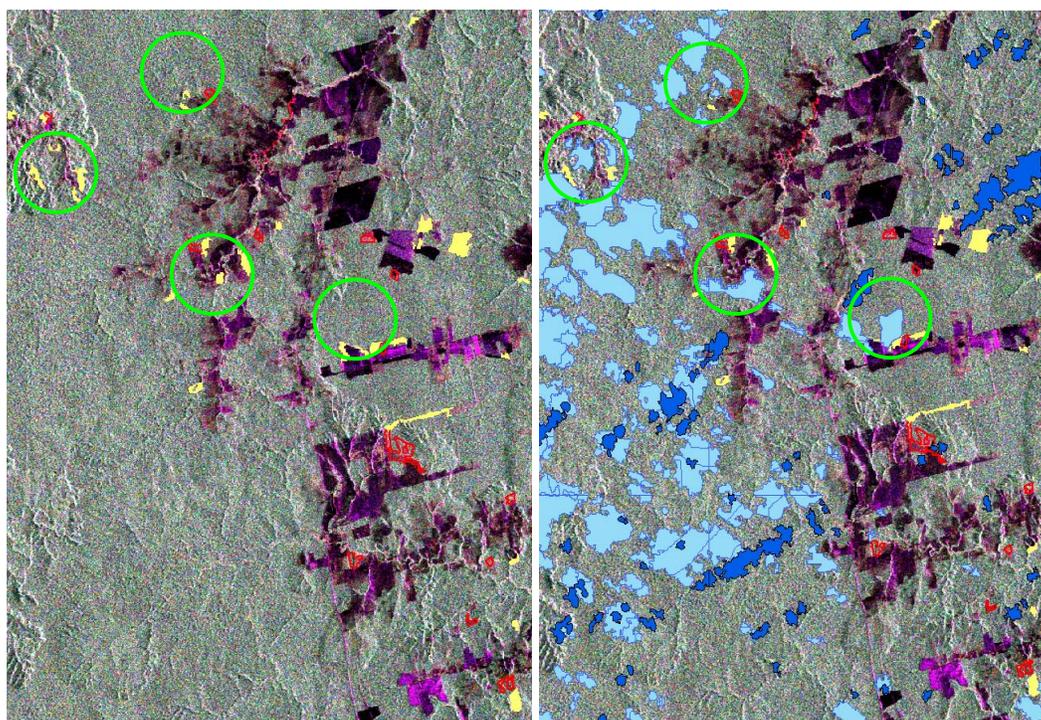
Diante dos resultados apresentados na figura 4.28 e da tabela 4.15, pode-se concluir que o mapa temático com melhor concordância com o mapa do PRODES 2006 foi obtido quando utilizou-se o classificador Bhattacharyya na imagem amplitude sem filtro segmentada pelo SPRING utilizando os canais bivariados HH+HV o qual obteve maior valor *kappa* (0,5085). No entanto, a acurácia do produtor foi relativamente menor em comparação com as outras combinações de polarizações devido ao erro de omissão ter sido de 42,71%. Para as demais combinação de canais HH+HV, o menor erro de omissão foi obtido quando utilizou-se respectivamente a segmentação pelo SEGSAR na imagem com filtro (E.O. de 3,04%), sem filtro (E.O. de 7,17%) e segmentação pelo SPRING na imagem com filtro (E.O. de 9,20%). Porém, em todas estas classificações o

erro de inclusão foi maior em relação a classificação de maior $kappa$ (E.I. de 54,06%), sendo respectivamente de 78,78%, 75,41% e 70,42%.

Deste modo, na seção seguinte realizou-se uma análise mais minuciosa do melhor resultado encontrado, já que na maioria das vezes, embora as classes sejam outras, alguns trabalhos evidenciam que os resultados apresentados pela segmentação do SEGSAR apresentam valores $kappa$ superiores para as classificações em relação as classificações que utilizam a segmentação pelo SPRING (ABOUD NETA et al., 2009; DUTRA et al., 2007, 2008). Assim, devido as classificações mencionadas anteriormente terem um menor erro de omissão (porém com um número maior de erros de inclusão), as mesmas também foram analisadas separadamente, visto que de acordo com a tabela 4.15 as matrizes de confusão das classificações Bhattacharyya HH+HV para a imagem sem filtro e com filtro segmentadas pelo SPRING e pelo SEGSAR são estatisticamente diferentes entre si ao nível de significância de 5%.

4.3 Análise para as classificações HH+HV

A figura 4.29 ilustra a imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) em (a) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (polígonos vermelhos) e 2007 (polígonos amarelos) e em (b) a sobreposição da classe nuvem dos anos de 2005, 2006 (obtidas pelo PRODES 2006 e ilustradas na cor azul claro) e do ano de 2007 (obtidas pelo PRODES 2007 e referenciadas na cor azul escuro). De acordo com os dados disponibilizados pelo PRODES, em 2007 ocorreram 5598 *pixels* de incremento de desflorestamento distribuídos em 57 polígonos. Na figura 4.29 (b), é possível evidenciar pelo exemplo dos círculos verdes que alguns dos polígonos mapeados como incremento de desflorestamento em 2007 estavam sob nuvens nos dados disponibilizados pelo PRODES 2006. Dos 57 polígonos mapeados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007, 10 estavam sob nuvem desde 2005 e 16 sob nuvem no mapeamento realizado em 2006.



(a)

(b)

- Incremento de desflorestamento em 2006
- Incremento de desflorestamento em 2007
- Nuvens na imagem utilizada pelo PRODES 2006
- Nuvens na imagem utilizada pelo PRODES 2007
- Exemplo de Incremento de desflorestamento em 2007, sob nuvem no ano anterior

FIGURA 4.29 – Imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) em (a) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (cor vermelha) e 2007 (cor amarela) e em (b) sobreposição da classe nuvem obtida do PRODES 2006.

Como análise complementar dos resultados, na figura 4.30 (a) a cor azul claro representa os polígonos mapeados pelo PRODES 2007 que estavam sob nuvem desde 2005 e em (b) é possível evidenciar os polígonos sob nuvem desde 2006.

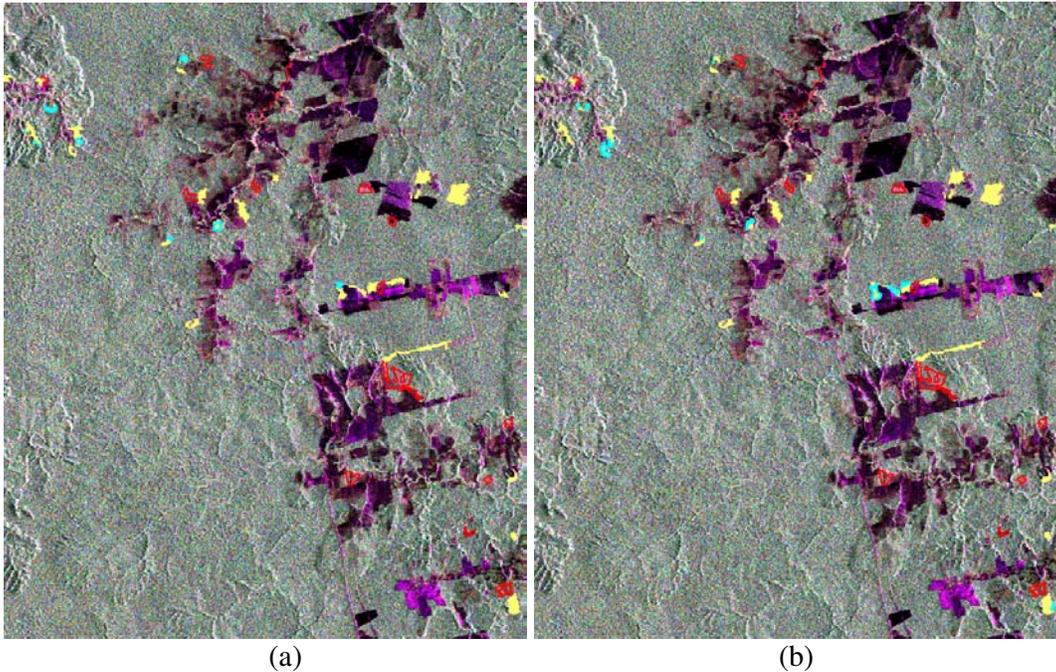
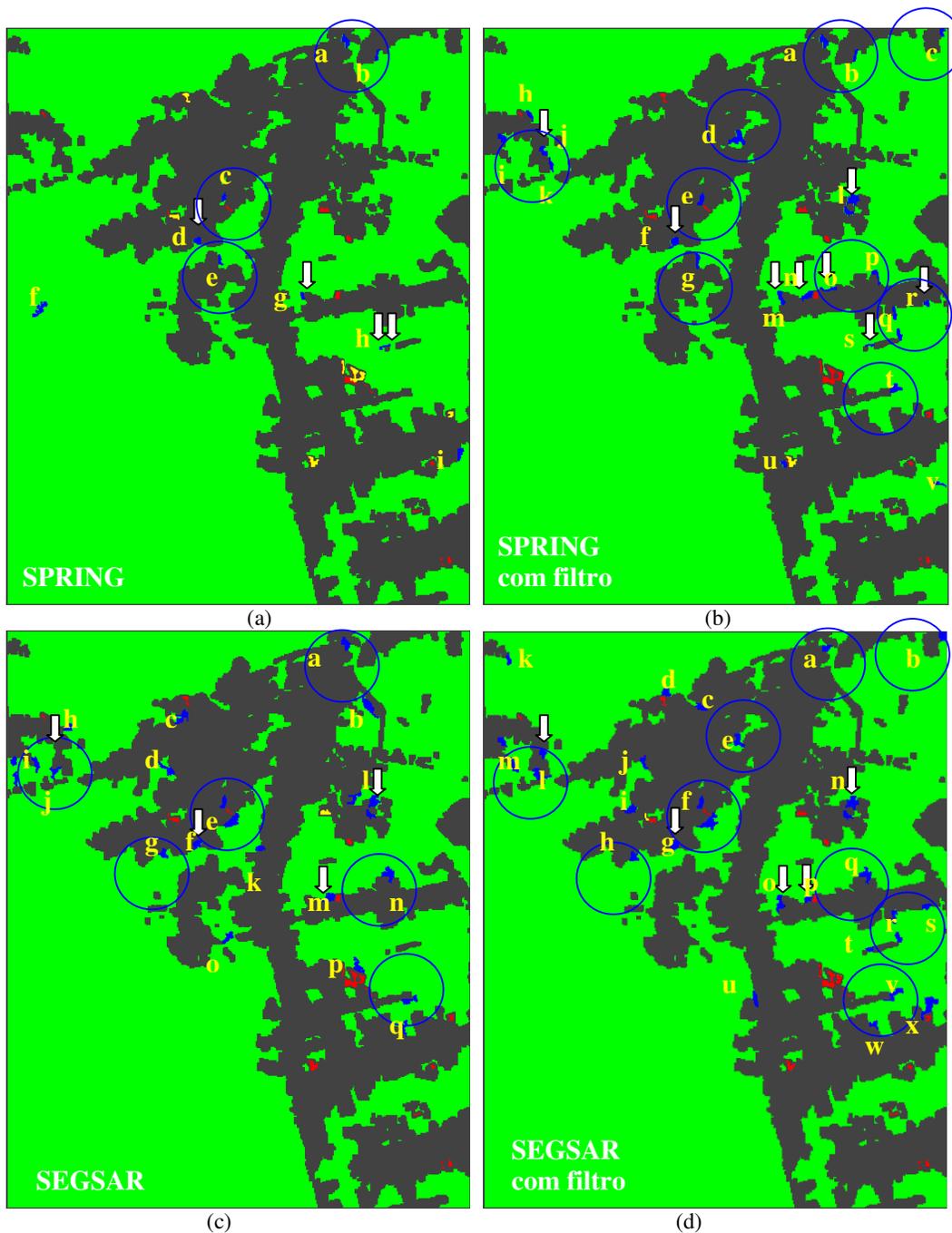


FIGURA 4.30 – Imagem ALOS/PALSAR composição HH(R)HV(G)VV(B) com os polígonos de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2006 (cor vermelha) e 2007 (cor amarela). Em (a) na cor azul claro são ilustrados os polígonos detectados como incremento em 2007 mas que estavam sob nuvem desde 2005 e em (b) é ilustrado pela cor azul claro os polígonos detectados como incremento em 2007 mas que estavam sob nuvem desde 2006.

Mediante as informações descritas acima, realizou-se a análise dos erros de inclusão (E.I.) para as classificações HH+HV (polarização onde se obteve o maior valor κ e que em geral apresentaram as melhores matrizes de confusão de acordo com a validação pelo mapa do PRODES 2006). Os resultados foram analisados com o auxílio das imagens Landsat TM e SPOT-4 (descritas na tabela 3.2 da seção 3.2.2) e dos dados de incremento de desflorestamento disponibilizados pelo PRODES 2007 (devido a imagem utilizada pelo PRODES 2006 ter uma considerável quantidade de nuvens, o que pode ser evidenciado na imagem Landsat TM da figura 3.6). Foram analisadas as quatro classificações ilustradas na figura 4.31, onde os círculos em azul mostram áreas classificadas como E.I. que foram detectadas em pelo menos duas dessas classificações. As letras indicam todos os E.I. de cada classificação, os quais foram caracterizados no Anexo C, e as setas mostram os polígonos detectados como E.I. na classificação e que foram discriminados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.



■ Máscara do PRODES 2006 (Desflorestamento acumulado até 2005)
 ■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de desflorestamento em 2006
 ○ Áreas classificadas como E.I. que foram detectadas em pelo menos duas dessas classificações.

■ Classificação: Erros de omissão da classe incremento de desflorestamento
 ■ Classificação: Erros de inclusão da classe incremento de desflorestamento

FIGURA 4.31 – Classificações Bhattacharyya HH+HV: Em (a) SPRING sem filtro; (b) com filtro *Gamma* 5x5; (c) SEGSAR na imagem sem filtro e com filtro *Gamma* 5x5 (d). As letras indicam todos os correspondentes E.I. de cada classificação caracterizados no Anexo C.

A tabela 4.16 ilustra o número de polígonos discriminados como erros de inclusão e omissão para as classificações Bhattacharyya HH+HV da figura 4.31.

TABELA 4.16 – Números de erros de inclusão e omissão para as classificações Bhattacharyya HH+HV.

Classificador	SPRING	SPRING com filtro	SEGSAR	SEGSAR com filtro
Erros de inclusão	10 polígonos (dos quais 4 foram detectados pelo PRODES em 2007)	24 polígonos (dos quais 9 foram detectados pelo PRODES em 2007)	22 polígonos (dos quais 5 foram detectados pelo PRODES em 2007)	29 polígonos (dos quais 10 foram detectados pelo PRODES em 2007)
Erros de omissão	6 polígonos	1 polígono	1 polígono	1 polígono

De acordo com análise das classificações, os erros de inclusão (indicados pelas letras em amarelo na figura 4.31 e discriminados no Anexo C) obtidos na classificação com dados SAR podem ser devido:

- Evidências de acerto antecipado do radar em áreas com nuvem: Os polígonos detectados pelo radar estavam sob nuvem na data do imageamento pelo sensor óptico utilizado pelo PRODES 2006;
- Evidências de acerto antecipado do radar em áreas sem nuvem: Houve erro de omissão do PRODES 2006 e o radar conseguiu detectar áreas desflorestadas antes do sensor óptico. As áreas detectadas apesar de não estarem sob nuvem, não foram mapeadas pelo PRODES de referência, seja devido:
 - ao fato de ainda não serem “corte raso”;
 - ainda não terem atingido o limiar mínimo de detecção de 6,25 ha na data de imageamento pelo PRODES;

- ao fato de ter ocorrido erro de omissão do PRODES ao não detectar o desflorestamento (erros de interpretação ou classificação dos dados).
- Realmente houve erro de inclusão na classificação pelo dado SAR devido:
 - a existência de vestígios de biomassa (troncos) no solo e
 - ao efeito do teor de hídrico no solo.
 - ocorrência de *double bounce*.

Para a figura 4.31 (a), os erros de omissão e inclusão sobrepostos a classificação Bhattacharyya com segmentação SPRING na imagem sem filtro para os canais HH+HV foram de:

- 548 *pixels* mapeados como erros de omissão (E.O.) e distribuídos nos 6 polígonos (cor amarela);
- 865 *pixels* mapeados como erros de inclusão (E.I.) distribuídos nos 10 polígonos (cor azul).

Conforme descrito na tabela 4.16, dos 10 polígonos detectados como erros de inclusão, 4 polígonos foram detectados como incremento pelo PRODES 2007. As letras (d), (g) e (h) da figura 4.31 (a) ilustram estas quatro áreas (Anexo C.3), sendo que 2 estavam sob nuvem (um desde 2005 (g) e o outro desde 2006 (d)). O polígono representado pela letra (i) é adjacente a um polígono mapeado como incremento pelo PRODES 2007.

O polígono (h) é um exemplo de erro de inclusão com evidência de acerto antecipado sem nuvem, ou seja, áreas desflorestadas que apesar de não estarem sob nuvem foram detectadas pelo radar antes do PRODES 2006 e discriminadas como incremento de desflorestamento pelo PRODES do ano seguinte (2007).

Na figura 4.32 é ilustrado o polígono (h) com as imagens Landsat TM utilizadas pelo PRODES 2005, 2006 e 2007 que serviram de base para a disponibilização dos dados de incremento de desflorestamento. Pela análise da figura, nota-se que entre 2005 e 2006 a área evidenciada pelo círculo possivelmente estava em processo de degradação, sendo agravada em 2007 quando foi detectado o incremento pelo PRODES 2007, provavelmente devido ao erro do PRODES 2006 ou a área ter atingido o limiar mínimo de detecção pelo PRODES de 6,25 ha. Ainda, é possível evidenciar a formação caracterizada por áreas com cicatrizes recentes, as quais provavelmente são caminhos que levam até a área visualizada pela coloração rosa claro, onde localizam-se os polígonos de incremento de desflorestamento dos grupos 2 e 3 descritos na seção 4.1.1 da análise exploratória. As cicatrizes existentes podem ainda referir-se à extração seletiva de madeira, o que pode ser evidenciado pelos traçados dos ramais de acesso (como trilhas de arraste) à exploração, onde podem ser observados os impactos no dossel das áreas interligadas (ROJAS, 2004).



FIGURA 4.32 – Imagens Landsat TM composição R(5)G(4)B(3) de 21/10/2005, 09/11/2006 e 23/07/2007 utilizadas respectivamente pelo PRODES 2005, 2006 e 2007. O círculo em azul ilustra a área em que foram mapeados os polígonos de incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 e detectados como erros de inclusão na classificação realizada.

Ainda na figura 4.31 (a), conforme pode ser visualizado no Anexo C.3, os polígonos representados pelas letras (e) e (f) indicam erros de inclusão que não foram contabilizados como incremento pelo PRODES 2007 mas que estavam sob nuvem de acordo com as informações disponibilizadas pelo PRODES 2006, podendo ser áreas de floresta degradada.

A maioria dos incrementos de desflorestamento corretamente classificados, encontram-se em áreas com existência de solo exposto, como pode ser observado nos polígonos D6 e D9 representados pela imagem Landsat TM na figura 4.2 em comparação com os erros de omissão no Anexo C.2, o que corrobora com os resultados apresentados por Guerra (2008) onde áreas desflorestadas que se tornaram solo exposto tiveram menores erros de omissão nas classificações com dados SAR.

De acordo com análise dos erros de omissão das classificações, notou-se que em geral os erros de omissão foram obtidos em áreas com feições de queimadas, como no polígono D10 e D11 da figura 4.33, os quais localizam-se no grupo 1 da análise exploratória realizada na seção 4.1. Tal fato deve-se principalmente ao fato de:

- As áreas de queimadas possuem um comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR (devido à vegetação que cresce após o corte e queima da floresta a qual pode ser capaz de mascarar a resposta do solo e provocar a diminuição do retorno em banda L);
- O contraste entre a floresta e os desflorestamentos são reduzidos ao longo do ano, fazendo com que os novos desflorestamentos que inicialmente apareciam claros na imagem de radar, escureçam com o passar do tempo;
- Em um determinado momento a tonalidade do incremento será semelhante à da floresta, ocasionando os erros de omissão na classe incremento e inclusão na classe floresta (RIGNOT et al.,1997).

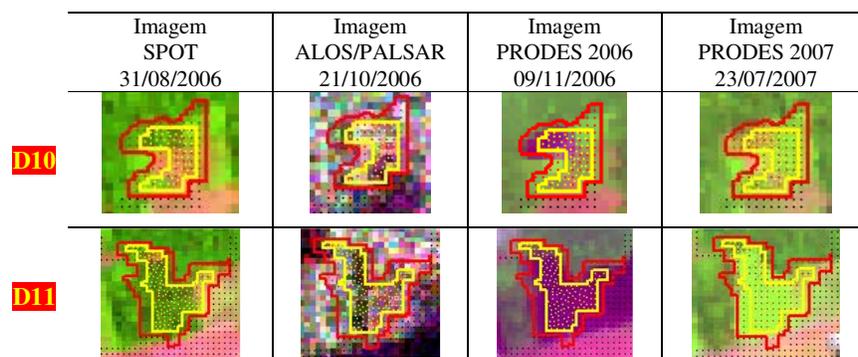


FIGURA 4.33 – Exemplo de polígonos representativos dos erros de omissão obtidos em áreas de queimadas para a classificação da figura 4.31 (a). É possível visualizar que as áreas de queimadas possuem comportamento semelhante ao da floresta na imagem SAR.

Áreas como o polígono D8 da figura 4.2, podem representar os erros de inclusão que ocorreram nas classificações, erros estes provavelmente devido ao acúmulo hídrico no solo alguns dias antes do imageamento do radar, bem como a incidência de vestígios de biomassa (galhos e troncos) presentes no solo.

Segundo Gonçalves (2005), a reflexão especular da água pode fazer com que a interação das microondas sejam refletidas especularmente na direção oposta da antena, e nenhum sinal seja registrado, formando assim superfícies escuras. Porém, o efeito de canto (*double bounce*), faz com que a interação do pulso de energia do radar com áreas que contenham teor hídrico e o tronco das árvores, tenham um retorno amplificado na direção da antena do radar, ocasionando superfícies claras e em alguns casos erros de inclusão nas classificações.

Para a figura 4.31 (b), os erros de omissão e inclusão sobrepostos a classificação Bhattacharyya com segmentação SPRING na imagem com filtro *Gamma 5x5* para a polarização dual HH+HV foram de:

- 118 *pixels* mapeados como erro de omissão e distribuído em apenas 1 polígono (cor amarela).
- 2774 *pixels* mapeados como erro de inclusão e distribuídos em 24 polígonos (cor azul).

Conforme descrito na tabela 4.16, dos 24 polígonos detectados como erros de inclusão, 9 polígonos foram detectados como incremento pelo PRODES 2007 (Anexo C.6) e representados pelas letras (f), (j), (k), (l), (m), (n) e (o), sendo que três estavam sob nuvem desde 2006 (f), (m), (n) e um desde 2005 (k).

O polígono representado pela letra (f), embora tenha formato diferente devido a segmentação utilizada, está localizado no mesmo local do polígono (d) da figura 4.31 (a). Conforme pode ser visualizado no Anexo C.3 (d) e C.6 (f), a imagem SPOT (31/08/2006) adquirida antes do imageamento SAR (21/10/2006) e a imagem Landsat TM utilizada pelo PRODES 2006 (09/11/2006), já indicavam a presença de solo parcialmente coberto por vegetação, sugerindo a presença de desflorestamento e conseqüentemente o erro de omissão pelo PRODES 2006 (FIGURA 4.34). Na imagem ALOS/PALSAR de 21/10/2006 é possível evidenciar a existência de solo exposto com resquícios de vegetação.

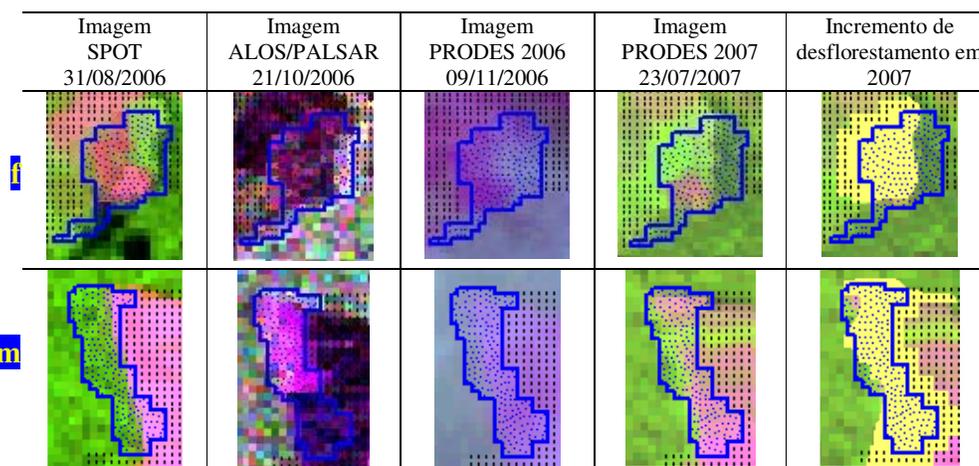


FIGURA 4.34 – Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (b), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 os quais estavam sob nuvem nos anos anteriores.

O polígono representado pela letra (m) é referente a mesma área do polígono (g) da figura 4.31(a), conforme pode ser visualizado no Anexo C.3 (g) e C.6 (m). Do mesmo modo que a análise realizada para o polígono (f), pode-se constatar a evidência de acerto antecipado do radar em decorrência da nuvem (e conseqüentemente omissão do desflorestamento pelo PRODES 2006 causado pelo sensor óptico). Na imagem SPOT,

cerca de dois meses anteriores ao imageamento SAR, os indícios de desflorestamento ainda não haviam ocorrido. Porém, é possível visualizar que na data de aquisição dos dados da imagem radar, havia ocorrência significativa de solo exposto na parte inferior do polígono. Na parte superior, provavelmente havia vestígios de biomassa empilhados (troncos e galhos) os quais foram favorecidos pelo teor hídrico do solo na data no imageamento e assim puderam ser realçados na imagem radar. Apesar da imagem utilizada pelo PRODES 2006 apresentar resquícios de nuvem, é possível observar a presença de solo exposto com textura não uniforme, o que pode ser melhor ilustrado pela imagem de 23/07/2007 utilizada no PRODES 2007, podendo ser áreas de corte raso com vestígios de troncos e galhos no solo. A mesma análise pode ser feita para o polígono representado pela letra (n) conforme Anexo C.6 (n).

O polígono representado pela letra (k) (ANEXO C.6 (k)), possivelmente corresponde a uma área definida como queimada na data no imageamento SAR, devido principalmente a análise na imagem Landsat TM utilizada pelo PRODES 2006 e ao comportamento similar da floresta na imagem radar. Na imagem utilizada pelo PRODES 2007 é possível visualizar sinais de floresta secundária provavelmente coberta por capoeiras, sugerindo o abandono das áreas após os processos de degradação florestal.

Os demais polígonos mapeados como erros de inclusão na classificação realizada e ilustrados no Anexo C.6, em sua maioria parecem ser áreas em processo de degradação florestal de intensidade leve, podendo ser caracterizados como áreas de floresta degradada (devido a textura rugosa e formato irregular das áreas adjacentes, como no polígono (d)) e floresta secundária com capoeiras.

A utilização do filtro *Gamma*, permitiu a redução do número de polígonos com erro de omissão. O polígono D11 (localizado no grupo 1 pela análise de agrupamento hierárquico na análise exploratória da seção 4.1) foi o único a apresentar erro de omissão, conforme ilustrado no Anexo C.5, onde de acordo com análise da imagem SAR provavelmente seja uma área de queimada com comportamento semelhante ao da floresta.

Para a figura 4.31 (c), os erros de omissão e inclusão sobrepostos a classificação Bhattacharyya com segmentação SEGSAR na imagem sem filtro para os canais HH+HV foram de:

- 92 *pixels* com erros de omissão, concentrados em apenas 1 polígono (cor amarela);
- 3653 *pixels* com erros de inclusão distribuídos em 22 polígonos (cor azul).

Dos 22 polígonos discriminados como erro de inclusão, 5 foram detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 (Anexo C.9) e representados pelas letras (f), (j), (l) e (m). O polígono representado pela letra (p) é adjacente a um polígono mapeado como incremento pelo PRODES 2007. Dos cinco polígonos detectados como incremento em 2007, houve nuvens desde 2006 em dois (polígonos (f) e (m)).

O polígono representado pela letra (f), embora tenha formato diferente devido à segmentação pelo SEGSAR, está localizado no mesmo local dos polígonos (d) da figura 4.31 (a) e (f) da figura 4.31 (b), cuja análise foi realizada anteriormente.

O polígono (m) está localizado na mesma região do polígono (n) da figura 4.31 (b), onde é possível evidenciar a presença de solo exposto com textura não uniforme, o que pode ser melhor ilustrado pela imagem de 23/07/2007 utilizada no PRODES 2007, sendo caracterizado pelo predomínio de solo exposto com resquícios de vegetação.

O polígono (l), ilustrado no Anexo C.9 (l), embora com formas diferentes devido à segmentação, corresponde a mesma região da figura 4.31 (b) representado pela letra (l) (ANEXO C.6 (l)). Embora estas regiões não estivessem sob nuvens antes da detecção de incremento pelo PRODES 2007, as classificações obtidas com dados SAR anteciparam a detecção do incremento, ficando evidente a omissão do mapa do PRODES 2006. Na figura 4.35 é possível visualizar a sombra da nuvem na imagem SPOT anterior ao imageamento ALOS/PALSAR. A análise da imagem SAR permite visualizar a evidência de acerto antecipado do radar em áreas que não estavam sob nuvem. É possível inferir que provavelmente os polígonos representem áreas de

queimadas com presença de vegetação e áreas com predominância de cobertura florestal que podem ter sofrido algum tipo de perturbação (como por incêndio). Análise semelhante pode ser realizada para a maioria dos polígonos tidos como erros de inclusão obtidos pela segmentação do SEGSAR na imagem sem filtro e ilustrados no Anexo C.9. (representados pelas letras (e), (j), (k) e (n)). O restante dos polígonos do Anexo C.9 representam em geral áreas em processo de degradação florestal de intensidade leve a floresta secundária com capoeiras.

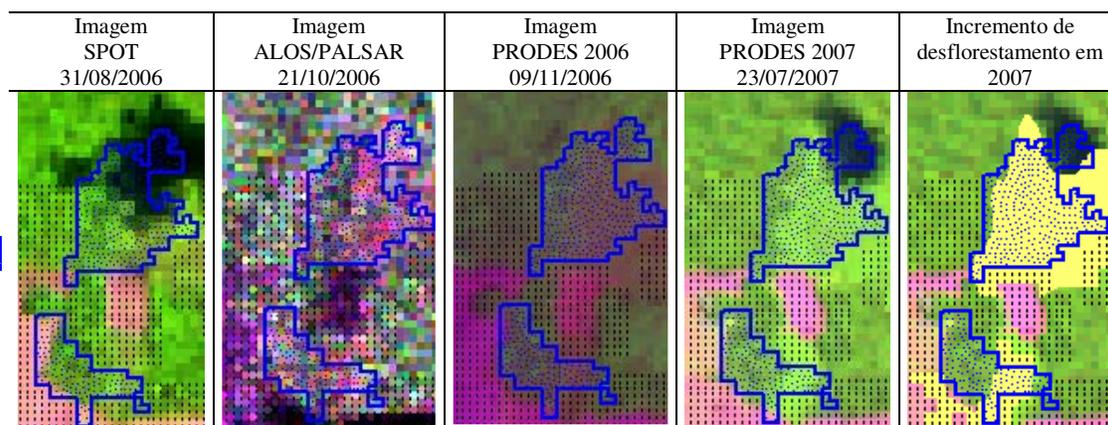


FIGURA 4.35 – Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (c), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.

A utilização da segmentação pelo SEGSAR permitiu a redução do número de polígonos com erro de omissão em comparação com a imagem sem filtro segmentada pelo SPRING. O polígono D5, localizado no grupo 5 pela análise de agrupamento hierárquico na seção 4.1, foi o único a apresentar erro de omissão, conforme ilustrado no Anexo C.8, onde de acordo com análise da imagem SAR provavelmente seja uma área de floresta degradada de intensidade alta com a presença de cicatrizes de fogo florestal associadas a manchas florestais.

Para a figura 4.31 (d), os erros de omissão e inclusão sobrepostos a classificação Bhattacharyya com segmentação SEGSAR na imagem com filtro *Gamma* 5x5 para os canais HH+HV foram de:

- 39 *pixels* com erros de omissão distribuídos em 1 polígono (cor amarela).
- 4619 *pixels* distribuídos com erros de inclusão distribuídos em 29 polígonos (cor azul).

Dos 29 polígonos classificados como erros de inclusão, 10 foram detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007 (Anexo C.12) e representados pelas letras (g), (h), (l), (m), (n), (o), (p), (s) e (t), dos quais houveram nuvens desde 2006 em quatro polígonos (polígonos (g), (l), (o) e (p)).

O polígono representado pela letra (g), embora tenha formato diferente devido a segmentação pelo SEGSAR com filtro *Gamma* 5x5, está localizado no mesmo local dos polígonos (d) da figura 4.31 (a), polígono (f) da figura 4.31 (b) e polígono (f) da figura 4.31 (c), os quais foram analisados anteriormente. A figura 4.34 ilustrou a região onde se localizam esses polígonos, bem como para os polígonos representados pela letra (o), os quais concentram-se no mesmo local dos polígonos (g) da figura 4.31 (a) e polígono (m) da figura 4.31 (b), conforme pode ser visualizado no Anexo C.3 (g), C.6 (m) e C.12 (o).

O polígono representado pela letra (p) está localizado na mesma região do polígono (n) da figura 4.31 (b) e do polígono (m) da figura 4.31 (c), onde é possível evidenciar a presença de solo com textura não uniforme, o que pode ser visualizado na figura 4.36, sendo caracterizado pelo predomínio de resquícios de vegetação favorecidos pelo teor hídrico do solo.

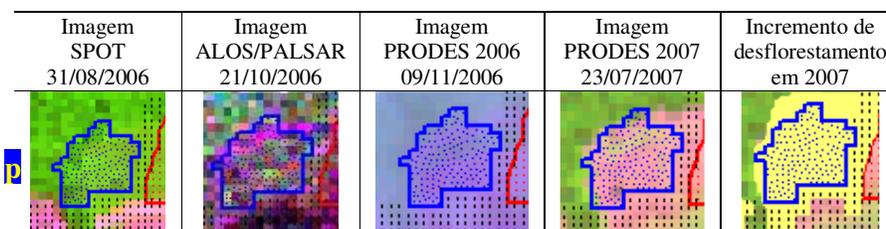


FIGURA 4.36 – Polígonos representativos dos erros de inclusão da figura 4.31 (d), detectados como incremento de desflorestamento pelo PRODES 2007.

Do mesmo modo que a análise realizada para os polígonos da figura 4.35, grande parte dos polígonos detectados como erros de inclusão pelo SEGSAR na imagem com filtro e que não estavam sob nuvem, provavelmente representem áreas de queimadas com presença de vegetação e áreas com predominância de cobertura florestal que podem ter sofrido algum tipo de perturbação, conforme caracterizado no Anexo C.12. Ainda, é possível evidenciar áreas em processo de degradação florestal de intensidade leve e floresta secundária com capoeiras.

A utilização da segmentação pelo SEGSAR na imagem com filtro *Gamma* permitiu que o erro de omissão fosse o menor dentre as classificações analisadas da figura 4.31. O polígono D4, localizado no grupo 5 pela análise de agrupamento hierárquico da seção 4.1, foi o único a apresentar erro de omissão, conforme ilustrado no Anexo C.11, onde de acordo com análise da imagem SAR, a parte omitida do polígono provavelmente seja uma área onde não havia sido desflorestada por corte raso até a data do imageamento SAR.

Constatou-se assim que, embora a análise inicial dos resultados das classificações indicassem que o segmentador SEGSAR havia apresentado resultados inferiores, de acordo com o índice de concordância *kappa*, em relação as classificações *Bhattacharyya* utilizando segmentação pelo SPRING, a análise detalhada dos erros de inclusão e omissão indicaram que o segmentador SEGSAR é uma “ferramenta” eficaz na detecção de incremento de desflorestamento. O baixo número de polígonos com erro de omissão, comparado com a segmentação SPRING, e o considerável número de polígonos inicialmente classificados como erros de inclusão os quais foram detectados como novos desflorestamentos pelo PRODES do ano seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior ou realmente devido ao erro de omissão do PRODES, salientaram a eficácia dos classificadores por regiões na utilização de dados microondas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

De posse dos resultados obtidos, pode-se concluir que o objetivo primordial do trabalho de detecção de incremento de desflorestamento utilizando dados em banda L do radar ALOS/PALSAR foi alcançado, confirmando a hipótese inicial.

A sensibilidade do retorno de radar às estruturas da cobertura vegetal e sua relativa orientação com respeito à plataforma de aquisição e às condições climáticas, tornaram a interpretação dos resultados complexa. No entanto, apesar das dificuldades encontradas, foi possível demonstrar a utilização do radar como ferramenta de detecção antecipada (em comparação aos dados ópticos) de processos de degradação.

Concluiu-se ainda que:

- O classificador MAXVER-ICM não apresentou bom desempenho na classificação dos dados SAR, tendo uma ínfima melhora quando se utilizou o filtro *Gamma* 5x5 na imagem amplitude;
- O classificador por regiões de Bhattacharyya, apresentou uma performance relativamente boa de acordo com o critério *kappa* em comparação com o mapa de validação do PRODES 2006;
- Para ambos os classificadores, evidenciou-se que em geral não há perda significativa de informação quando não se utiliza todos os canais de polarização, porém, desde que a polarização dual HH+HV esteja presente;
- A análise de apenas um canal mostrou que polarizações univariadas possuem limitações na discriminação de incrementos de desflorestamento;
- Os resultados apontaram a limitação do canal HH para detecção de desflorestamentos recentes, apresentando para segmentação SPRING na imagem sem filtro simultaneamente o maior erro de omissão e inclusão em comparação com as outras classificações;

- Individualmente, a polarização HV apresentou resultados melhores em comparação com os canais HH e VV, confirmando a análise exploratória realizada a qual sugeriu que o canal HV discriminasse melhor floresta de incremento de desflorestamento. No entanto, a utilização de apenas um canal não obteve um grau de acerto de classificação tão elevado quanto à combinação dual HH+HV, a qual apresentou perda de informação menor;
- A classificação com maior valor *kappa* foi obtida quando se utilizou a combinação bivariada HH+HV para a imagem amplitude sem filtro segmentada pelo SPRING (*kappa* de 0,5085). No entanto, a acurácia do produtor foi relativamente menor em comparação com as outras classificações devido ao erro de omissão ter sido de 42,71%;
- A segmentação pelo SEGSAR apresentou tempo de processamento superior em relação à segmentação do SPRING, no entanto, evidenciou-se que os erros de omissão foram menores quando se utilizou tal segmentador;
- O menor erro de omissão para os canais HH+HV foi obtido quando se utilizou respectivamente a segmentação pelo SEGSAR na imagem com filtro (E.O. de 3,04%), sem filtro (E.O. de 7,17%) e segmentação pelo SPRING na imagem com filtro (E.O. de 9,20%). No entanto, em todas estas classificações o erro de inclusão foi maior em relação à classificação de maior *kappa* (E.I. de 54,06%), sendo respectivamente de 78,78%, 75,41% e 70,42%;
- A utilização do filtro, tanto na imagem segmentada pelo SPRING quanto pelo SEGSAR, promoveu o aumento dos erros de inclusão. Porém, na segmentação pelo SPRING, ocorreu uma diminuição dos erros de omissão em relação à imagem sem filtro;
- A segmentação realizada pelo SEGSAR na imagem com filtro apresentou erros de omissão menores em comparação com os mesmos canais para a imagem amplitude com filtro segmentada pelo SPRING.

Deste modo, constatou-se que a segmentação através do SPRING possui maior *kappa* devido ao menor erro de inclusão, no entanto o erro de omissão é maior em relação à segmentação pelo SEGSAR. Porém, este último apresenta maior erro de inclusão em relação ao SPRING. Assim, a análise dos erros de inclusão permitiu inferir que um considerável número de polígonos classificados como erros de inclusão pelo SEGSAR foram detectados pelo PRODES do ano seguinte (2007), seja porque estavam sob nuvens no ano anterior (acerto antecipado do radar em relação ao imageamento óptico) ou realmente devido ao erro de omissão do PRODES.

Logo, considerando a cobertura de nuvens na região Amazônica, comprovou-se a eficácia da utilização de dados radar na detecção de desflorestamentos. No entanto, constatou-se que o uso de radar no mapeamento de regiões tropicais pode ser considerado como uma “ferramenta” de auxílio para imagens ópticas, visto que ainda há a limitação da utilização de apenas imagens SAR. Esta limitação em geral é devido à influência de conteúdo hídrico das regiões (causadas por chuvas antes do imageamento) provocando o efeito de *Double Bounce*, o mesmo ocorrendo para vestígios de biomassa existentes no solo. Deste modo, verificou-se que dados ALOS/PALSAR podem ser complementares aos dados obtidos pelas imagens ópticas do PRODES.

Por fim, pode-se inferir que o par de amplitudes HH+HV na maioria dos casos é suficiente para separar as classes incremento de desflorestamento e floresta com boa acurácia, o que justifica a disponibilidade dos dados FBD do modo de imageamento operacional do sensor ALOS/PALSAR para aplicações em estudos de cobertura do solo em floresta tropical. No entanto, novos estudos levando em consideração a informação polarimétrica da fase tornam-se relevantes no sentido de se obter uma comparação com os resultados encontrados.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

A utilização de dados ALOS/PALSAR poderá contribuir com uma base para estudos para as imagens a serem obtidas pelo MAPSAR, o qual realizará a cobertura sistemática da região Amazônica.

Devido ao caráter heterogêneo da classe incremento de desflorestamento, sugere-se o uso de classificadores que explorem o uso de mineração de dados (como classificadores por árvore de decisão) para que se possa obter uma melhor discriminação dos alvos a partir das diferentes classes de uso e cobertura do solo existentes dentro da classe desflorestamento.

Recomenda-se ainda a implementação de classificadores por regiões que utilizem distribuições estatísticas específicas para dados SAR, utilizando outras medidas de distâncias com o intuito de estabelecer comparações com a distância de Bhattacharyya.

A aquisição de dados de campo torna-se necessária no sentido de se ter informação complementar para que se possa ter embasamento na coleta de amostras e futuras análises das classificações, mais especificamente na análise dos erros de inclusão.

Recomenda-se ainda o uso de dados complexos com o intuito de verificar a influência da informação de fase na detecção do desflorestamento. E por fim, sugere-se a fusão com outras imagens, gerando imagens multisensores (ópticos e radar), como as imagens fração solo e vegetação geradas a partir do Modelo Linear de Mistura Espectral, com o intuito de verificar se há maior separabilidade ente floresta e incremento de desflorestamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUD NETA, S. R.; DUTRA, L. V.; SCOFIELD, G. B.; NEGRI, R. G.; FREITAS, C. C.; SILVA, D. L. A. Comparação entre classificação contextual e classificação por regiões para mapeamento de uso e cobertura da terra na região da Floresta Nacional de Tapajós - PA (FLONA): utilizando imagens polarimétricas em banda L. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7749-7756. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15793-PRE/10405).

ALENCAR, A.; NEPSTAD, N; MCGRATH, D; MOUTINHO, A.; PACHECO, P; DIAZ, M.D.C.V.; FILHO, B. S. **Desmatamento na Amazônia:** indo além da emergência crônica. Manaus, Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (Ipam), 2004, p. 89

ALLEN, C. T.; ULABY, F. T. Modeling the polarization dependence of the attenuation in vegetation canopies. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'84), 1984, Digest, Strasbourg, France. **Proceedings...** Strasbourg: IEEE, 1984.

ALMEIDA FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; DOS SANTOS, J. R. Evaluation and perspectives of using multitemporal L-band SAR data to monitor deforestation in the Brazilian Amazonia. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n.4, p. 409-412, 2005.

ALMEIDA FILHO, R.; ROSENQVIST, A.; SHIMABUKURO, Y. E.; SILVA GOMEZ, R. Detecting deforestation with multitemporal L-band SAR imagery: a case study in western Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 6, 2007.

ALMEIDA, F. C. **Simulação de resposta de estruturas simplificadas de vegetação ao radar de abertura sintética interferométrico.** 2008. 102 p. (INPE-15433-TDI/1419). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008.

ALMEIDA FILHO, R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ROSENQVIST, A.; SÁNCHEZ, A. Using dual-polarized ALOS PALSAR data for detecting new fronts of deforestation in the Brazilian Amazônia. **International Journal of Remote Sensing**. v.30, n.14, p.3735-3743. 2008.

ALVES, D. S. Characterizing landscape changes in central Rondônia using Landsat TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, v.20, n.14, p. 2877-2882, 1999.

ALVES, D. S. O processo de desmatamento na Amazônia. **Parcerias estratégicas**, v. 12, p. 259-275, 2001.

ALVES, D. S. **The stability of tropical rainforest margins, linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation.**

Verlag - Berlin: Springer, 2007. 493-512 p. 19

ALVES, F. S. M.; FISCH, G. I.; VENDRAME, I. F. Modificação do microclima e regime hidrológico devido ao desmatamento na amazônia: estudo de um caso em Rondônia (RO), Brasil. **Acta Amazonica**. n. 29, v. 3, p. 395 – 409, 1999.

ARAÚJO, L. S.; SANTOS, J.R.; FREITAS, C. C.; XAUD, H. A. M. The use of microwave and optical data for estimating aerial biomass of the savanna and Forest formations at Roraima State, Brazil. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'99). Hamburg. **Proceedings...** Hamburg: IEEE, 1999.

ASNER, G.P. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, preview article, p. 1-8, 2001.

BALZTER, H. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (INSAR). **Progress in Physical Geography**, 25(2): p. 159-177. 2001

BARLOW, J.; PERES, C. A. Fire-mediated dieback and compositional cascade in an Amazonian forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v.363, p.1787–1794. 2008

BECKER, B. Geopolítica da Amazônia. **Estudos Avançados** - Dossiê Amazônia Brasileira I, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005.

BINS, L. S.; FONSECA, L. M. G.; ERTHAL, G. J.; II, F. M. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 677-680. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6231-PRE/2321).

BORNER, T.; PAPATHANASSIOU, K. P.; MARQUART, N.; ZINK, M.; MEININGER, M.; MEADOWS, P. J.; RYE, A. J.; WRIGHT, P.; TELL, B. R. ALOS PALSAR product verification. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'07), 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: IEEE, 2007.

BRISCO, B.; BROWN, R. J. Agricultural applications with radar. In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (Ed.). **Principles and applications of imaging radar**. New York : Wiley, 1998. p. 381-406.

BRITES, R. S.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. Á. S. Comparação de desempenho entre três índices de exatidão aplicados a classificações de imagens orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 813-822. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5.

BUFALO, A. C. **Avaliação da aplicação de mosaicos de dados de radar da missão de mapeamento de florestas pluviais ao monitoramento do desmatamento na Amazônia Brasileira.** 2005, 169p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

CÂMARA, G.; VALERIANO, D. D. M.; SOARES, J. V. **Metodologia para o Cálculo da Taxa Anual de Desmatamento na Amazônia Legal.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2006, 22 p.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing.** New York: The Guilford Press, 1996. 622 p.

CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING (CCRS) Tutorial: **Fundamentals of remote sensing.** 2007. 258 p. [on line]. Disponível em: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf>. Acesso em 02 out. 2008.

CARDILLE, J. A.; FOLEY, J. A. Agricultural land-use change in Brazilian Amazônia between 1980 and 1995: evidence from integrated satellite and census data. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 551-562, 2003. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIImage_imagekey=B6V6V-49S77YF8Ke_cdi=5824e_user=687369e_orig=browsee_coverDate=11%2F15%2F2003e_sk=999129995eview=cewchp=dGLbVzbzSkzVemd5=3b7910d6f87a3058f96db239f53458afeie=/sdarticle.pdf>. Acesso em: 10 maio 2008.

CAVES, R.; QUEGAN, S.; WHITE, R. G. Quantitative comparison of the performance of SAR segmentation algorithms. **IEEE Transactions on Image Processing**, v.7, n.11, p.1534-1546, 1998

CHOMITZ, K.M.; THOMAS, T.S. **Geographic patterns of land use and land intensity in the Brazilian Amazon.** World Bank Policy Research Working Paper, n. 2687, Washington D.C., 2001.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and psychological measurement.** v. 20, n. 1, p. 37-46, 1960

COHENCA, D. Evolução anual de desmatamentos na Floresta Nacional do Tapajós de 1997 a 2005. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6653-6660. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 1999. 137 p

COOK, R.; MCCONNELL, I; STEWART, D.; OLIVER, C. MUM (Merge Using Moments) segmentation for SAR images. In: EURO SAR DATA PROCESSING FOR REMOTE SENSING, 1994, Rome, Italy. **Proceedings...** Rome: SPIE, 1994. p.92-103.

CORREIA, A. H. **Desenvolvimento de Classificadores de Máxima Verossimilhança e ICM para Imagens SAR Polarimétricas**. 275 p. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas**. 1999, 271 p. (INPE-7178- DI/679) Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

CORREIA, F. W.; ALVALÁ, R. C. S; MANZI, A. O impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na Amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3, p.15, 2006.

COSTA, M.R.; FOLEY, J.A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO2 concentrations on the climate of Amazonia. **J Climate**, v.13, n.18, p.34, 2000.

COSTA, W. M. **O Estado e as políticas territoriais no Brasil**. São Paulo: Contexto, 1997.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**, Unicamp, Gráfica Universitária 170p. 1993

DALLEMAND, J.F.; LICHTENEGGER, J.; RANEY, R.K.; SCHUMANN, R. **Radar imagery: theory and interpretation: lecture notes**. Rome: FAO/ESA, 1993. (RSC Series 67).

DE GRANDI, G.; LEMOINE, G.; SIEBER, A. Supervised fully polarimetric classification: an experimental study on the maestro1 freiburg data set. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'92), 1992, Houston. **Proceedings...** Houston: IEEE, 1992.

DELVES, L. M.; WILKINSON, R.; OLIVER, C. J.; WHITE, R. G. Comparing the performance of SAR segmentation algorithms. **International Journal of Remote Sensing**, v. 13, n.11, p. 2121-2149, 1992.

DIERKING, W. Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2397-2412, 1999.

DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; LETOAN, T.; BEAUDOIN, A.; KASISCHKE, 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

DOBSON, M.C.; ULABY, F. T.; PIERCE, L. E. **Land-cover classification of tropical rainforest using orbital SAR and impacts of natural and anthropogenic disturbance on species**: JERS-1 Science Program 99 PI Reports - Global Forest Mapping and Sar Interferometry. Japan: Earth Observation Research Center, National Space Development Agency of Japan, 1999.

DOBSON, M. C. Forest information from Synthetic Aperture Radar. **Journal of Forestry**. n.98, p.41-43, 2000.

DUARTE, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R.; MELLO, E. M. K.; MOREIRA, J. C.; MOREIRA, M. A.; SOUZA, R. C. M.; SHIMABUKURO, R. M. K.; FREITAS, U. M. **Metodologia para criação do PRODES digital e do banco de dados digitais da Amazonia**: Projeto BADDAM. Sao Jose dos Campos: INPE, 1999. 33 p. (INPE-7032-PUD/089).

DUTRA, L.V.; HUBER, R. Feature Extraction and Selection for ERS-1/2 InSAR Classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.5, p. 993- 1016. May 1999.

DUTRA, L. V.; SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; NOVO, E. M. L.; ALVES, D. S.; HERNANDEZ, P. F.; RENNO, C. D.; SANT'ANNA, S. J. S.; COSTA, M. P. F.; RIBEIRO, M. C.; SOARES, S. M.; LACRUZ, M. S. P. **The use of JERS-1 data for environment monitoring and resources assessment in Amazônia**: JERS-1 Science Program 99 PI Reports - Global Forest Monitoring and SAR Interferometry. Earth Observation Research Center, National Space Development Agency of Japan, 1999

DUTRA, L. V. ; SCOFIELD, G. B. ; ABOUD NETA, S. R. ; NEGRI, R. G. ; MURA, J. C. ; SANT'ANNA, S. J. S. ; GAMA, F. F. Alos PALSAR polarimetric data for land use/land cover classification in Amazon. In: FIRST JOINT PI SYMPOSIUM OF ALOS DATA NODES FOR ALOS SCIENCE PROGRAM, 2007, Kyoto. Jaxa- Japan Aerospace Exploration Agency, 2007.

DUTRA, L. V.; FREITAS, C. C.; SCOFIELD, G. B.; ABOUD NETA, S. R.; NEGRI, R. G.; SANTOS, J. R.; SANT'ANNA, S. J. S. Assessment on the improvement of the land use/land cover classification in amazon using alos palsar polarimetric data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2008), Boston. **Proceedings...** Boston: IEEE, 2008.

DUTRA, L. V.; SCOFIELD, G. B.; ABOUD NETA, S. R.; NEGRI, R. G.; FREITAS, C. C.; ANDRADE, D. Land Cover Classification in Amazon using Alos Palsar Full Polarimetric Data. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7259-7264. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15865-PRE/10475).

ELACHI, C. **Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing**. New York. Wiley & Sons. , 1987.

FEARNSIDE, P.M. **A floresta Amazônia nas mudanças globais**. Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa), 2003, 134 p.

FEARNSIDE. P. M. Desmatamento na Amazônia Brasileira: história, índices e consequências. **Megadiversidade**, v. 1, p. 115-123, 2005. Disponível em: <http://www.conservacao.org/publicacoes/megadiversidade/16_Fearnside.pdf> Acesso em: 12 abr. 2008.

FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A.; THEOBALD, D. M.; BALLESTER, M. V. Landscape dynamics of Amazonian deforestation between 1984 and 2002 in central Rondônia, Brazil: assessment and future scenarios. **Forest Ecology and Management**, v. 204, p. 67-83, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg_imagekey=B6T6X-4DK682S2Ke_cdi=5042e_user=687369e_orig=browse_coverDate=01%2F03%2F2005e_sk=997959998eviw=cewchp=dGLbVtbzSkWAemd5=0cad6944432af1ed5f5baf752fb4c3b8eie=/sdarticle.pdf> Acesso em: 28 ago. 2007

FERREIRA, L.V.; VENTICINQUE, E.; ALMEIDA, S. **O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas**. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 53, p. 157-166, 2005.

FREITAS, C.C.; SANT'ANNA, S.J.S.; SOLER, L.S.; SANTOS, J. R.; DUTRA, L.V.; ARAÚJO L.S. DE; MURA, J. C.; HERNANDEZ FILHO, P. The use of airborne P-band radar data for land use and land cover mapping in Brazilian Amazonia. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2001, Sydney. Local. **Proceedings...**Piscataway: IEEE, 2001.

FREITAS, C. C.; FRERY, A. C.; CORREIA, A. H. The polarimetric g distribution for sar data analysis. *Environmetrics*, v. 16, p. 13{31, 2005.

FRERY, A. C. **O. Algumas ferramentas estatísticas na síntese, processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética**. 1993. 242 p. (INPE-5548-TDI/534). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos. 1993.

FRERY, A. C.; MÜLLER, H. J.; YANASSE, C. C. F; SANT'ANNA, S.J.S. A Model for extremely heterogeneous cluster. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.35,n.3,p.1–12, May, 1997.

FRERY, A. C.; CORREIA, A. H.; FREITAS, C. C. Classifying multifrequency fully polarimetric imagery with multiple sources of statistical evidence and contextual information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 45,n. 10, p. 3098 - 3109, 2007.

GABOARDI, C. **Utilização de Imagem de Coerência SAR para Classificação do Uso da Terra: Floresta Nacional de Tapajós**. 139 p. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 37, 38

GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 509 p., 2000

GREGOIRE, J.M.; TANSEY, K.; SILVA, J.M.N. The GBA2000 initiative: Developing a global burned area database from SPOT-VEGETATION imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.24, n.6, p.1369-1376, 2003.

GONÇALVES, F. D. **Utilização de dados de Sensores Remotos para o Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental a derramamento de óleo na Baía de Guajará**, Belém-PA. 2005. 162f. Dissertação (Mestrado em Ciências área de Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2005

GUERRA, J. B. **Avaliação do Potencial de Dados SAR R99B para Discriminar Incremento de Desflorestamento na Amazônia**. 127 p. Tese (Mestrado em Sensoriamento Remoto) | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

HAIR JR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analysis**. 5 ed. Upper Sanddler River, New Jersey: Prentice Hall, 1998. 742p.

HASHIMOTO, Y.; TSUCHIYA, K.; IJIMA, T. Normalized backscattering radar cross section of Tropical Rain Forest in Rondonia, Northern Brazil. **Advances in Space Research**, v. 19, n. 9, p. 1425-1428, 1997.

HOEKMAN, D.H.; QUIÑONES, M.J. Biophysical forest type characterization in the Colombian Amazon by airborne polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n.6, p. 1288-1300, 2002.

HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 11, p. 1699-1708, 1974.

Hudson, W. D.; Ramm, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of

agreement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53,n.4,p.421-422, 1987.

IMHOFF, M. L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for the global biomass inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. n.33, p.511-518. 1995

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário Estatístico do Brasil** – 2000. Compartmento de Relevô. Rio de Janeiro: IBGE.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Imagens do Satélite Alos** Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/alos/> Acesso em: 05 dez. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Programa de prevenção e controle de queimadas e incêndios florestais na Amazônia Legal**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/proarco/apresentacao.htm>. Acesso em: 11 fev. 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) **SPRING**: sistema de processamento de informações georreferenciadas: manual de ajuda. São José dos Campos: INPE, 2006

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites. Sistemas PRODES, DETER, DEGRAD e QUEIMADAS 2007-2008**. São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008a, 47 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da cobertura florestal da Amazônia por satélites**. São José dos Campos-SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008b, 143p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Monitoramento da Floresta Amazônica por Satélite: Projeto PRODES**. Desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Apresenta gráficos com os resultados obtidos pelo projeto PRODES até o ano de 2008. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/r2008.htm>. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008c. Acesso em: 7 jan. 2009.

INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA (IMAZON). Disponível em: http://www.imazon.org.br/novo2008/sobreamazonia_ler.php?idpub=677. Acesso em: 24 jun. 2008.

ISRAELSSON, H.; SYLVANDER, R. Estimation of forest parameters using polarimetric multi-frequency SAR data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'92), Houston, May 26–29, 1992.

International space year: space remote sensing. Piscataway: IEEE, 1992. v.1, p.786–788.

JAXA. Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa. Tutorial: **ALOS-Advanced Land Observing Satellite DAICHI**. 2008. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html>. Acesso em 01 fev. 2008

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment An Earth Resource Perspective**. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2000. 544 p.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL) **Shuttle imaging radar-C science plan**. Pasadena: JPL/NASA, 1986. v. 1 p. 86-29.(JPL Publication 86-29).

KASISCHKE, E.S.; MELACK, J.M.; DOBSON, C.M. The use of imaging radars for ecological applications-A review. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n.2, p. 141-156, 1997.

KERR, J.T.; OSTROVSKY, M. From space to species: ecological applications for remote sensing. **Trends in Ecology and Evolution**. v. 18, n. 6, p. 299-305, 2003.

KUPLICH, T.M. Estudos florestais com imagens de radar. **Espaço & Geografia**, v. 6, n.1, p. 65-90, 2003. ISSN: 1516-9375

KUPLICH, T.M.; CURRAN, P.J.; ATKINSON, P.M. Relating SAR image texture and backscatter to tropical forest biomass. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS 2003). Toulouse. **Proceedings...** Toulouse: IEEE Piscataway. IEEE. V.IV. p.2872-2874, 2003.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro: UNESP, 2000. 120p. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/multivariados.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2009.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurements of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159-174, 1977.

LAURANCE, W.L.; ALBERNAZ, A.K.M.; FEARNSIDE, P.M.; VASCONCELOS, H.; FERREIRA, L.V. "Deforestation in Amazonia". **Science** 304, 2004, pp. 1109-1111.

LAURENCE, W. F.; COCHRANE, M. A.; BERGEN, S.; FEARNSIDE, P.M.; DELAMÔNICA, P.; BABER, C.; D'ANGELO, S.; FERNANDES, T. Environment: The future of the Brazilian Amazon. **Science**, v. 291, n. 5503, p. 438-439, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/291/5503/438?maxtoshow=eHITS=10ehits=10eRESULTFORMAT=efulltext=Enviroment%3A+The+future+of+the+Amazon+esearchid=1eFIRSTINDEX=0eresourcetype=HWCIT>> Acesso em: 18 dez. 2008

LASHOF, D.A. The contribution of biomass burning to global warming: an integrated assessment. In: Levine, J.S. (Ed.) Global biomass burning. Cambridge: **MIT Press**, p. 441-444, 1996.

LEAN, J.; BUNTON, C.B.; NOBRE, C.A.; ROWNTREE, R.L. “**The simulation of Amazonian deforestation on climate using measured Abracos vegetation characteristics**”. Chichester (England): John Wiley & Sons Ltd., 611 pp., 1996.

LECKIE, D. G., RANSON, K. J. **Forestry applications using imaging radar. In: Principles and Applications of Imaging Radar.** (F. M. Henderson, and A. J. Lewis, Eds.). New York: John Wiley, p. 435-509, 1998

LEE, J. S.; GRUNES, M. R. Feature classification using multi-look polarimetric SAR imagery. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'92) Houston, May 26–29, 1992. **International space year: space remote sensing.** Piscataway: IEEE, 1992. v.1,p.77–79.

LEE, J. S.; MILLER, A.; HOPPEL, K. Statistics of phase difference and product magnitude of multi-look processed gaussian signals. **Waves in Random Media**, v. 4, p. 3007{319, 1994a. [31](#)

LEE, J. S.; SCHULER, D. L.; LANG, R. H.; RANSON, K. J. K distribution for multilook processed polarimetric sar imagery. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, (IGARSS'94), Pasadena. **Surface and atmospheric remote sensing: technologies, data analysis and interpretation.** [S.l.], 1994b. p. 21792181.[31](#), [33](#), [35](#)

LE TOAN, T.; BEAUDOIN, A.; GUYON, D. Relating forest biomass to SAR data. . **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n.2, p. 403-411, 1992

LEWIS, A. J., HENDERSON, P.M., HOLCOMB, D.W. 1998. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: LEWIS, A.J.; HENDERSON, F.M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar.** 3 ed. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998. 866p.

LOWMAN JR, P.D.; HARRIS, J.; MASUOKA, P.M.; SINGHROY, V.H.; SLANEY, V.R. Shuttle Imaging Radar (SIR-B) investigations of the Canadian Shield: Initial Report. **IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing**, v.GE25, n.1, p.55-66, 1987.

LUCKMAN, A.; BACKER, J.; KUPLICH, T. M., YANASSE, C. C. F.; FRERY, A. A study of the relationship between radar backscatter and regenerating tropical forest biomass for spaceborne SAR instruments. **Remote Sensing of Environment.** N. 60, p. 1-13, 1997

MAHAR, D.J. Frontier development policy in Brazil: a study of Amazonia. Praeger, Nova York. 1979

- MALHI, Y; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A., KILLEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. **Science**, v. 319, n. 169, p. 169-172, 2008.
- MANZI, A.O.; PLANTON, S. “A simulation of Amazonian deforestation using a GCM calibrated with Abracos and Arme data”. In Gash, J.H.C. et al. Amazonian deforestation and climate. Chichester (England): John Wiley & Sons Ltd., 611 pp., 1996.
- MASSEY, F. J., JR.. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.
- MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3 ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 324 p.
- MORAIS, M. C. **Discriminação de lateritas mineralizadas em ferro no depósito N1 (Carajás-PA) por radar imageador : uma avaliação através de classificação textural**. 193 p. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998. 49
- MORAN, E. F. Deforestation and land use in the Brazilian amazon. **Human Ecology**, v.21, n.1, p.1-21, 1993.
- NEPSTAD, D. C; CAPOBIANCO, JOÃO PAULO; BARROS, ANA CRISTINA; CARVALHO, GEORGIA; MOUTINHO, PAULO; LOPES, URBANO; LEFEBVRE. **Avança Brasil: Os custos ambientais para a Amazônia** -1.ed. - Belém: Gráfica e Editora Alves, 2000. 24p
- NEPSTAD, D.; CARVALHO, G.; BARROS, A.C.; ALENCAR, A.; CAPOBIANCO, J.P.; MOUTINHO, P.; LEFEBVRE, P. Road paving, fire regime feedbacks, future of Amazon forests. **Forest Ecology and Management**, v. 5524, p. 1–13, 2001.
- NEUBERT, M.; HEROLD; H. MEINEL, G. Evaluation of remote sensing segmentation quality- further results and concepts. In: International Conference on Object-based Image Analysis, **Proceedings** Salzburg, Salzburg University, 2006. Available in: http://www.commission4.isprs.org/obia06/Papers/10_Adaption%20and%20further%20development%20II/OBIA2006_Neubert_Herold_Meinell.pdf Acessado em: 09 ago. 2008.
- NEZRY, E.; LOPÉS, A.; DUCROT-GAMBART, D.; NEZRY, C.; LEE, J.S. Supervised classification of K-distributed SAR images of natural targets and probability of error estimation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.34,n.5,p.1233–1242, Sept. 1996.
- NOBRE, C.A.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. “Amazonian deforestation and regional climate change”. **Journal of Climate** 1991 4: 957-988, 1991.

OLIVER, C.; QUEGAN, S. **Understanding synthetic aperture radar images**. Norwood, MA: Artech House, p- 479, 1998.

PAGE, S.E.; SIEGERT, F.; RIELEY, J.O.; BOEHM, H.D.V.; JAYA, A.; LIMIN, S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. **Nature**, v. 420, n.6911, p. 61-65, Nov. 2002

PARADELLA, W. R.; **Imagens de Radar Fundamentação e Experiências com o SAR na Amazônia. Fator GIS**, v. , n. , p. , jul. 1996.

PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; MORAIS, M. C. Synthetic aperture radar for geological applications in the moist tropics: experiences from the brasilian Amazon region. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 538-542, 2000.

PARADELLA, W.R.; OLIVEIRA, C.G.; LUIZ, S.; CECARELLI, I.C.F.; COTTINI, C.P.; OKIDA, R. Operational use of RADARSAT-1 fine stereoscopy integrated with Landsat-5 thematic mapper data for cartographic application in the Brazilian Amazon. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Vol. 31, Nº 2, pp. 139–148. 2005.

PEDLOWSKI, M. A.; DALE, V. H.; MATRICARDI, E. A. T.; SILVA FILHO, E. P. Patterns and impacts of deforestation in Rondônia, Brasil. **Landscape And Urban Planning**, v. 38, p. 149-157, 1997. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MIimg_imagekey=B6V91-3SWR71T33e_cdi=5885e_user=687369e_orig=browsee_coverDate=11%2F15%2F1997e_sk=999619996eview=cewchp=dGLbVlzzSkWAemd5=b3bd523a1b85238dcc9634c556f002a7eie=/sdarticle.pdf> Acesso em: 18 ago. 2008.

PRATT, W. **Digital Image Processing**. New York Wiley-Interscience, 1991.

PRODES. **Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia**. Fevereiro 2009. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/>>. 19

Quegan, S.; Rye, A. J.; Hendry, A.; Skingley, J.; Oddy, C. J. Automatic interpretation strategies for synthetic aperture radar images. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. A324, p.409-421, 1988.

RANNEY, K. Radar fundamentals: technical perspectives In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (Ed.). **Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar**. New York: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, cap. 2, p. 9-130.

RICHARDS, J.A., **Remote Sensing Digital Image Analysis: a introduction**, 2 ed., Springer-Verlag, Germany, 1995.

- RIGNOT, E.; SALAS, W. A.; SKOLE, D. L. Mapping deforestation and secondary growth in Rondônia, Brazil, using imaging radar and thematic mapper data. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n.2, p. 167-179, 1997.
- ROJAS, E. H. M. **Síntese genética de redes neurais artificiais ART2 na classificação de imagens ASTER para mapeamento de uso e cobertura da terra na região norte do Mato Grosso**. 2004, 126p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- ROMÁN-ROLDÁN, R.; GÓMEZ-LOPERA, J. F.; ATAE-ALLAH, C; MARTÍNEZ-AROZA, J.; LUQUE-ESCAMILLA, P. L. A measure of quality for evaluating methods of segmentation and edge detection. **Pattern Recognition.**, v.34, p:969-980, 2001.
- ROSENFELD, G.H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, v.52, n. 2, p.223-227, Feb. 1986.
- ROSENQVIST, A. **Analysis of the backscatter characteristic of rubber, oil palm and irrigated rice in multiband polarimetric syntetic aperture radar imagery**. Thesis submitted to the Institute of Industrial Science University of Tokyo. 114p. 1997
- ROSENQVIST, A.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environment Science & Policy**, v. 6, n. 5, p. 441-455, out. 2003.
- ROSENQVIST, A.; MASANOBU, S.; NORIMASA, I; MANABU, W. ALOS PALSAR: A Pathfinder Mission for Global-Scale Monitoring of the Environment. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n.11, p. 3307-3316, 2007.
- ROY, D.P.; LEWIS, P.E. E JUSTICE, C.O. Burned área mapping using –temporal moderate spatial resolution data – a bidirectional reflectance model-based expectation approach. **Remote Sensing of Environment**. v. 83 p.263-286. 2002
- SÁ, A.C.L; PEREIRA, J.M.C.; VASCONCELOS, M.J.P.; SILVA, J.M.N; RIBEIRO, N.; AWASSE, A. Assessing the feasibility of sub-pixel burned area mapping in miombo woodlands of northern Mozambique using MODIS imagery. **International Journal of Remote Sensing**, n. 24, p.1783-1796, 2003.
- SAATCHI S. S.; NELSON, B.; PODEST, E.; HOLT, J. Mapping land cover types in the Amazon Basin using 1 km JERS-1 mosaic. **International Journal of Remote Sensing**, v. 21, n.6, p. 1201 - 1234, 2000.
- SABINS JR, F. F. **Remote sensing: principles and interpretation**. 3. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 1996. 494p

SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; PARADELLA, W. R.; MORAIS, M. C. Curso: **Radar aplicado ao mapeamento geológico e prospecção mineral: Aplicações**. São José dos Campos, 2001. 94 p. (INPE-8117-PUD/099).

SANTOS, J.R.; PARDI LACRUZ, M.S.; ARAUJO, L.S.; KEIL, M., Savanna and tropical rainforest biomass estimation and spatialization using JERS-1 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.7, p. 1217-1229, 2002.

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 aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, p. 482-493., 2003.

SCHAEFER, J.R. **As migrações rurais e implicações pastorais. Um estudo das migrações campo-campo do sul do país em direção ao norte do Mato Grosso**. São Paulo, Edições Loyola, 1985. 264p.

SCOFIELD, G. B.; SANT'ANNA, S. J. S.; FREITAS, C. C.; DUTRA, L. V. Avaliação quantitativa do SegSAR através de medidas de borda e regiões em imagens ópticas sintéticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6167-6174. CD-ROM; On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. (INPE-16524-PRE/11100).

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The Least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-20, 1991.

SHIMABUKURO, Y.E.; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C.; DUARTE, V. **Segmentação e classificação da imagem sombra no modelo de mistura para mapear desflorestamento na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1997. 16p. (INPE – 6147-PUD/029)

SHIMABUKURO, Y.E.; BATISTA, G.T; MELLO, E.M.K.; MOREIRA, J.C., DUARTE, V. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n. 3, p.535-541, 1998

SHIMABUKURO, Y. E.; ALMEIDA-FILHO, R.; KUPLICH, T. M.; FREITAS, R.M. Use of Landsat TM fraction images to quantify the optical and SAR data relationships for land cover discrimination in the Brazilian Amazonia. ISPRS Comission VII Mid-term Symposium “Remote Sensing: From Pixels to Processes”, Enschede, the Netherlands, 8-11 May 2006

SHIMADA, M. Alos handbook. In: . [s.n.], 2007. p. 146. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/doc/alos_userhb_en.pdf>

SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; HIGUCHI, R.; ISONO, K. Pulsar calval summary and update 2007. **Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International, 2007.**

SINGHROY, V.; SAINT-JEAN, R. Effects of relief on the selection of RADARSAT-1 incidence angle for geological applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 3, p. 211-217, 1999.

SMITS, P. C.; DELLEPIANE, S. G.; SCHOWENGERDT, R. A. Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n.8, p. 1461-1486. Aug. 1999.

SOARES FILHO, B. S. Fragmentação da paisagem florestal em função da estrutura e dinâmica fundiária no norte do Mato Grosso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 987-995. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1.

SOARES FILHO, B.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; DIAZ, M.D.C.V.; RIVEIRO, S.; SOLORZANOS, L.; VOLL, E. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém-Cuiaba corridor. **Global Change Biology**, v. 10, p. 745-764, 2004.

SOUZA JR, M.A., **Segmentação multi-níveis e multi-modelos para imagens de radar e ópticas.** Tese Doutorado em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.

SPIEGEL, M. R. **Estatística.** 2. ed. Tradução de Crusius, C. A. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1984. 454 p.

SPRING: **Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling'** Camara, G., Souza, R. C. M., Freitas, U. M., Garrido, J., **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-Jun, 1996.

STATISTICA, data analysis software system, 6.0. Tulsa, OK, USA: StatSoft, Inc.2001. CD-ROM.

STORY, M.; CONGALTON, R.G. Accuracy assessment: a user's perspective. TSCHARNTKE, T.; LEUSCHNER, C.; ZELLER, M.; GUHARDJA, E.; BIDIN, A. **The stability of tropical rainforest margins, linking ecological, economic and social constraints of land use and conservation.** [S.l.]: Springer Verlag Berlin, 2007. 493-512 p. 19

SWAIN, P.H., **Pattern Recognitions: A Basis for Remote Sensing Data Analysis.** LARS Information Note 111572, LARS, Purdue University, West Lafayette, Indiana 1972

- THIEL, C.; DREZET, P.; WEISE, C.; QUEGAN, S.; SCHUMULLIUS, C. **Radar remote sensing for the delineation of forest cover maps and the detection of deforestation.** *Forestry*, v. 79, n. 5, 2006.
- TOMIYASU, K. Tutorial review on synthetic aperture radar (SAR) with application to imaging of the ocean surface. **Proceedings** of the IEEE. v. 66, n. 5, p. 563-584, 1978.
- ULABY, T.F. Radar response to vegetation. **Antennas and Propagation, IEEE Transaction**, v. 23, n. 1, p. 36-45, 1975.
- ULABY, F.T.; BATLIVALA, P.P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture. **IEEE Transactions Geoscience Electronics**, v. 14, n. 2, p. 81-93, 1976.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: Microwave remote sensing fundamentals and radiometry.** v. 1, Norwood, Artech House, 1981.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing active and passive.** Washington: Addison-Wesley, v.2, 1982
- ULABY, F.T.; ALLEN, C.T.; EGER, G.; KANEMASU, E. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. **Remote Sensing Environment.**, v.14, n.1-3, p. 113-133, Jan. 1984.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive.** Reading, Addison-Wesley, 1986a. v.2. 360p.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A.K. **Microwave remote sensing: active and passive: from theory to applications.** Dedham MA:, Artech House, 1986b. v. III.
- ULABY, F. T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications.** Norwood, Artech House, 1990.
- VAN DER SANDEN, J. J. **Radar remote sensing to support tropical forest management.** Doctoral Thesis, Tropenbos-Guyana Series, 330 p.,1997.
- VAN DER SANDEN, J. J.; HOEKMAN, D. H. Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n.1, p. 26-40, 1999.
- VENTURIERI, A. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Inuência da Rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém): Diagnóstico do Meio Socioeconômico, Jurídico e Arqueologia.** [S.l.]: Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2007. 229-252 p.

VIEIRA, P. R., **Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR**. São José dos Campos, 251 p. (INPE 6124-TDI/585).
Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.

WANG, C.; WU, J.; ZHANG, Y.; PAN, G.; QI, J.; SALAS, W.A. Characterizing L-Band Scattering of Paddy Rice in Southeast China With Radiative Transfer Model and Multitemporal ALOS/PALSAR Imagery. **IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing**, vol. 47, no. 4, April 2009.

WHITE, R. **Low-level segmentation of noise imagery**. Memorandum 3900, 1986.
DRA, Royal Signal and Radar Establishment, Works.

WONNACOTT, T.H.; WONNACOTT, R.J. **Introdução à Estatística**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1980.

YANASSE, C. C. F., FRERY, A. C., SANT'ANNA, S. J. S. **Stochastic distribution and the multiplicative model: relations, properties, estimators and applications to SAR image analysis**. São José dos Campos: INPE, 1995. 31 p. (INPE-5630-NTC/318).

ZALOTI, O. D. J.; GONÇALVES, F. G.; FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; SANTOS, J. R. Evaluating the potential of SAR-R99B L and X bands data for Amazon deforestation increment mapping. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006, Denver, Colorado. **Proceedings...**Piscataway: IEEE, 2006. p. 2662-2665.

ZEE BR-163. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Rodovia BR-163: Caracterização da Area de Estudo**. Janeiro 2008. Disponível em:
<<http://zeebr163.cpatu.embrapa.br>>. 41

APÊNDICE A. MATRIZES DE CONFUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES

Matrizes de confusão das classificações MAXVER-ICM sem filtro (A.1 até A.7) e com filtro *Gamma* 5x5 (A.8 até A.14) e das classificações Bhattacharyya sem filtro com segmentação SPRING (A.15 até A.21) e SEGSAR (A.22 até A.28) e com filtro *Gamma* 5x5 segmentação SPRING (A.29 até A.35) e SEGSAR (A.36 até A.42). Para as classes incremento de desflorestamento (D) e a classe floresta (F), são representados os erros de inclusão (E.I.), omissão (E.O.) e a acurácia do usuário (A.U.) e do produtor (A.P.).

A.1 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HH.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U. (%)
Classificação	D	704 (54,87%)	215951 (44,03%)	216655 (44,06%)	99,68	0,32
	F	579 (45,13%)	274488 (55,97%)	275067 (55,94%)	0,21	99,79
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	45,13	44,03			
	A.P.(%)	54,87	55,97			

A.2 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U. (%)
Classificação	D	786 (61,26%)	26355 (5,37%)	27141 (5,52%)	97,10	2,90
	F	497 (38,74%)	464084 (94,63%)	464581 (94,48%)	0,11	99,89
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	38,74	5,37			
	A.P.(%)	61,26	94,63			

A.3 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal VV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U. (%)
Classificação	D	1220 (95,09%)	445427 (90,82%)	446647 (90,83%)	99,73	0,27
	F	63 (4,91%)	45012 (9,18%)	45075 (9,17%)	0,14	99,86
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	4,91	90,82			
	A.P.(%)	95,09	9,18			

A.4 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	976 (76,07%)	23297 (4,75%)	24273 (4,94%)	95,98	4,02
	F	307 (23,93%)	467142 (95,25%)	467449 (95,06%)	0,07	99,93
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	23,93	4,75			
	A.P.(%)	76,07	95,25			

A.5 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HV+VV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	948 (73,89%)	59457 (12,12%)	60405 (12,28%)	98,43	1,57
	F	335 (26,11%)	430982 (87,88%)	431317 (87,72%)	0,08	99,92
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	26,11	12,12			
	A.P.(%)	73,89	87,88			

A.6 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+VV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	920 (71,71%)	145766 (29,72%)	146686 (29,83%)	99,37	0,63
	F	363 (28,29%)	344673 (70,28%)	345036 (70,17%)	0,11	99,89
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	28,29	29,72			
	A.P.(%)	71,71	70,28			

A.7 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV+VV.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1027 (80,05%)	30130 (6,14%)	31157 (6,34%)	96,70	3,30
	F	256 (19,95%)	460309 (93,86%)	460565 (93,66%)	0,06	99,94
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	19,95	6,14			
	A.P.(%)	80,05	93,86			

A.8 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HH para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	608 (47,39%)	153568 (31,31%)	154176 (31,35%)	99,61	0,39
	F	675 (52,61%)	336871 (68,69%)	337546 (68,65%)	0,20	99,80
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	52,61	31,31			
	A.P.(%)	47,39	68,69			

A.9 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal HV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	848 (66,10%)	21469 (4,38%)	22317 (4,54%)	96,20	3,80
	F	435 (33,90%)	468970 (95,62%)	469405 (95,46%)	0,09	99,91
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	33,90	4,38			
	A.P.(%)	66,10	95,62			

A.10 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com o canal VV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	880 (68,59%)	251198 (51,22%)	252078 (51,26%)	99,65	0,35
	F	403 (31,41%)	239241 (48,78%)	239644 (48,74%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	31,41	51,22			
	A.P.(%)	68,59	48,78			

A.11 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1130 (88,07%)	17670 (3,60%)	18800 (3,82%)	93,99	6,01
	F	153 (11,93%)	472769 (96,40%)	472922 (96,18%)	0,03	99,97
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	11,93	3,60			
	A.P.(%)	88,07	96,40			

A.12 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HV+VV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	912 (71,08%)	27493 (5,61%)	28405 (5,77%)	96,79	3,21
	F	371 (28,92%)	462946 (94,39%)	463317 (94,23%)	0,08	99,92
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	28,92	5,61			
	A.P.(%)	71,08	94,39			

A.13 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+VV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	879 (68,51%)	64283 (13,11%)	65162 (13,25%)	98,65	1,35
	F	404 (31,49%)	426156 (86,89%)	426560 (86,75%)	0,09	99,91
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	31,49	13,11			
	A.P.(%)	68,51	86,89			

A.14 – Matriz de confusão da classificação MAXVER-ICM realizada com os canais HH+HV+VV para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1134 (88,39%)	19431 (3,96%)	20565 (4,18%)	94,49	5,51
	F	149 (11,61%)	471008 (96,04%)	471157 (95,82%)	0,03	99,97
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	11,61	3,96			
	A.P.(%)	88,39	96,04			

A.15 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	463 (36,09%)	3915 (0,80%)	4378 (0,89%)	89,42	10,58
	F	820 (63,91%)	486524 (99,20%)	487344 (99,11%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	63,91	0,80			
	A.P.(%)	36,09	99,20			

A.16 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	646 (50,35%)	1126 (0,23%)	1772 (0,36%)	63,54	36,46
	F	637 (49,65%)	489313 (99,77%)	489950 (99,64%)	0,13	99,87
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	49,65	0,23			
	A.P.(%)	50,35	99,77			

A.17 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	463 (36,09%)	1053 (0,21%)	1516 (0,31%)	69,46	30,54
	F	820 (63,91%)	489386 (99,79%)	490206 (99,69%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	63,91	0,21			
	A.P.(%)	36,09	99,79			

A.18 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	735 (57,29%)	865 (0,18%)	1600 (0,33%)	54,06	45,94
	F	548 (42,71%)	489574 (99,82%)	490122 (99,67%)	0,11	99,89
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	42,71	0,18			
	A.P.(%)	57,29	99,82			

A.19 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	630 (49,10%)	941 (0,19%)	1571 (0,32%)	59,90	40,10
	F	653 (50,90%)	489498 (99,81%)	490151 (99,68%)	0,13	99,87
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	50,90	0,19			
	A.P.(%)	49,10	99,81			

A.20 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	463 (36,09%)	751 (0,15%)	1214 (0,25%)	61,86	38,14
	F	820 (63,91%)	489688 (99,85%)	490508 (99,75%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	63,91	0,15			
	A.P.(%)	36,09	99,85			

A.21 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SPRING.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	738 (57,52%)	873 (0,18%)	1611 (0,33%)	54,19	45,81
	F	545 (42,48%)	489566 (99,82%)	490111 (99,67%)	0,11	99,89
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	42,48	0,18			
	A.P.(%)	57,52	99,82			

A.22 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1193 (92,99%)	8108 (1,65%)	9301 (1,89%)	87,17	12,83
	F	90 (7,01%)	482331 (98,35%)	482421 (98,11%)	0,02	99,98
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	7,01	1,65			
	A.P.(%)	92,99	98,35			

A.23 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1283 (100%)	7797 (1,59%)	9080 (1,85%)	85,87	14,13
	F	0 (0%)	482642 (98,41%)	482642 (98,15%)	0	100
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	0	1,59			
	A.P.(%)	100	98,41			

A.24 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1090 (84,96%)	9219 (1,88%)	10309 (2,10%)	89,43	10,57
	F	193 (15,04%)	481220 (98,12%)	481413 (97,90%)	0,04	99,96
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	15,04	1,88			
	A.P.(%)	84,96	98,12			

A.25 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1191 (92,83%)	3653 (0,74%)	4844 (0,99%)	75,41	24,59
	F	92 (7,17%)	486786 (99,26%)	486878 (99,01%)	0,02	99,98
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	7,17	0,74			
	A.P.(%)	92,83	99,26			

A.26 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1283 (100%)	5625 (1,15%)	6908 (1,40%)	81,43	18,57
	F	0 (0%)	484814 (98,85%)	484814 (98,60%)	0	100
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	0	1,15			
	A.P.(%)	100	98,85			

A.27 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1072 (83,55%)	5077 (1,04%)	6149 (1,25%)	82,57	17,43
	F	211 (16,45%)	485362 (98,96%)	485573 (98,75%)	0,04	99,96
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	16,45	1,04			
	A.P.(%)	83,55	98,86			

A.28 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SEGSAR.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1281 (99,84%)	2761 (0,56%)	4042 (0,82%)	68,31	31,69
	F	2 (0,16%)	487678 (99,44%)	487680 (99,18%)	0	100
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	0,16	0,56			
	A.P.(%)	99,84	99,44			

A.29 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	463 (36,09 %)	949 (0,19%)	1412 (0,29%)	67,21	32,79
	F	820 (63,91%)	489490 (99,81%)	490310 (99,71%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	63,91	0,19			
	A.P.(%)	36,09	99,81			

A.30 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	705 (54,95 %)	1434 (0,29%)	2139 (0,44%)	67,04	32,96
	F	578 (45,05%)	489005 (99,71%)	489583 (99,56%)	0,12	99,88
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	45,05	0,29			
	A.P.(%)	54,95	99,71			

A.31 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	463 (36,09%)	1428 (0,29%)	1891 (0,38%)	75,52	24,48
	F	820 (63,91%)	489011 (99,71%)	489831 (99,62%)	0,17	99,83
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	63,91	0,29			
	A.P.(%)	36,09	99,71			

A.32 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência					
		Classes	D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D		1165 (90,80%)	2774 (0,57%)	3939 (0,80%)	70,42	29,58
	F		118 (9,20%)	487665 (99,43%)	487783 (99,20%)	0,02	99,98
	Total		1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)		9,20	0,57			
	A.P.(%)		90,80	99,43			

A.33 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência					
		Classes	D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D		743 (57,91%)	1506 (0,31%)	2249 (0,46%)	66,96	33,04
	F		540 (42,09%)	488933 (99,69%)	489473 (99,54%)	0,11	99,89
	Total		1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)		42,09	0,31			
	A.P.(%)		57,91	99,69			

A.34 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SPRING, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência					
		Classes	D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D		725 (56,51%)	1270 (0,26%)	1995 (0,41%)	63,66	36,34
	F		558 (43,49%)	489169 (99,74%)	489727 (99,59%)	0,11	99,89
	Total		1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)		43,49	0,26			
	A.P.(%)		56,51	99,74			

A.35 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SPRING na imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência					
		Classes	D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D		1165 (90,80%)	2796 (0,57%)	3961 (0,81%)	70,59	29,41
	F		118 (9,20%)	487643 (99,43%)	487761 (99,19%)	0,02	99,98
	Total		1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)		9,20	0,57			
	A.P.(%)		90,80	99,43			

A.36 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HH, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	932 (72,64%)	9943 (2,03%)	10875 (2,21%)	91,43	8,57
	F	351 (27,36%)	480496 (97,97%)	480847 (97,79%)	0,07	99,93
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	27,36	2,03			
	A.P.(%)	72,64	97,97			

A.37 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal HV segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1283 (100%)	11936 (2,43%)	13219 (2,69%)	90,29	9,71
	F	0 (0%)	478503 (97,57%)	478503 (97,31%)	0	100
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	0	2,43			
	A.P.(%)	100	97,57			

A.38 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com o canal VV segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	920 (71,71%)	9174 (1,87%)	10094 (2,05%)	90,89	9,11
	F	363 (28,29%)	481265 (98,13%)	481628 (97,95%)	0,08	99,92
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	28,29	1,87			
	A.P.(%)	71,71	98,13			

A.39 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1244 (96,96%)	4619 (0,94%)	5863 (1,19%)	78,78	21,22
	F	39 (3,04%)	485820 (99,06%)	485859 (98,81%)	0,01	99,99
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	3,04	0,94			
	A.P.(%)	96,96	99,06			

A.40 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HV+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1223 (95,32%)	5093 (1,04%)	6316 (1,28%)	80,64	19,36
	F	60 (4,68%)	485346 (98,96%)	485406 (98,72%)	0,01	99,99
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	4,68	1,04			
	A.P.(%)	95,32	98,96			

A.41 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1234 (96,18%)	3029 (0,62%)	4263 (0,87%)	71,05	28,95
	F	49 (3,82%)	487410 (99,38%)	487459 (99,13%)	0,01	99,99
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	3,82	0,62			
	A.P.(%)	96,18	99,38			

A.42 – Matriz de confusão da classificação por regiões Bhattacharyya realizada com os canais HH+HV+VV, segmentação no SEGSAR, para a imagem amplitude com *Gamma* 5x5.

		Referência				
Classes		D	F	Total	E.I. (%)	A.U.(%)
Classificação	D	1230 (95,87%)	2701 (0,55%)	3931 (0,80%)	68,71	31,29
	F	53 (4,13%)	487738 (99,45%)	487791 (99,20%)	0,01	99,99
	Total	1283 (100%)	490439 (100%)	491722 (100%)		
	E.O.(%)	4,13	0,55			
	A.P.(%)	95,87	99,45			

APÊNDICE B. MAPAS TEMÁTICOS RESULTANTES DAS CLASSIFICAÇÕES

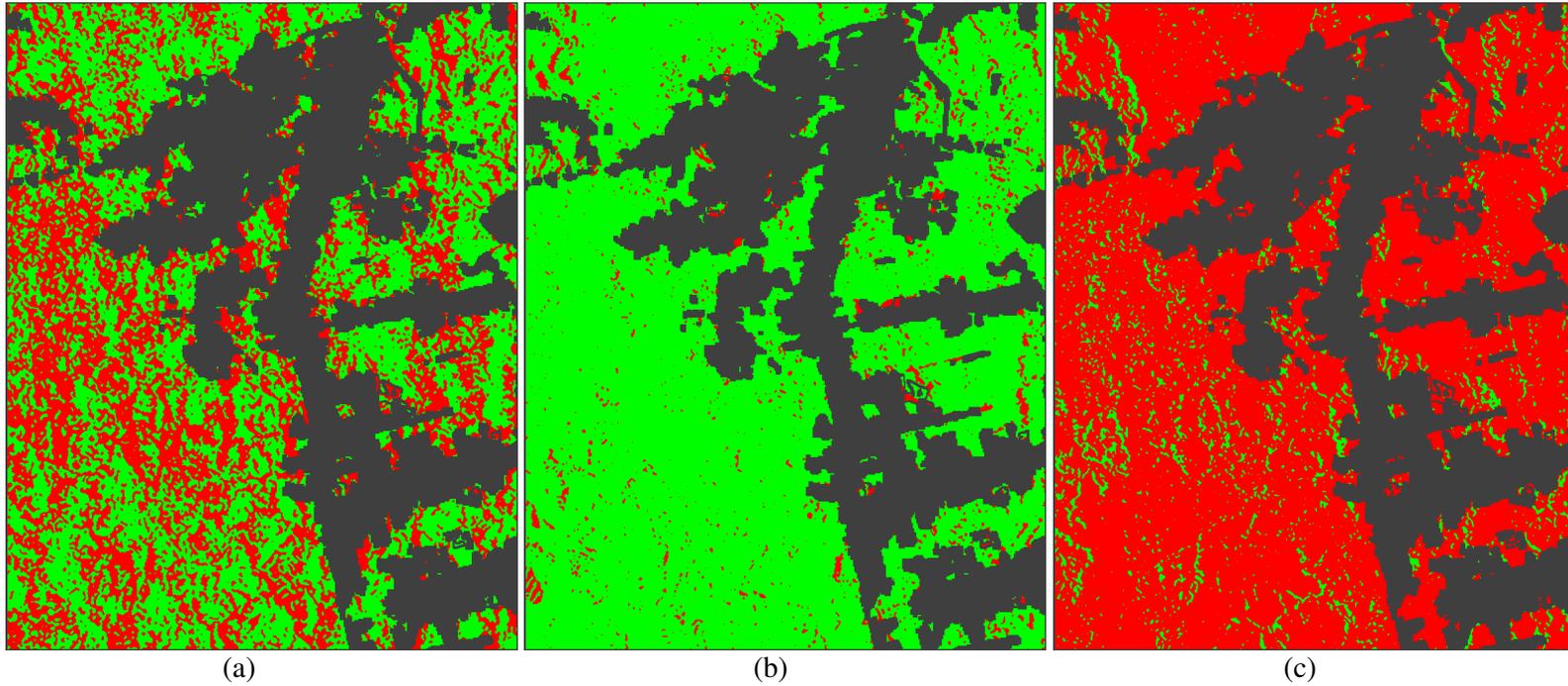
Mapas temáticos resultantes das classificações:

- MAXVER-ICM para a imagem amplitude sem filtro: a partir de dados univariados (B.1 (a) classificação no canal HH, B.1 (b) classificação no canal HV e B.1 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.2 (a) classificação no canal HH+HV, B.2 (b) classificação no canal HV+VV e B.2 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.3 - canais HH+HV+VV).
- MAXVER-ICM para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5: a partir de dados univariados (B.4 (a) classificação no canal HH, B.4 (b) classificação no canal HV e B.4 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.5 (a) classificação no canal HH+HV, B.5 (b) classificação no canal HV+VV e B.5 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.6 - canais HH+HV+VV).
- Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SPRING: a partir de dados univariados (B.7 (a) classificação no canal HH, B.7 (b) classificação no canal HV e B.7 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.8 (a) classificação no canal HH+HV, B.8 (b) classificação no canal HV+VV e B.8 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.9 - canais HH+HV+VV).
- Bhattacharyya para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR: a partir de dados univariados (B.10 (a) classificação no canal HH, B.10 (b) classificação no canal HV e B.10 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.11 (a) classificação no canal HH+HV, B.11 (b) classificação no canal HV+VV e B.11 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.12 - canais HH+HV+VV).
- Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 e segmentação pelo SPRING: a partir de dados univariados (B.13 (a) classificação no canal HH, B.13 (b) classificação no canal HV e B.13 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.14 (a) classificação no canal HH+HV, B.14 (b) classificação no

canal HV+VV e B.14 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.15 - canais HH+HV+VV).

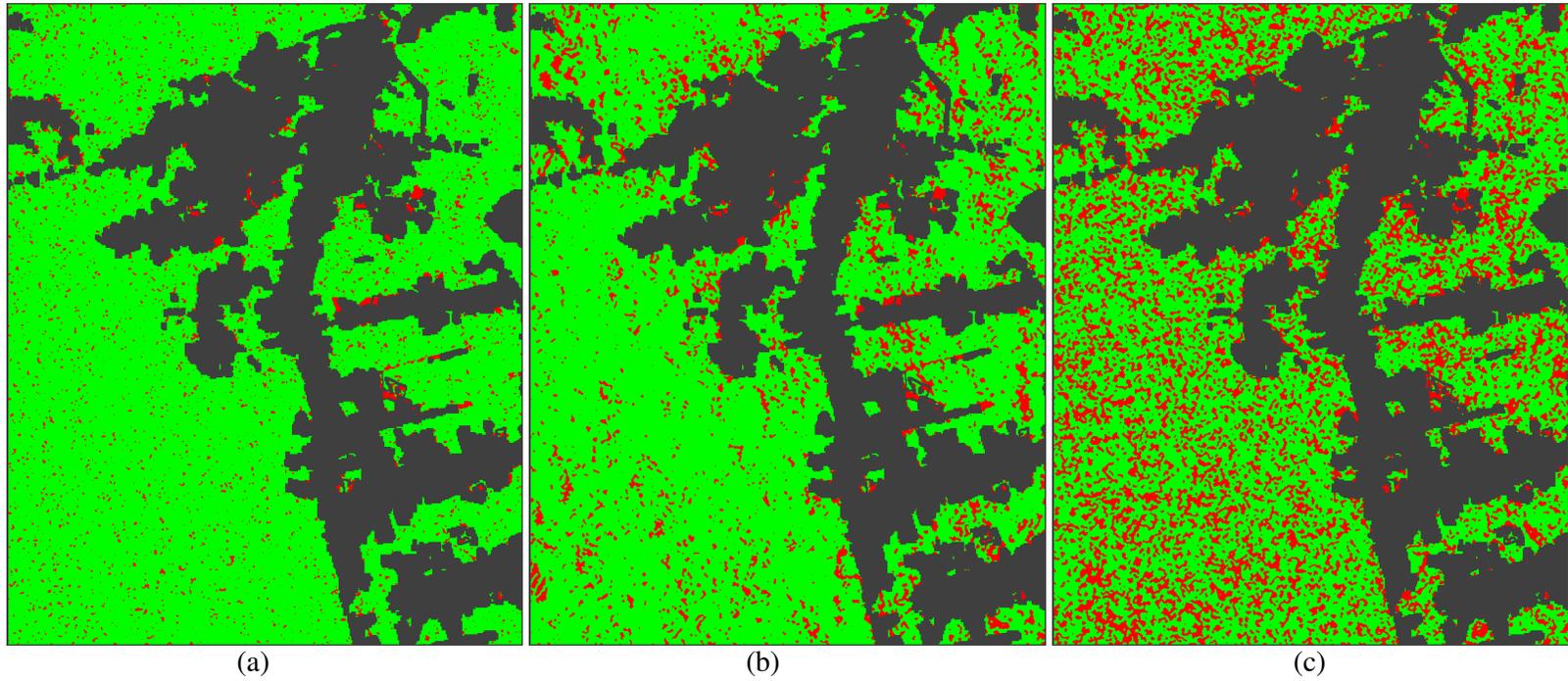
- Bhattacharyya para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 e segmentação pelo SEGSAR: a partir de dados univariados (B.16 (a) classificação no canal HH, B.16 (b) classificação no canal HV e B.16 (c) classificação no canal VV), bivariados (B.17 (a) classificação no canal HH+HV, B.17 (b) classificação no canal HV+VV e B.17 (c) classificação no canal HH+VV) e multivariados (B.18 - canais HH+HV+VV).

Na figura B.19 é ilustrado o intervalo de confiança com 95% para o coeficiente *kappa* de todas as classificações ordenadas por canal.

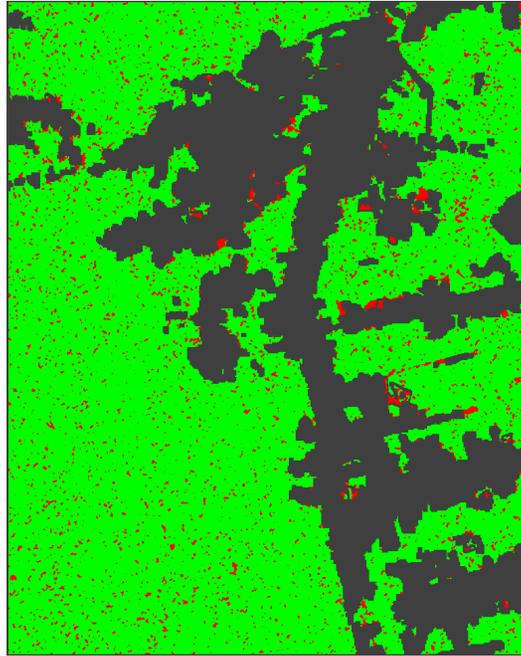


■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.1 – Classificações MAXVER-ICM a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.

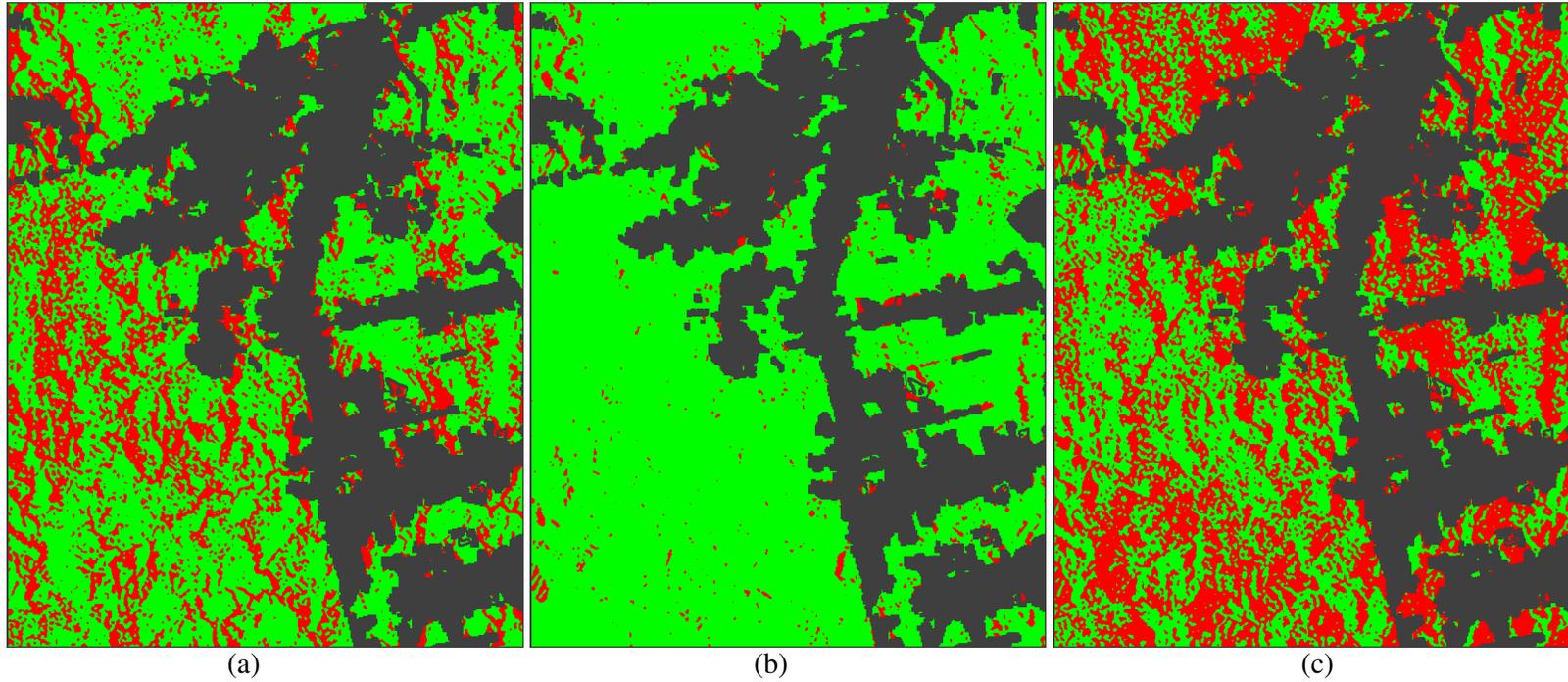


B.2 – Classificações MAXVER-ICM a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



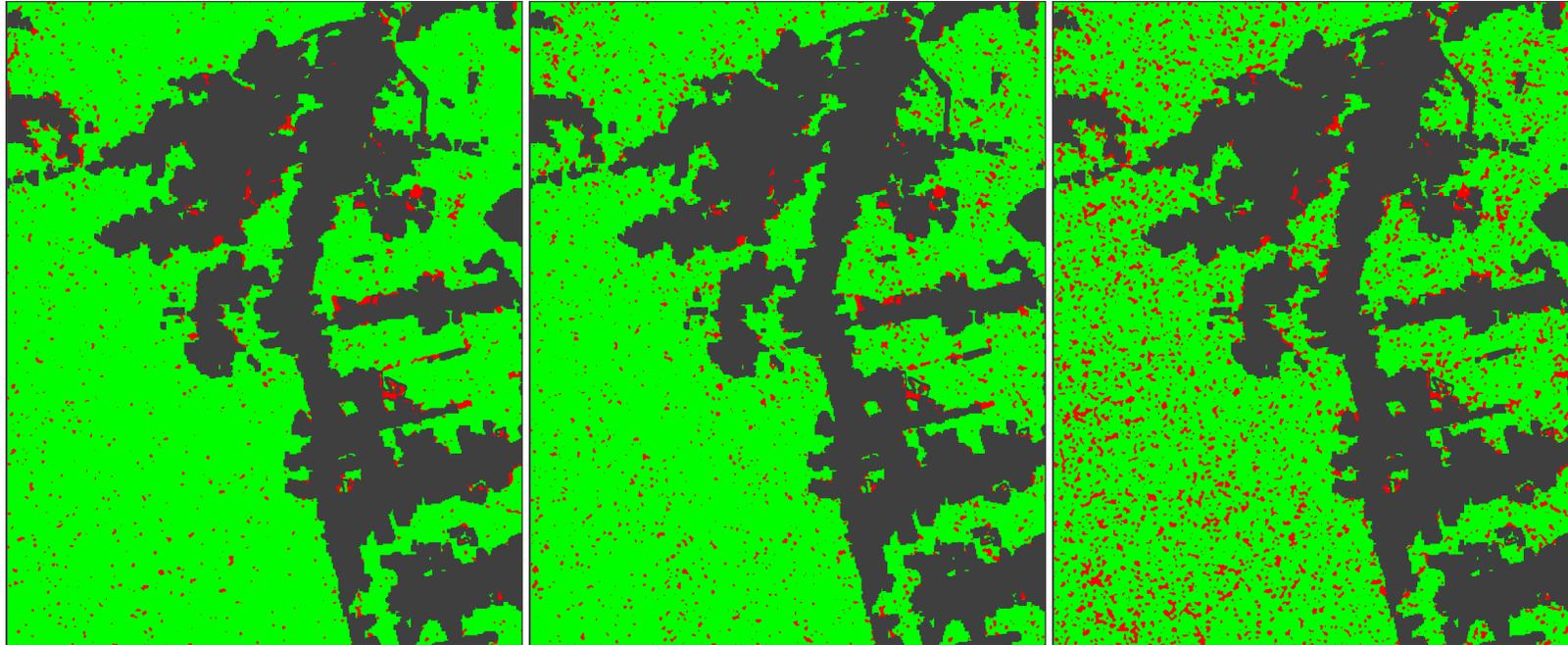
■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.3 – Classificação MAXVER-ICM a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.



■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.4 – Classificações MAXVER-ICM a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.



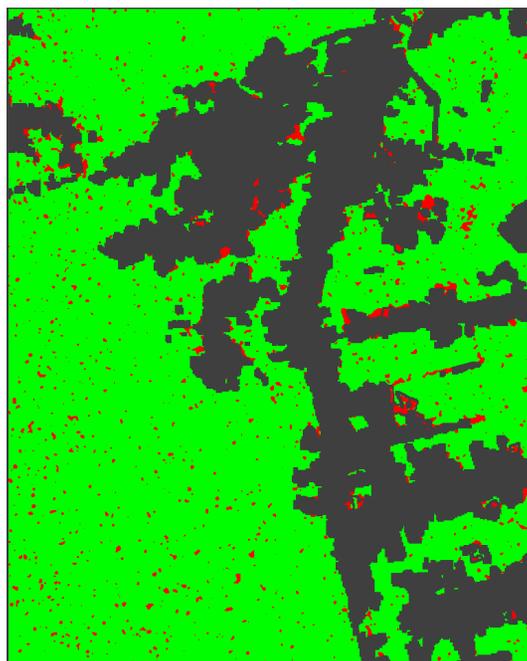
(a)

(b)

(c)

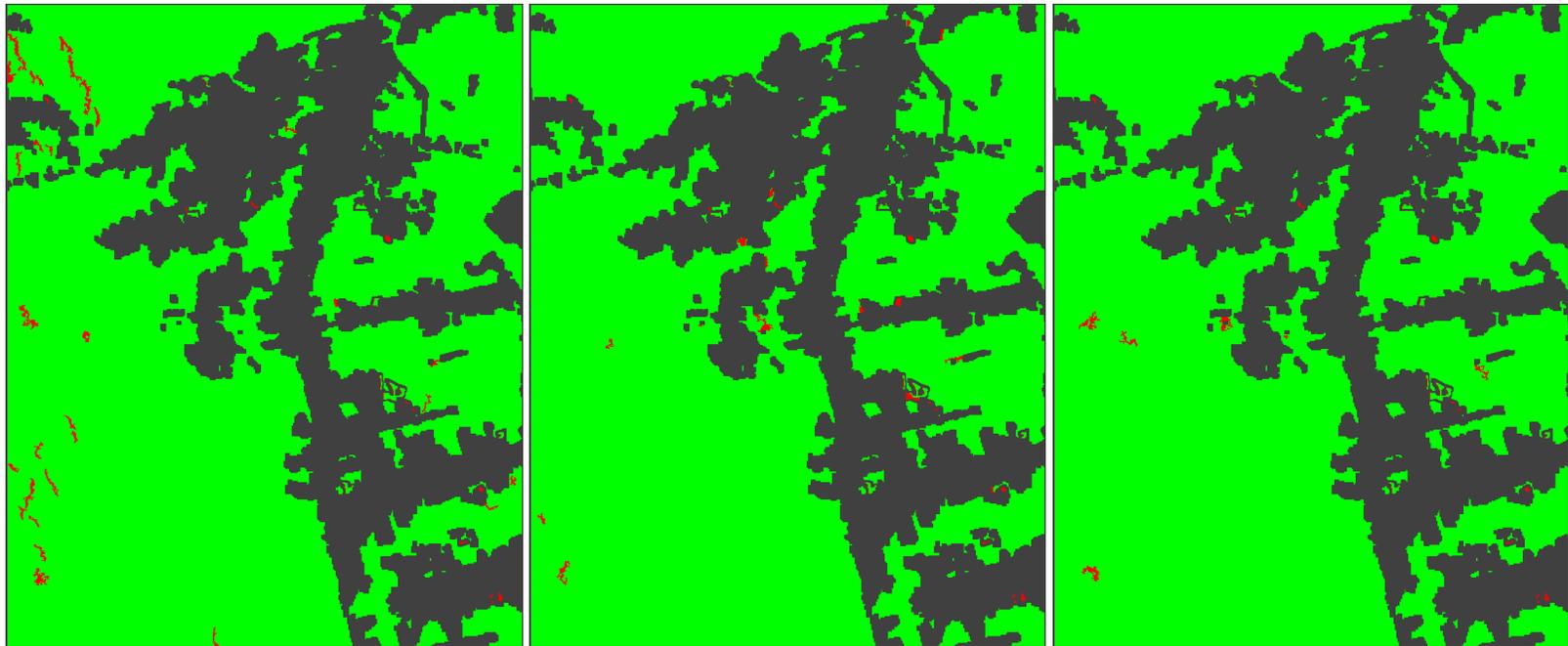
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.5 – Classificações MAXVER-ICM a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.6 – Classificação MAXVER-ICM a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.



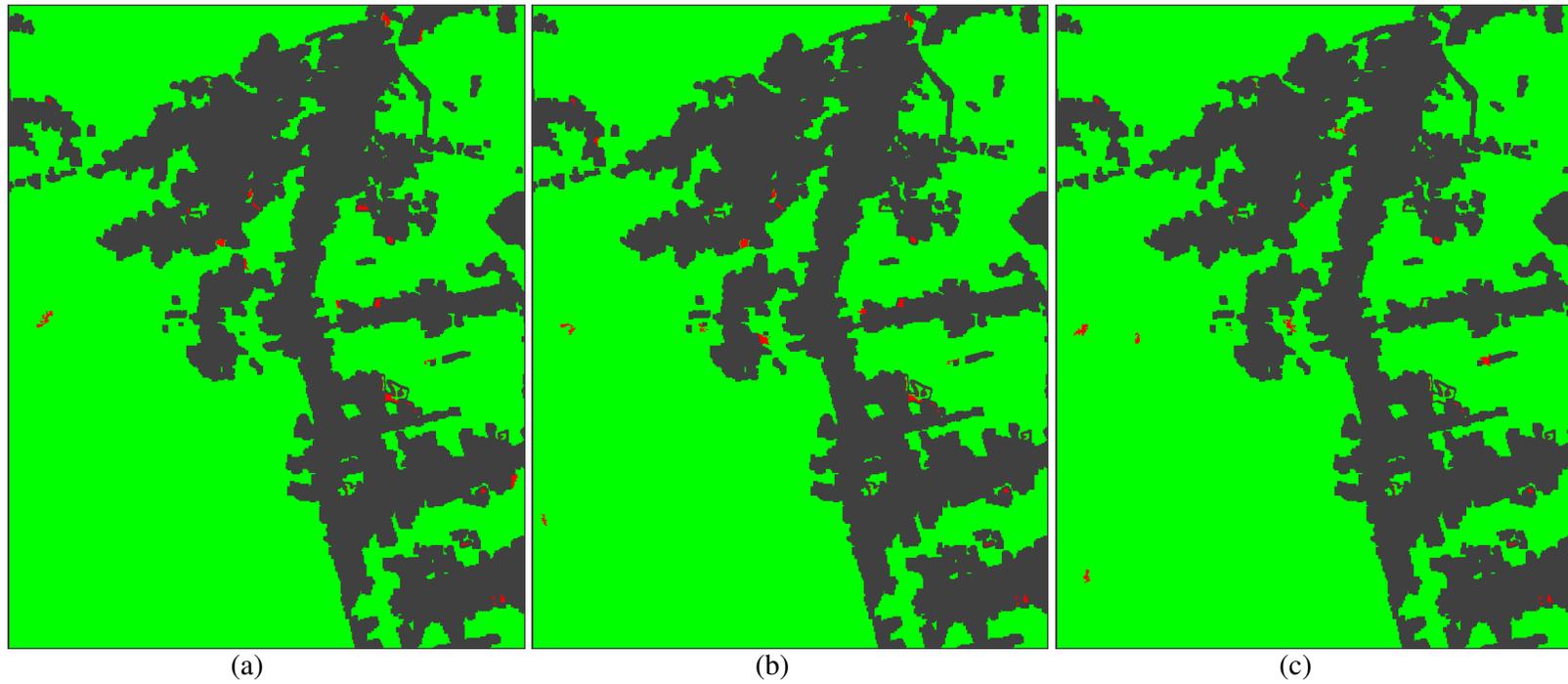
(a)

(b)

(c)

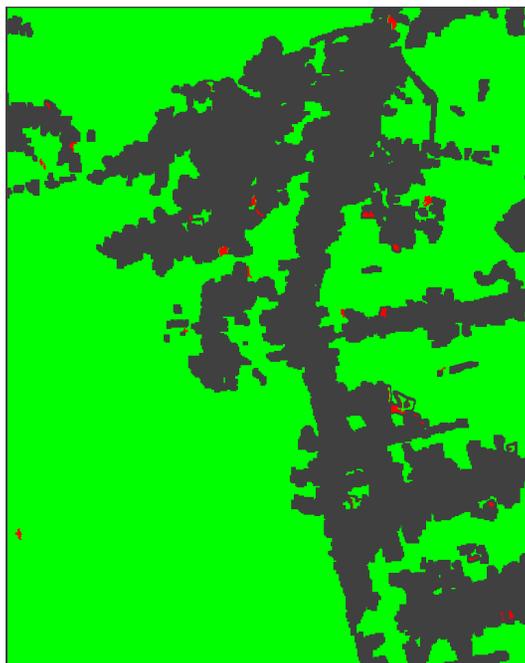
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.7 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação por crescimento de regiões do SPRING. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.



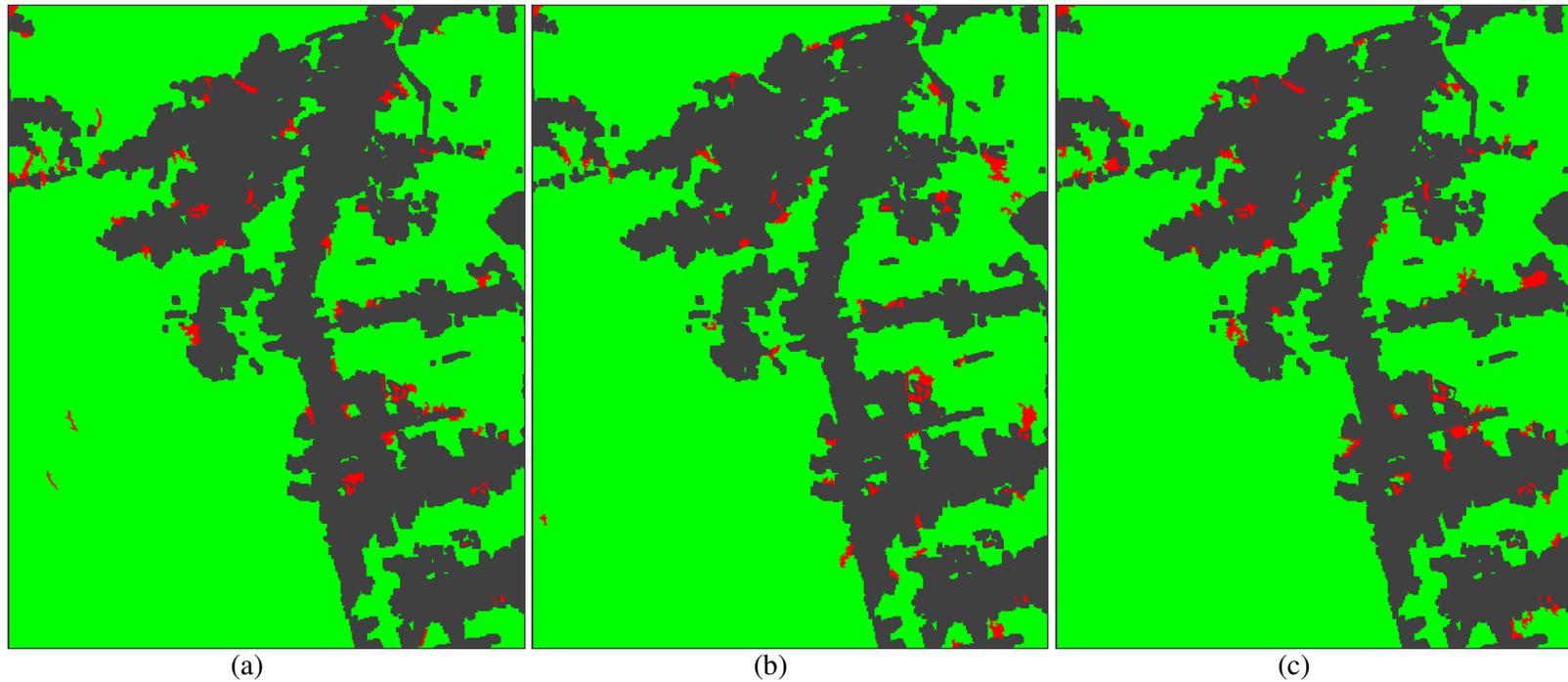
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.8 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação por crescimento de regiões do SPRING. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



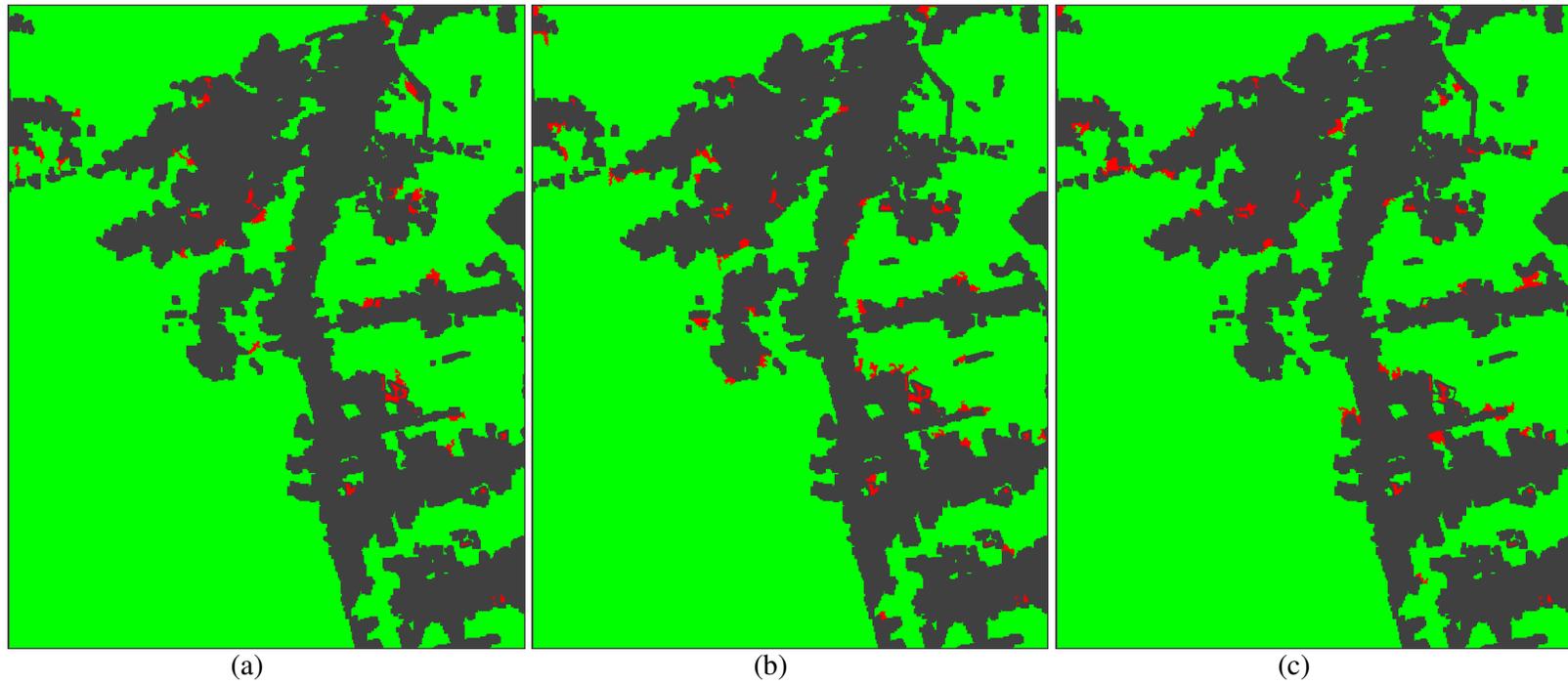
■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.9 – Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SPRING, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.



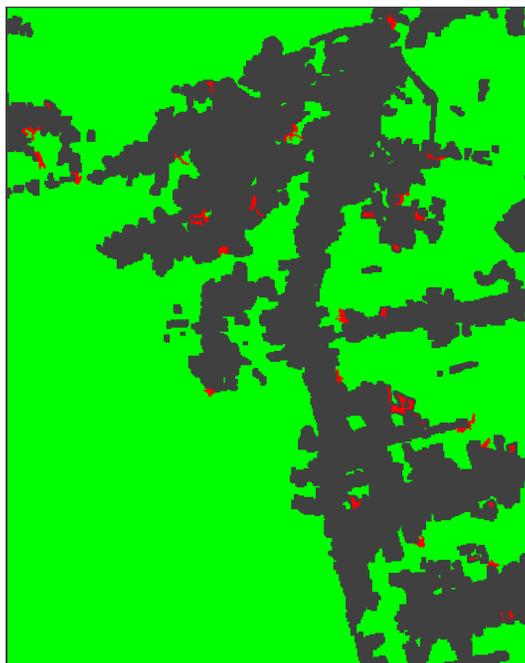
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.10 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.



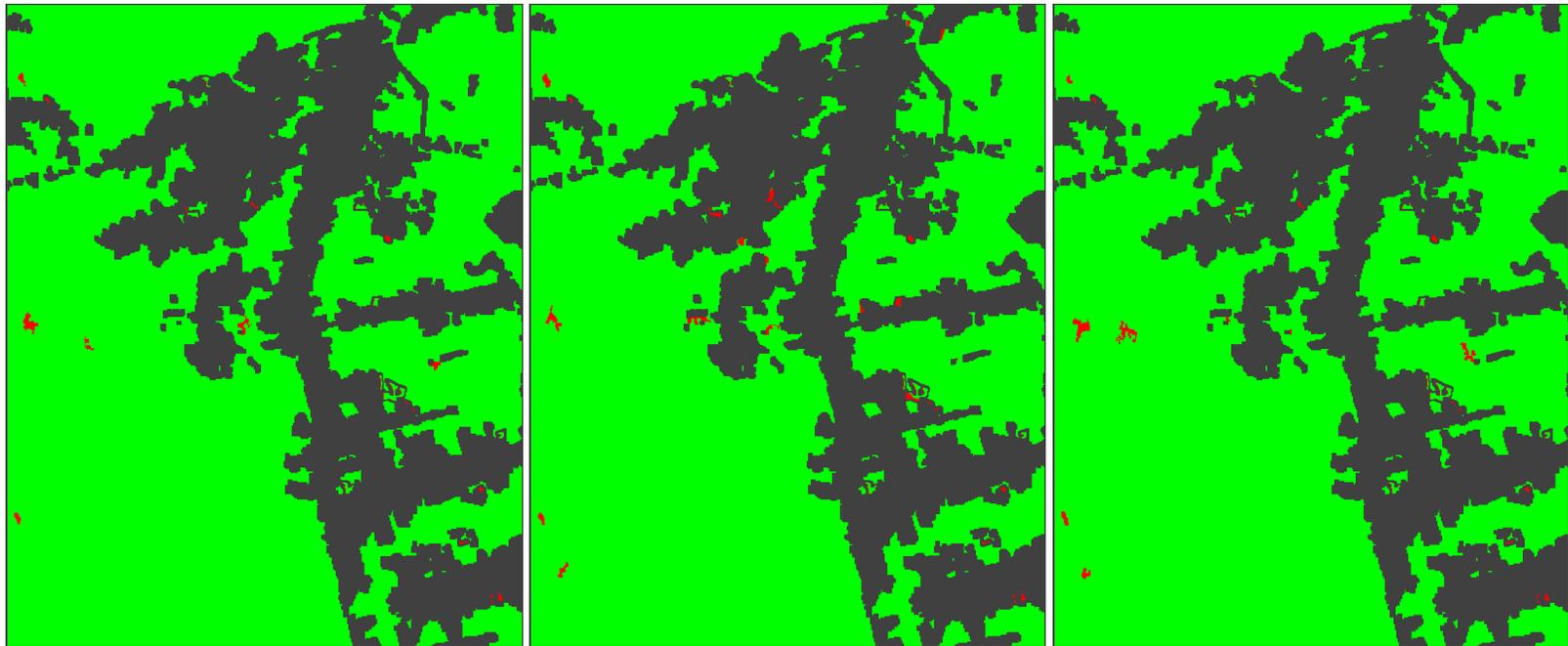
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.11 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude sem filtro e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.12 – Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SEGSAR, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude sem filtro.



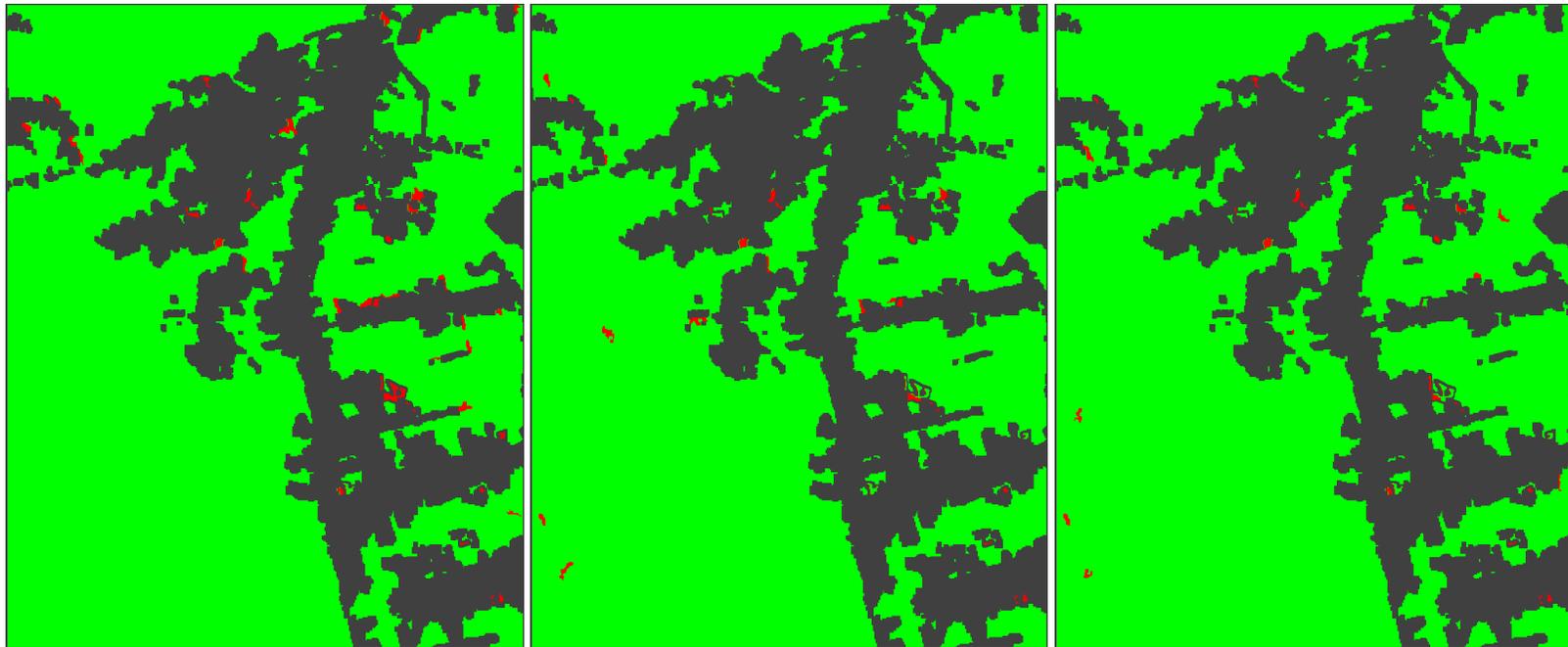
(a)

(b)

(c)

■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.13 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma* 5x5 e segmentação pelo SPRING. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.



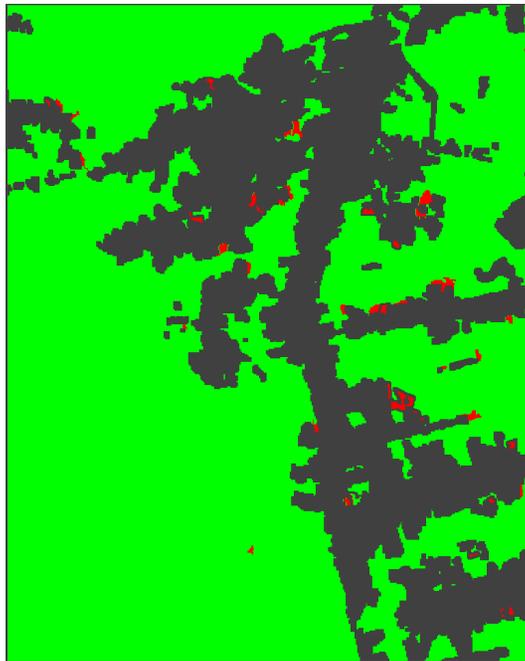
(a)

(b)

(c)

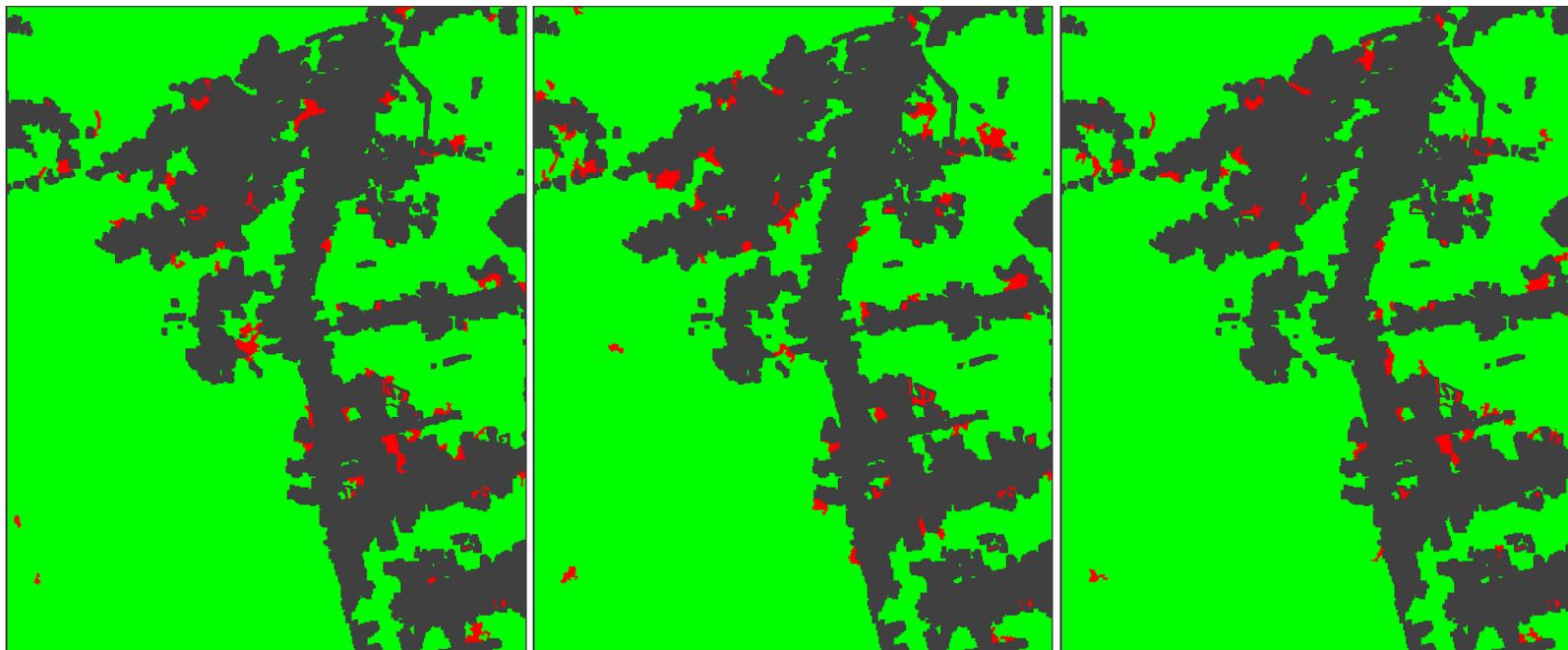
■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.14 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5* e segmentação pelo SPRING. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.15 – Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SPRING, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.



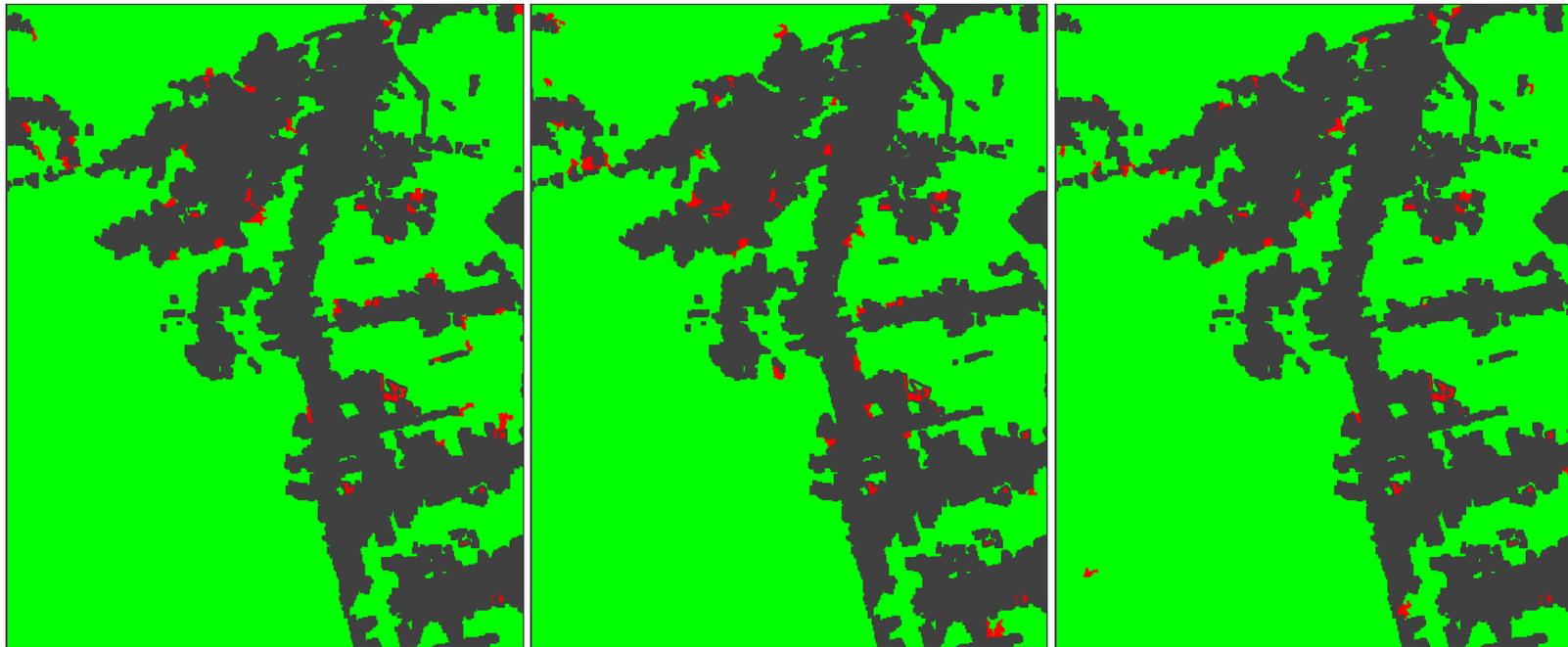
(a)

(b)

(c)

■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.16 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados univariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5* e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH, (b) classificação no canal HV e em (c) classificação no canal VV.



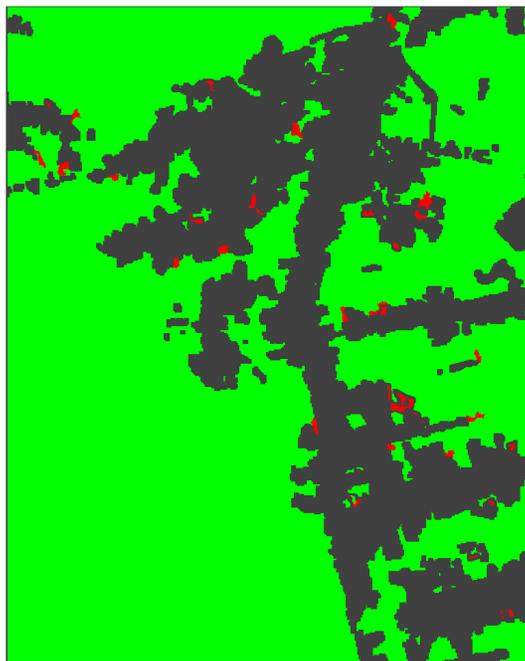
(a)

(b)

(c)

■ Classificação: Floresta
 ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006
 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

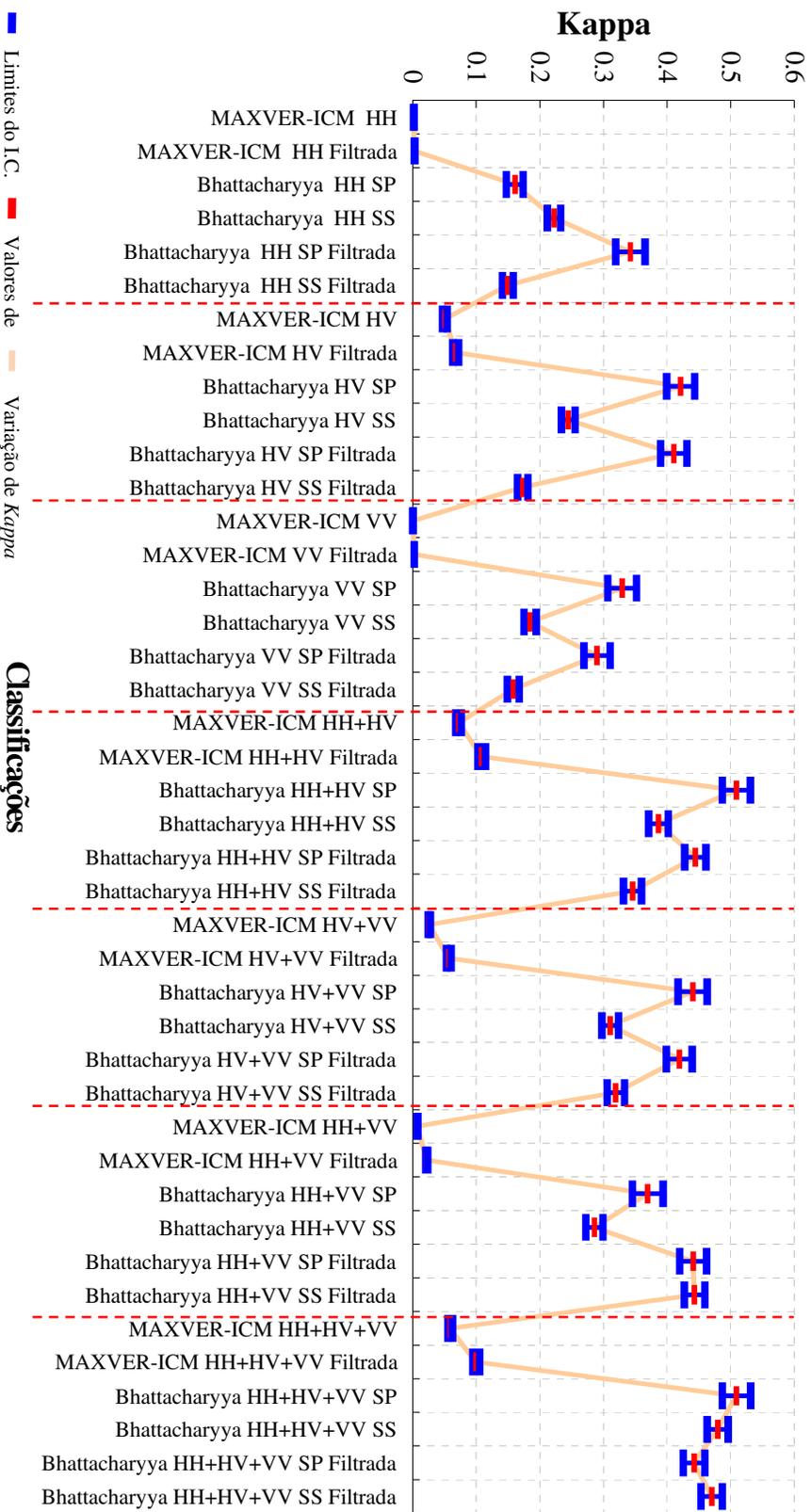
B.17 – Classificações obtidas pelo método por regiões Bhattacharyya a partir de dados bivariados para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5* e segmentação pelo SEGSAR. Em (a) classificação no canal HH+HV, (b) classificação no canal HV+VV e em (c) classificação no canal HH+VV.



■ Classificação: Floresta ■ Classificação: Incremento de Desflorestamento 2006 ■ Máscara de desflorestamento acumulado até 2005

B.18 – Classificação obtida pelo método por regiões Bhattacharyya e segmentação pelo SEGSAR, a partir de dados multivariados (canais HH+HV+VV) para a imagem amplitude com filtro *Gamma 5x5*.

Intervalo de confiança para o kappa de todas as classificações ordenados por canal

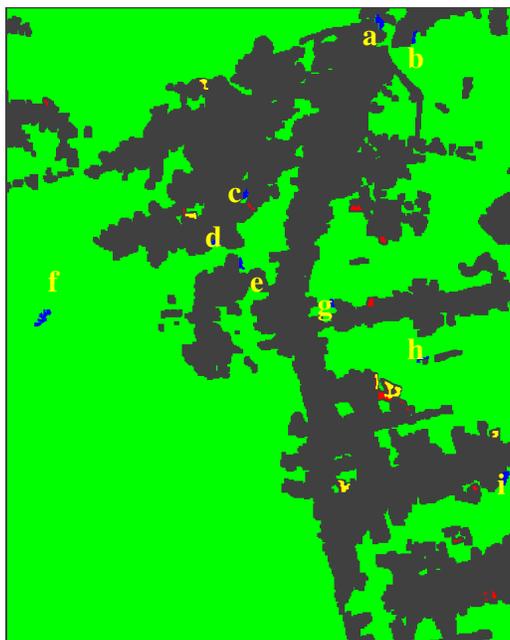


B.19 – Intervalo de confiança de 95%, ordenados por canal, para os coeficientes kappa das imagens sem filtro e com filtro Gamma 5x5 classificadas pelo classificador MAXVER-ICM e Bhattacharyya (segmentadas pelo SPRING (SP) e SEGSR (SS)) classificadas individualmente (HH, HV e VV), aos pares (HH+HV, HV+VV, HH+VV) e em conjunto (HH+HV+VV), gerando um total de quarenta e duas classificações.

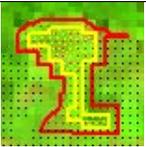
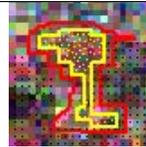
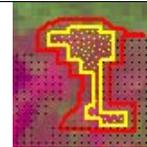
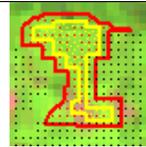
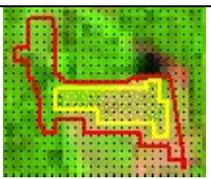
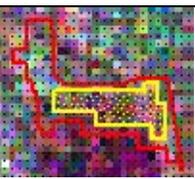
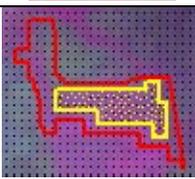
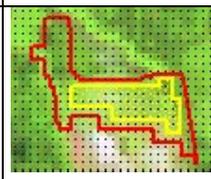
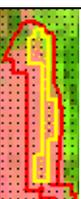
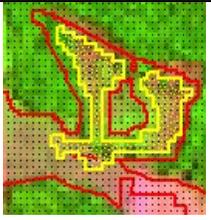
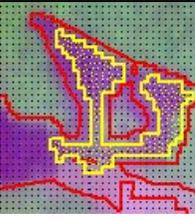
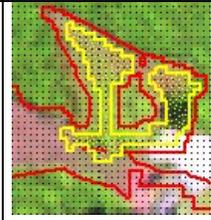
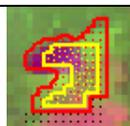
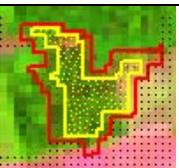
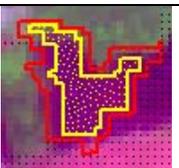
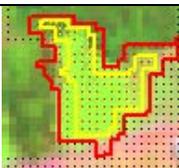
APÊNDICE C. ERROS DE OMISSÃO E INCLUSÃO DAS CLASSIFICAÇÕES BHATTACHARYYA PARA OS CANAIS HH+HV

Erros de omissão (E.O.) e inclusão (E.I.) resultante das classificações HH+HV utilizando o classificador Bhattacharyya para os seguintes casos:

- Classificação utilizando segmentação SPRING na imagem sem filtro (C.1). Os E.O. e E.I. são ilustrados respectivamente em C.2 e C.3.
- Classificação utilizando segmentação SPRING na imagem com filtro *Gamma* 5x5 (C.4). Os E.O. e E.I. são ilustrados respectivamente em C.5 e C.6.
- Classificação utilizando segmentação SEGSAR na imagem sem filtro (C.7). Os E.O. e E.I. são ilustrados respectivamente em C.8 e C.9.
- Classificação utilizando segmentação SEGSAR na imagem com filtro *Gamma* 5x5 (C.10). Os E.O. e E.I. são ilustrados respectivamente em C.11 e C.12.



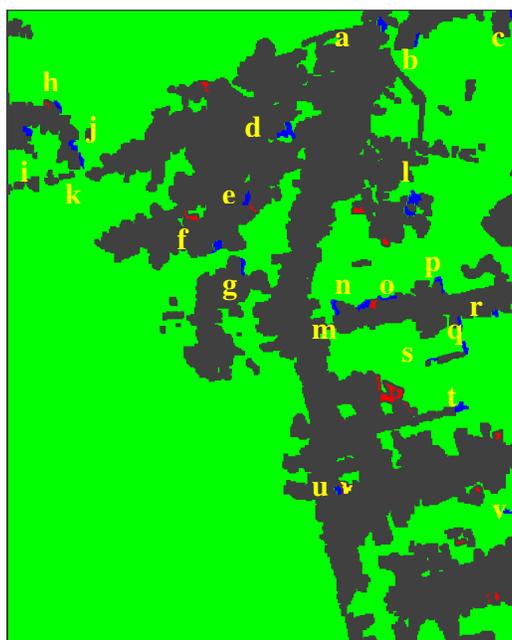
C.1 – Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. As letras de “a” até “i” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.3.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007
D1 (a)				
D4 (b)				
D7 (c)				
D8 (d)				
D10 (e)				
D11 (f)				

C.2 – E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007	Incremento de desflorestamento em 2007
(a)					
(b)					
(c)					
(d)					
(e)					
(f)					
(g)					
(h)					
(i)					

C.3 – E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007.



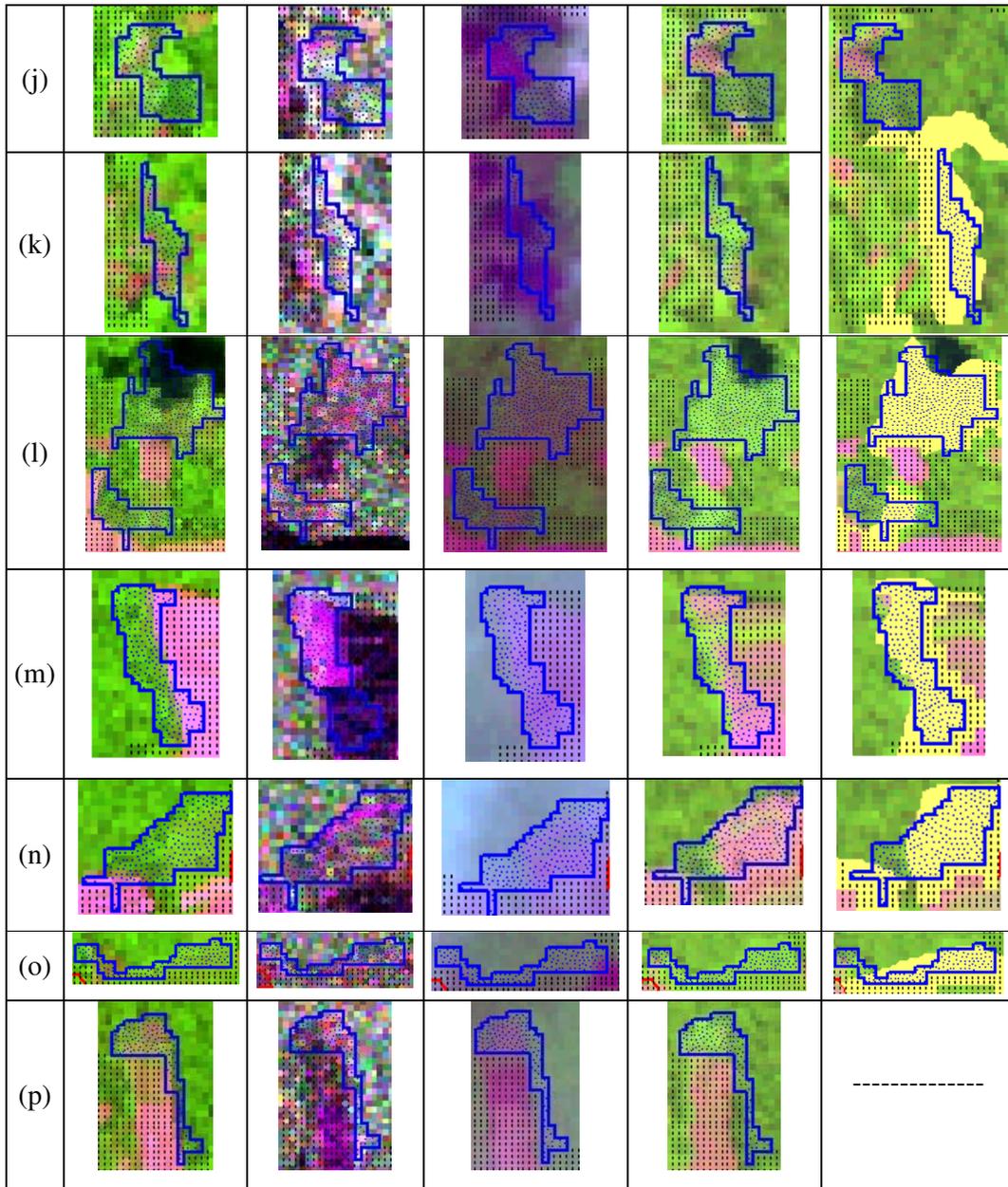
C.4 – Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. As letras de “a” até “v” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.6.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007
D11 (a)				

C.5 – E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007	Incremento de desflorestamento em 2007
(a)	Igual ao da figura C.3 (a)				
(b)	Igual ao da figura C.3 (b)				
(c)					-----
(d)					-----
(e)					-----
(f)					
(g)					-----
(h)					-----
(i)					-----

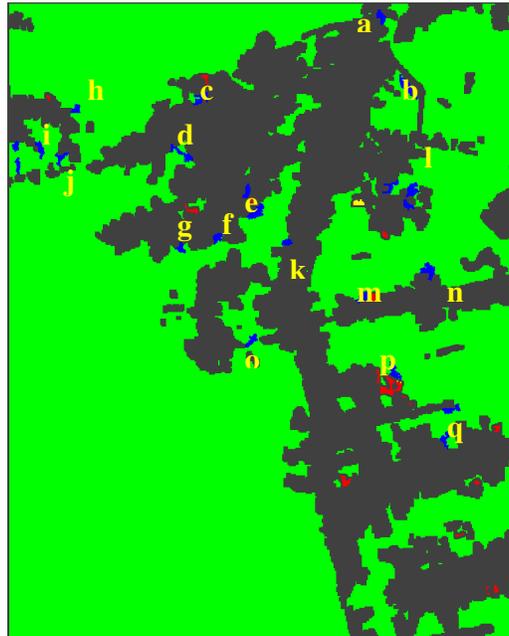
C.6 – E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)



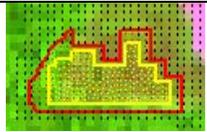
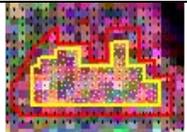
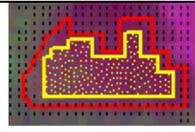
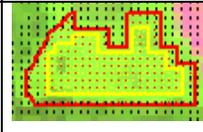
C.6 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)

(q)					-----
(r)					
(s)					
(t)					-----
(u)					-----
(v)					-----

C.6 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SPRING para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado.



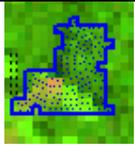
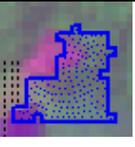
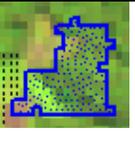
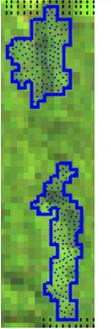
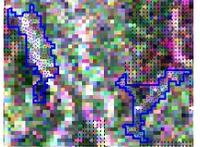
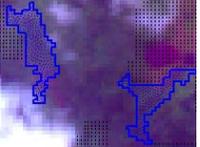
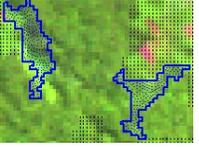
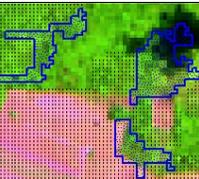
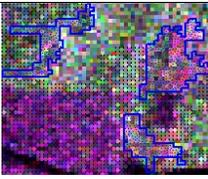
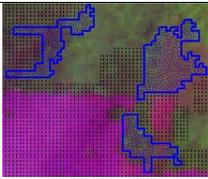
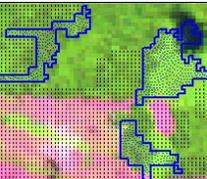
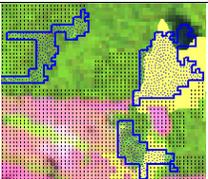
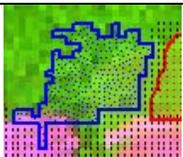
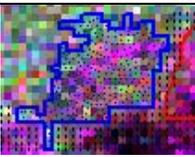
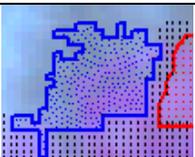
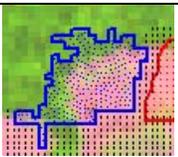
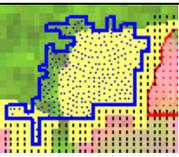
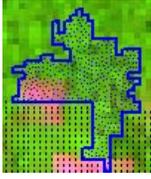
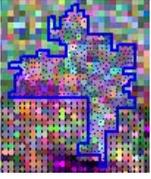
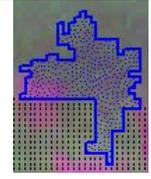
C.7 – Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. As letras de “a” até “q” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.9.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007
D5 (a)				

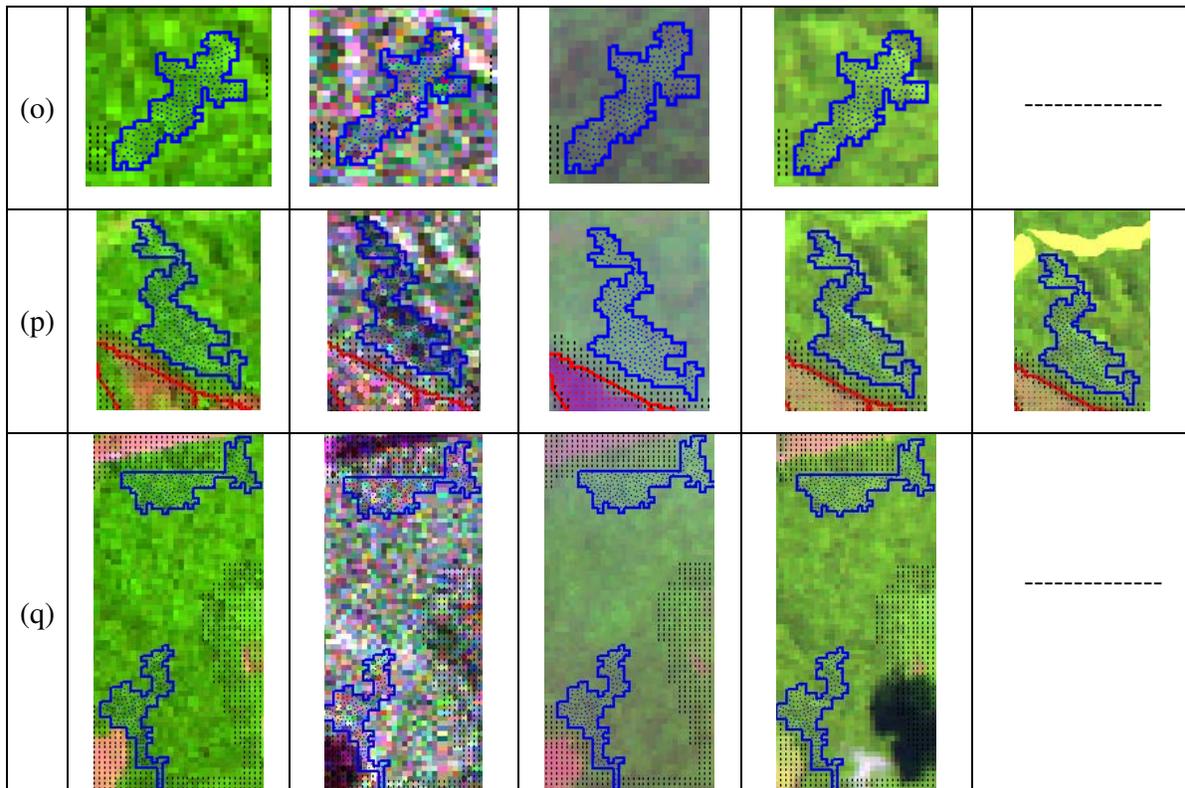
C.8 – E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007	Incremento de desflorestamento em 2007
(a)	Igual 4.34 (a)				
(b)					-----
(c)					-----
(d)					-----
(e)					-----
(f)					
(g)					-----

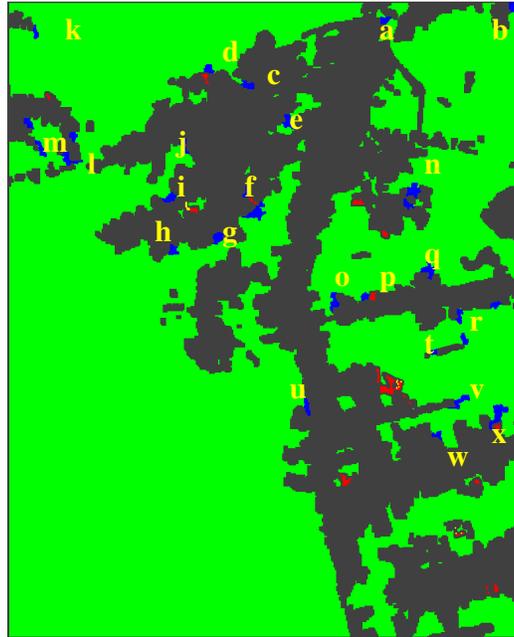
C.9 – E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)

(h)					-----
(i)					-----
(j)					
(k)					-----
(l)					
(m)					
(n)					-----

C.9 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)



C.9 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem sem filtro segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado.



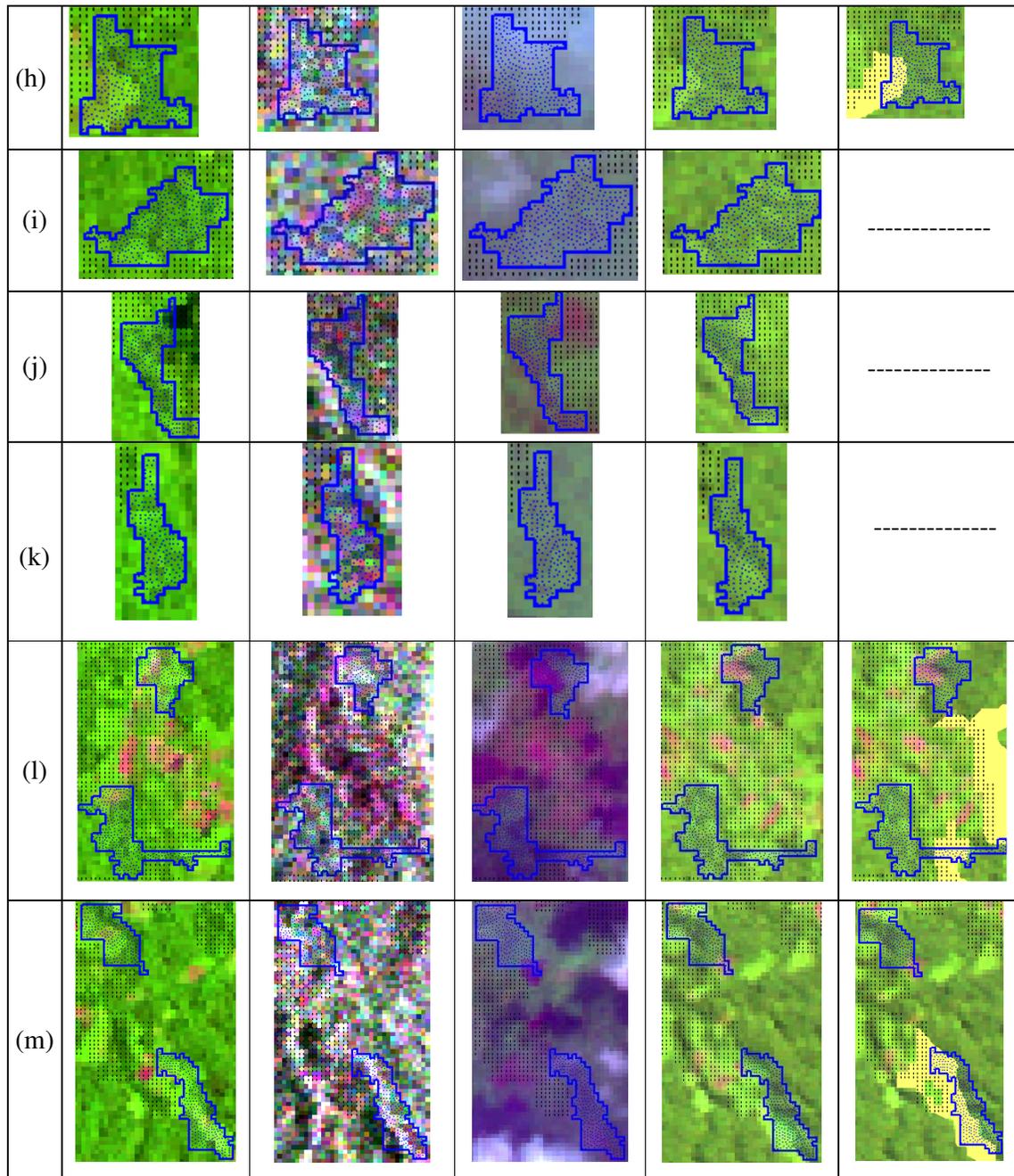
C.10 – Os polígonos amarelos representam E.O. e os azuis E.I. para a classe incremento de desflorestamento (vermelho) obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. As letras de “a” até “x” indicam os correspondentes erros de inclusão da figura C.12.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007
D4 (a)				

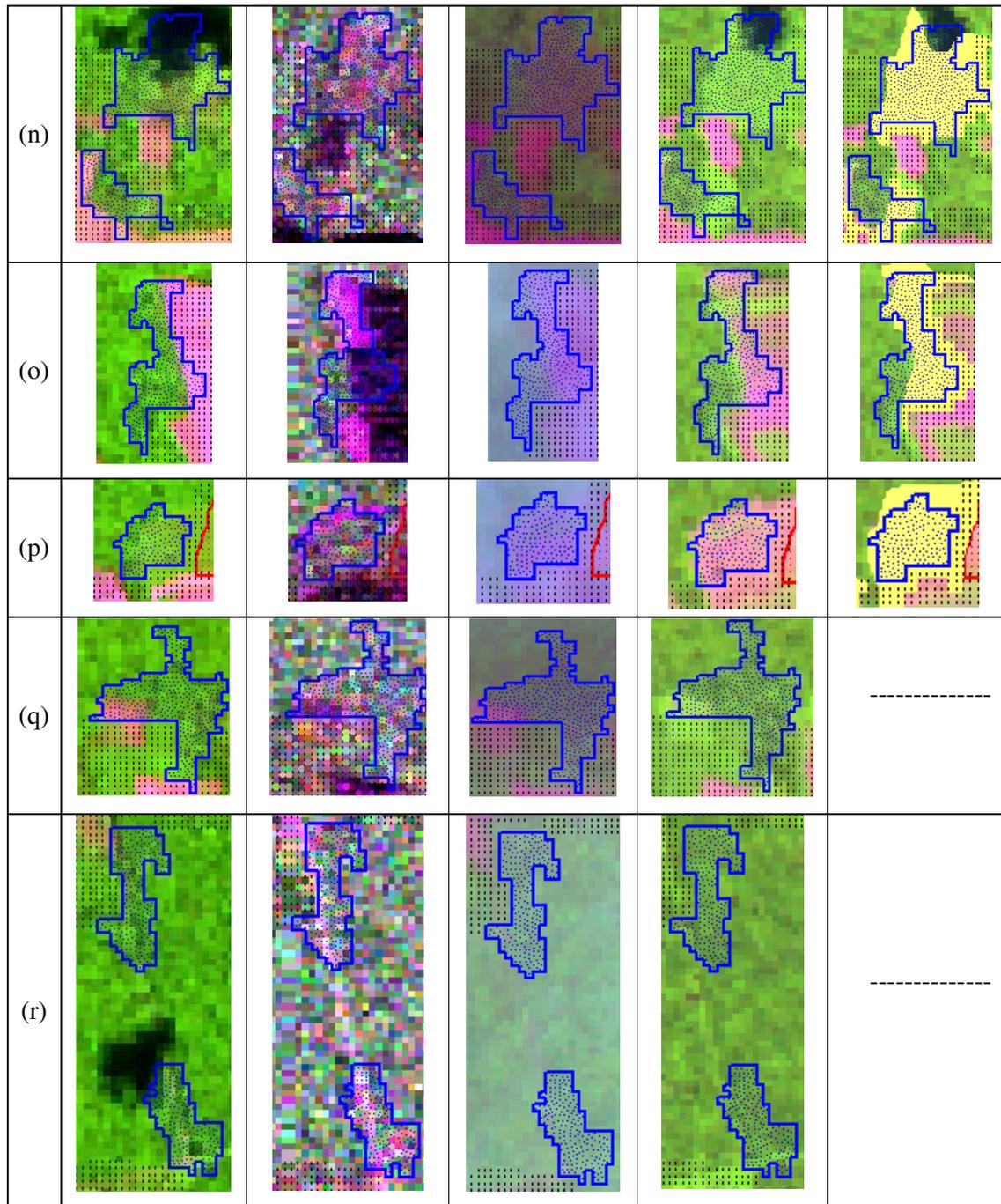
C.11 – E.O. (polígonos amarelos) para a classe incremento de desflorestamento da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Em vermelho são ilustrados os polígonos de incremento de desflorestamento obtidos a partir dos dados disponibilizados pelo PRODES. Os pontos hachurados em preto representam a máscara de desmatamento acumulado.

	Imagem SPOT 31/08/2006	Imagem ALOS/PALSAR 21/10/2006	Imagem PRODES 2006 09/11/2006	Imagem PRODES 2007 23/07/2007	Incremento de desflorestamento em 2007
(a)					-----
(b)					-----
(c)					-----
(d)					-----
(e)					-----
(f)					-----
(g)					

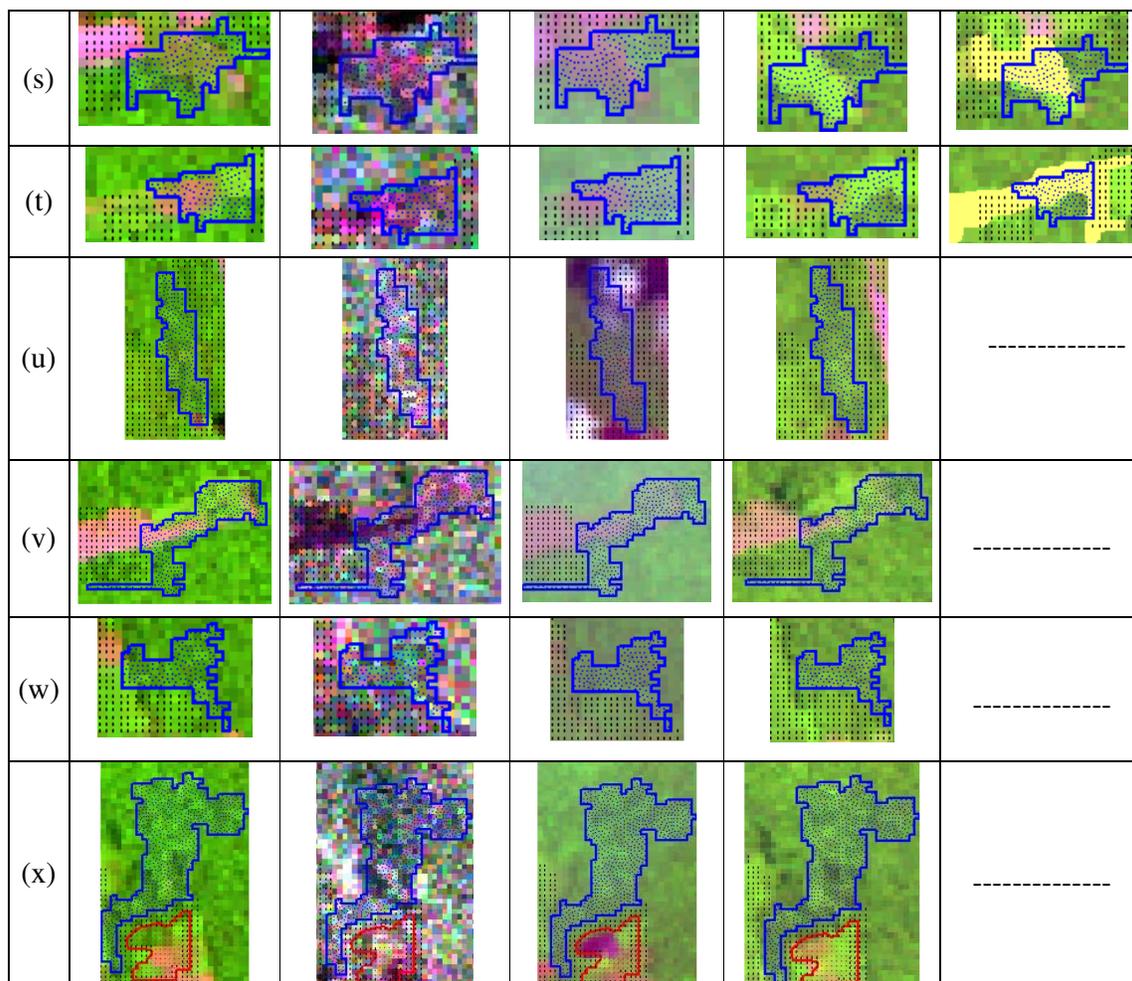
C.12 – E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)



C.12 – E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)



C.12 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado. (Continua)



C.12 – (Continua) E.I. (polígonos azuis) para a classe incremento de desflorestamento obtidos a partir da classificação Bhattacharyya na imagem com filtro *Gamma* 5x5 segmentada pelo SEGSAR para os canais HH+HV. Os polígonos amarelos representam os incremento de desflorestamento mapeados pelo PRODES 2007. Os pontos hachurados em preto ilustram a máscara de desmatamento acumulado.