



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16349-TDI/1557

MÉTODO AUTOMÁTICO PARA CALIBRAÇÃO POLARIMÉTRICA DE IMAGENS SAR

Antonio Henrique Correia

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas e José Cláudio Mura, aprovada em 23
de junho de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.01.21.26>>

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-16349-TDI/1557

MÉTODO AUTOMÁTICO PARA CALIBRAÇÃO POLARIMÉTRICA DE IMAGENS SAR

Antonio Henrique Correia

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas e José Cláudio Mura, aprovada em 23
de junho de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/06.01.21.26>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Correia, Antonio Henrique.

C817m Método automático para calibração polarimétrica de imagens SAR / Antonio Henrique Correia. – São José dos Campos : INPE, 2009.
307p. ; (INPE-16349-TDI/1557)

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

Orientadores : Drs. Corina da Costa Freitas e José Cláudio Mura.

1. Calibração. 2. Polarimetria. 3. Radar. 4. Abertura sintética.
5. Processamento de imagem. 6. Correção radiométrica. I. Título.

CDU 528.8.044.2:528.852

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.

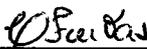
Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material 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 Doutor(a) em
Sensoriamento Remoto

Dr. Camilo Daleles Rennó


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Corina da Costa Freitas


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. José Cláudio Mura


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

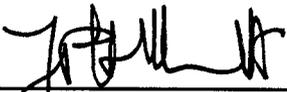
Dr. João Roberto dos Santos


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. David Fernandes


Convidado(a) / ITA / SJCampos - SP

Dr. João Roberto Moreira Neto


Convidado(a) / ORBISAT / Campinas - SP

Aluno (a): Antonio Henrique Correia

São José dos Campos, 23 de junho de 2009

À minha amada esposa Aída e a minha querida filha Maria Elisabeth dedico este trabalho e agradeço por todo o incentivo, carinho, paciência e compreensão em todos os momentos de alegria e de dificuldades que compartilhamos nessa longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Corina da Costa Freitas e ao Dr. José Claudio Mura, do INPE, pela amizade, ensinamentos, paciência e acima de tudo pela maneira extremamente profissional e objetiva com que orientaram este trabalho.

Ao Engenheiro Cartógrafo Paulo Gurgel, do INPE, pelo bom humor, ensinamentos e apoio prestado na instalação de refletores de canto e rastreamento GPS, por ocasião da realização do trabalho de campo na região da Floresta Nacional do Tapajós-PA, e na fase de processamento das medições GPS.

Ao Ten Cel Av Ricardo Veiga e ao Cap Marcos Monteiro, do COMAer e da Divisão de Sensoriamento Remoto do IEAv, respectivamente, pela extrema boa vontade e cooperação na disponibilização e introdução de modificações necessárias no aplicativo SPSAR, para processamento das imagens PolSAR do sensor SAR R99B, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Amigo Ten Cel Av Eduardo Viegas Dalle Lucca, do Ministério da Defesa, pela oportunidade que me foi ofertada de participar da cooperação técnica com a EMBRAPA Monitoramento por Satélite, por ocasião do imageamento e do processamento SAR na região de Campinas-SP.

À EMBRAPA Monitoramento por Satélite, com especial atenção ao Dr. José Roberto de Miranda e ao Agrônomo José Paulo Franzin, que disponibilizaram todos os meios necessários e participaram ativamente da instalação de refletores de canto na região de Campinas-SP, com extremo interesse, dedicação e um vasto conhecimento da área de estudo, o que possibilitou a execução do trabalho de campo em um período de tempo bastante reduzido.

Ao Amigo Dr. Sidnei João Siqueira Sant'Anna, do INPE, pela cooperação em vários momentos deste trabalho, seja esclarecendo dúvidas sobre características dos sistemas SAR ou sobre problemas específicos de programação, além do apoio prestado por ocasião da realização do rastreamento GPS na região de Campinas-SP.

À Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) por conceder-me uma grande oportunidade de aprimoramento técnico-científico e profissional, por intermédio da realização do doutorado em sensoriamento remoto no INPE, bem como pelo apoio prestado, em especial atenção nos momentos finais da conclusão deste trabalho.

Aos militares da Seção Técnica da DSG, em especial atenção ao Cap Oséias Borges dos Santos, pelo apoio, colaboração e compreensão pela ausência da Seção para dedicar-me a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivos desenvolver um conjunto de ferramentas computacionais para calibração radiométrica de imagens de radares de abertura sintética polarimétricos (PolSAR) e apresentar um novo método automático de calibração polarimétrica. Para atingir estes objetivos foi empregada uma abordagem metodológica dividida em seis etapas, com base nas imagens PolSAR, na banda L, do sistema sensor SAR R99B do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM). Na primeira etapa, em campo, foi realizada a pré-sinalização do imageamento SAR, por intermédio do posicionamento de refletores de canto triédricos em duas áreas de estudo, situadas na região da Floresta Nacional do Tapajós, próxima à cidade de Santarém-PA, e na região da cidade de Campinas-SP. A segunda etapa consistiu do processamento dos dados brutos SAR para geração de imagens PolSAR. Na terceira etapa, foram desenvolvidas, no ambiente ENVI/IDL, diversas ferramentas de calibração radiométrica de imagens PolSAR multi-sensor e multi-plataforma já consagradas na literatura, não disponíveis até o momento em um único ambiente de processamento SAR, onde se agregam funcionalidades gráficas interativas e amigáveis aos usuários, especializados ou não na área de calibração SAR. A quarta etapa envolveu a concepção, o equacionamento, a implementação e o teste de um novo método automático de calibração de imagens PolSAR, chamado de calibração *multi-look*, onde se procura provar a hipótese de que é possível empregar somente as imagens PolSAR para a calibração do *channel imbalance*, como sendo uma alternativa viável, em relação aos métodos tradicionais, no caso da inexistência de alvos artificiais conhecidos na cena imageada. O novo método baseia-se em um modelo de distorção linear consagrado para sistemas PolSAR, em três conjuntos de imagens PolSAR do tipo *Multi-Look Complex* (MLC) e em um método numérico de mínimos quadrados, para solucionar um sistema de equações não-lineares, cujas incógnitas são os parâmetros de calibração que se deseja estimar. A quinta etapa envolveu uma quantificação pormenorizada da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR do sistema R99B, onde foi possível mensurar os níveis de distorção de recepção e de transmissão deste sistema. Na última etapa do trabalho, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com os métodos tradicionais de calibração, e com o novo método proposto, o de *multi-look*, além de um estudo preliminar da influência do processo de calibração do *cross-talk* e do *channel imbalance* sobre as imagens da entropia e do ângulo α obtidas pelo método de decomposição de alvos por autovetores. Os valores médios do *channel imbalance* calculados pelo método tradicional, sem o uso dos refletores de canto, e pelo novo método foram iguais a 1,04 dB \angle 25,05° e 0,84 dB \angle 9,95°, respectivamente. Este valor se aproximou do limite de referência de 0,4 dB \angle 10° para a calibração polarimétrica, demonstrando, portanto, a viabilidade de aplicação do novo método, como uma alternativa ao método tradicional, quando a informação polarimétrica desses refletores não está disponível.

AUTOMATIC APPROACH TO POLARIMETRIC CALIBRATION OF SAR IMAGES

ABSTRACT

The purposes of this study is to develop a set of computational tools for radiometric calibration of images of polarimetric synthetic aperture radar (PolSAR) and present a new automatic method for polarimetric calibration. To achieve these goals was employed a methodological approach divided into six stages, based on PolSAR images in L band, from the sensor system SAR R99B of the Amazon Protection System (SIPAM). In the first stage, in the field, were the pre-signaling SAR imaging of through the positioning of the corner reflectors trihedral in two areas of study, located in the region of the Tapajos National Forest, near the city of Santarém-PA, and in the region of Campinas-SP. The second step was the processing of raw data for generation of PolSAR images. In the third stage have been developed, into the environment ENVI/IDL, several tools for radiometric calibration of PolSAR images multi-sensor and multi-platform already established in the literature, not available so far in a single environment of SAR processing, which adds features graphic interactive and user friendly, specialized or not in the SAR calibration. The fourth stage involved the design, equating, implementation and testing of a new method of automatic calibration of PolSAR images, called multi-look calibration, which seeks to prove the hypothesis that you can only use the PolSAR images for calibration the channel imbalance, as a viable alternative, in relation to traditional methods, in the absence of known artificial targets in the scene image. The new method is based on a model of linear distortion devoted to PolSAR systems in three sets of PolSAR images type Multi-Look Complex (MLC) and a numerical method of least squares to solve a system of nonlinear equations whose unknowns are the calibration parameters that you want to estimate. The fifth stage involved a detailed quantification of geometric and radiometric quality of PolSAR images R99B system, where it was possible to measure the levels of distortion of reception and transmission of this system. At the last stage of the work was performed to compare the results with traditional methods of calibration, and the new proposed method, the multi-look, and a preliminary study of the influence of the calibration of cross-talk and channel imbalance on the images of entropy and the obtained by the method of decomposition of targets for eigenvectors. The α -angle average values of channel imbalance calculated by the traditional method, without the use of reflectors in the corner, and the new method were equal to $1.04 \text{ dB} \angle 25.05^\circ$ and $0.84 \text{ dB} \angle 9.95^\circ$, respectively. This value is near to the polarimetric calibration reference limit of $0.4 \text{ dB} \angle 10^\circ$, showing therefore the feasibility of applying the new method as an alternative to the traditional method, where the polarimetric information of the reflectors is not available.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
1 INTRODUÇÃO	31
1.1 Contexto do trabalho	31
1.2 Motivação	32
1.3 Objetivos e hipóteses	34
1.4 Contribuição da tese	36
1.5 Estrutura do trabalho	38
2 FUNDAMENTOS DA POLARIMETRIA SAR	41
2.1 Polarização de ondas eletromagnéticas	41
2.1.1 Elipse de polarização	44
2.1.2 Vetor de Stokes	45
2.1.3 Vetor de Jones	46
2.2 Espalhamento de ondas eletromagnéticas	47
2.2.1 Geometria de imageamento SAR	47
2.2.2 Sistemas de coordenadas	50
2.2.3 Matriz de espalhamento	52
2.2.4 Espalhadores parciais ou não-determinísticos	53
2.2.4.1 Matriz de Kennaugh	54
2.2.4.2 Matriz de covariância e coerência	55
2.3 Síntese de polarização	58
2.4 Resposta polarimétrica	60
2.4.1 Refletor de canto diédrico	61
2.4.2 Refletor de canto triédrico	63
2.5 Teorema de decomposição de alvos	65
2.5.1 Decomposição por autovetores	66
2.5.2 Entropia, anisotropia e ângulo α	67
2.5.3 Plano entropia/ângulo α	70
3 FUNDAMENTOS DA CALIBRAÇÃO SAR	73
3.1 Introdução	73
3.2 Calibração externa ou absoluta	77
3.2.1 Método do pico de potência	78
3.2.2 Método da potência integrada	79
3.3 Calibração de fase	81

3.4	Calibração polarimétrica	83
3.4.1	Método de Quegan	86
3.4.2	Método de Kimura/Quegan	89
3.5	Calibração de amplitude	91
3.5.1	Correção do padrão da antena	91
3.5.2	Rotação de Faraday	92
3.5.3	Compensação da influência da topografia.....	95
3.5.3.1	Correção do padrão da antena e da área do espalhador.....	95
3.5.3.2	Correção do ângulo de orientação de polarização.....	97
3.6	Modelo geral de distorção	100
4	METODOLOGIA DE TRABALHO	101
4.1	Introdução.....	101
4.2	Seleção do sistema sensor	103
4.3	Definição da área de estudo.....	104
4.3.1	Área de estudo 1 - Tapajós-PA.....	104
4.3.2	Área de estudo 2 – Campinas-SP	106
4.4	Planejamento do trabalho de campo.....	107
4.5	Execução do trabalho de campo	108
4.5.1	Área de estudo 1 – Tapajós-PA	109
4.5.2	Área de estudo 2 – Campinas-SP	112
4.6	Imageamento SAR	114
4.6.1	Área de estudo 1 – Tapajós-PA	114
4.6.2	Área de estudo 2 – Campinas-SP	115
4.7	Processamento SAR	116
4.8	Análise da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR.....	120
4.9	Implementação do método de calibração polarimétrica proposto por Kimura et al. (2004).....	124
4.10	Desenvolvimento e implementação de ferramentas de calibração de imagens PolSAR.....	126
4.11	Desenvolvimento e implementação do método de calibração polarimétrica <i>multi-look</i>	127
4.12	Avaliação comparativa entre os métodos de calibração polarimétrica estudados	129
4.13	Avaliação da influência do processo de calibração polarimétrica na decomposição da entropia/ângulo α	129
5	MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POLARIMÉTRICA MULTI-LOOK	131
5.1	Análise teórica da correlação multi-look.....	132
5.2	Estimação da correlação multi-look	133
5.3	Método de calibração polarimétrica multi-look	135
5.3.1	Motivação	135
5.3.2	Suposições	137
5.3.3	Modelo matemático de calibração	138
5.3.4	Método numérico de solução.....	139

5.3.4.1	Método de Levenberg-Marquardt.....	139
5.3.4.2	Solução inicial	141
5.3.4.3	Determinação do tamanho do filtro da imagem covariância.....	142
5.3.5	Obtenção dos dados calibrados	144
5.3.6	Considerações sobre a rotação de Faraday	145
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	149
6.1	Desenvolvimento e implementação de ferramentas de calibração de imagens PolSAR.....	149
6.1.1	Motivação	149
6.1.2	Concepção das ferramentas desenvolvidas.....	151
6.2	Correção do padrão de irradiação da antena.....	154
6.3	Análise preliminar das imagens PolSAR	158
6.3.1	Avaliação radiométrica.....	158
6.3.2	Avaliação geométrica	168
6.3.2.1	Avaliação da resolução espacial	169
6.3.2.2	Avaliação do registro entre as componentes HH e VV	171
6.3.2.3	Avaliação do erro global de posicionamento das imagens SAR.....	173
6.4	Calibração polarimétrica pelo método de Kimura et al. (2004).....	175
6.4.1	Estimação do parâmetro m	175
6.4.2	Estimação dos parâmetros do <i>cross-talk</i>	178
6.4.2.1	Estimação por blocos heterogêneos.....	178
6.4.2.2	Variabilidade azimutal na estimação do <i>cross-talk</i>	188
6.4.2.3	Variabilidade radial na estimação do <i>cross-talk</i>	193
6.4.3	Estimação do <i>channel imbalance</i>	198
6.4.4	Síntese dos resultados de calibração.....	202
6.5	Método de calibração polarimétrica <i>multi-look</i>	204
6.5.1	Avaliação do registro entre as imagens <i>multi-look complex</i>	204
6.5.2	Avaliação da resolução espacial das imagens <i>multi-look complex</i>	207
6.5.3	Avaliação da correlação espacial entre as imagens <i>multi-look complex</i>	208
6.5.4	Avaliação da calibração polarimétrica para as imagens <i>multi-look complex</i> ...	211
6.5.5	Estimação dos parâmetros de calibração	216
6.5.6	Influências na estimação dos parâmetros	219
6.6	Comparação dos resultados obtidos com os métodos de calibração polarimétrica estudados	221
6.6.1	Tempo de processamento	222
6.6.2	Método de calibração polarimétrica <i>multi-look</i> híbrido	223
6.6.3	Análise do <i>channel imbalance</i>	225
6.6.4	Análise da resposta polarimétrica.....	227
6.7	Avaliação da influência do processo de calibração polarimétrica na decomposição da entropia/ângulo α	231
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	239
7.1	Conclusões.....	239
7.2	Sugestões	244

APÊNDICE A - DEFINIÇÕES	263
A.1 Produto de Kronecker	263
A.2 Momento amostral	264
A.3 Coeficiente de correlação complexa	264
A.4 Função gamma de Euler	266
A.5 Função hipergeométrica gaussiana	266
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS POLSAR.....	267
B.1 Instalação no aplicativo ENVI.....	267
B.2 Funcionalidades gerais.....	268
B.3 Ferramentas de calibração de amplitude.....	274
B.3.1 Correção do padrão da antena	274
B.3.2 Calibração absoluta.....	278
B.3.3 Calibração da rotação de Faraday.....	281
B.3.4 Calibração da orientação de polarização	283
B.4 Ferramenta de calibração polarimétrica.....	285
B.5 Ferramenta de calibração em lote (Batch)	292
B.6 Ferramentas auxiliares	296
B.6.1 Processamento de blocos SPSAR.....	296
B.6.2 Análise de alvos pontuais e distribuídos	299
B.6.3 Decomposição da entropia/ângulo α /anisotropia	303

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Onda eletromagnética.	43
2.2 – Geometria de imageamento SAR – Exemplo de 3 looks em azimute.	48
2.3 – (a) Modulação linear de frequência (<i>chirp</i>) e (b) ilustração de pulsos transmitidos e ecos recebidos por um sistema SAR (domínio temporal).....	48
2.4 – Geometria de espalhamento e sistemas de coordenadas na convenção (a) FSA e (b) BSA.	51
2.5 – (a) Refletor de canto diédrico condutor e (b) orientação do refletor em relação à linha de visada do radar.	62
2.6 – Respostas polarimétricas teóricas (a) co-polarizada e (b) polarizada cruzada de um refletor de canto diédrico condutor.	62
2.7 – (a) Refletor de canto triédrico e (b) orientação em relação à linha de visada do radar.	64
2.8 – Respostas polarimétricas teóricas (a) co-polarizada e (b) polarizada cruzada de um refletor de canto triédrico condutor.	64
2.9 – Representação esquemática da interpretação física do ângulo α e valores paramétricos dos espalhadores canônicos (Ξ - nenhum valor fixo e ϑ° - ângulo em relação à direção vertical).	69
2.10 – Plano ($H_s, \bar{\alpha}$).	71
3.1 – Representação esquemática dos efeitos de fase devido ao caminho do sinal no sistema SAR e <i>cross-talk</i>	81
3.2 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance em uma região de floresta.	92
3.3 – Representação esquemática do efeito da rotação de <i>Faraday</i>	93
4.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho.	102
4.2 – Localização geográfica das faixas imageadas e dos refletores instalados na área de estudo 1 (FLONA).	105
4.3 – Localização geográfica da faixa imageada e dos refletores instalados na área de estudo 2 (Campinas/Holambra-SP).	107
4.4 – (a) Características da área de entorno e (b) orientação do refletor de canto triédrico instalado no ponto PCR04.	110
4.5 – Localização dos blocos processados por faixa, referentes as áreas de estudo na região do (a) Tapajós-PA e de (b) Campinas/Holambra-SP.	118
4.6 – (a) Resposta impulsiva bidimensional de um alvo pontual com os perfis na direção (b) radial e (c) azimutal que passam pelo pico de potência.	121
4.7 – Perfil da resposta impulsiva de um alvo pontual (a) sem e (b) com o filtro passa-banda de Kaiser.	122
4.8 – Deslocamento entre o pico da resposta impulsiva das componentes polarimétricas HH e VV na direção (a) radial e (b) azimutal.	123
4.9 – Histograma da imagem diferença de fase $S_{hh}S_{hv}^*$, (a) antes e (b) depois da calibração polarimétrica, e também para a imagem diferença de fase $S_{hh}S_{vv}^*$ antes (c) e (d) depois da calibração.	125

5.1 – Tendência da magnitude do estimador $ E(\hat{p}_L) $ em função do aumento do número de amostras independentes L	134
6.1 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Tapajós-PA (Faixa 1).....	155
6.2 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Tapajós-PA (Faixa 2).....	156
6.3 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Campinas-SP (Faixa 3).....	157
6.4 – Geometria de imageamento para as Faixas 1, 2 e 3 das áreas de estudo.....	158
6.5 – Valores da amplitude das componentes polarimétricas (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV, referentes ao sinal de retorno do refletor PCR01.....	159
6.6 – Valores da amplitude das componentes polarimétricas HH, HV, VH e VV referentes ao sinal de retorno dos 25 refletores de cantos.....	159
6.7 – (a) Perfil radial da resposta impulsiva com a interpolação <i>Zero Padding</i> (fator = 8) e resposta impulsiva (b) sem e (c) com interpolação.....	160
6.8 – Valores da (a),(b),(c),(d) amplitude e da (e),(f),(g),(h) fase relativa entre as componentes HH/VV, HV/VH, HV/HH e VH/VV medidas para os 25 refletores de cantos antes da calibração polarimétrica.....	163
6.9 – Valores do EMQ calculado entre as respostas polarimétricas normalizadas de co-polarização e de polarização cruzada observadas e de referência, para os 25 refletores, antes da calibração polarimétrica.....	166
6.10 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, antes da calibração polarimétrica.....	167
6.11 – Perfil da resposta impulsiva para as componentes HH e VV, na direção azimutal, referentes aos refletores (a) PCR06 e (b) PCR08.....	170
6.12 – Perfil da resposta impulsiva para as componentes HH e VV, na direção azimutal, referentes aos refletores (a) PCR22 e (b) PCR25.....	172
6.13 – (a) Área de solo exposto bastante plana e as respectivas (b) amostras selecionadas na imagem correspondente ao bloco Az08_Rg02, para a estimação do parâmetro m da Faixa 1.....	176
6.14 – Amostras de corpos d’água selecionadas para a estimação do parâmetro m nas imagens correspondentes ao (a) bloco Az27_Rg00 da Faixa 2 e ao (b) mosaico dos blocos Az08-09_Rg00-03 da Faixa 3.....	176
6.15 – Estimativa do parâmetro m para a (a) Faixa 1, (b) Faixa 2 e (c) Faixa 3.....	177
6.16 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> estimados para o bloco Az14_Rg02 da Faixa 2.....	179
6.17 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> medidos em cada refletor.....	180
6.18 – Perfil radial da amplitude estimada dos parâmetros (a) u e (b) z para o bloco Az09_Rg00 da Faixa 1, onde se localiza o refletor PCR03 na posição radial igual a 305, ou ângulo de incidência igual a $45,13^\circ$	182
6.19 – Histograma da fase entre as componentes HH-HV e VV-VH do bloco Az09_Rg00, (a),(b) antes e (c),(d) depois da calibração polarimétrica.....	182
6.20 – Amplitude estimada do parâmetro α (a) sem e (b) com a utilização do parâmetro m para o bloco Az07_Rg01 da Faixa 2.....	183

6.21 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV e estimação da amplitude do parâmetro u para os blocos (a) Az14_Rg02 e (b) Az12_Rg02 da Faixa 2.....	184
6.22 – Estimação da amplitude do parâmetro z para uma imagem PolSAR, na banda L, do sensor PiSAR em uma área litorânea no Japão.	185
6.23 – Perfis radiais da fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> estimados para os blocos (a),(b),(c),(d) Az05_Rg03 da Faixa 1 (PCR12) e (e),(f),(g),(h) Az14_Rg02 da Faixa 3 (PCR25).	187
6.24 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV dos blocos (a) Az05_Rg03 da Faixa 2 e (b) Az14_Rg02 da Faixa 3.....	188
6.25 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV dos blocos (a) Az00_Rg03 e (b) Az11_Rg03 da Faixa 1, (c) Az01_Rg00 e (d) Az25_Rg00 da Faixa 2 e (e) Az01_Rg03 e (f) Az18_Rg03 da Faixa 3.	190
6.26 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> estimados para os blocos Az00_Rg03 e Az11_Rg03 da Faixa 1, Az01_Rg00 e Az25_Rg00 da Faixa 2 e Az01_Rg03 e Az18_Rg03 da Faixa 3.	191
6.27 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> estimados para toda a largura radial útil da Faixa1 (Az07), Faixa 2 (Az22) e Faixa 3 (Az18).	194
6.28 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, depois da correção do <i>cross-talk</i>	197
6.29 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase do parâmetro k medidos em cada refletor para estimação do <i>channel imbalance</i>	198
6.30 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase relativa medidos em cada refletor antes (6.8) e depois da calibração do <i>channel imbalance</i>	199
6.31 – Valores de EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de co-polarização e de polarização cruzada observadas e de referência, para os 25 refletores, antes e depois da calibração polarimétrica.	200
6.32 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, depois da calibração polarimétrica.	201
6.33 – Deslocamento azimutal entre as respostas impulsivas do refletor PCR01, referentes às componentes (a) HH e (b) VV das três imagens MLC.	205
6.34 – Deslocamento (em <i>pixel</i>) entre as imagens correspondentes aos (a) <i>looks</i> 1 e 2 e (b) <i>looks</i> 2 e 3, para as componentes HH e VV, com base na posição do pico da resposta impulsiva dos 25 refletores.	205
6.35 – Função de Autocorrelação Espacial calculada para a classe <i>regeneração2</i> na direção (a),(b),(c) radial e (d),(e),(f) azimutal, para a componente HH das imagens correspondentes ao <i>look</i> 1, <i>look</i> 2 e <i>look</i> 3, respectivamente.	209
6.36 – Valores de coerência amostral de 23 classes nas componentes (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV, que foram estimados sobre as imagens correspondentes aos <i>looks</i> 1 e <i>look</i> 3, em relação ao <i>looks</i> 2.	210
6.37 – Composições coloridas R-HH,G-HV,B-VV de três sub-blocos, com os refletores (a) PCR02, (b) PCR15 e (c) PCR24, destacados em vermelho.	212

6.38 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> em cada refletor, para as imagens MLC e SLC.....	213
6.39 – Valores da (a) amplitudes e da (b) fase do <i>channel imbalance</i> em cada refletor, para as imagens MLC e SLC.....	214
6.40 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros α , u , v , w e z , em cada refletor, que compõem os vetores de solução inicial e final do método de calibração polarimétrica <i>multi-look</i>	217
6.41 – Valores da (a),(b) amplitude e da (c),(d) fase dos parâmetros k e Y , em cada refletor, que compõem os vetores de solução inicial e final do método de calibração polarimétrica <i>multi-look</i>	218
6.42 – Composição colorida R-HH,G-HV,B-VV do sub-bloco que contém o refletor PCR09 (destacado em vermelho), e que foi empregado para avaliar os fatores que influenciam os resultados do método <i>multi-look</i>	220
6.43 – Valores da (a),(b) amplitude e da (c),(d) fase dos parâmetros α , u , v , w , z , k e Y , para o refletor PCR09, que compõem os vetores de solução inicial e final das etapas de avaliação dos fatores que afetam o método <i>multi-look</i>	220
6.44 – Tempo de processamento para as fases de estimação dos parâmetros de calibração pelo método 2.....	222
6.45 – Valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de (a) co-polarização e de (b) polarização cruzada de referência e calibradas pelos métodos 2 e 3, para os 25 refletores.	224
6.46 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase relativa da razão HH/VV de cada refletor, corrigidos pelos métodos 1 e 3.	226
6.47 – Valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de (a) co-polarização e de (b) polarização cruzada de referência e corrigidas pelos métodos 1 e 3.....	227
6.48 – Respostas polarimétricas de co-polarização corrigidas (a),(b),(c),(d),(e) do <i>cross-talk</i> pelo método 1, (f),(g),(h),(i),(j) pelo método 3 e (k),(l),(m),(n),(o) pela informação do <i>channel imbalance</i> dos refletores PCR04, PCR10, PCR16, PCR18 e PCR24.....	229
6.49 – Respostas polarimétricas de polarização cruzadas corrigidas (a),(b),(c),(d),(e) do <i>cross-talk</i> pelo método 1, (f),(g),(h),(i),(j) pelo método 3 e (k),(l),(m),(n),(o) pela informação do <i>channel imbalance</i> dos refletores PCR04, PCR10, PCR16, PCR18 e PCR24.....	230
6.50 – Composições coloridas (a),(b) R-HH,G-HV,B-VV e (c),(d) $R-H_s, G-\bar{\alpha}, B-A_p$, correspondentes aos blocos Az08_Rg02 da Faixa 1 e Az11_Rg02 da Faixa 3....	232
6.51 – Representação das 9 classes no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, com base nas imagens (a) original e corrigidas (b) do <i>cross-talk</i> (método 1), (b) do <i>cross-talk</i> com simetriação por MMQ (método 1), (d) do <i>cross-talk/channel imbalance</i> com simetriação por MMQ (método 1), (e) pela simetriação média e (f) do <i>cross-talk/channel imbalance</i> com simetriação por MMQ (método 3).	234
6.52 – Representação dos deslocamentos dos centros das 9 classes no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, com base nas imagens corrigidas do <i>cross-talk/channel imbalance</i> com simetriação por MMQ pelo (a) método 1 e (b) método 3.....	235

B.1 – Interfaces para seleção do diretório que contém o (a) menu do ENVI e as (b) ferramentas implementadas.	267
B.2 – Barra de ferramentas do ENVI contendo as opções para seleção das ferramentas computacionais desenvolvidas.	268
B.3 – Interfaces para associação dos arquivos de entrada com as respectivas componentes polarimétricas.	269
B.4 – Exemplo da (a) resposta de um alvo pontual de referência e (b) seleção da respectiva amostra de treinamento (<i>ROI</i>).	270
B.5 – Interface para seleção da tabela de cores de interesse.	270
B.6 – Interfaces para (a) edição e exportação dos gráficos disponíveis e (b) seleção da porção da imagem de entrada que será processada.	271
B.7 – Interfaces para (a) seleção da imagem de entrada e (b) exportação dos gráficos ou relatórios disponíveis.	273
B.8 – Interfaces para (a) seleção do arquivo de entrada e (b) criação do <i>header</i> da imagem, quando necessário.	274
B.9 – Interfaces para correção do padrão da antena: (a) principal, (b) seleção do arquivo <i>Meta Blocks</i> , (c) criação do arquivo <i>Meta Blocks</i> , e (d) seleção dos blocos de saída.	276
B.10 – Interfaces para calibração absoluta: (a) principal, (b) entrada dos ângulos de orientação do alvo pontual em relação à onda incidente, cálculo do ângulo de incidência para os alvos pontuais com base em (c) coordenadas geográficas conhecidas ou (d) coordenadas de imagem.	279
B.11 – Interface para calibração da rotação de <i>Faraday</i>	282
B.12 – Interface para calibração da orientação de polarização.	284
B.13 – Interface para definição das fases da calibração polarimétrica e simetrização que serão aplicadas aos dados PolSAR.	286
B.14 – Interface para definição do <i>channel imbalance</i> com 3 opções: (a) seleção de um arquivo de ROI contendo alvos pontuais (<i>Point Target ROI File</i>), (b) inserção de um valor conhecido (<i>Enter k Value</i>), e (c) restauração de um arquivo contendo valores do parâmetro <i>k</i> estimados na direção radial (<i>Restore k Profile</i>).	288
B.15 – Interface para visualização dos gráficos dos parâmetros de calibração estimados, histogramas da correlação complexa e resposta polarimétrica de alvo pontuais, antes e depois da calibração.	289
B.16 – Interface para visualização da resposta e análise polarimétrica, antes e depois do processo de calibração, para alvos pontuais de referência existentes nas imagens PolSAR.	292
B.17 – Interface principal para entrada dos dados da calibração em lote.	294
B.18 – Interface para seleção dos métodos de calibração em lote.	295
B.19 – Interfaces para pós-processamento dos blocos SPSAR: (a) principal, (b) seleção do fator de reamostragem azimutal do mosaico, (c) seleção dos parâmetros de rotação da imagem, e (d) seleção do método e fator de reamostragem da imagem nas direções X e Y.	297
B.20 – Interface para análise dos dados polarimétricos de alvos de interesse.	300
B.21 – Interface para análise da resposta impulsiva de alvos de interesse.	301
B.22 – Interface para análise do perfil da resposta impulsiva (amplitude e fase) de alvos pontuais de interesse.	302

B.23 – Interface para análise da resposta polarimétrica de alvos de interesse.....	303
B.24 – Interface para decomposição da imagem PolSAR nas componentes Entropia, Ângulo α e Anisotropia.....	304
B.25 – Interface para visualização da distribuição dos <i>pixels</i> da imagem SAR no Plano Entropia/Ângulo α	305
B.26 – Interface para visualização da distribuição dos <i>pixels</i> das amostras de interesse (ROI) no Plano Entropia/Ângulo α	307

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Ângulos de polarização para diferentes estados de polarização.	45
4.1 – Características técnicas do sistema sensor SAR R99B do SIPAM.	103
4.2 – Coordenadas do ponto base e de localização dos refletores de canto triédricos instalados na área de estudo 1.....	111
4.3 – Coordenadas do ponto base e de localização dos refletores de canto triédricos instalados na área de estudo 2.....	113
4.4 – Especificações das imagens PolSAR processadas.....	118
4.5 – Localização por bloco dos 25 refletores de canto triédricos.	119
6.1 – Principais aplicativos para pós-processamento de dados PolSAR.	150
6.2 – Valores de média e de desvio-padrão dos parâmetros PSLR, ISLR e SCR.	161
6.3 – Valores de Referência para Calibração Polarimétrica e Absoluta.....	162
6.4 – Valores de média e de desvio-padrão do <i>cross-talk</i> e do <i>channel imbalance</i> antes da calibração polarimétrica.....	164
6.5 – Valores de média e de desvio-padrão das resoluções espaciais azimutal e radial das imagens PolSAR do sensor SAR R99B.	169
6.6 – Valores do EMQ referente ao registro entre as componentes HH e VV das imagens PolSAR do sensor SAR R99B.	171
6.7 – Valores do erro quadrático de posicionamento para os 25 refletores de canto disponíveis nas imagens na banda L do sensor SAR R99B.	173
6.8 – Valores do erro médio quadrático, ou erro global de posicionamento, das imagens na banda L do sensor SAR R99B correspondentes as faixas imageadas.	174
6.9 – Valores de média e de desvio-padrão dos parâmetros do <i>cross-talk</i> para os refletores de canto após a calibração polarimétrica.....	181
6.10 – Valores de desvio-padrão calculados para a estimação da amplitude e da fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> para o bloco Az25_Rg00 da Faixa2.....	186
6.11 – Intervalos de variação do ângulo de incidência para cada bloco radial que compõem as três faixas imageadas.....	189
6.12 – Valores médios da amplitude e da fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> calculados para as Faixas 1, 2 e 3.....	196
6.13 – Valores de média e de desvio-padrão do parâmetro <i>k</i> (<i>channel imbalance</i>), para cada faixa imageada, obtidos da razão HH/VV dos refletores.	198
6.14 – Valores do EMQ (em <i>pixel</i>) referente ao registro entre as imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B, para as componentes HH e VV.	206
6.15 – Valores de média e de desvio-padrão da resolução espacial azimutal para as componentes HH e VV, das imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B.	207
6.16 – Valores médios da coerência <i>multi-look</i> , referente às 23 classes de interesse, estimados para as componentes polarimétricas.	211
6.17 – Valores médios da amplitude e da fase relativa dos parâmetros de calibração obtidos para as imagens MLC e SLC, com base em 23 refletores.	214
6.18 – Valores finais da amplitude e da fase dos parâmetros do <i>cross-talk</i> e do <i>channel imbalance</i> calculados para as Faixas 1, 2 e 3 pelo método <i>multi-look</i>	216

6.19 – Valores de média e de desvio-padrão do parâmetro k (<i>channel imbalance</i>) obtidos, para cada faixa imageada, pelo método 3 de calibração.....	224
6.20 – Valores de média e de desvio-padrão da amplitude e da fase relativa da razão HH/VV, corrigidos pelos métodos 1 e 3.....	226
6.21 – Descrição dos alvos selecionados na Faixa 1 e 3, para avaliação da influência da calibração polarimétrica, e localização no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$	233

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACF	Autocorrelation Function
AIRSAR	Airborne Synthetic Aperture Radar
ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ARC	Active Radar Calibrator
BSA	Backscatter Alignment
CTA	Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial
DGPS	Differential Global Positioning System
DLR	Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
EM	Eletromagnética
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	Environment for Visualizing Images
FLONA	Floresta Nacional
FSA	Forward Scatter Alignment
GUI	Graphic User Interface
IDL	Interactive Data Language
IEAv	Instituto de Estudos Avançados
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAXA	Japan Aerospace eXploration Agency
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LBA	Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia
MAPSAR	Multi-Application Purpose SAR
MLC	Multi-Look Complex
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OBT	Observação da Terra
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PARC	Polarimetric Active Radar Calibrator
PCR	Ponto de Corner Reflector
POLINSAR	Polarimetria Interferométrica SAR
POLSAR	Polarimetria SAR
PRF	Pulse Repetition Frequency
RAT	Radar Tools
SAR	Synthetic Aperture Radar
SEPLAMA	Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SLC	Single-Look Complex
SPSAR	Sistema de Processamento SAR
TM	Thematic Mapper
WGS	World Geodetic System

LISTA DE SÍMBOLOS

$[A]_{m \times n}$	Matriz A com dimensões m x n (linhas x colunas)
\mathbf{a}	Vetor a, representando um conjunto de números organizados em uma matriz com apenas uma coluna
$[A]^T$	Transposta da matriz [A]
$[A]^{-1}$	Inversa da matriz [A]
$[A]^*$	Conjugado da matriz [A]
$[A]^\dagger = [A]^{*T}$	Hermitiana da matriz [A]
$ [A] $	Determinante da matriz [A]
$Tr([A])$	Traço da matriz [A], que representa a soma dos elementos da diagonal principal
λ_j	Autovalor de uma dada matriz $n \times n$ [A], onde $j = \{1, \dots, n\}$
\vec{e}_j	Autovetor de uma dada matriz $n \times n$ [A], onde $j = \{1, \dots, n\}$ e Vetor unitário de um dado eixo coordenado, onde $j = \{X, Y, Z\}$
\mathfrak{R}	Conjunto dos números reais, $(-\infty, +\infty)$
\mathfrak{R}^+	Conjunto dos números reais positivos, $(0, +\infty)$
\mathcal{C}	Conjunto dos números complexos
i	Valor complexo de $\sqrt{-1}$
$\Re\{z\}$	Parte real do número complexo z
$\Im\{z\}$	Parte imaginária do número complexo z
z^*	Conjugado do número complexo z, onde $z^* = \Re\{z\} - \Im\{z\}i$
$ z $ ou $Mod(z)$	Módulo ou magnitude do número complexo z, onde $ z = \sqrt{\Re\{z\}^2 + \Im\{z\}^2}$
$ z \exp(i\varphi)$	Forma trigonométrica do número complexo z, com fase igual φ
$Arg(z)$	Fase ou argumento do número complexo z
$A \angle \varphi^\circ$	Número complexo de amplitude A e fase φ
\vec{a}	Vetor a, representando, geometricamente grandezas vetoriais com direção, sentido e módulo, no plano ou no espaço n-dimensional
(\vec{a}, \vec{c})	Plano representado pelos vetores \vec{a} e \vec{c}

$(\vec{a}, \vec{c}) \perp \vec{b}$	Condição de ortogonalidade entre o plano (\vec{a}, \vec{c}) e o vetor \vec{b}
$ \mathbf{a} = \sqrt{\sum_{k=1}^n a_k^2}$	Módulo de um vetor $\mathbf{a} = [a_1 \dots a_n]^T$
$ \vec{b} = \sqrt{\sum_{k=1}^n b_k^2}$	Módulo de um vetor $\vec{b} = b_1 \vec{e}_1 + \dots + b_n \vec{e}_n$, onde $\{\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n\}$ é uma base ortogonal de vetores unitários no espaço n-dimensional
$\vec{a} \cdot \vec{c} = \vec{a} \vec{c} \cos(\theta)$	Produto escalar de \vec{a} por \vec{c} , onde θ é o ângulo entre os vetores.
\vec{E}	Vetor campo elétrico
$\vec{\epsilon}$	Permissividade elétrica
$\vec{\mu}$	Permeabilidade magnética
ψ	Ângulo de inclinação da elipse de polarização
χ	Ângulo de elipticidade da elipse de polarização
σ	Seção cruzada do radar de um alvo pontual
σ^0	Coefficiente de retroespalhamento de um alvo distribuído
σ_x	Resposta polarimétrica normalizada de co-polarização ($x = co$) e de polarização cruzada ($x = cross$)
λ	Comprimento de onda eletromagnética
$[S]$	Matriz de espalhamento ideal
S_{pq}	Componente polarimétrica de $[S]$, onde $p, q = \{h, v\}$
$[O]$	Matriz de espalhamento observada
$[R]$	Matriz de distorção de recepção do sistema POLSAR
$[T]$	Matriz de distorção de transmissão do sistema POLSAR
$[N]$	Matriz de ruído do sistema POLSAR
$[C_j]$	Matriz de covariância polarimétrica, onde $j = \{3, 4\}$
$[T_j]$	Matriz de coerência polarimétrica, onde $j = \{3, 4\}$
$[M]$	Matriz de Mueller
$[K]$	Matriz de <i>Kennaugh</i> ou Matriz de espalhamento de <i>Stokes</i>
Ψ_j	Matrizes de rotação da base lexográfica (L) ou de Pauli (P), onde $j = \{L, P\}$
k_{4j}	Vetores de espalhamento da base lexográfica ou de Pauli

α	Parâmetro α do processo de calibração polarimétrica e Ângulo α da teoria de decomposição de alvos
A_p	Anisotropia polarimétrica
H_s	Entropia de Espalhamento Polarimétrica
φ	Diferença de fase entre dois vetores
\vec{k}	Direção de propagação da onda eletromagnética
k	Parâmetro k do processo de calibração do <i>channel imbalance</i> e Número de onda, onde $k= \vec{k} =2\pi/\lambda$
θ	Ângulo de incidência da onda eletromagnética, em relação à normal a superfície do terreno
ω	Frequência angular
ω	Taxa de variação de frequência instantânea (<i>chirp rate</i>)
h	Componente horizontal da onda eletromagnética
v	Componente vertical da onda eletromagnética Parâmetro v do processo de calibração do <i>cross-talk</i>
m	Parâmetro m do processo de calibração do <i>cross-talk</i>
u	Parâmetro u do processo de calibração do <i>cross-talk</i>
w	Parâmetro w do processo de calibração do <i>cross-talk</i>
z	Parâmetro z do processo de calibração do <i>cross-talk</i>
Y	Parâmetro Y do processo de calibração polarimétrica
c	Velocidade da luz
c_0	Velocidade da luz no vácuo
Ω	Ângulo devido à rotação de <i>Faraday</i>
∇	Vetor gradiente
θ_a	Abertura física azimutal da antena SAR (radianos)
L_a	Tamanho físico azimutal da antena SAR (metros)
L_{sa}	Comprimento da abertura sintética no imageamento SAR
θ_s	Ângulo de orientação de polarização induzido pela declividade do terreno
$r(\tau)$	Distância alvo-radar em função do tempo τ
T_a	Taxa de amostragem do sinal recebido pelo radar
T_{prf}	Intervalo de tempo de transmissão de um novo pulso pelo radar
T_p	Tempo de duração do pulso transmitido pelo radar

\mathbf{g}^j	Vetor de <i>Stokes</i> da onda transmitida (t) ou recebida (r) pelo radar, onde $j = \{t, r\}$
I	Intensidade total da onda eletromagnética
Q	Diferença entre as intensidades horizontal e vertical da onda eletromagnética
U	Tendência de polarização linear da onda eletromagnética
V	Tendência do sentido de polarização da onda eletromagnética
\hat{x}	Estimador de um parâmetro X
rg	Direção de range do imageamento SAR
az	Direção de azimuth do imageamento SAR
gr	Direção de ground range do imageamento SAR
B_x	Largura de banda de frequência na direção x
Δ_x	Resolução espacial de uma imagem na direção x
δ_x	Espaçamento entre pixels de uma imagem na direção x

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do trabalho

Nos últimos 30 anos, as perspectivas de aplicações do Sensoriamento Remoto por microondas, empregando-se radares imageadores de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR), foram ampliadas de forma significativa, em consequência da introdução operacional da polarimetria na década de 80 e da interferometria na década de 90.

Desde o início da década de 80, com a operação do sistema aerotransportado AIRSAR (NASA/JPL) e a disponibilização das primeiras imagens polarimétricas para a comunidade científica, até os dias atuais, os avanços alcançados na área de polarimetria possibilitaram, entre outras aplicações, a estimação de parâmetros geofísicos dos alvos terrestres e o aprimoramento dos métodos de classificação de imagens SAR. Hoje, a polarimetria SAR (PolSAR) é uma técnica bem fundamentada e conhecida, com um grande potencial de aplicação na agricultura (discriminação de diferentes culturas), mapeamento florestal (estimação de biomassa), geologia (identificação de estruturas geológicas), hidrologia (estimação da rugosidade e umidade da superfície), entre outras.

A principal causa desses avanços na área de polarimetria SAR é a grande quantidade de informações contidas nos dados polarimétricos complexos (amplitude e fase), que permitem a decomposição e a identificação de diferentes mecanismos elementares de espalhamento. Entretanto, esse aumento de informação sobre a cena imageada acarreta a necessidade de realizar um grande esforço de calibração, que é uma exigência imprescindível e crítica no processamento polarimétrico. Essa necessidade de calibração é decorrência de distorções de transmissão e de recepção entre os canais do sistema SAR polarimétrico, que introduzem nos dados polarimétricos sintetizados pelo sistema SAR informações de amplitude e de fase que não são provenientes dos alvos terrestres, e, portanto devem ser minimizadas.

Todo o esforço de calibração é fundamental para garantir uma precisa caracterização da informação polarimétrica proveniente dos alvos terrestres, proporcionando uma maior

confiabilidade nas aplicações baseadas nas imagens SAR polarimétricas. Dentre elas, os resultados obtidos por diferentes métodos de classificação polarimétrica (CORREIA, 1998; POTTIER e LEE, 2000; LEE et al., 2004) evidenciaram a importância do uso da informação de fase. Outra importante área de aplicação é baseada na combinação das técnicas de polarimetria e interferometria SAR (PolInSAR), com a finalidade de obtenção de uma fase interferométrica otimizada, proporcionando a geração de modelos numéricos de elevação mais precisos (PAPATHANASSIOU, 1999; COLIN et al., 2003; MURA, 2005), bem como a extração de parâmetros biofísicos de áreas de floresta (CLOUDE e PAPATHANASSIOU, 1998). Para tal, é necessário minimizar as distorções impostas pelo sistema SAR, de modo a garantir que a informação de fase dos espalhadores seja a mais precisa possível.

Em função dessa necessidade de minimizar os erros introduzidos na informação de fase dos espalhadores, diversos métodos de calibração polarimétrica têm sido propostos ao longo dos últimos 20 anos, com base em métodos iterativos (VAN ZYL, 1990; KLEIN, 1992; AINSWORTH e LEE, 2001; AINSWORTH et al., 2006) ou de solução direta (QUEGAN, 1994; KIMURA et al., 2004; FUJITA, 2005). Apesar dos métodos em questão serem baseados no mesmo modelo de distorção linear, não é possível garantir uma adequada generalização de aplicação desses métodos para os dados provenientes dos sistemas SAR atualmente disponíveis, em decorrência de algumas suposições formuladas sobre os sistemas SAR e os alvos terrestres, ou pela dependência de alvos conhecidos na cena imageada.

1.2 Motivação

Pelo exposto acima, os estudos na área de calibração de imagens PolSAR têm um grande potencial de expansão, principalmente agora, em decorrência do lançamento de novos sistemas PolSAR orbitais, como foi o caso dos satélites RADARSAT-2 (VAN DER SANDEN e ROSS, 2001), em 14/12/2007, e ALOS (SHIMADA et al., 2005), em 24/01/2006, contribuindo para a implementação de um programa contínuo de monitoramento da cobertura terrestre com imagens SAR orbitais.

Inserido neste contexto, no ano de 2004, foi iniciado, na Divisão de Processamento de Imagens/INPE, o planejamento de várias missões de imageamento com o sistema sensor SAR aerotransportado do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), denominado de R99B, com a finalidade de simular as imagens do sensor SAR orbital polarimétrico na banda L, denominado MAPSAR (*Multi-Application Purpose SAR*), o qual é um projeto de desenvolvimento entre o INPE e o DLR (Agencia Espacial Alemã).

Dentre as várias áreas previstas para a simulação do sistema MAPSAR, foi selecionada a região da Floresta Nacional do Tapajós (FLONA) e arredores, situada próxima à cidade de Santarém-PA, com o propósito de obtenção de imagens PolSAR complexas destinadas à classificação digital do uso e cobertura do solo. Devido ao elevado grau de antropização da região localizada nas proximidades da FLONA, o que possibilitava a seleção de diferentes locais adequados para instalação de refletores de canto triédricos, vislumbrou-se a possibilidade de empregar também as referidas imagens e a informação polarimétrica conhecida desses refletores para o desenvolvimento de um estudo inédito no Brasil, voltado para a calibração polarimétrica das imagens do sensor SAR R99B.

Com base nesse novo cenário que se apresenta, onde se inserem as futuras aplicações sistemáticas de imagens SAR sobre o território nacional, aliado à disponibilidade de imagens PolSAR provenientes dos sensores orbitais supracitados e aerotransportados, como é o caso do SAR R99B (ANDRADE, 2007), do SIPAM, e do OrbiSAR, da empresa nacional ORBISAT (ROMBACH, 2003), é fundamental garantir a precisa caracterização da informação polarimétrica dos alvos terrestres. Para tal, não somente as distorções impostas pelo sistema PolSAR devem ser minimizadas, pois, para esses sistemas, o processo de calibração envolve também a necessidade de correção de outras fontes de distorções impostas aos dados SAR, que podem ser provenientes do meio de propagação do sinal emitido ou recebido pelo radar e/ou da região imageada.

Portanto, evidencia-se a importância da introdução do processo de calibração em qualquer metodologia de pesquisa que tem por finalidade realizar uma análise polarimétrica dos alvos terrestres, onde, atualmente, não se dispõe de um único ambiente de pós-processamento digital de imagens SAR, comercial ou livre, que

agregue os principais métodos de calibração de dados PolSAR. Além disso, a inexistência de uma metodologia de calibração polarimétrica abrangente, que independa da região imageada, do sistema SAR empregado, do conhecimento prévio de alvos naturais existentes na cena imageada e principalmente da necessidade de execução de trabalho de campo para instalação de alvos artificiais com retorno conhecido, o que pode ser extremamente difícil em algumas regiões do Brasil, como é o caso da Amazônia, motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

1.3 Objetivos e hipóteses

Dentro do contexto exposto, em contraposição à escassez de trabalhos anteriores desenvolvidos no país e devido à relevância do processo de calibração radiométrica na sistematização das aplicações de sensoriamento remoto baseada na técnica de polarimetria SAR, fruto da crescente disponibilidade de imagens orbitais e aerotransportadas com diferentes bandas de frequência, o objetivo central deste trabalho é o desenvolvimento de um novo método automático de calibração polarimétrica por intermédio do uso isolado das imagens PolSAR. Além disso, devido à inexistência de um sistema de calibração de imagens PolSAR, são caracterizadas todas as fontes de distorções radiométricas que afetam as imagens PolSAR, bem como o desenvolvimento de um conjunto de ferramentas computacionais para correção dessas distorções.

Com base nos objetivos propostos, foram formuladas duas hipóteses básicas: a primeira a que é possível se ter uma metodologia geral de calibração radiométrica multi-sensor e multi-plataforma, integrada em um único ambiente de processamento SAR, que se adapte a qualquer conjunto de imagens PolSAR e de dados auxiliares disponíveis, e que seja amigável a qualquer usuário, especializado ou não na área de calibração SAR; e a segunda a que é possível empregar somente as imagens PolSAR para a calibração automática do *cross-talk* e do *channel imbalance*, como sendo uma alternativa viável, em relação aos métodos de calibração polarimétrica tradicionais, no caso da inexistência de alvos artificiais conhecidos na cena imageada.

Para atingir estes objetivos foi empregada uma abordagem metodológica, com base nas imagens PolSAR, na banda L, do sistema sensor SAR R99B do SIPAM, com diferentes

resoluções espaciais, além da execução do trabalho de campo, que consistiu da pré-sinalização do imageamento SAR, por intermédio do posicionamento de refletores de canto triédricos em duas áreas de estudo, situadas na região da Floresta Nacional do Tapajós, próxima à cidade de Santarém-PA, e na região da cidade de Campinas-SP. As respostas polarimétricas teóricas destes refletores serviram de referência para quantificar a qualidade dos resultados obtidos com as diferentes metodologias de calibração abordadas neste trabalho.

Na primeira parte do trabalho, foram implementados e testados todos os algoritmos necessários para a obtenção dos resultados intermediários e finais da tese. Inicialmente, com o objetivo de verificar a primeira hipótese, foram desenvolvidas diversas ferramentas computacionais de calibração de imagens PolSAR multi-sensor e multi-plataforma, onde se destaca a implementação do tradicional método semi-automático de calibração polarimétrica proposto por Quegan (1994), com as melhorias propostas por Kimura et al. (2004). Em seguida, com o objetivo de verificar a segunda hipótese, foi desenvolvida a concepção, o equacionamento e a implementação de um novo método automático de calibração polarimétrica com base em imagens PolSAR *multi-look*.

A outra parte do trabalho teve por objetivo realizar os processamentos e análises necessárias para obtenção dos resultados de interesse deste trabalho, por intermédio de uma inédita quantificação pormenorizada da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR do sistema R99B, cujos aspectos geométricos avaliados foram o erro global de posicionamento e a qualidade interna. Em relação à análise radiométrica, foi possível mensurar os níveis de distorção de recepção e de transmissão do sistema R99B, o que possibilitou a comparação entre os resultados obtidos para os dois métodos de calibração polarimétrica estudados, além da análise da influência dessa calibração sobre as imagens obtidas pelo método de decomposição de alvos por autovetores.

Com base nas hipóteses formuladas e nos objetivos gerais descritos anteriormente, foram definidos os seguintes objetivos específicos, como metas intermediárias a serem alcançadas no decorrer deste trabalho:

- 1) Caracterizar todas as fontes de distorções radiométricas que afetam as imagens PolSAR;
- 2) Desenvolver um conjunto de ferramentas computacionais de calibração de imagens PolSAR multi-sensor e multi-plataforma;
- 3) Implementar e avaliar o método de calibração polarimétrica desenvolvido por Quegan (1994), com as melhorias propostas em Kimura et al. (2004);
- 4) Desenvolver, implementar e avaliar um novo método automático de calibração polarimétrica de dados PolSAR, com base em imagens *multi-look* complexas;
- 5) Avaliar a qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR, na banda L, provenientes do sistema sensor SAR R99 do SIPAM;
- 6) Quantificar as distorções polarimétricas de transmissão e de recepção do sistema sensor SAR R99B do SIPAM, na banda L;
- 7) Avaliar a influência do processo de calibração polarimétrica sobre as imagens obtidas pela decomposição da Entropia/Ângulo α .

1.4 Contribuição da tese

A mais importante contribuição desta tese é a concepção, equacionamento, implementação e teste de um novo método de calibração polarimétrica, que tem por finalidade a estimação automática e unificada dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance*, empregando-se apenas três imagens PolSAR *multi-look* complexas. Porém, o caráter mais geral da nova metodologia de calibração está baseado na possibilidade de estimação conjunta dos parâmetros do *cross-talk*, *channel imbalance* e da rotação de *Faraday*, diferentemente dos outros métodos existentes, que pressupõem, pelo menos, a inexistência do *cross-talk* para corrigir a rotação de *Faraday*. Além disso, após a realização de testes mais exaustivos, o uso desse novo método poderá suprimir a necessidade de utilização de refletores de canto para a calibração polarimétrica, de acordo com a finalidade de emprego das imagens PolSAR.

Outro aspecto importante a ser considerado se refere ao desenvolvimento das ferramentas computacionais de calibração de dados PolSAR, cujo objetivo inicial era atender a demanda de processamento deste trabalho. O conjunto de ferramentas implementadas, integradas em um único ambiente de processamento SAR e complementando ou aperfeiçoando as funcionalidades dos demais aplicativos, pode ser considerada como outra contribuição deste trabalho na área de calibração de imagens PolSAR.

Destaca-se ainda, como outra contribuição desta tese, a caracterização detalhada e inédita, no cenário nacional, das propriedades geométricas e radiométricas das imagens PolSAR, na banda L, do sensor SAR R99B, definindo, principalmente os níveis de distorção de desbalançamento e contaminação entre os canais polarimétricos do referido sensor. Essa caracterização dos níveis de distorção impostos pelo sistema sensor SAR R99B poderão servir de referência para futuras avaliações que se fizerem necessárias a cerca da qualidade polarimétrica das imagens PolSAR obtidas por esse sistema. Além disso, a partir da quantificação das distorções de recepção e de transmissão do sistema sensor SAR R99B foi possível obter a resposta polarimétrica de alvos de interesse, o que pode ser utilizado em outras aplicações que envolvam a necessidade de calibração polarimétrica e também desenvolver um estudo preliminar da influência do processo de calibração do *cross-talk* e do *channel imbalance* sobre as imagens da entropia e do ângulo α obtidas pelo método de decomposição de alvos por autovetores.

Finalmente, destacam-se a fundamentação teórica apresentada, com base nas referências bibliográficas pesquisadas, especialmente para a fase de calibração de imagens SAR, a metodologia empregada no trabalho de campo para instalação de refletores e as etapas de avaliação radiométrica e geométrica das imagens SAR apresentadas neste documento, que podem ser consideradas como uma referência para trabalhos futuros, em função da abrangência dos conceitos envolvidos e sintetizados em um único documento, que até a presente data não estava disponível em publicações nacionais. Como consequência desse trabalho de pesquisa foi possível realizar um levantamento de sugestões de trabalhos futuros, conforme descrito no Capítulo 7, que abrem a perspectiva para implantação de uma nova linha de pesquisa na área da DPI/INPE,

voltada para a quantificação e avaliação da influência da calibração de imagens PolSAR em diferentes aplicações.

1.5 Estrutura do trabalho

Para apresentar os fundamentos teóricos, formulações utilizadas, detalhes da metodologia empregada e os resultados obtidos, este trabalho está dividido nos capítulos e apêndices descritos abaixo.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica básica sobre Polarimetria SAR, com ênfase na representação matemática da polarização e espalhamento de ondas eletromagnéticas, da síntese de polarização em sistemas PolSAR, da resposta polarimétrica de alvos de referência e da Teoria de Decomposição de Alvos.

No Capítulo 3, são apresentados os principais métodos referentes a cada uma das fases do processo de calibração radiométrica de imagens SAR.

No Capítulo 4, é apresentada a metodologia de trabalho empregada para obtenção dos resultados descritos no Capítulo 6, enfocando os principais aspectos envolvidos na fase de campo, imageamento e processamento SAR desenvolvidos neste trabalho.

No Capítulo 5, é apresentada a concepção, o equacionamento e a implementação do novo método de calibração polarimétrica *multi-look*, abordando as questões relativas as suposições impostas pelo método, ao sistema de equações não-lineares e ao método numérico de solução adotado para estimação dos parâmetros de calibração.

No Capítulo 6, são apresentados e discutidos os aspectos que motivaram o desenvolvimento das ferramentas computacionais de calibração e os resultados obtidos nas diferentes etapas de pós-processamento das imagens PolSAR descritas no Capítulo 4. Esses resultados englobam desde a correção do padrão de irradiação da antena do sensor SAR R99B, passando por uma análise radiométrica e geométrica das imagens em questão, seguido de uma comparação entre os métodos de calibração polarimétrica abordados nesse trabalho e por fim uma avaliação preliminar da influência do processo de calibração polarimétrica sobre as imagens da entropia e do ângulo α .

No Capítulo 7, são apresentadas as conclusões e sugestões resultantes deste trabalho.

No Apêndice A, são apresentadas as definições básicas utilizadas no decorrer deste trabalho.

No Apêndice B, são apresentadas as interfaces gráficas e as funcionalidades correspondentes às ferramentas de calibração e auxiliares que foram desenvolvidas para dados PolSAR, por intermédio do uso combinado do sistema de processamento e visualização de imagens ENVI e da linguagem de programação IDL.

2 FUNDAMENTOS DA POLARIMETRIA SAR

Os radares imageadores convencionais operam, em geral, com um único canal e com uma única antena de polarização fixa, tanto para a transmissão como para a recepção do sinal de microondas. Nesses sistemas, devido à combinação específica da polarização de transmissão e recepção, os milhares de pontos que compõe uma cena, são geralmente representados somente pela medida da amplitude ou da intensidade do sinal. Desta forma, a onda espalhada, que é uma quantidade vetorial composta por uma amplitude e uma fase, é representada apenas por uma grandeza escalar (amplitude ou intensidade). Como consequência, qualquer informação adicional sobre a superfície contida na informação de fase dos sinais refletidos é perdida.

Para garantir que toda a informação da onda espalhada seja mantida, sua polarização deve ser medida através de uma representação vetorial. Com a utilização de radares imageadores polarimétricos é possível medir a amplitude e a fase relativa de todas as configurações das antenas de transmissão e recepção, para todos os elementos de resolução de uma cena (ULABY e ELACHI, 1990).

A seguir são descritos os fundamentos físicos e matemáticos que caracterizam a polarização de ondas eletromagnéticas transmitidas pelo sistema SAR polarimétrico, seus estados de polarização, como a onda espalhada pelos alvos terrestres é recebida e processada pelo radar, e as respectivas respostas polarimétricas de alvos de referência.

2.1 Polarização de ondas eletromagnéticas

As equações de *Maxwell*, estabelecidas por *James Clerk Maxwell* em 1864 e experimentalmente verificadas por *Heinrich Hertz* em 1884, definem as leis fundamentais que governam todos os aspectos macroscópicos do fenômeno eletromagnético, incluindo a geração de ondas, propagação e interação com a matéria. Com base nas equações de *Maxwell* e nas relações constitutivas (PAPATHANASSIOU, 1999), que caracterizam o comportamento do meio de propagação, representado pela

permissividade elétrica¹ ($\vec{\epsilon}$) e permeabilidade magnética² ($\vec{\mu}$), sob a influência de um campo eletromagnético, prova-se a mais importante consequência resultante das equações *Maxwell*, que é a existência das ondas eletromagnéticas (EM). Portanto, para um meio linear (onde os vetores de campo são linearmente relacionados), homogêneo ($\vec{\mu}$ e $\vec{\epsilon}$ são constantes em qualquer ponto), isotrópico ($\vec{\mu}$ e $\vec{\epsilon}$ são escalares) e livre de influência da fonte de radiação eletromagnética, a equação de movimento da onda é homogênea para qualquer componente do vetor campo elétrico \vec{E} , sendo dada por (ALBERGA, 2003):

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E}(\vec{r}, t) = 0, \quad (2.1)$$

onde $c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$ e representa a velocidade de propagação da onda, e a intensidade de \vec{E} é dada em *Volts/metro*. No vácuo, $c = c_0 = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2,99792 \times 10^8$ m/s. Segundo Kostinski e Boerner (1986), para aplicações em sensoriamento remoto por radar, pode-se supor o caso de campos harmônicos no tempo (parte real do vetor campo elétrico complexo), conduzindo a seguinte equação da onda, que é uma solução particular da Equação 2.1:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \Re \left\{ \vec{E}(\vec{r}) \exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})) \right\} = \vec{E}_{re}(\vec{r}) \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}), \quad (2.2)$$

onde $\vec{E}(\vec{r}) \in C$ é um vetor amplitude constante, $\vec{E}_{re}(\vec{r}) = \Re \left\{ \vec{E}(\vec{r}) \right\}$, ω e \vec{k} são, respectivamente, a frequência angular e o vetor de propagação da onda, cujo módulo do vetor \vec{k} é denominado de número de onda e dado por $k = |\vec{k}| = 2\pi/\lambda$, e λ é o comprimento de onda. Em função da distância entre a frente de onda e a fonte de radiação, pode-se considerar a fase frontal de $\vec{E}(\vec{r}, t)$, representada por $\vec{k} \cdot \vec{r}$, como sendo constante, o que produz como lugar geométrico dessa fase um plano $\perp \vec{k}$. Desta forma, o vetor $\vec{E}(\vec{r}, t)$

¹ Descreve a densidade de fluxo produzido por um material que é excitado por um campo elétrico.

² Descreve o grau de magnetização de um material em resposta a excitação de um campo magnético.

representa uma *onda plana monocromática*³ se deslocando na direção \vec{k} , com amplitude variando no tempo, porém, constante para todos os pontos \vec{r} no plano da onda em um instante t .

A variação temporal, em módulo e direção, do vetor $\vec{E}(\vec{r}, t)$ pode ser representada pelo trajeto helicoidal da sua extremidade, de acordo com a Figura 2.1. A natureza vetorial das ondas eletromagnéticas, no plano transversal à direção de propagação, é chamada de *polarização*, e independe do sistema de coordenadas escolhido. O caso mais geral do lugar geométrico descrito pela extremidade do vetor $\vec{E}(\vec{r}, t)$, projetado no plano $(\vec{h}, \vec{v}) \perp \vec{k}$, é denominado de *elipse de polarização* (Figura 2.1), significando que a onda é elipticamente polarizada, conforme demonstrado a seguir.

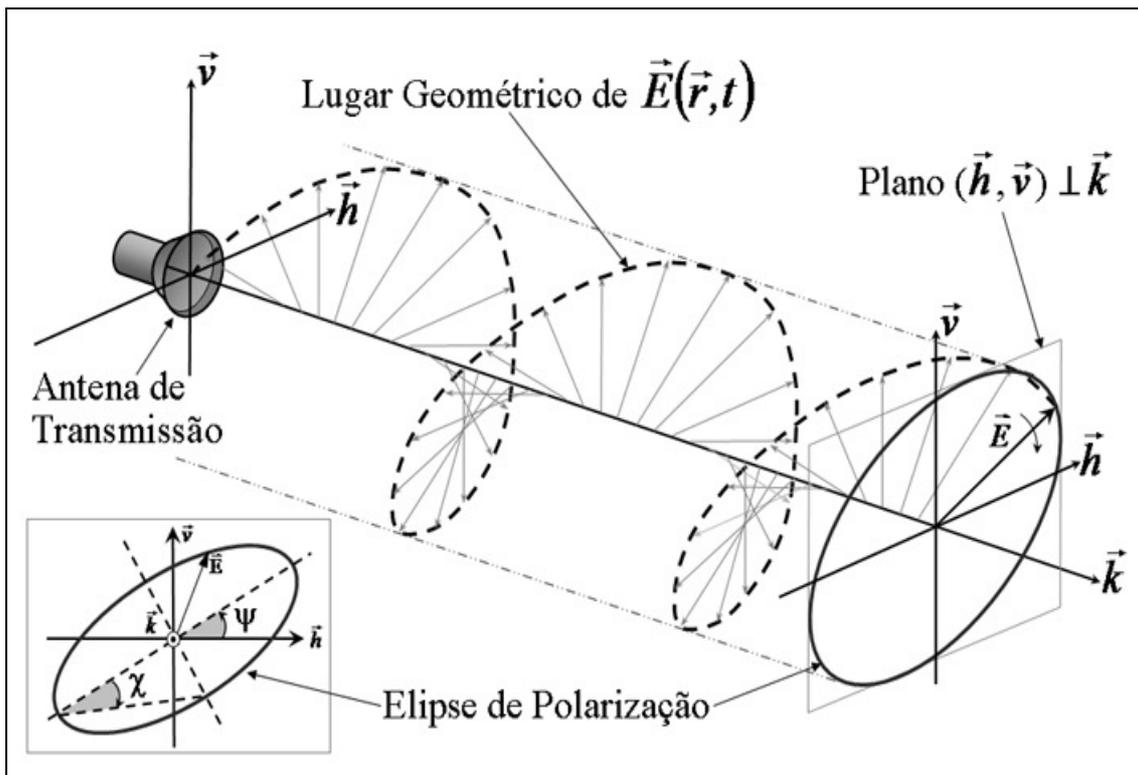


Figura 2.1 – Onda eletromagnética.

FONTE: Adaptada de Hellman (2001).

³ Onda plana e monocromática é aquela em que a superfície equifásica é um plano e que possui uma única frequência, respectivamente.

2.1.1 Elipse de polarização

A maioria dos sistemas SAR polarimétricos utilizam duas antenas polarizadas linearmente e ortogonais, o que permite a adoção de um sistema de coordenadas cartesiana $(\vec{h}, \vec{v}, \vec{k})$, para caracterizar o vetor campo elétrico \vec{E} de uma onda plana monocromática que se desloca na direção \vec{k} . A decomposição do vetor $\vec{E}(\vec{r}, t)$ em duas componentes ortogonais no plano (\vec{h}, \vec{v}) é dada por (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\begin{cases} E_h(\vec{r}, t) = \Re\{a_h \exp(i\varphi_h) \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})\} = a_h \cos(\varphi_h + \tau) \\ E_v(\vec{r}, t) = \Re\{a_v \exp(i\varphi_v) \exp i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})\} = a_v \cos(\varphi_v + \tau) \end{cases}, \quad (2.3)$$

onde a_j e φ_j representam, respectivamente, a amplitude e a fase do vetor \vec{E} em relação à direção $j=\{h, v\}$, e $\tau = \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$. Definindo o ângulo $\varphi = \varphi_v - \varphi_h \neq 0$ e desenvolvendo a Equação 2.3, onde o termo τ é eliminado, obtém-se (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\left(\frac{E_h(\vec{r}, t)}{a_h}\right)^2 + \left(\frac{E_v(\vec{r}, t)}{a_v}\right)^2 - 2\left(\frac{E_h(\vec{r}, t)E_v(\vec{r}, t)}{a_h a_v}\right) \cos(\varphi) - \sin^2(\varphi) = 0 \quad (2.4)$$

Substituindo $E_h(\vec{r}, t) = x$ e $E_v(\vec{r}, t) = y$ na Equação 2.4, e comparando-se com a expressão geral das cônicas $Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$, conclui-se que $B^2 - 4AC < 0$ ($\varphi \neq 0$), o que caracteriza uma elipse com um ângulo de *orientação* ψ e *elipticidade* χ , onde (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\tan(2\psi) = \tan\left(2\frac{a_v}{a_h}\right) \cos(\varphi) \quad \text{e} \quad \sin(2\chi) = \sin\left(2\frac{a_v}{a_h}\right) \sin(\varphi) \quad (2.5)$$

Com base nos ângulos de polarização ψ ($-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$) e χ ($-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4$), é possível descrever o estado de polarização da onda EM, conforme os casos especiais apresentados na Tabela 2.1. O sentido de polarização é indicado pelo sinal do ângulo χ , onde os valores negativos e positivos indicam, respectivamente, o sentido de rotação para a esquerda e para a direita (IEEE, 1983).

Tabela 2.1 - Ângulos de polarização para diferentes estados de polarização.

Ângulo	Estado de Polarização				
	Horizontal (h)	Vertical (v)	Linear em θ°	Circular à direita (R)	Circular à esquerda (L)
Inclinação (ψ)	0°	90°	θ°	90° a 90°	90° a 90°
Elipticidade (χ)	0°	0°	0°	-45°	45°

Devido à faixa de valores que estão compreendidos os ângulos ψ e χ , pode-se definir uma infinidade de combinações lineares de dois estados de polarização ortogonais, dando origem a uma base de polarização de referência, como por exemplo (\vec{h}, \vec{v}) ou (R, L) . Em termos dos ângulos de polarização, dois estados de polarização, denotados pelos subscritos e_1 e e_2 , são ortogonais se $\psi_{e_1} = \psi_{e_2} + \pi/2$ e $\chi_{e_1} = -\chi_{e_2}$. Os estados de polarização ortogonais são a base para a representação da resposta polarimétrica dos alvos naturais e artificiais, conforme descrito na Seção 2.4.

2.1.2 Vetor de Stokes

Outra maneira de representar o estado de polarização da onda eletromagnética é por meio do *Vetor de Stokes* \mathbf{g} . Essa representação consiste de 4 parâmetros reais que são relacionados com os parâmetros ψ e χ , sendo que \mathbf{g} é definido por (ALBERGA, 2003):

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \stackrel{def}{=} \begin{bmatrix} |E_h|^2 + |E_v|^2 \\ |E_h|^2 - |E_v|^2 \\ 2\Re\{E_h^* E_v\} \\ 2\Im\{E_h^* E_v\} \end{bmatrix} = g_0 \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ \sin(2\psi) \cos(2\chi) \\ \sin(2\chi) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

onde I é a intensidade total da onda, Q é a diferença entre as intensidades das componentes horizontal e vertical, e U e V contêm a diferença entre as fases dessas componentes. Para ondas totalmente polarizadas tem-se que $g_0^2 = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$ (caso das ondas transmitidas pelo radar), enquanto que para ondas parcialmente polarizadas tem-se que $g_0^2 > g_1^2 + g_2^2 + g_3^2$.

As ondas parcialmente polarizadas são geradas, tipicamente, após a interação de ondas polarizadas com alvos naturais da superfície terrestre, que devem ser considerados como um conjunto distribuído de diversos espalhadores variando no tempo e espaço (ALBERGA, 2003). Esses espalhadores são denominados de não-determinísticos, parciais ou aleatórios, o que acarreta a necessidade de estimação da média de um conjunto de medidas, para expressar corretamente as variações estatísticas da polarização, conforme abordado na Seção 2.2, que trata do espalhamento de ondas eletromagnéticas.

2.1.3 Vetor de Jones

Para aplicações de sensoriamento remoto por microondas, é preferida a representação do vetor campo elétrico em um espaço complexo bidimensional, ao invés do espaço complexo tridimensional, dada por (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\vec{E}_{hv} = \begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_h \exp(i\phi_h) \\ a_v \exp(i\phi_v) \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

onde \vec{E}_{hv} é denominado de *Vetor de Jones*, E_h e E_v são as amplitudes complexas projetadas na base (\vec{h}, \vec{v}) , e a_j e ϕ_j foram definidos na Equação 2.3. O vetor \vec{E}_{hv} contém toda a informação referente à forma da elipse de polarização e o sentido de rotação do vetor campo elétrico. A única informação que não está contida no vetor de *Jones* é a direção de propagação da onda, que é representada com a inserção dos subscritos “+” e “-”, onde \vec{E}_{hv+} e \vec{E}_{hv-} denotam a propagação da onda na direção $+\vec{k}$ e $-\vec{k}$, respectivamente. Por comodidade de representação, no decorrer do trabalho o vetor \vec{E}_{hv} indicará a direção de propagação $+\vec{k}$.

O vetor de *Jones* pode ser relacionado com os parâmetros da elipse de polarização, onde a decomposição total da onda elipticamente polarizada transmitida, em termos das amplitudes complexas E_h e E_v , é dada por (HUYNEN, 1965):

$$\vec{E}_{hv}^t = \begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix} = \sqrt{a_h^2 + a_v^2} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\chi) \\ i\sin(\chi) \end{bmatrix}}_{\mathbf{h}(\psi, \chi)} \exp(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi)), \quad (2.8)$$

onde $\varphi = \varphi_v - \varphi_h$ (Equação 2.3) e o vetor $\mathbf{h}(\psi, \chi)$ é utilizado para obtenção da resposta polarimétrica, conforme descrito na Seção 2.4.

Até esse ponto, foram abordados os principais fundamentos envolvidos na descrição de ondas EM polarizadas. A seguir são descritos os principais aspectos que caracterizam o espalhamento de ondas EM polarizadas, em aplicações de sensoriamento remoto por radar.

2.2 Espalhamento de ondas eletromagnéticas

Nesta seção são abordados os principais aspectos envolvidos na representação geométrica e matemática do fenômeno de interação das ondas EM polarizadas, que são transmitidas pelos sistemas SAR polarimétricos, com os objetos espalhadores existentes na cena imageada, o que possibilita a obtenção da informação polarimétrica proveniente dos alvos terrestres.

2.2.1 Geometria de imageamento SAR

O Radar de Abertura Sintética (SAR) é um sistema imageador ativo de visada lateral, que trabalha com sinais de rádio na faixa de microondas (JENSEN et al., 1977). O princípio básico de imageamento SAR consiste de um radar instalado em uma plataforma aerotransportada ou orbital (Figura 2.2), que se desloca com velocidade V , onde um transmissor envia pulsos de microondas modulados linearmente em frequência, conhecidos como *chirp* (WERNER, 1994) (Figura 2.3a), em intervalos regulares, T_{prf} (*prf* – *pulse repetition frequency*), como ilustrado na Figura 2.3b. Normalmente se convencionou a direção de vôo como a direção de *azimute* e a direção perpendicular ao vôo, como a direção de *range* ou *radial*.

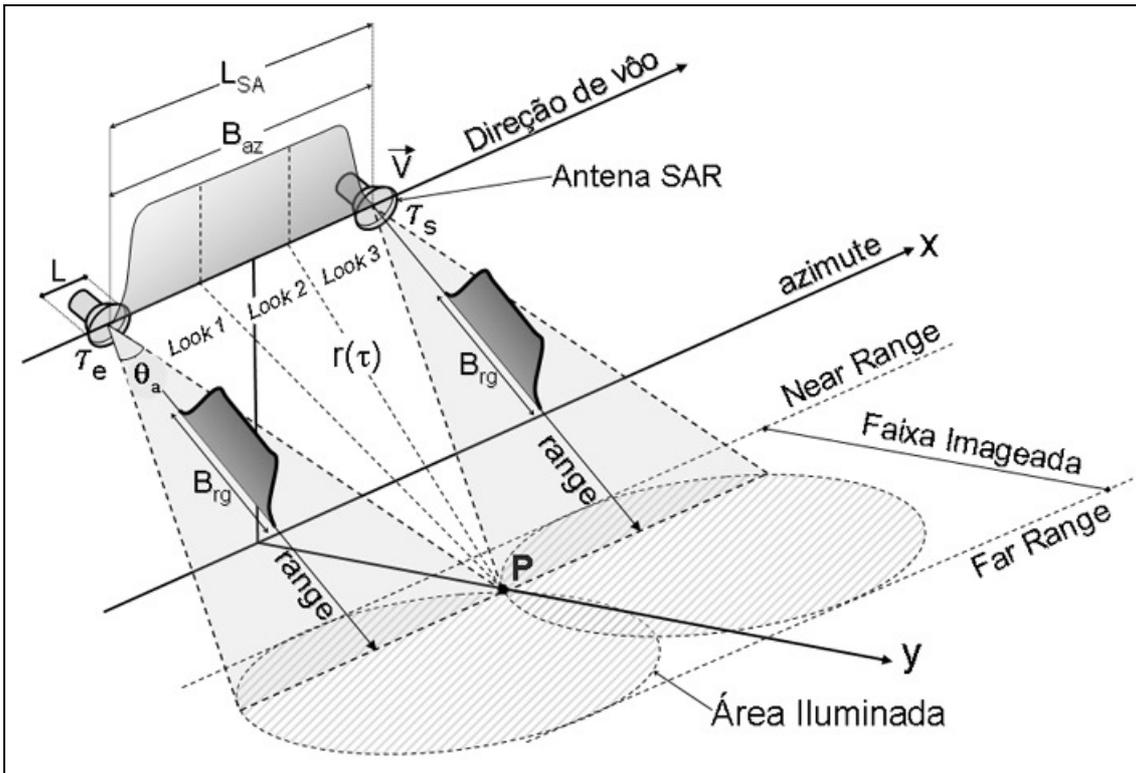


Figura 2.2 – Geometria de imageamento SAR – Exemplo de 3 looks em azimute.

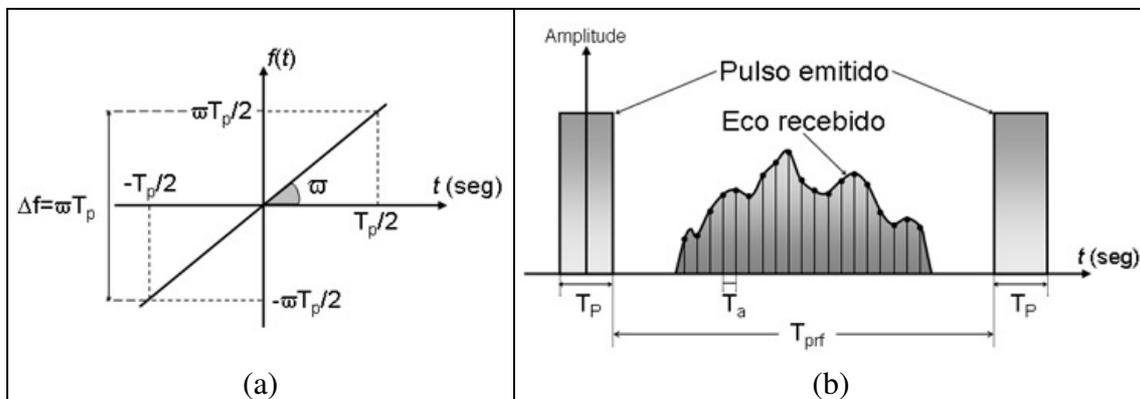


Figura 2.3 – (a) Modulação linear de frequência (*chirp*) e (b) ilustração de pulsos transmitidos e ecos recebidos por um sistema SAR (domínio temporal).

Os ecos que retornam ao receptor do radar (Figura 2.3b) são gravados a bordo, com uma taxa de amostragem T_a , e posteriormente processados para a geração da imagem SAR. A variação de frequência do pulso transmitido define a largura de banda radial (B_{rg}) (Figura 2.2). A alta resolução da imagem SAR na direção radial é obtida por meio do

uso de um pulso de grande largura de banda de frequência associado com a técnica de filtragem denominada de compressão de pulso (FERNANDES, 1993), que fornece uma resolução radial definida por (MURA, 2000):

$$\Delta_{rg} = \frac{c}{2B_{rg}} = \frac{c}{2\varpi T_p} \quad (2.9)$$

onde c é a velocidade da luz, ϖ é a taxa de variação de frequência instantânea (*chirp rate*) (Figura 2.3a) e T_p é o tempo de duração do pulso transmitido.

A alta resolução da imagem SAR na direção azimutal é obtida por intermédio da técnica conhecida por *Abertura Sintética*. Para entender melhor o que ocorre em um sistema de imageamento SAR, utiliza-se como modelo o comportamento de um alvo pontual. A Figura 2.2 apresenta o imageamento de um ponto genérico P , desde a sua entrada no campo visual da antena com abertura e tamanho físico azimutal θ_a e L_a , respectivamente, no instante azimutal τ_e , até sua saída no instante τ_s . No intervalo de tempo $(\tau_s - \tau_e)$, o radar envia N pulsos, o que proporciona uma coleta de N amostras do eco do ponto P . Durante este intervalo de tempo a plataforma se desloca $V(\tau_s - \tau_e)$ metros, sendo que este deslocamento é conhecido como o *comprimento da Abertura Sintética* (L_{sa}) (MURA, 2000), conforme apresentado na Figura 2.2.

O eco recebido de cada pulso enviado sofre uma variação de frequência e fase devido à velocidade V da plataforma e da variação de distância $r(\tau)$, durante o intervalo $(\tau_s - \tau_e)$. A variação de frequência é conhecida como *efeito Doppler*, e define a largura de banda azimutal (B_{az}) (Figura 2.2), que por sua vez define a resolução da imagem SAR na direção de azimute, da seguinte forma:

$$\Delta_{az} = \frac{V}{B_{az}} = \frac{V}{(2V/L_a)} = \frac{L_a}{2} \cong \frac{\lambda}{2\theta_a} \quad (2.10)$$

De acordo com a Equação 2.10, a resolução espacial azimutal é independente da distância radial e do comprimento de onda, somente dependendo da dimensão azimutal

real da antena (L_a). Em virtude dessa importante característica, os sistemas SAR operam com alta resolução não somente em plataformas aerotransportadas, mas também em plataformas orbitais (PAPATHANASSIOU, 1999).

No caso dos radares imageadores polarimétricos, que operam com duas antenas de polarização ortogonal (horizontal e vertical), é possível medir para cada elemento de resolução de uma cena, por meio de uma grandeza vetorial, o sinal de retorno de todas as configurações (componentes) das antenas de transmissão e de recepção. Para obter os ecos de cada componente, o radar deve transmitir primeiro uma onda EM polarizada horizontalmente ou verticalmente, e após a interação com o alvo a radiação espalhada é captada pelas antenas horizontal e vertical, medindo-se as respectivas amplitudes e fases dos sinais de retorno. Em seguida, o mesmo processo é repetido para a outra antena, obtendo-se assim as componentes HH, HV, VV e VH, que descrevem a relação existente entre os vetores campo elétrico recebido e transmitido pelo radar, conforme descrito a seguir.

2.2.2 Sistemas de coordenadas

Considerando-se a configuração espacial mais geral da transmissão e da recepção da radiação EM por um sistema de radar, pode-se caracterizar o espalhamento da radiação incidente em alvos terrestres por meio de sistemas de coordenadas locais que são baseados em duas convenções principais, denominadas de *Forward Scatter Alignment* (FSA) e *Backscatter Alignment* (BSA). Em ambos os casos, os vetores campo elétrico das ondas incidente e espalhada são representados pelos sistemas de coordenadas locais S_T e S_R , ambos centrados nas antenas de transmissão e de recepção do radar, respectivamente. Todos os sistemas de coordenadas são definidos em termos de um sistema de coordenadas global (S_G), representado pelos vetores unitários $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$, com origem dentro do alvo ou espalhador como apresentado na Figura 2.4a e b.

Segundo Ulaby e Elachi (1990), a convenção FSA (Figura 2.4a), também conhecida como *coordenadas de onda*, é orientada em relação à propagação da onda EM incidente (definida pela base $(\vec{h}_i, \vec{v}_i, \vec{k}_i)$), e espalhada (definida pela base $(\vec{h}_s, \vec{v}_s, \vec{k}_s)$) pelo alvo,

sendo mais utilizada para problemas que envolvem o espalhamento de sistemas SAR biestáticos⁴. A convenção BSA (Figura 2.4b), também conhecida como *coordenadas de antena*, é orientada em relação às antenas de transmissão (definida pela base $(\vec{h}_t, \vec{v}_t, \vec{k}_t)$) e recepção (definida pela base $(\vec{h}_r, \vec{v}_r, \vec{k}_r)$) do radar. No caso em que as antenas de recepção e transmissão são instaladas na mesma posição (caso denominado de *backscattering*), ou quando a mesma antena é utilizada para transmissão e recepção (sistemas SAR monoestáticos), os dois sistemas de coordenadas locais S_T e S_R podem ser escolhidos para coincidirem.

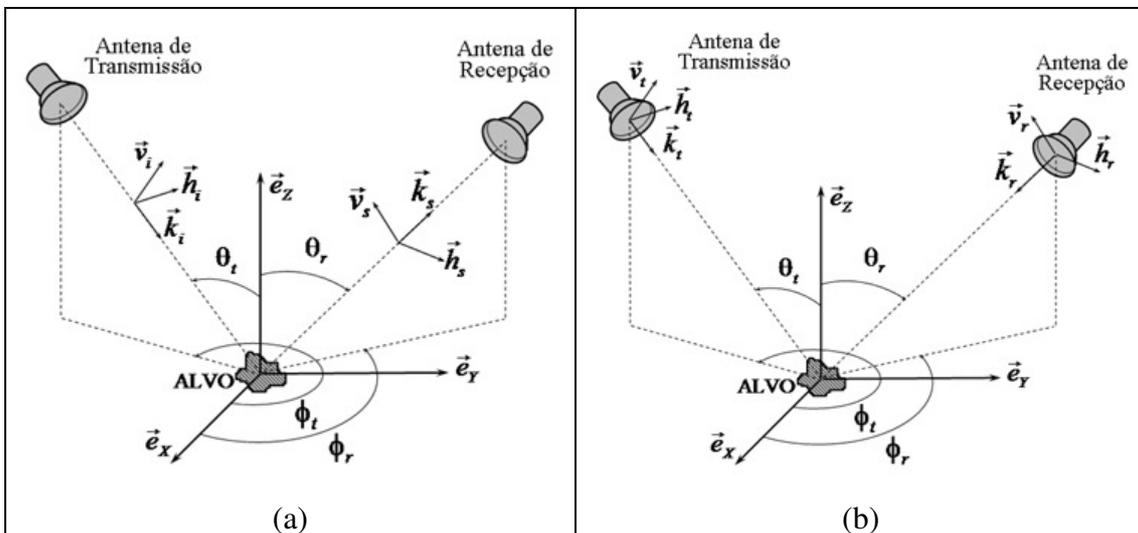


Figura 2.4 – Geometria de espalhamento e sistemas de coordenadas na convenção (a) FSA e (b) BSA.

FONTE: Adaptada de Sánchez (1999).

Em função dessa propriedade, a convenção BSA é preferida em aplicações que envolvam a medida do cálculo do retroespalhamento (*backscatter*) radar, que é o modo de operação de todos os sistemas SAR polarimétricos orbitais e aerotransportados atualmente disponíveis, sendo, portanto adotada no decorrer do presente trabalho. No sistema BSA as direções dos vetores unitários horizontais $(\vec{h}_t$ e $\vec{h}_r)$ e verticais $(\vec{v}_t$ e $\vec{v}_r)$ são sempre definidas em relação às direções normais aos planos das antenas de

⁴ São aqueles onde as antenas de transmissão e recepção estão instaladas em posições diferentes.

transmissão (\vec{k}_t) e recepção (\vec{k}_r) do radar, com sentido para o alvo, definindo os sistemas de coordenadas locais de transmissão ($\vec{h}_t, \vec{v}_t, \vec{k}_t$) e recepção ($\vec{h}_r, \vec{v}_r, \vec{k}_r$), respectivamente, ambos com orientação de mão direita.

Com base nos sistemas de referências descritos anteriormente é possível estabelecer uma transformação analítica que relaciona os vetores campo elétrico transmitido e recebido pelo radar, conforme descrito a seguir.

2.2.3 Matriz de espalhamento

Considerando-se que a antena de recepção ocupa uma área pequena e encontra-se em uma região bem distante do alvo, pode-se aproximar a onda espalhada por uma onda EM plana. Considerando-se que a onda EM incidente é plana (Seção 2.1), os vetores campo elétrico transmitido (\vec{E}^t) e recebido (\vec{E}^r) pelo radar podem ser escritos como (ULABY e ELACHI, 1990):

$$\vec{E}^t = \begin{bmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{bmatrix} = E_h^t \vec{h}_t + E_v^t \vec{v}_t \quad \text{e} \quad \vec{E}^r = \begin{bmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{bmatrix} = E_h^r \vec{h}_r + E_v^r \vec{v}_r, \quad (2.11)$$

onde E_j^r e E_j^t representam os campos elétricos recebido e transmitido, respectivamente, projetados na direção $j=\{h,v\}$. A relação entre as componentes do vetor campo elétrico recebido (\vec{E}^r) e o transmitido (\vec{E}^t) pelo radar, empregando-se a representação do vetor de *Jones*, é dada por (ULABY et al., 1986):

$$\begin{bmatrix} E_h^r \\ E_v^r \end{bmatrix} = \frac{\exp(ikR)}{R} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^t \\ E_v^t \end{bmatrix} \Rightarrow \vec{E}^r = \frac{\exp(ikR)}{R} [S] \vec{E}^t, \quad (2.12)$$

onde $[S]$ é denominada de *matriz de espalhamento complexa (scattering matrix complex)* dos alvos, no caso geral do espalhamento biestático, na convenção BSA. Na Equação 2.12, R é a distância entre o alvo e a antena de recepção, k é o número de onda, e os termos S_{pq} (onde $p, q = \{h, v\}$) são conhecidos como *amplitude de espalhamento complexa (complex scattering amplitude)*.

No caso mais geral, existem sete parâmetros que devem ser medidos para os sistemas biestáticos, visando à obtenção da matriz de espalhamento, que são: três fases relativas ($\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ e $\varphi_{hv} - \varphi_{vh}$ e $\varphi_{vh} - \varphi_{vv}$) e quatro amplitudes ($|S_{hh}|, |S_{hv}|, |S_{vh}|$ e $|S_{vv}|$). Porém, devido ao *teorema da reciprocidade* no caso do *backscattering*, onde $S_{hv} = S_{vh}$, o que conduz a simetria da matriz $[S]$, devem ser medidas apenas duas fases relativas ($\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ e $\varphi_{hv} - \varphi_{vv}$) e três amplitudes ($|S_{hh}|, |S_{hv}|$ e $|S_{vv}|$).

Em Ulaby e Elachi (1990) é demonstrada a condição de reciprocidade, sendo considerada válida para o espalhamento proveniente de partículas simples, bem como para um volume de muitas partículas, porém nenhuma consideração sobre o meio de propagação é feita. Em Huynen (1965) e Freeman (2004) é descrito que, a simetria da matriz $[S]$, em função do teorema de reciprocidade, nem sempre é verdadeira, pois os efeitos de propagação da onda EM, relacionados com o campo magnético terrestre, que causa a distorção denominada de rotação de *Faraday* (Seção 3.5.2), podem invalidar essa simetria. Portanto, a condição de reciprocidade dependerá do meio de propagação da onda EM polarizada (SANT'ANNA et al., 2009).

A matriz $[S]$, também conhecida por *matriz de Sinclair* no caso da convenção BSA para sistemas monoestáticos, ou *matriz de Jones* na convenção FSA, pode ser empregada para descrever de forma completa qualquer alvo determinístico, que é caracterizado pela invariância no tempo e no espaço, além de preservar o grau de polarização da onda incidente em relação à onda espalhada. Portanto, para ondas completamente polarizadas, o fenômeno de espalhamento pode ser descrito pela matriz de espalhamento complexa, que relaciona os vetores de *Jones* incidente e espalhado. Porém, para ondas parcialmente polarizadas, outra forma de representação mais apropriada é empregada para descrever o fenômeno de espalhamento, conforme descrito a seguir.

2.2.4 Espalhadores parciais ou não-determinísticos

Conforme descrito na Seção 2.1.2, ondas parcialmente polarizadas são geradas por espalhadores não-determinísticos, o que ocorre nas aplicações de sensoriamento remoto

por microondas. No caso do imageamento SAR polarimétrico, a célula de resolução espacial é maior que o comprimento de onda da radiação incidente, proporcionando uma distribuição espacial de vários centros j de espalhadores determinísticos sobre os alvos terrestres, onde cada um desses centros pode ser completamente representado por uma matriz $[S_j]$ (HELLMANN, 2001). Com isso, a matriz $[S]$ medida pelo sistema radar representa a superposição coerente de todas as matrizes $[S_j]$ contidas na célula de resolução. Desta forma, diferentes células de resolução do mesmo alvo poderão possuir valores diferentes da matriz $[S]$, devido à distribuição espacial diferente dos espalhadores individuais.

Para proceder à descrição dos espalhadores parciais ou não-determinísticos existem dois conceitos equivalentes: o primeiro é chamado de *matriz de Mueller* (convenção FSA) ou *matriz de Kennaugh* (convenção BSA), e o segundo método para analisar estatisticamente os efeitos dos espalhadores parciais é baseado no conceito de *matriz de covariância ou coerência* dos espalhadores, conforme descrito a seguir.

2.2.4.1 Matriz de Kennaugh

Devido à propriedade de representar ondas parcialmente polarizadas, conforme apresentado na Equação 2.6, o vetor de *Stokes* é apropriado para descrever o fenômeno de espalhamento de alvos não-determinísticos. Para tal, emprega-se uma formulação que relaciona os vetores de *Stokes* da onda transmitida (\mathbf{g}^t) e recebida (\mathbf{g}^r) pelo radar, utilizando-se a *matriz de Kennaugh* $[K]$ (convenção BSA⁵), também chamada de *matriz* (ou *operador*) *de espalhamento de Stokes*, onde (TOUZI et al., 2004):

$$\mathbf{g}^r = \frac{1}{R^2} [K] \mathbf{g}^t, \quad (2.13)$$

e a matriz $[K]$ é relacionada com a matriz $[S]$ por meio da seguinte expressão (TOUZI et al., 2004):

⁵ Na convenção FSA a matriz $[K]$ é substituída pela matriz de *Mueller* $[M] = [U_d][K]$, onde a matriz $[U_d]$ representa uma matriz diagonal com elementos iguais a $\{1, 1, 1, -1\}$.

$$[K]=2[D_4]^*([S]\otimes[S]^*)[D_4]^{-1}, \text{ onde } [D_4]=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Uma característica importante da matriz $[K]$ é a propriedade de relacionar a potência recebida pelo radar em função das características da antena e dos vetores de *Stokes* dos campos elétricos transmitidos e recebidos pelo radar, conforme descrito na Seção 2.4.

2.2.4.2 Matriz de covariância e coerência

O conceito inserido pela matriz de *Kennaugh* possibilita apenas a análise dos espalhadores parciais no espaço real (intensidade da onda), homólogo ao vetor de *Stokes*. Entretanto, para proceder à análise da componente de fase (espaço complexo), emprega-se o conceito de *matriz de covariância* ou *coerência*, que são baseados na vetorização da matriz de espalhamento (BOERNER e MORISAKI, 2004):

$$[S]=\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{k}_4 = \frac{1}{2} \text{Tr}([S]\Psi) = [k_0 \quad k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T, \quad (2.15)$$

onde Ψ é um conjunto de bases de matrizes complexas 2×2 , as quais são ortonormais, e o vetor \mathbf{k}_4 é composto por elementos complexos ($k_j \in C, j=\{0,1,2,3\}$).

Na literatura existem diferentes conjuntos de bases Ψ que podem ser aplicados. Porém, existem dois conjuntos de bases principais que são empregadas para a vetorização da matriz $[S]$: o primeiro é conhecido como *base lexográfica* Ψ_L (PAPATHANASSIOU, 1999), dada por:

$$\Psi_L = 2 \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\}, \quad (2.16)$$

onde a vetorização de $[S]$, utilizando-se a base Ψ_L , fornece o seguinte vetor:

$$\mathbf{k}_{4L} = [S_{hh} \quad S_{hv} \quad S_{vh} \quad S_{vv}]^T \quad (2.17)$$

O segundo conjunto de bases de matrizes ortonormais, que é empregado na vetorização de $[S]$, é formado pelas *matrizes de rotação de Pauli*, que formam a *base de Pauli* Ψ_P (CLOUDE e POTTIER, 1996):

$$\Psi_P = \sqrt{2} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (2.18)$$

onde a vetorização de $[S]$, utilizando-se a base Ψ_P , fornece o seguinte vetor:

$$\mathbf{k}_{4P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(S_{hh} + S_{vv}) \quad (S_{hh} - S_{vv}) \quad (S_{hv} + S_{vh}) \quad (S_{hv} - S_{vh})i]^T \quad (2.19)$$

O relacionamento entre os *vetores de espalhamento da base lexográfica* \mathbf{k}_{4L} e da *base de Pauli* \mathbf{k}_{4P} é dado por (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\mathbf{k}_{4P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [D_4] \mathbf{k}_{4L}, \quad (2.20)$$

onde $[D_4]$ é a matriz definida na Equação 2.14. É importante destacar que, os fatores 2 e $\sqrt{2}$ são utilizados para preservar a potência total espalhada, independente da escolha da base de matrizes Ψ_j ($j = \{P, L\}$), onde a potência total é definida como $Span([S])$, que é dada por:

$$\|\mathbf{k}_{4j}\|^2 = \mathbf{k}_{4j}^\dagger \mathbf{k}_{4j} = Span([S]) = Tr([S][S]^\dagger) = |S_{hh}|^2 + |S_{hv}|^2 + |S_{vh}|^2 + |S_{vv}|^2 \quad (2.21)$$

Com base na vetorização descrita acima, é possível obter as matrizes de covariância e coerência, utilizando-se o produto dos vetores \mathbf{k}_{4j} pelo respectivo hermitiano. Portanto, a *matriz de covariância polarimétrica* $[C_4]$ é definida por (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$[C_4] = \langle \mathbf{k}_{4L} \mathbf{k}_{4L}^\dagger \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \langle S_{hv} S_{vh}^* \rangle & \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vh} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vh} S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vh}|^2 \rangle & \langle S_{vh} S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

onde $\langle \rangle$ representa a média espacial dos dados.

Analogamente, a chamada *matriz de coerência polarimétrica* $[T_4]$ é definida por (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$[T_4] = \langle \mathbf{k}_{4P} \mathbf{k}_{4P}^\dagger \rangle \quad (2.23)$$

Com base na Equação 2.20, pode-se obter o relacionamento entre as matrizes $[C_4]$ e $[T_4]$, dado por (BOERNER e MORISAKI, 2004):

$$[T_4] = \langle \mathbf{k}_{4P} \mathbf{k}_{4P}^\dagger \rangle = \frac{1}{2} [D_4] \langle \mathbf{k}_{4L} \mathbf{k}_{4L}^\dagger \rangle [D_4]^\dagger = \frac{1}{2} [D_4] [C_4] [D_4]^\dagger \quad (2.24)$$

No caso do *backscattering*, em um meio recíproco, onde $S_{hv} = S_{vh}$ (Seção 2.2.3), os vetores \mathbf{k}_{4L} e \mathbf{k}_{4P} apresentam informação redundante, proporcionando a redução da dimensionalidade desses vetores de quatro para três, por meio das seguintes expressões (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\mathbf{k}_{3L} = [Q] \mathbf{k}_{4L} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{k}_{4L} = [S_{hh}, \sqrt{2}S_{hv}, S_{vv}]^T \quad (2.25)$$

$$\mathbf{k}_{3P} = [Q] \mathbf{k}_{4P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{k}_{4P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_{hv}]^T \quad (2.26)$$

Com base nas Equações 2.25 e 2.26, pode-se obter a descrição de espalhadores parciais recíprocos por meio das matrizes $[C_3]=\langle \mathbf{k}_{3L}\mathbf{k}_{3L}^\dagger \rangle$ ou $[T_3]=\langle \mathbf{k}_{3P}\mathbf{k}_{3P}^\dagger \rangle$.

Dependendo das condições de simetria dos alvos terrestres, as matrizes de covariância e coerência podem apresentar elementos nulos, conforme apresentado no trabalho de Borgeaud et al. (1987), que utilizando uma aproximação de *Born* até segunda ordem mostrou que a correlação entre as componentes cruzadas e co-polarizadas da matriz de espalhamento é nula, considerando-se um espalhamento volumétrico composto por espalhadores esféricos.

Outros trabalhos na literatura têm estudado essa correlação, conforme apresentado em Nghiem et al. (1992) e Yueh et al. (1994), sendo que o primeiro demonstrou essa propriedade para alvos com simetria azimutal em relação à linha de visada do radar, considerando-se meios recíprocos e não-recíprocos. Segundo Nghiem et al. (1992), o espalhamento volumétrico de alvos iluminados por radiação de baixa frequência possui simetria de reflexão, enquanto que para altas frequências, o espalhamento volumétrico apresenta simetria central. Além disso, em Nghiem et al. (1992) é destacado que a condição de simetria existente em muitos alvos naturais é a chave para o desenvolvimento dos métodos de calibração polarimétrica.

A matriz de coerência tem grande importância nos métodos de decomposição da matriz de espalhamento, conforme será apresentado na Seção 2.5.1, enquanto que a matriz de covariância é a base dos principais métodos de calibração polarimétrica que são abordados na Seção 3.4.

2.3 Síntese de polarização

O conhecimento da matriz $[S]$ possibilita o cálculo da potência recebida para qualquer combinação possível de estados de polarização transmitidos (t) e recebidos (r) pelo radar, com base nos respectivos vetores de *Stokes* (\mathbf{g}^t e \mathbf{g}^r) ou nos vetores campo elétrico (\vec{E}^t e \vec{E}^r). Este processo é chamado de *síntese de polarização* (ULABY e

ELACHI, 1990), onde a potência medida pelo radar é dada por (ULABY e ELACHI, 1990; VAN ZYL et al., 1987a):

$$P^{rec} = \frac{1}{2} \frac{\lambda^2}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{g(\theta, \phi)}{|\vec{E}^r|^2} |\vec{E}^r \cdot [S] \vec{E}^t|^2 = F(\lambda, \theta, \phi) (\mathbf{g}^r)^T [K] \mathbf{g}^t, \quad (2.27)$$

onde $g(\theta, \phi)$ é a *função de ganho da antena* para um ângulo de incidência θ e azimute ϕ (Figura 2.4), $(\lambda^2/4\pi)g(\theta, \phi)$ é a área efetiva da antena, e ϵ_0 e μ_0 são a permissividade e permeabilidade no vácuo, respectivamente.

A potência recebida pelo radar (P^{rec}), para uma determinada polarização t de transmissão e uma polarização r de recepção, também pode ser expressa em termos de uma área equivalente do espalhador (alvo), denominada de *seção cruzada de espalhamento* (ou *do espalhador*, ou *do radar*) σ_{rt} ⁶, dado por: (RUCK et al., 1970):

$$\sigma_{rt}(\psi_r, \chi_r, \psi_t, \chi_t) = \sigma_{rt} = \lim_{R \rightarrow \infty} \left(4\pi R^2 \frac{P_{rt}^{rec}}{P^{trans}} \right), \quad (2.28)$$

onde P^{trans} é a potência transmitida pelo radar, R é a distância entre o alvo e o radar, e (ψ_r, χ_r) e (ψ_t, χ_t) são os ângulos de orientação e elipticidade (Figura 2.1) das elipses de polarização das antenas de recepção e transmissão, respectivamente. Com base nas Equações 2.8, 2.27 e 2.28, e supondo que a função $F(\lambda, \theta, \phi)$ é independente da polarização, a seção cruzada σ_{rt} , em função dos parâmetros de *Stokes*, pode ser expressa por (ULABY e ELACHI, 1990; LEMOINE, 1992):

$$\sigma_{rt} = 4\pi |\mathbf{h}(\psi_r, \chi_r)^T [S] \mathbf{h}(\psi_t, \chi_t)|^2 = 4\pi (\mathbf{g}^r)^T [K] \mathbf{g}^t \quad (2.29)$$

⁶ É a área de um alvo equivalente ao alvo real, que capta uniformemente pela sua superfície a potência incidente, e irradia uma potência idêntica em todas as direções, igual à potência real medida pelo radar.

Para os radares imageadores, as medidas de potência individuais, de cada elemento de resolução, são estatisticamente relacionadas. Desta forma, para diminuir a variância das medidas, é usual adicionar várias medidas de potência, produzindo uma seção cruzada média ou normalizada de espalhamento σ_{rt}^0 , mais conhecido como *coeficiente de retroespalhamento* (LEMOINE, 1992):

$$\sigma_{rt}^0 = \frac{\langle \sigma_{rt}^{(n)} \rangle}{A_{gr}} = \frac{4\pi}{A_{gr}} \left\langle \left| \mathbf{h}(\psi_r, \chi_r)^T [S] \mathbf{h}(\psi_t, \chi_t) \right|^2 \right\rangle = \frac{4\pi}{A_{gr}} (\mathbf{g}^r)^T \langle [K] \rangle \mathbf{g}^t, \quad (2.30)$$

onde $\sigma_{rt}^{(n)}$ é a seção cruzada de espalhamento para a n -ésima medida individual de σ_{rt} , e A_{gr} é a área iluminada projetada no terreno. Por facilidade de notação, o termo σ_{rt} será substituído por σ no decorrer do presente trabalho. É importante destacar que, o parâmetro σ_{rt} tem por unidade m^2 , enquanto que o parâmetro σ_{rt}^0 é adimensional, em função da normalização obtida pela área iluminada A .

2.4 Resposta polarimétrica

Com base na Equação 2.29 é possível obter a síntese de polarização da seção cruzada dos espalhadores σ , para qualquer combinação de polarização de transmissão e recepção. A representação gráfica dessas combinações de potência recebida pelo radar, em função da polarização, caracteriza a *resposta polarimétrica*⁷ de um determinado alvo. Essa representação gráfica descreve a seção cruzada do espalhador sintetizada como uma função dos ângulos de elipticidade e de orientação da onda transmitida e recebida pelas antenas do radar (ULABY e ELACHI, 1990).

A maneira mais eficiente para visualizar a resposta polarimétrica dos alvos foi introduzida por Van Zyl et al. (1987a), onde, por meio de um sistema cartesiano (ψ, χ, σ) é possível visualizar a variação de σ (normalizado) para todas as combinações dos ângulos ψ e χ , tanto para a recepção como para a transmissão do vetor campo

⁷ É comum na literatura a utilização do termo *assinatura polarimétrica*, o que não é adequado, pois a combinação de diferentes mecanismos de espalhamento pode resultar na mesma resposta polarimétrica, o que não caracteriza uma assinatura.

elétrico. Na prática, a representação da resposta polarimétrica, em função dos parâmetros de *Stokes*, é dada por:

$$\sigma = \left\langle \left| \mathbf{h}(\psi_r, \chi_r)^T [S] \mathbf{h}(\psi_t, \chi_t) \right|^2 \right\rangle = (\mathbf{g}_n^r)^T \langle [K] \rangle \mathbf{g}_n^t, \quad (2.31)$$

onde \mathbf{g}_n^r e \mathbf{g}_n^t representam os vetores de *Stokes* normalizados de recepção ($g_0^r=1$) e transmissão ($g_0^t=1$), respectivamente. Para simplificar a análise da resposta polarimétrica, é comum considerar dois tipos de gráficos: o primeiro denominado de *resposta co-polarizada (co-polarized)*, onde as polarizações de transmissão e recepção são iguais ($\psi_r = \psi_t$ e $\chi_r = \chi_t$); e o segundo denominado de *resposta polarizada cruzada (cross-polarized)*, onde as polarizações de transmissão e recepção são ortogonais ($\psi_r = \psi_t + 90^\circ$ e $\chi_r = -\chi_t$).

A seguir são descritas as principais características da resposta polarimétrica teórica de diferentes refletores de canto, que são amplamente empregados no imageamento SAR, principalmente na calibração de imagens SAR.

2.4.1 Refletor de canto diédrico

A onda incidente em um refletor de canto diédrico (espalhamento do tipo *double-bounce* ou *even-bounce*) irá refletir em cada uma das faces e será espalhada na mesma direção de incidência (ULABY e ELACHI, 1990). Porém, o sentido da polarização vertical espalhada será alterado, introduzindo uma diferença de fase igual a 180° entre as componentes S_{hh} e S_{vv} (Figura 2.5a). A matriz de espalhamento teórica de um refletor de canto diédrico, na convenção BSA, é dada por (RUCK et al., 1970; UNAL et al., 1994):

$$[S] = \sqrt{\sigma^{di}} \begin{bmatrix} -\cos(2\theta) \operatorname{sen}(2\theta) \\ \operatorname{sen}(2\theta) \cos(2\theta) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{16\pi a^2 b^2 \operatorname{sen}^2(\pi/4 + \phi)}{\lambda^2}} \begin{bmatrix} -\cos(2\theta) \operatorname{sen}(2\theta) \\ \operatorname{sen}(2\theta) \cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (2.32)$$

onde a e b são as dimensões do refletor diédrico, θ e ϕ são, respectivamente, o ângulo de orientação e o azimute do refletor em relação à linha de visada do radar (Figura

2.5b). Na Figura 2.6 pode-se observar que, a resposta co-polarizada e polarizada cruzada de um refletor diédrico condutor (do tipo metal), orientado com $\theta = 90^\circ$ (a interseção dos dois lados do diedro é paralela à direção \vec{h}), possuem dois mínimos e dois máximos, respectivamente, nas polarizações lineares com orientação de $\pm 45^\circ$.

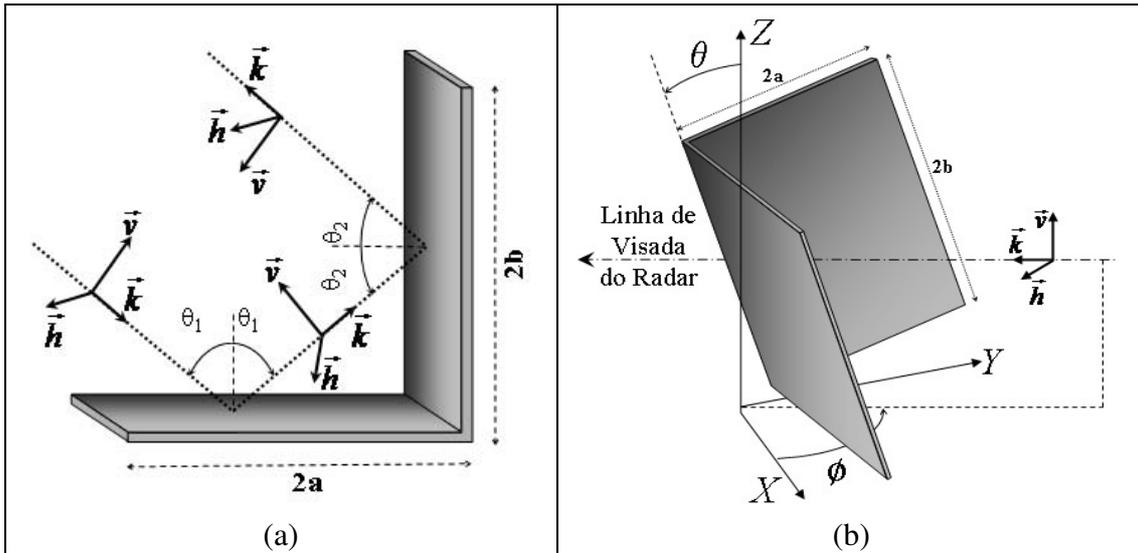


Figura 2.5 – (a) Refletor de canto diédrico condutor e (b) orientação do refletor em relação à linha de visada do radar.

FONTE: (b) Unal et al., 1994.

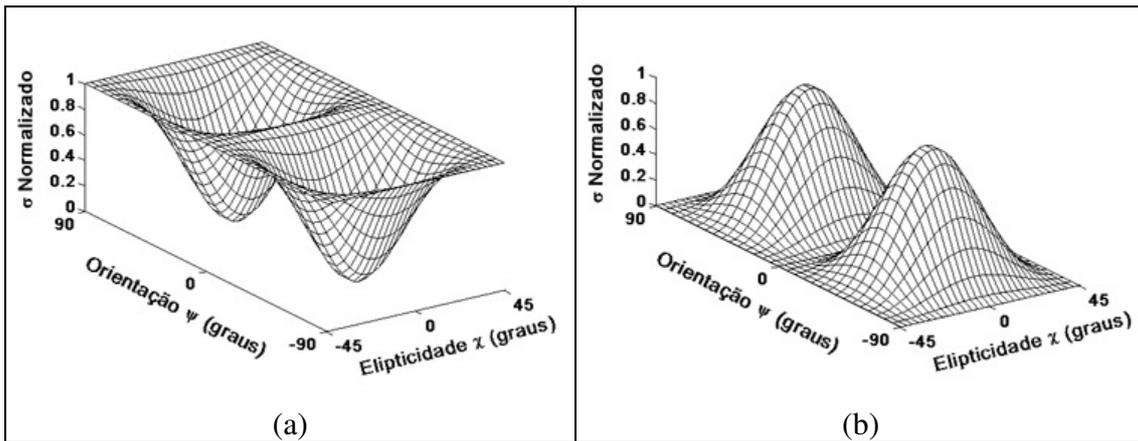


Figura 2.6 – Respostas polarimétricas teóricas (a) co-polarizada e (b) polarizada cruzada de um refletor de canto diédrico condutor.

Com base na Equação 2.32, pode-se concluir que a resposta polarimétrica do refletor de canto diédrico dependerá do ângulo de orientação θ , enquanto que o valor da seção cruzada σ^{di} será função do azimute ϕ de orientação do refletor.

2.4.2 Refletor de canto triédrico

A onda incidente em um refletor de canto triédrico (espalhamento do tipo *odd-bounce*) irá refletir três vezes antes de ser espalhada na mesma direção de incidência. A reflexão extra, comparado com o refletor diédrico, altera novamente o sentido da polarização vertical espalhada, introduzindo mais uma diferença de fase igual a 180° entre as componentes S_{hh} e S_{vv} , o que totaliza 360° (Figura 2.7a). Desta forma, o estado de polarização inicial não será alterado, onde a matriz de espalhamento teórica de um refletor de canto triédrico, na convenção BSA, é dada por (ULABY e ELACHI, 1990):

$$[S] = \sqrt{\sigma^{tri}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

O valor da seção cruzada σ^{tri} é dado por (RUCK et al., 1970):

$$\sigma^{tri} = B [\cos(\theta) + \sin(\theta)(\sin(\phi) + \cos(\phi)) - 2(\cos(\theta) + \sin(\theta)(\sin(\phi) + \cos(\phi)))^{-1}]^2, \quad (2.34)$$

onde $B = 4\pi l^4 / \lambda^2$, l é a dimensão do refletor triédrico (Figura 2.7a), $\theta = \theta_{inc} + \beta$, $\phi = 45^\circ - \varphi + \phi_{dest}$, θ_{inc} é o ângulo de incidência, β é o ângulo de elevação do refletor em relação ao plano horizontal, φ é o ângulo entre a direção da faixa de imageamento e a borda frontal do refletor, e ϕ_{dest} é o ângulo devido ao não alinhamento da antena do radar e a direção de imageamento (Figura 2.7b). De acordo com a Equação 2.34, os ângulos $\theta = 54,74^\circ$ e $\phi = 45^\circ$ (quando $\beta = \varphi = \phi_{dest} = 0^\circ$) definem a direção do *boresight*⁸ de um refletor triédrico apoiado diretamente sobre a superfície terrestre.

⁸ É o eixo físico que determina a direção principal de emissão de uma antena ou um transmissor, sendo que essa direção concentra, normalmente, a maior parte da radiação emitida ou espalhada.

A vantagem da utilização da Equação 2.34 é que eventuais deslocamentos e erros de orientação da plataforma, ocorridos durante a fase de imageamento, em relação à linha de vôo planejada, podem ser considerados no cálculo final da seção cruzada do refletor triédrico, visando uma adequada calibração dos alvos existentes na cena imageada.

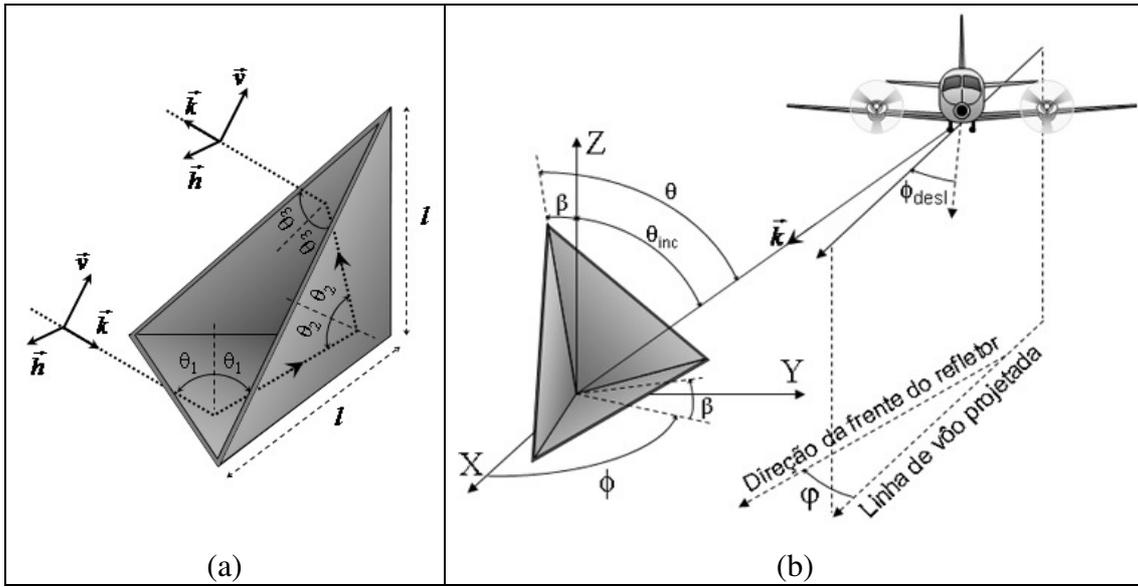


Figura 2.7 – (a) Refletor de canto triédrico e (b) orientação em relação à linha de visada do radar.

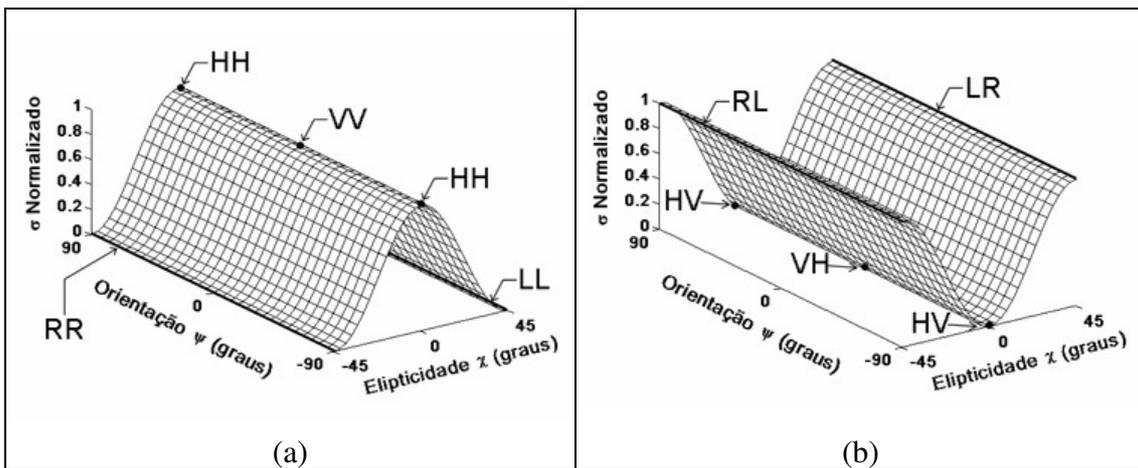


Figura 2.8 – Respostas polarimétricas teóricas (a) co-polarizada e (b) polarizada cruzada de um refletor de canto triédrico condutor.

De acordo com a Figura 2.8a, o valor máximo de σ^{tri} para a resposta co-polarizada ocorre para as polarizações lineares (HH e VV). Para a resposta polarizada cruzada (Figura 2.8b), o valor de σ^{tri} é máximo para as polarizações circulares (RL e LR) e mínimo para as polarizações lineares (HV e VH). Com base na Equação 2.34, pode-se concluir que a resposta polarimétrica do refletor de canto triédrico não dependerá do azimute ϕ e da orientação θ do refletor em torno da linha de visada do radar, enquanto que o valor da seção cruzada σ^{tri} será função dos ângulos ϕ e θ .

Uma das principais aplicações da resposta polarimétrica é na calibração polarimétrica, conforme descrito na Seção 4.4, onde o efeito de espalhamento do tipo *double-bounce* (instalação de refletores de canto triédricos na cena a ser imageada) é empregado para criar alvos de fácil identificação nas imagens SAR (quase pontuais), e que são utilizados para validar a qualidade radiométrica das imagens polarimétricas complexas calibradas.

Pelo exposto, com base na resposta polarimétrica é possível identificar os mecanismos dominantes de espalhamento na cena imageada, tornando menos ambígua a caracterização das propriedades geométricas da superfície e das propriedades elétricas dos alvos terrestres. Porém, se o objetivo é a identificação dos mecanismos predominantes de uma cena, visando, por exemplo, uma classificação digital da respectiva imagem, pode-se empregar os métodos de decomposição descritos a seguir.

2.5 Teorema de decomposição de alvos

A grande vantagem da utilização dos dados polarimétricos, representados pela matriz $[S]$, é possibilitar a interpretação física do espalhamento de um meio aleatório. Para tal, pode-se decompor a matriz $[S]$ em uma soma de contribuições independentes, associadas a determinados mecanismos de espalhamento elementares, o que pode ser interpretado como uma reorganização do espalhamento. Os métodos empregados para realizar tal decomposição são denominados de Teoremas de Decomposição de Alvos (*Target Decomposition Theorems*). Segundo Cloude e Pottier (1996), esses teoremas podem ser separados em 03 classes primárias: *Decomposição Coerente*, *Decomposição*

por Autovetor, e *Decomposição do Tipo Huynen* (CLOUDE, 1992), que é mais utilizada para dados de sensoriamento remoto óptico.

A idéia principal dos métodos de *decomposição coerente* é representar a matriz $[S]$ por meio de uma combinação linear (soma complexa) de matrizes de espalhamento elementares de segunda ordem, que podem ser associadas a certos mecanismos de espalhamento determinístico, com as respectivas interpretações físicas. Um exemplo da decomposição coerente da matriz $[S]$ é baseado nas matrizes de *Pauli*, com base nas 04 matrizes de segunda ordem da Equação 2.18. Segundo Alberga (2003), esse tipo de decomposição é apropriada para os casos onde o espalhamento é devido a alguns centros de espalhamento dominante. Maiores detalhes a respeito de outros métodos de decomposição coerente, que descrevem diferentes mecanismos elementares de espalhamento, podem ser obtidos em Hellmann (2001), Krogager (1990), Krogager e Czyż (1995), Cameron e Leung (1990), e Freeman e Durden (1998).

A outra classe importante dos teoremas de decomposição de alvos é denominada de *decomposição por autovetores*, sendo baseada na análise dos autovetores da matriz de coerência $[T]$. Com a finalidade de fundamentar os procedimentos metodológicos descritos na Seção 7.3.5, serão apresentados a seguir os principais conceitos ligados ao método de decomposição por autovetores.

2.5.1 Decomposição por autovetores

A matriz $[T_3] = \langle \mathbf{k}_{3P} \mathbf{k}_{3P}^\dagger \rangle$ é hermitiana ($[T_3] = [T_3]^\dagger$) e positiva semi-definida ($x^T [T_3] x > 0, \forall x \neq 0$), o que possibilita, sempre, a sua diagonalização por meio de uma transformação de similaridade unitária, dada por (CLOUDE E POTTIER, 1996):

$$[T_3] = [U_3] [\Lambda_3] [U_3]^{-1} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} e_{11} & e_{21} & e_{31} \\ e_{12} & e_{22} & e_{32} \\ e_{13} & e_{23} & e_{33} \end{bmatrix}^{-1}}_{[\vec{e}_1 \ \vec{e}_2 \ \vec{e}_3]}, \quad (2.35)$$

onde $[\Lambda_3]$ é a matriz diagonal de autovalores de $[T_3]$, com elementos $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \in \mathfrak{R}^+$, e $[U_3]$ é a matriz unitária de autovetores de $[T_3]$, com colunas correspondentes aos autovetores ortogonais \vec{e}_1 , \vec{e}_2 e \vec{e}_3 . A idéia do método de autovetores é obter uma decomposição da matriz $[T_3]$ em uma soma de 03 matrizes de coerência independentes $[\tilde{T}_{3j}]$, ponderadas pelos respectivos autovalores, conforme a seguinte expressão:

$$[T_3] = \sum_{j=1}^3 [\tilde{T}_{3j}] = \sum_{i=j}^3 \lambda_j (\vec{e}_j \cdot \vec{e}_j^\dagger) = \lambda_1 (\vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1^\dagger) + \lambda_2 (\vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2^\dagger) + \lambda_3 (\vec{e}_3 \cdot \vec{e}_3^\dagger), \quad (2.36)$$

onde cada matriz de coerência unitária $[\tilde{T}_{3j}]$ representa a contribuição de um espalhamento determinístico (equivalente à matriz $[S]$), sendo que os autovalores determinam a intensidade de cada mecanismo, enquanto que os autovetores discriminam a presença de diferentes espalhamentos.

Com base na decomposição por autovetor pode-se obter uma interpretação física dos mecanismos de espalhamento, através do conceito de entropia, anisotropia e do ângulo α , conforme descrito a seguir.

2.5.2 Entropia, anisotropia e ângulo α

Com base na decomposição por autovetores descrita anteriormente, foram definidos dois indicadores importantes a respeito do processo de espalhamento. O primeiro foi denominado de *Entropia de Espalhamento Polarimétrica* (H_s), que mede a quantidade de aleatoriedade (ou desordem) dos processos de espalhamento (CLOUDE E POTTIER, 1997). Para estimar a importância relativa dos diferentes mecanismos de espalhamento, um segundo indicador foi desenvolvido, denominado de *Anisotropia Polarimétrica* (A_p) (POTTIER, 1998). A entropia (H_s) e anisotropia (A_p) são definidas por:

$$H_s = \sum_{j=1}^3 -P_j \log_3 P_j, \quad \text{onde } P_j = \frac{\lambda_j}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)} \quad \text{e} \quad A_p = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (2.37)$$

O valor P_j indica a intensidade relativa de cada processo j . Os valores da entropia são restritos ao intervalo $0 \leq H_s \leq 1$, onde $H_s = 0$ indica que existe apenas um único autovalor diferente de zero, o que representa a existência de somente um mecanismo de espalhamento determinístico, enquanto que $H_s = 1$ significa que todos os autovalores são iguais, ou seja, não existe um mecanismo de espalhamento dominante (equivale a um ruído aleatório).

Quando $H_s \rightarrow 1$ ($\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$) ou $H_s \rightarrow 0$ ($\lambda_2 \cong \lambda_3 \cong 0$) a anisotropia ($0 \leq A_p \leq 1$) não fornece nenhuma informação adicional, exceto quando o valor de H_s for baixo ou médio ($\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_3$). Uma entropia média indica que existem dois ou mais mecanismos de espalhamento, porém não permite identificar quantos estão presentes. Uma anisotropia alta indica que somente o segundo mecanismo é importante, enquanto que uma anisotropia baixa indica que o terceiro mecanismo também contribui para o espalhamento (HELLMANN, 2001).

Além de separar e determinar a intensidade de cada mecanismo de espalhamento faz-se necessário identificá-los, principalmente quando o objetivo é a classificação das imagens SAR polarimétricas. Segundo Papathanassiou (1999), o conjunto de componentes ortogonais representadas pelos três autovetores da Equação 2.35 não possuem significância física direta, em relação aos reais mecanismos de espalhamento. Desta forma, para obter uma interpretação física é necessário relacionar os graus de liberdade da respectiva representação matemática com os processos de espalhamento observados. No caso em que $S_{hv} = S_{vh}$, a matriz $[S]$ possuirá cinco parâmetros independentes, duas fases relativas ($\varphi_{hh} - \varphi_{vv}$ e $\varphi_{hv} - \varphi_{vh}$) e três amplitudes ($|S_{hh}|, |S_{hv}|$ e $|S_{vv}|$). Portanto, os autovetores são parametrizados com cinco ângulos diferentes, onde (PAPATHANASSIOU, 1999):

$$\vec{e}_j = \begin{bmatrix} e_{j1} \\ e_{j2} \\ e_{j3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_j \exp(-i\Theta_{1j}) \\ \text{sen} \alpha_j \cos \beta_j \exp(-i\Theta_{2j}) \\ \text{sen} \alpha_j \text{sen} \beta_j \exp(-i\Theta_{3j}) \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 = \cos^{-1}(|e_{11}|) \\ \alpha_2 = \cos^{-1}(|e_{21}|) \\ \alpha_3 = \cos^{-1}(|e_{31}|) \end{cases} \quad \text{e} \quad \bar{\alpha} = \sum_{j=1}^3 P_j \alpha_j \quad (2.38)$$

Na Equação 2.38, os ângulos Θ_{1j}, Θ_{2j} e Θ_{3j} representam ângulos de fase dos alvos. Fisicamente, somente o ângulo β ($-\pi \leq \beta \leq \pi$) representa uma orientação física do espalhador em relação à linha de visada do radar. O parâmetro α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) não está relacionado com a orientação do alvo (independe de β), mas sim, com o tipo de mecanismo isotrópico e anisotrópico de espalhamento, sendo que o último representa a os alvos reais nas aplicações de sensoriamento remoto. Com base nos valores dos cinco ângulos supracitados pode-se elaborar uma lista de parâmetros que caracterizam importantes mecanismos canônicos de espalhamento, de grande interesse para a polarimetria SAR.

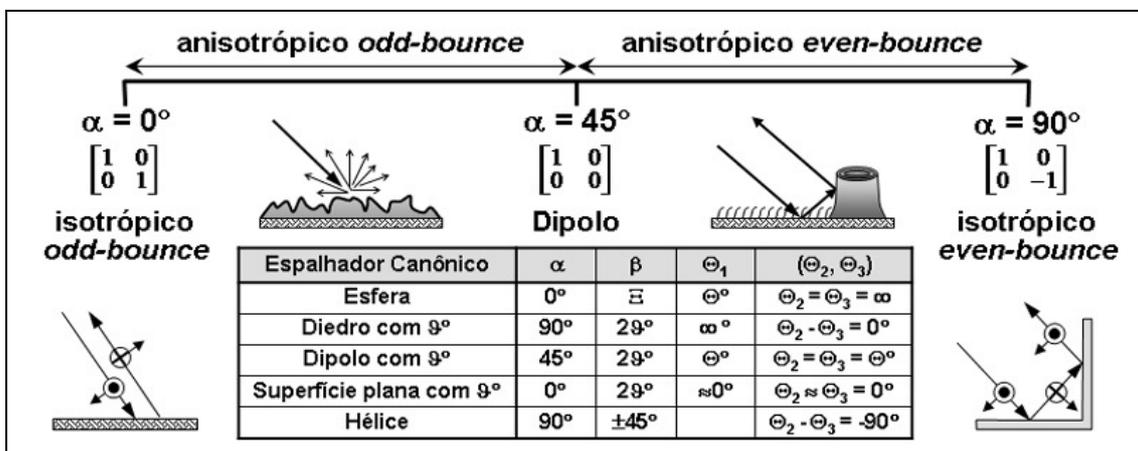


Figura 2.9 – Representação esquemática da interpretação física do ângulo α e valores paramétricos dos espalhadores canônicos (Ξ - nenhum valor fixo e ϑ° - ângulo em relação à direção vertical).
 FONTE: Modificada de Hellmann (2001).

Quando múltiplos mecanismos de espalhamento estão presentes na mesma matriz de coerência, isto é, quando mais de um autovalor é diferente de zero, é possível obter uma descrição geral do espalhamento. Para tal, calcula-se o valor médio $\bar{\alpha}$, onde cada valor α_j é ponderado pela respectiva intensidade relativa P_j .

Pelo exposto acima, a integração da informação representada pela entropia H_S e pelo parâmetro $\bar{\alpha}$, possibilita uma discriminação mais detalhada dos diferentes mecanismos de espalhamento. Desta forma, os alvos podem ser estudados em um espaço

bidimensional, denominado de plano $(H_s, \bar{\alpha})$, onde a partição desse plano em várias regiões pode ser utilizada como parte de um método de classificação digital de imagens SAR polarimétricas, conforme será apresentado a seguir.

2.5.3 Plano entropia/ângulo α

Com base no trabalho de Cloude e Pottier (1997) é que as informações provenientes dos mecanismos de espalhamento começaram a serem exploradas. A grande inovação do trabalho em questão foi à criação do plano $(H_s, \bar{\alpha})$, onde o mesmo foi dividido em 9 zonas (Figura 2.10), representando os seguintes mecanismos:

- a) **Zona 1:** espalhamento múltiplo com alta entropia (ex: camadas de vegetação com estrutura geométrica bem desenvolvida);
- b) **Zona 2:** espalhamento da vegetação com alta entropia (ex: espalhamento volumétrico);
- c) **Zona 3:** não faz parte de uma região válida, pois os sistemas SAR polarimétricos não conseguem distinguir alta entropia ($H_s > 0,9$), sendo desejável trabalhar com baixa entropia;
- d) **Zona 4:** espalhamento múltiplo com média entropia (ex: mecanismos de *double-bounce* em áreas urbanas);
- e) **Zona 5:** espalhamento da vegetação com média entropia (ex: superfícies vegetadas com espalhadores anisotrópicos);
- f) **Zona 6:** espalhamento de superfície com média entropia (ex: propagação no dossel ou elevação da rugosidade da superfície);
- g) **Zona 7:** espalhamento múltiplo com baixa entropia (ex: espalhadores diédricos metálicos isolados);
- h) **Zona 8:** espalhamento de dipolo com baixa entropia (ex: vegetação com elementos de espalhamento anisotrópicos altamente correlacionados);

- i) **Zona 9**: espalhamento de superfície com baixa entropia (ex: água e oceano em baixas frequências e superfícies bem suaves).

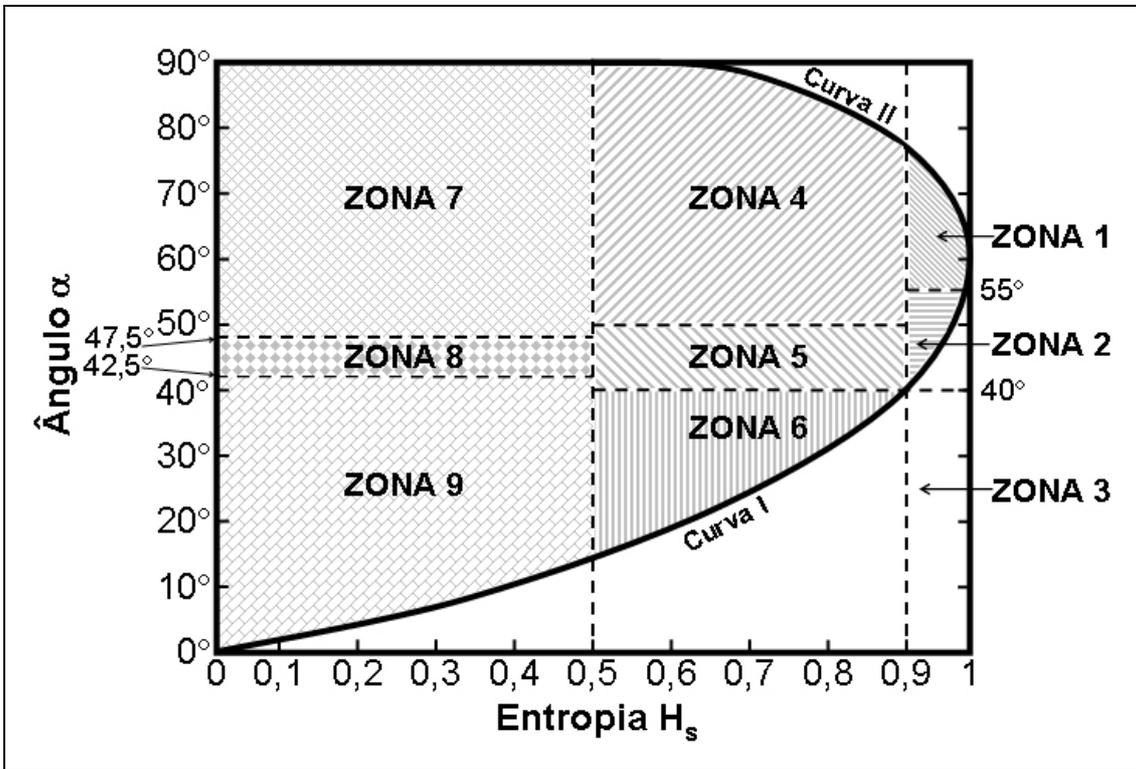


Figura 2.10 – Plano $(H_s, \bar{\alpha})$.

Apesar dos intervalos de variação da entropia e do ângulo α estarem entre $[0,1]$ e $[0^\circ,90^\circ]$, respectivamente, foi demonstrado em Cloude e Pottier (1997) que a representação de pontos no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$ é limitada pelas curvas I e II da Figura 2.10. Essas curvas representam a fronteira dos valores de máximo e mínimo do ângulo α observados como uma função da entropia, sendo que essas curvas são determinadas pela matriz de coerência com os menores autovalores degenerados, cuja amplitude é da forma (CLOUDE e POTTIER, 1997):

$$[T_3]_I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{bmatrix} \quad (0 \leq m \leq 1) \quad \text{e} \quad \begin{cases} [T_3]_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2m \end{bmatrix} & (0 \leq m \leq 0.5) \\ [T_3]_{II} = \begin{bmatrix} 2m-1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & (0.5 \leq m \leq 1) \end{cases}, \quad (2.39)$$

onde as equações de $H_s(m)$ e $\bar{\alpha}(m)$ são dadas por (HELLMANN, 2001):

$$H_s(m) = \frac{1}{1+2m} \log_3 \left(\frac{m^{2m}}{(1+2m)^{2m+1}} \right), \quad \alpha_I(m) = \frac{m\pi}{1+2m} \quad \text{e} \quad \alpha_{II}(m) = \begin{cases} \pi/2 \\ \pi \\ \pi/(1+2m) \end{cases} \quad (2.40)$$

A partir das oito zonas válidas no plano $(H_s, \bar{\alpha})$, foi desenvolvido por Cloude e Pottier (1997) um classificador não-supervisionado, onde todos os *pixels* da imagem que estão dentro de uma zona são atribuídos a uma determinada classe. Esse método apresenta como limitações o reduzido número de classes discriminadas (apenas oito) e a posição fixa das fronteiras de decisão do classificador. Apesar da limitação do método de classificação proposto por Cloude e Pottier (1997), novas perspectivas de aplicações foram vislumbradas com a divisão do plano $(H_s, \bar{\alpha})$, resultando no desenvolvimento de novos classificadores mais eficientes, que incorporam uma modelagem estatística para os dados PolSAR (LEE et al., 1999a; POTTIER e LEE, 2000; FERRO-FAMIL et al., 2001; PELLIZZERI, 2003; LEE et al., 2004).

3 FUNDAMENTOS DA CALIBRAÇÃO SAR

Neste capítulo são descritas as diversas fases da calibração radiométrica de imagens SAR polarimétricas. Para tal, são apresentados os principais métodos, referentes a cada uma das fases do processo de calibração, que devem ser aplicados para a correção das distorções radiométricas (fase e amplitude) internas e externas aos sistemas PolSAR, que afetam o sinal de retorno medido pelo radar.

3.1 Introdução

A calibração é a base para a comparação de diferentes conjuntos de dados, possibilitando a extração da informação quantitativa proveniente das imagens de sensoriamento remoto, independente do emprego de sensores ópticos ou de radar. Muitas áreas do conhecimento humano, que alcançaram recentes progressos, têm investido no desenvolvimento e uso de sistemas SAR com maior estabilidade eletrônica, na modelagem física mais realística para a interação da radiação de microondas com os alvos terrestres e em sistemas computacionais, com a finalidade de corrigir o retroespalhamento medido pelo radar, fornecendo dados SAR calibrados à comunidade de usuários.

É importante destacar que, no contexto do presente trabalho, o termo *calibração* é empregado para descrever o processo de minimização das distorções internas e externas ao sistema SAR, que alteram o sinal medido pelo radar. Essa observação se faz necessária, pois o termo *calibração* também é utilizado na literatura científica (HENDERSON e LEWIS, 1998) para descrever o processo de *correção* ou *calibração geométrica* das imagens SAR.

Em função do projeto interno dos subsistemas, da configuração operacional das antenas de transmissão e recepção (convencionais, polarimétricos, ou interferométricos), e da finalidade de aplicação dos dados, o processo de calibração de imagens SAR pode ser dividido em:

- a) **Calibração interna:** consiste na utilização de componentes de referência de calibração, que são instalados internamente ao sistema SAR, incluindo uma

réplica do modulador de pulso linear de frequência (*chirp*) de transmissão, um sinal senoidal com várias frequências compreendidas entre a largura de banda operacional do radar, ou um amplo controlador de sinal de banda, além de um gerador de ruído gaussiano. Essas componentes são usadas para fornecer uma estimativa da estabilidade do ganho e outros parâmetros de desempenho das partes do sistema através do qual passa uma amostra do sinal transmitido (sinal de teste) (HENDERSON e LEWIS, 1998). O processo de calibração interna não consegue monitorar vários parâmetros do sistema, além de não ser capaz de corrigir as distorções causadas pelas condições de iluminação da plataforma (correção do padrão da antena) e da cena imageada. Desta forma, outras estratégias de calibração devem ser empregadas para complementar o processo de calibração interna, onde se destacam as calibrações: externa, de amplitude, relativa, de fase, e polarimétrica, descritas a seguir;

- b) **Calibração externa ou absoluta:** é motivada pela impossibilidade do sistema de referência de calibração do radar em monitorar o ganho do sinal recebido, que é fortemente influenciado pelo padrão de elevação da antena. Desta forma, a *calibração externa*, também chamada de *calibração absoluta*, é baseada na obtenção de fatores de calibração, que são calculados pela comparação do valor de retroespalhamento medido pelo radar (σ^0) e o valor teórico conhecido da seção cruzada do espalhador (σ), para alvos artificiais instalados na área a ser imageada. Normalmente, são utilizados os seguintes alvos artificiais: *Active Radar Calibrator (ARC)*⁹, *Polarimetric Active Radar Calibrator (PARC)*¹⁰ (FREEMAN et al., 1990; FUJITA, 2005), e refletores de canto condutores diédricos e triédricos;
- c) **Calibração de amplitude:** a limitação da calibração interna em corrigir erros na amplitude do sinal recebido pelo radar pode ser compensada com a calibração

⁹ É um sistema ativo de microondas constituído de um amplificador de alto ganho, conectado a uma antena do tipo corneta com polarização linear, cujo valor máximo da seção cruzada do espalhador (σ) é conhecido.

externa, conforme descrito anteriormente. Porém, a *calibração de amplitude*, que é mais abrangente que a calibração externa, deve envolver outros aspectos que vão além das distorções ou limitações internas do sistema SAR e do processador, onde certas características da cena imageada são importantes, incluindo, em particular, a dependência do retroespalhamento do alvo com a declividade do terreno e com a localização na cena imageada devido ao padrão de irradiação da antena. Dependendo da topografia da região, não é possível a interpretação quantitativa da informação de brilho das imagens SAR, até que seja aplicada uma compensação da declividade, conforme apresentado em Lee et al. (2002) e Van Zyl et al. (1993). Outro exemplo da influência externa ao radar que deve ser corrigida por meio da calibração de amplitude, é a chamada rotação de *Faraday* devido à ionosfera, que afeta as amplitudes do sinal medido pelos sistemas PolSAR orbitais, que operam em banda L (1 a 2 GHz) com polarização linear, conforme descrito em Freeman (2004);

- d) **Calibração relativa:** refere-se à precisão do sistema SAR, que está relacionada à capacidade do instrumento em produzir repetidas medidas aferidas. No caso das imagens SAR, a calibração relativa pode ser realizada dentro de uma mesma imagem, ou entre duas imagens distintas. Com base na calibração absoluta, pode-se utilizar o coeficiente de retroespalhamento calculado em uma determinada região para calibração de outras regiões da mesma imagem (calibração relativa inter-cena), ou outras regiões inseridas em imagens distintas (calibração relativa entre-cenas) (KASISCHKE e FOWLER, 1989);
- e) **Calibração de Fase:** para aplicações SAR que envolvam o uso da informação de fase do sinal recebido pelo radar, que é o caso da interferometria e polarimetria, é importante a *calibração de fase*, para minimizar as distorções impostas pelo radar e/ou pelo processador SAR. Essa calibração é crítica na síntese de polarização (Seção 2.3), onde distorções internas do sistema SAR

¹⁰ É um sistema com o mesmo princípio de funcionamento do ARC, com a diferença que são utilizadas duas antenas do tipo corneta, com polarizações lineares ortogonais, que possuem um bom isolamento entre os canais e um baixo entrelaçamento de radiação, além de ser conhecido o valor máximo de σ .

modificam a informação de fase proveniente dos alvos terrestres. Normalmente, para os sistemas SAR de uma polarização, orbitais e aerotransportados, os erros de fase são introduzidos pelo sistema radar e durante a fase de geração da imagem pelo processador SAR. Para esses sistemas SAR, mesmo aqueles que operam no modo interferométrico, onde eventuais distorções são minimizadas com a obtenção da imagem diferença de fase, a calibração de fase não é crítica, ao contrário dos sistemas SAR polarimétricos, onde esta etapa é imprescindível, conforme apresentado na Seção 3.3;

- f) **Calibração polarimétrica:** um sistema SAR polarimétrico pode ser construído com um adequado balanceamento entre as amplitudes dos canais do radar, na ordem de 1 a 2 dB, e um ideal isolamento de energia entre os canais do radar. Entretanto, na prática, ocorrem flutuações no funcionamento do radar que provocam uma contaminação de energia de um canal no outro, além de um desequilíbrio de fase e amplitude entre os canais, que requerem o emprego de um processo denominado de *calibração polarimétrica*, discutido, detalhadamente, na Seção 3.4.

Conforme descrito anteriormente, existe uma superposição entre os diferentes processos de calibração radiométrica de imagens SAR. É importante destacar que, normalmente, o termo *calibração radiométrica* está associado à conversão do valor de brilho médio (nível de cinza) de uma determinada região da imagem SAR, com a finalidade de obtenção de uma estimativa do coeficiente de retroespalhamento médio dessa região. Essa definição, também associada à *calibração de amplitude*, é adequada para dados em intensidade ou magnitude da potência medida pelo radar, processados pelos sistemas SAR de uma polarização. Entretanto, para sistemas SAR polarimétricos, o processo de calibração é bem mais abrangente, pois a calibração polarimétrica envolve aspectos da calibração de fase e amplitude, uma vez que é baseada nos dados polarimétricos complexos, além da calibração externa ou absoluta, quando alvos artificiais são utilizados para a estimativa dos parâmetros de calibração.

É evidente a importância do processo de calibração radiométrica em qualquer análise quantitativa baseada em imagens SAR, especialmente àquelas que utilizam dados SAR polarimétricos, em função da maior complexidade interna dos subsistemas e do maior volume de informação obtida da cena imageada. Desta forma, são descritos a seguir os fundamentos teóricos dos principais métodos de calibração externa, de fase, polarimétrica, e de amplitude que devem ser aplicados aos dados SAR polarimétricos, com a finalidade de minimização das distorções radiométricas existentes.

É importante destacar que, cada método de calibração descrito é baseado na suposição de que somente a distorção que está sendo analisada afeta os dados PolSAR. O tratamento conjunto das distorções radiométricas é abordado no Apêndice B, quando são definidas as metodologias de calibração em função da plataforma de imageamento (aerotransportada ou orbital), dos dados auxiliares que estão disponíveis, e da finalidade de aplicação dos dados PolSAR. Essa visão mais abrangente do processo de calibração SAR é a justificativa para a ampliação da fundamentação teórica descrita a seguir, cujos tópicos abordados extrapolam o tema central do presente trabalho, que é o processo de calibração polarimétrica.

3.2 Calibração externa ou absoluta

Considerando-se que a calibração externa tem por finalidade a obtenção do coeficiente de retroespalhamento médio de alvos distribuídos na cena imageada, com base na seção cruzada conhecida de alvos pontuais de referência, pode-se dizer que esse tipo de calibração se reduz a um problema de relacionar, por meio de fatores de calibração, as respostas impulsivas da referência e dos alvos distribuídos de interesse, presentes na mesma imagem SAR.

Existem duas alternativas para estimação da resposta impulsiva do alvo pontual de interesse, que são: *método do pico de potência* e *método da potência integrada ou integração*, descritos a seguir.

3.2.1 Método do pico de potência

O método do pico de potência é baseado na identificação do valor máximo da resposta impulsiva de um alvo pontual de referência, onde normalmente se utiliza a resposta de um refletor de canto do tipo triédrico, cujo valor do fator de calibração absoluta f_c é dado por:

$$f_c = \frac{\sigma_r}{s_p A_p} = \frac{\sigma_r \text{sen}(\theta_r)}{s_p \delta_r \delta_a}, \quad (3.1)$$

onde $s_p = |S_j|$ representa o valor máximo (pico) de brilho (amplitude da componente S_j) do alvo pontual de referência, para uma dada polarização j (= hh ou vv), σ_r é o valor teórico da seção cruzada do alvo pontual de referência, A_p é a área no terreno do alvo pontual, θ_r é o valor do ângulo de incidência local, e δ_r e δ_a representam o espaçamento dos *pixels* na direção radial e azimutal, respectivamente. Devido à dependência do fator de calibração com o ângulo de incidência, é desejado que vários alvos pontuais de referência sejam dispostos ao longo da faixa de imageamento. Desta forma, seria possível obter uma função de calibração $F_c(r)$ que dependa da posição radial r de cada *pixel* da imagem, visando à obtenção do coeficiente de retroespalhamento σ^0 , por meio da seguinte expressão:

$$\sigma^0(r,a) = 20 \log_{10} [s(r,a) F_c(r)] \quad (\text{em dB}), \quad (3.2)$$

onde $s(r,a)$ representa a amplitude do sinal na posição de alcance e azimute (r,a) .

A eficiência do método do pico da resposta impulsiva depende dos dados SAR estarem bem focados, o que nem sempre é possível, devido principalmente a variações na velocidade da plataforma, acarretando um alargamento da resposta impulsiva, diminuição do valor de pico e erros de concordância entre a resposta impulsiva de cada *look* (processamento *multi-look*). A vantagem do método do pico de potência é que esse método é menos sujeito à variação do ruído aditivo do sistema SAR e à influência do

retroespalhamento do entorno do alvo pontual de referência (HENDERSON e LEWIS, 1998).

3.2.2 Método da potência integrada

O método da potência integrada ou de integração é baseado no somatório da potência de diferentes regiões da imagem SAR, uma delas contendo um alvo pontual de referência, visando à obtenção do coeficiente de retroespalhamento σ^0 , e de uma determinada região uniforme (s_{nu}), de baixo valor de coeficiente de retroespalhamento, vizinha do alvo pontual, de área no terreno igual a A_{nu} e formada por N_{nu} pixels. O subscrito nu significa que a área em questão contém o ruído de recepção do sistema¹¹ (n), bem como o sinal de um agrupamento uniforme (u). O alvo pontual de referência deve estar inserido em uma região da imagem, com área no terreno igual a A_{pnu} e composta por N_{pnu} pixels. Essa área A_{pnu} de potência s_{pnu} compreende, efetivamente, toda a energia s_p do alvo pontual de seção cruzada σ_r , a energia s_n relativa ao ruído de recepção, bem como a energia s_u do agrupamento uniforme que está inserido dentro da área em questão. O subscrito pnu significa que a área em questão contém o sinal do alvo pontual (p), o sinal do ruído de recepção do sistema (n) e o sinal do agrupamento uniforme (u).

Além dessas regiões, devem-se obter dados com o transmissor desligado, para uma determinada região com área no terreno A_n e composta por N_n pixels, com ângulo de incidência nominal próximo das outras duas regiões. As potências integradas das regiões em questão são denominadas de s_u , s_{nu} , s_{pnu} e s_n , cujo relacionamento com a potência s_p do alvo pontual, considerando-se que essas regiões são mutuamente descorrelacionadas, é dado por (GRAY et al., 1990):

$$s_u = s_{nu} - s_n \left(\frac{A_{nu}}{A_n} \right) \quad \text{e} \quad s_p = s_{pnu} - s_{nu} \left(\frac{A_{pnu}}{A_{nu}} \right), \quad (3.3)$$

¹¹ Ocorre quando o transmissor está desligado, porém o receptor continua medindo algum sinal, que é apenas ruído do sistema, ou para alvos que possuam a relação sinal/ruído muito baixa (superfícies onde a rugosidade possa ser desprezada em relação ao comprimento de onda incidente).

onde $A_j = \delta_r \delta_a / \text{sen}(\bar{\theta}_{inc})$, δ_r e δ_a são o espaçamento entre os *pixels* na direção radial e azimutal, respectivamente, e $\bar{\theta}_{inc}$ é o ângulo de incidência local médio para uma dada região. Para o caso prático de imagens digitais, a integração de potência pode ser estimada por um somatório (GRAY et al. 1990):

$$s_u = \left(\sum_{j=1}^{N_{nu}} s_j - \frac{N_{nu}}{N_n} \sum_{j=1}^{N_n} s_j \right) A_{nu} \quad \text{e} \quad s_p = \left(\sum_{j=1}^{N_{pnu}} s_j - \frac{N_{pnu}}{N_{nu}} \sum_{j=1}^{N_{nu}} s_j \right) A_{pnu} \quad (3.4)$$

onde s_j representa a amplitude da imagem associada ao *pixel* j . Com base no cálculo da potência s_p de um alvo pontual com seção cruzada conhecida σ , representando uma região de refletividade e ruído de recepção iguais a zero, pode-se calcular o coeficiente de retroespalhamento σ^0 , de uma região uniforme, com potência s_u e área no terreno A_u , dado por:

$$\sigma^0 = s_u \frac{\sigma}{s_p A_u}, \quad (3.5)$$

onde $\sigma/s_p A_u$ representa um fator de calibração, conforme apresentado na Equação 3.1.

Uma vez calibrada uma determinada região uniforme da imagem, com base no método descrito anteriormente, outras áreas podem ser calibradas, empregando-se o valor de σ^0 calculado, considerando-se a área a ser calibrada, bem como a variação do ângulo de incidência.

O método da potência integrada, que é mais adequado para imagens SAR com pequena resolução espacial, tem a vantagem de ser independente da qualidade de foco das imagens SAR, da cena imageada, do radar, ou do processador, porém tem a desvantagem de ser mais afetado pelo nível de ruído do sistema, que deve ser conhecido, e pela informação proveniente do entorno do alvo pontual. O método de integração tem certas vantagens em relação ao método do pico, porém a escolha entre o método do pico de potência ou da integração dependerá dos níveis relativos do sinal,

agrupamentos homogêneos, do ruído, e da confiança no conhecimento da função da resposta impulsiva (HENDERSON e LEWIS, 1998).

3.3 Calibração de fase

Os erros de fase entre os canais de polarização resultam em sínteses incorretas dos estados de polarização, e podem conduzir a conclusões equivocadas sobre a natureza dos espalhadores na superfície terrestre. Nos sistemas PolSAR, a principal causa da necessidade da calibração de fase é decorrência da diferença entre os caminhos que os sinais de transmissão e recepção das duas polarizações percorrem no sistema SAR, o que acarreta a introdução de novas fases que devem ser minimizadas, como ilustrado na Figura 3.1.

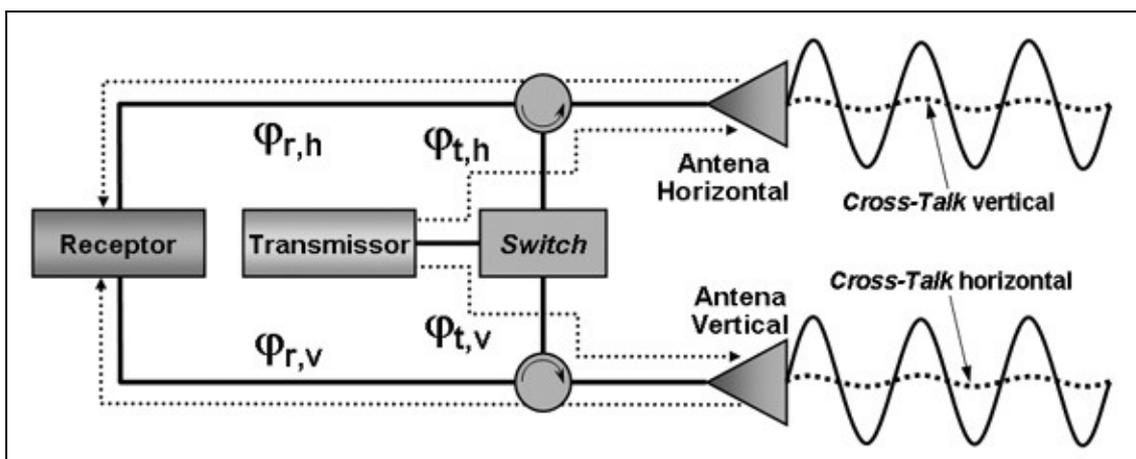


Figura 3.1 – Representação esquemática dos efeitos de fase devido ao caminho do sinal no sistema SAR e *cross-talk*.

FONTE: Modificada de Zebker e Lou (1990).

Em Zebker e Lou (1990), é descrito um método de calibração de fase bastante simples, baseado em alvos naturais conhecidos nas imagens SAR, visando à preservação da correta diferença de fase entre os canais, referente aos alvos terrestres. Este método é descrito a seguir.

Considerando-se as diferenças entre os caminhos no interior do radar, a matriz de espalhamento observada $[O]$ é relacionada à matriz de espalhamento ideal $[S]$, por meio da seguinte expressão (ZEBKER e LOU, 1990):

$$[O] = \begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix} = \exp(i(\varphi_{t,v} + \varphi_{r,v})) \begin{bmatrix} S_{hh} \exp(i(\varphi_r + \varphi_t)) & S_{hv} \exp(i\varphi_r) \\ S_{vh} \exp(i\varphi_t) & S_{vv} \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

onde $\varphi_r = \varphi_{r,h} - \varphi_{r,v}$, $\varphi_t = \varphi_{t,h} - \varphi_{t,v}$ e os termos $\varphi_{p,q}$ representam a fase introduzida pelo caminho de transmissão ($p = t$) ou de recepção ($p = r$) percorrido pelo sinal de polarização horizontal ($q = h$) ou vertical ($q = v$) no interior do sistema SAR. O fator $\exp(i(\varphi_{t,v} + \varphi_{r,v}))$ pode ser desprezado, pois o método de Zebker e Lou (1990) é baseado nos produtos $O_{hv}O_{vh}^*$ e $O_{hh}O_{vv}^*$, sendo considerada apenas a fase relativa entre esses produtos.

Com base na suposição de reciprocidade ($S_{hv} = S_{vh}$), $Arg(O_{hv}O_{vh}^*)$ é igual à diferença de fase $\varphi_r - \varphi_t$. Para evitar flutuações devido ao ruído do sistema, utiliza-se a média de todos os *pixels* da imagem para calcular essa diferença de fase, dada por:

$$Arg(\langle O_{hv}O_{vh}^* \rangle) = \varphi_r - \varphi_t \quad (3.7)$$

Com base no conhecimento prévio de algum mecanismo de espalhamento dominante em uma região da imagem SAR, calcula-se o produto $\langle O_{hh}O_{vv}^* \rangle$, obtendo-se:

$$Arg(\langle O_{hh}O_{vv}^* \rangle) = Arg(\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle) + (\varphi_r + \varphi_t), \quad (3.8)$$

onde $Arg(\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle)$ é a diferença de fase entre as polarizações hh e vv de uma região conhecida. Considerando-se alvos que possuam o valor $Arg(\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle)$ bem próximo de zero (superfícies ligeiramente rugosas), obtém-se:

$$Arg(\langle O_{hh}O_{vv}^* \rangle) \cong (\varphi_r + \varphi_t) \quad (3.9)$$

De posse dos valores estimados para as fases φ_t e φ_r , com base nas Equações 3.7 e 3.9, pode-se realizar a calibração de fase invertendo-se a Equação 3.6, onde os termos da matriz $[S]$ contêm outras distorções que precisam ser corrigidas. A vantagem desse método é que apenas são empregados alvos naturais existentes na imagem. Além disso, caso o interesse de aplicação dos dados SAR polarimétricos seja apenas avaliar a diferença de fase entre as polarizações hh e vv , nenhum outro método de calibração é necessário, sendo suficiente apenas a aplicação da calibração descrita.

3.4 Calibração polarimétrica

Um sistema SAR polarimétrico mede, para cada elemento de resolução da imagem, uma matriz de espalhamento $[S]$. Essa vantagem em relação aos sistemas SAR convencionais acarreta a necessidade de realizar um grande esforço de calibração, que é uma exigência imprescindível e crítica no processamento polarimétrico. A matriz $[S]$ ideal somente é obtida se os canais do sistema SAR estiverem com o mesmo ganho, com uma diferença de fase independente do sistema, e sem contaminação de energia de um canal para o outro.

As distorções impostas pelo sistema SAR sobre a matriz $[S]$ podem ser modeladas por meio da seguinte equação (FREEMAN et al., 1990):

$$\underbrace{\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix}}_{[O]} = A e^{i\varphi} \underbrace{\begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{bmatrix}}_{[R]} \underbrace{\begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix}}_{[S]} \underbrace{\begin{bmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{bmatrix}}_{[T]} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix}}_{[N]}, \quad (3.10)$$

onde $[O]$ é a matriz de espalhamento observada, A é o ganho global do sistema, φ representa qualquer desvio de fase devido a distância alvo-sensor e perdas no interior do sistema, $[R]$ e $[T]$ são, respectivamente, as matrizes complexas de distorção de recepção e de transmissão, e a matriz $[N]$ representa um ruído aditivo devido à radiação da Terra, ruído térmico no receptor e ruído de digitalização. Segundo Van Zyl et al.

(1987b), a fase absoluta φ é perdida quando a potência recebida é calculada no decorrer do processo de síntese, o que elimina a necessidade de calibração da fase em questão.

Com base na Equação 3.10, pode-se dividir o processo de calibração em três etapas:

- a) **Calibração do *cross-talk***: idealmente, todos os sistemas SAR polarimétricos devem possuir um isolamento de energia (< -30 dB) entre as antenas. Porém, na prática, dependendo da banda de frequência e do sistema, uma determinada quantidade de energia de uma antena interfere na outra, tanto na transmissão quanto na recepção do sinal, o que é denominado de *cross-talk* (Figura 3.1). Essa distorção é representada pelos termos r_{pq} e t_{pq} da Equação 3.10, com $p \neq q$, e indicam a influência do canal q na recepção ou transmissão do canal p ;
- b) **Calibração relativa da fase e amplitude (*channel imbalance*)**: além da distorção causada pelo *cross-talk*, existe ainda um desequilíbrio que ocorre entre as fases e amplitudes medidas pelos canais na recepção e na transmissão, que pode variar no tempo ou depender do modo de operação. Esse desequilíbrio é denominado de *channel imbalance*, e é representado pelos termos r_{jj} e t_{jj} da Equação 3.10. Uma das causas desse problema é devido a diferença entre os caminhos de transmissão e recepção das duas polarizações, o que acarreta a introdução pelo sistema SAR de duas novas fases, $\varphi_r = \varphi_{r,h} - \varphi_{r,v}$ e $\varphi_t = \varphi_{t,h} - \varphi_{t,v}$ (Figura 3.1), que devem ser minimizadas;
- c) **Calibração absoluta**: em decorrência de atenuações impostas pelo meio e por limitações do sistema SAR, o valor da seção cruzada do espalhador (σ) ou coeficiente de retroespalhamento (σ^0) medido pelo radar pode não corresponder ao valor teórico. Portanto, com base na utilização de alvos que tenham a sua assinatura de polarização conhecida pode-se obter o fator de calibração absoluta ou ganho global (A) da Equação 3.10.

A calibração polarimétrica envolve, efetivamente, as duas primeiras etapas, devido às distorções de amplitude e fase impostas pelos sistemas PolSAR. A calibração absoluta é

importante para qualquer sistema SAR (convencional ou polarimétrico), sendo necessário empregar alvos conhecidos na imagem para realizar esse tipo de calibração, conforme descrito na Seção 3.2.

Os diversos métodos de calibração polarimétrica que têm sido propostos nas últimas duas décadas podem ser divididos em duas categorias: a primeira se refere aos métodos baseados em alvos externos de referência, como refletores de canto e/ou PARC) e em nenhuma suposição adicional para obtenção dos parâmetros de calibração (YUEH et al., 1990; FREEMAN et al., 1990; FUJITA et al., 1998, FUJITA, 2005); a segunda categoria abrange os métodos que utilizam alvos externos de referência e/ou alvos naturais com propriedade de espalhamento conhecida, além de considerar alguma suposição sobre o sistema SAR (VAN ZYL, 1990; KLEIN e FREEMAN, 1991; FREEMAN et al., 1992; KLEIN, 1992; YUEH et al., 1992; QUEGAN, 1994; AINSWORTH e LEE, 2001; KIMURA et al., 2004; TOUZI e SHIMADA, 2004; SHIMADA et al., 2004; FUJITA e MURAKAMI, 2005; AINSWORTH et al., 2006).

Em função das condições de aplicação mais restrita dos métodos baseados em alvos externos de referência, que são geralmente empregados em missões de calibração, será dada preferência em descrever os principais métodos da segunda categoria, que são baseados em soluções analíticas ou numéricas. Tais métodos são baseados na suposição de reciprocidade da cena imageada ($S_{hv} = S_{vh}$) e, com exceção do método de Van Zyl (1990), que é baseado na matriz de *Stokes*, os demais são baseados na matriz de covariância observada, porém com diferentes suposições quanto às matrizes $[R]$, $[T]$ e $[N]$. Além disso, com exceção do método de Shimada et al. (2004), que é aplicado para regiões de floresta com base na decomposição de Freeman e Durden (1998), os demais necessitam de alvos conhecidos na imagem SAR (por exemplo, refletores de canto triédricos ou superfícies de baixa rugosidade) para realizar a calibração do *channel imbalance*.

Dentre todos os métodos existentes, apenas os desenvolvidos por Quegan (1994) e Kimura et al. (2004), que é baseado no primeiro, consideram uma modelagem para a matriz de ruído $[N]$, o que constitui o caráter mais geral desses métodos, além de serem

de solução direta. Desta forma, de acordo com os objetivos definidos no presente trabalho, os métodos em questão foram selecionados para serem avaliados, cujas principais características são abordadas a seguir.

3.4.1 Método de Quegan

O método de calibração do *cross-talk* e *channel imbalance* proposto por Quegan (1994) é baseado na matriz de covariância observada $[Co] = \langle \mathbf{o}_{4L} \mathbf{o}_{4L}^\dagger \rangle$, onde \mathbf{o}_{4L} representa a vetorização lexográfica da matriz $[O]$ e nas seguintes suposições:

- a) Existe reciprocidade na cena imageada, ou seja, $[S] = [S]^T$ ou $S_{hv} = S_{vh}$;
- b) Os valores r_{pq} e t_{pq} (onde $p \neq q$) são bem menores que os termos r_{jj} e t_{jj} ;
- c) Para alvos distribuídos aleatoriamente com simetria azimutal (Seção 3.2.4.2), em relação à linha de visada do radar, as componentes cruzadas e co-polarizadas da matriz $[S]$ são descorrelacionados ($\langle S_{pp} S_{pq}^* \rangle = 0$, onde $p \neq q$ e $p, q = h, v$);
- d) O ruído é simétrico ($n_{hv} = n_{vh}$), não correlacionado com o sinal ($\langle n_{pq} S_{lm} \rangle = 0$, para $p, q, l, m = \{h, v\}$), e não correlacionado entre canais ($\langle n_p n_q^* \rangle = 0$, para $p, q = \{hh, hv, vv\}$ e $p \neq q$);
- e) As matrizes de covariância de $[S]$, $[O]$ e $[N]$ podem ser aproximadas pela média amostral sobre uma região da imagem SAR (KLEIN, 1992).

A Equação 3.10 pode ser reescrita com base nos parâmetros de calibração definidos por Quegan (1994):

$$\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} k & w \\ uk & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha k & \alpha k z \\ v & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{hh} & n_{hv} \\ n_{vh} & n_{vv} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

onde $u = r_{vh}/r_{hh}$, $v = t_{vh}/t_{vv}$, $w = r_{hv}/r_{vv}$ e $z = t_{hv}/t_{hh}$ são as razões do *cross-talk*, $\alpha = (r_{vv}t_{hh})/(r_{hh}t_{vv})$ é a razão entre o *channel imbalance* de recepção e transmissão, $Y = r_{vv}t_{vv}$ é o ganho total do canal vertical, $k = r_{hh}/r_{vv}$ é o *channel imbalance* de recepção e $\alpha k = t_{hh}/t_{vv}$.

Utilizando-se as propriedades do produto de *Kronecker* (Seção A.1) e as suposições (a), (b) e (d), a Equação 3.11 pode ser vetorizada, obtendo-se o seguinte resultado:

$$\mathbf{o}_{4L} = ([T]^T \otimes [R])\mathbf{s} + \mathbf{n} = \begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{bmatrix} = Y \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & (\alpha w + v)vw \\ \alpha u & \alpha & v \\ \alpha z & 1 & w \\ \alpha uz & (\alpha z + u) & 1 \end{bmatrix}}_{[D_1]} \underbrace{\begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{[D_2]} \underbrace{\begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{s}} + \underbrace{\begin{bmatrix} n_{hh} \\ n_{hv} \\ n_{hv} \\ n_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{n}}, \quad (3.12)$$

Com base nas suposições (c), (d) e (e) obtém-se a matriz de covariância observada $[Co]$ por meio da seguinte equação:

$$[Co] = \langle \mathbf{o}_{4L} \mathbf{o}_{4L}^\dagger \rangle = \underbrace{[D]}_{[Cs]} \underbrace{[D]^\dagger}_{[Cs]} + \underbrace{\begin{bmatrix} N_{hh} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{hv} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{hv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{vv} \end{bmatrix}}_{[Cn]}, \quad (3.13)$$

onde $[D] = [D_1][D_2]$, $Cs_p = \langle |s_p|^2 \rangle$, $Cs_{13} = \langle S_{hh} S_{vv}^* \rangle$ e $N_p = \langle |n_p|^2 \rangle$ ($p = \{1, 2, 3\} = \{hh, hv, vv\}$). Desprezando-se a matriz $[Cn]$ na Equação 3.13, os parâmetros do *cross-talk* u , v , w e z são obtidos por:

$$\begin{cases} u = (Co_{44}Co_{21} - Co_{41}Co_{24})/\Delta \\ v = (Co_{11}Co_{24} - Co_{21}Co_{14})/\Delta \\ z = (Co_{44}Co_{31} - Co_{41}Co_{34})/\Delta \\ w = (Co_{11}Co_{34} - Co_{31}Co_{14})/\Delta \end{cases}, \quad (3.14)$$

onde $\Delta = Co_{11}Co_{44} - |Co_{14}|^2$ e $Co_{pq} = \langle S_p S_q^* \rangle$ ($p, q = \{1, 2, 3, 4\} = \{hh, vh, hv, vv\}$).

Enquanto que os parâmetros u, v, w e z apresentam uma única solução, o parâmetro α , em virtude de um número maior de equações que incógnitas (Equação 3.13), possui duas soluções complexas (α_1 e α_2), de mesma fase e amplitudes diferentes. A amplitude e fase do parâmetro α são calculadas por meio das seguintes expressões:

$$\begin{cases} |\alpha| = \frac{|\alpha_1 \alpha_2| - 1 + \sqrt{(\alpha_1 \alpha_2 - 1)^2 + 4|\alpha_2|^2}}{2|\alpha_2|} \\ Arg(\alpha) = Arg(\alpha_1) = Arg(\alpha_2) \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{Co_{22} - uCo_{12} - vCo_{42}}{Co_{32} - zCo_{12} - wCo_{42}} \\ \alpha_2 = \frac{(Co_{32} - zCo_{12} - wCo_{42})^*}{Co_{33} - z^*Co_{31} - w^*Co_{34}} \end{cases} \quad (3.16)$$

Os resultados obtidos por Quegan (1994) mostraram a estabilidade da estimação do parâmetro α , sem a consideração do ruído do sistema (matriz $[N]$), empregando-se imagens das bandas C e L, sobre áreas agrícolas (sensor AIRSAR). Porém, quando foram utilizadas imagens da banda P, a presença de ruídos na estimação do parâmetro α fez com que seus valores apresentassem uma grande instabilidade, o que foi corrigido adicionando-se ao modelo o ruído $[N]$. Portanto, como consequência da inclusão da matriz $[Cn]$ na Equação 3.13 e da suposição de que o ruído é simétrico, caracterizado pela suposição (d), pode-se obter uma estimação para a variância do ruído para a componente hv , dada por:

$$N_{hv} = (Co_{32} - zCo_{12} - wCo_{42})(\alpha_1 - \alpha) \quad (3.17)$$

Com base na matriz $[D_1]$ estimada e desprezando-se o ruído da Equação 3.12, é possível relacionar as componentes do vetor de espalhamento observado corrigido $\tilde{\theta}$ com o parâmetro k , por meio das seguintes expressões:

$$|k| = \left(\frac{|\tilde{O}_{hh}| |S_{vv}|}{|\tilde{O}_{vv}| |S_{hh}|} \right)^{\frac{1}{2}} e^{Arg(k) = \frac{1}{2} [Arg(\tilde{O}_{hh} \tilde{O}_{vv}^*) - Arg(S_{hh} S_{vv}^*)]}, \quad (3.18)$$

onde $\tilde{o} = ([D_1]^\dagger [D_1])^{-1} [D_1]^\dagger o$. Utilizando-se alvos conhecidos existentes nas imagens SAR, como é o caso de refletores de canto triédricos, onde $S_{hh} = S_{vv} = \sqrt{\sigma^{tri}}$ e $Arg(S_{hh} S_{vv}^*) = 0$ (Seção 2.4.2), pode-se estimar o parâmetro k por intermédio da expressão:

$$|k| = \left(|\tilde{O}_{hh}| / |\tilde{O}_{vv}| \right)^{\frac{1}{2}} e^{Arg(k) = \frac{1}{2} [Arg(\tilde{O}_{hh} \tilde{O}_{vv}^*)]} \quad (3.19)$$

É importante observar que, a existência na imagem SAR de alvos que possuam a diferença de fase HH-VV conhecida, possibilita a correção da distorção de fase induzida pelo parâmetro k , que é equivalente à calibração de fase apresentada na Seção 3.3.

3.4.2 Método de Kimura/Quegan

Recentemente, foi proposto por Kimura et al. (2004) uma modificação no método de Quegan (1994), visando à calibração dos dados gerados pelo satélite/sensor japonês (NASDA) ALOS/PALSAR (SHIMADA et al., 2005), lançado em 24/01/2006. Essa modificação deve-se ao fato da suposição $n_{hv} = n_{vh}$ não ser garantida, pois os canais de recepção das componentes horizontal e vertical do sensor ALOS/PALSAR são separados. Com isso, o novo cálculo do parâmetro α , conforme apresentado na Equação 3.15, é dependente da relação $m = N_{vh} / N_{hv}$ (KIMURA et al., 2004), e é dado por:

$$|\alpha| = \frac{|\alpha_1 \alpha_2| - m + \sqrt{(\alpha_1 \alpha_2 - m)^2 + 4m|\alpha_2|^2}}{2|\alpha_2|} \quad (3.20)$$

O cálculo do parâmetro m é realizado sobre regiões da imagem onde o sinal do radar, nas componentes cruzadas, seja pequeno o suficiente para que possa ser comparado ao

ruído, como é o caso de superfícies com pouca rugosidade, como por exemplo, a superfície de um rio. Desta forma, a razão $\langle O_{vh} O_{vh}^* \rangle / \langle O_{hv} O_{hv}^* \rangle \approx N_{vh} / N_{hv}$, é estimada para várias linhas da imagem, obtendo-se um perfil do parâmetro m na direção radial, de onde é extraído o valor médio.

Outra modificação introduzida por Kimura et al. (2004) foi o método de escolha das regiões utilizadas no cálculo dos parâmetros de *cross-talk* (u, v, w, z), em função de eventuais dificuldades em se localizar áreas onde $\langle S_{pp} S_{pq}^* \rangle \approx 0$, para $p \neq q$ e $p, q = h, v$. Para tal, selecionam-se as áreas da imagem que forneçam a menor variância global na estimativa dos parâmetros u, v, w, z , sendo que essas áreas estão associadas a valores de correlação $\rho(O_{hh}, O_{vh})$ (Seção A.3) menores que um determinado valor c .

Desta forma, todos os *pixels* que apresentam valores de $\rho(O_{hh}, O_{vh}) \leq c$ são utilizados para estimação dos parâmetros do *cross-talk*. Além disso, em Kimura et al. (2004) foi introduzido um ajuste polinomial de 1ª ordem aos perfis dos parâmetros calculados. Esse ajuste tem por finalidade diminuir a variância encontrada em cada perfil estimado, pois não são esperadas variações abruptas entre os valores adjacentes na direção radial, relativas a um determinado parâmetro.

Após a calibração do *cross-talk*, o parâmetro k pode ser estimado por meio da resposta de refletores de canto triédricos, conforme descrito na seção anterior. Em Kimura et al. (2004), as respostas de polarização de refletores de canto diédricos rotacionados de 45°, obtidas após o processo de calibração das imagens da banda L do sensor aerotransportado Pi-SAR/JAXA (SHIMADA et al., 2003), mostraram-se consistentes, quando comparadas com os resultados obtidos com o método de Quegan (1994). Segundo Kimura et al. (2004), essa consistência dos resultados se deve à introdução do parâmetro m , enquanto que as demais modificações realizadas não produziram resultados expressivos.

3.5 Calibração de amplitude

Conforme descrito acima, além de limitações internas do radar, onde se destaca o ganho total do sistema SAR, que é corrigido pela calibração absoluta, os principais fatores que influenciam na interpretação quantitativa do coeficiente de retroespalhamento dos alvos de interesse são de natureza externa ao sistema SAR. Esses fatores podem depender do meio de propagação e das características da região imageada, onde se destacam as distorções impostas pelo padrão de recepção da antena SAR, devido à geometria de iluminação da plataforma, pela ionosfera, denominada rotação de *Faraday*, e pela topografia da região. A seguir, são descritos os principais métodos de calibração da amplitude do sinal medido pelo radar, para correção do padrão da antena SAR, da rotação de *Faraday* e da topografia da região imageada.

3.5.1 Correção do padrão da antena

Os dois tipos de distorções radiométricas mais frequentes em imagens de radar são aquelas causadas pelo padrão de radiação da antena e pelo ruído *speckle*, que é inerente a sistemas que operam com iluminação coerente. O padrão de radiação da antena e a geometria de imageamento podem causar uma variação gradual do sinal de retorno na direção radial.

Esta variação pode ser amenizada com a correção do padrão de irradiação da antena, que normalmente é aplicado durante o processamento SAR, pois esse padrão é determinado pelo fabricante da antena. Porém, nos casos em que essa correção não for satisfatória, conforme descrito na Seção 3.5.3.1, pode-se determinar, após o processamento dos dados brutos um perfil que compreenda toda a faixa imageada (Figura 3.2), oriundo de uma área homogênea contida nas imagens SAR, conforme descrito em Hawkins (1990) e Mura et al. (2007).

Na Figura 3.2, é apresentado um exemplo dos perfis na direção de alcance (radial), correspondente a soma das colunas das imagens em amplitude HH, VV, HV e VH de uma área homogênea de floresta (MURA et al., 2007), que foram ajustados por um polinômio do 7º grau. A correção do padrão da antena pode ser baseada no método

multiplicativo, ou seja, cada *pixel* da imagem de uma dada coluna é multiplicado pelo valor médio do perfil e dividido pelo valor do perfil correspondente à mesma coluna da imagem. Esta técnica garante uma homogeneização do brilho da imagem no sentido de alcance.

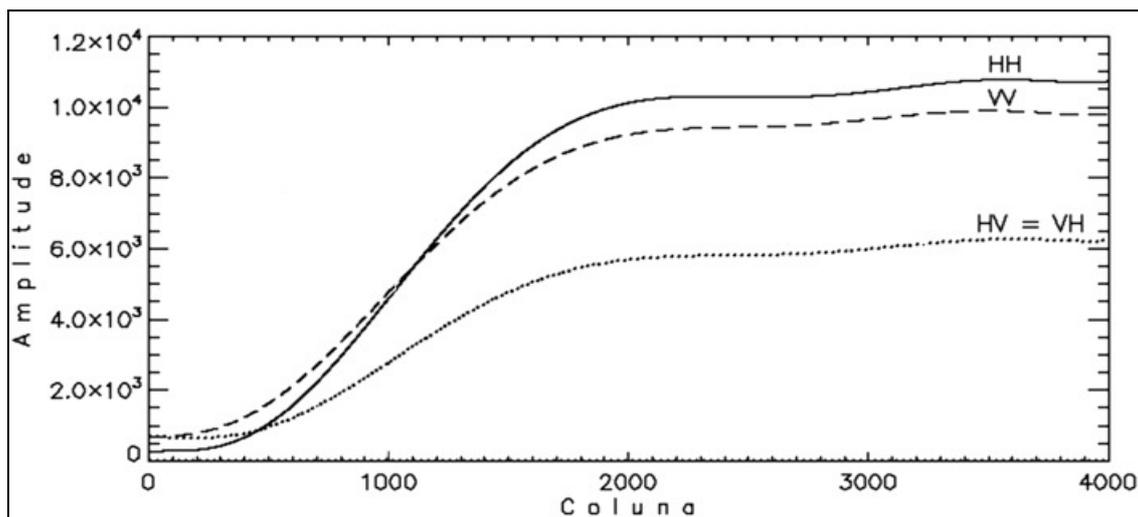


Figura 3.2 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance em uma região de floresta.
 FONTE: Mura et al. (2007).

3.5.2 Rotação de Faraday

Uma onda EM linearmente polarizada que atravessa a ionosfera¹², pode estar sujeita a rotação de *Faraday*, que causa uma rotação Ω no plano de polarização dessa onda, conforme o exemplo apresentado na Figura 3.3 de uma onda polarizada verticalmente. A magnitude desse efeito dependerá da frequência da onda, da densidade dos elétrons (N) e comprimento (d) do caminho de propagação, da densidade do fluxo do campo magnético terrestre (B), e do ângulo entre a direção de propagação da onda e o vetor campo magnético. A magnitude da rotação de *Faraday* é proporcional ao inverso do quadrado da frequência, podendo ser normalmente desprezada para frequências acima

¹² Camada da atmosfera terrestre situada, aproximadamente, entre 50 e 500 km de altitude, sendo composta por uma grande quantidade de partículas ionizadas.

de 1 a 2 GHz, porém pode ser significativa em frequências menores, como no caso da banda P (~ 400 MHz). Sob certas condições, como por exemplo, em períodos de intensa atividade solar, a rotação de *Faraday* pode ser um problema para a banda L (~1.2 a 1.4 GHz) (FREEMAN e SAATCHI, 2004).

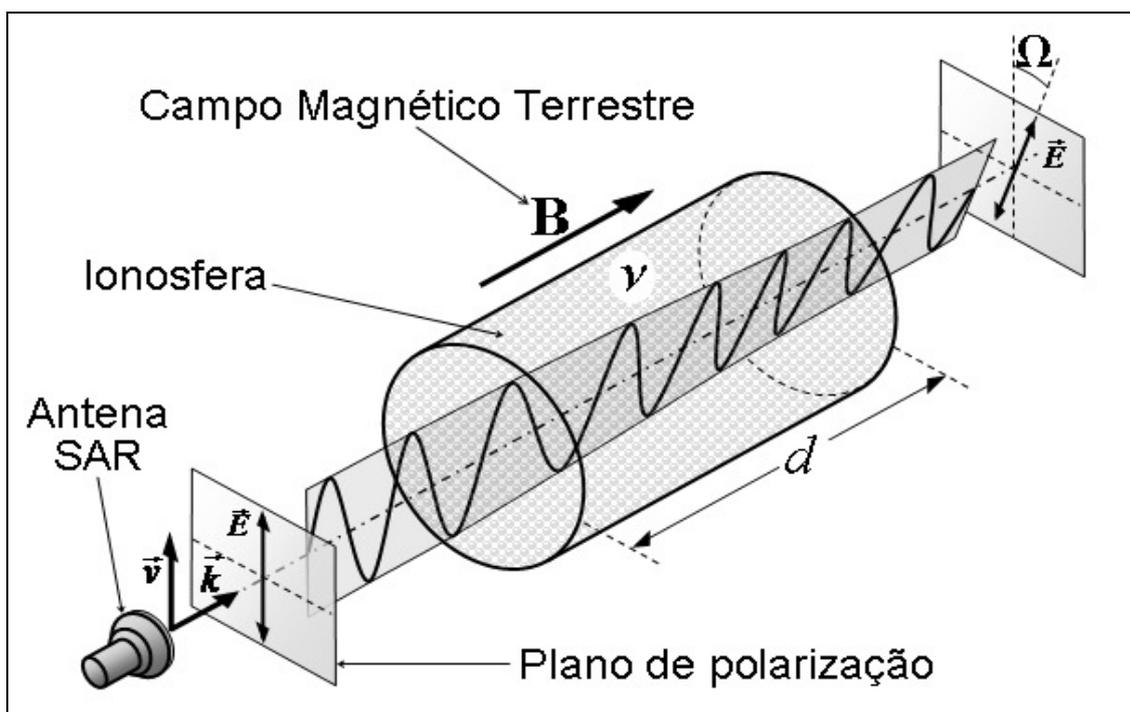


Figura 3.3 – Representação esquemática do efeito da rotação de *Faraday*.
 FONTE: Adaptada de Wikipedia (2007b).

Outro efeito da ionosfera sobre a propagação de ondas EM inclui a absorção, na qual é negligenciada em ultra-altas frequências, exceto sob raras condições nas regiões polares, quando pode alcançar de 1 a 2 dB (FREEMAN e SAATCHI, 2004). A refração também pode ser negligenciada conforme descrito em Thompson et al. (2001). O atraso devido ao caminho na ionosfera pode ocasionar grandes desvios na fase em baixas frequências, o que pode causar problemas na comparação da fase medida para observações sucessivas, como é o caso da interferometria de várias passagens. Nas medidas polarimétricas, esse erro de fase normalmente não tem influência, uma vez que somente há interesse nas fases relativas entre as polarizações. Para medidas simultaneamente

próximas, podem-se ignorar as diferenças entre os comprimentos dos caminhos percorridos pela polarização horizontal e vertical.

A rotação de *Faraday* pode ser uma significativa fonte de erros para sistemas PolSAR em grandes comprimentos de ondas, em altitudes superiores a 200 km, como é o caso do sistema orbital ALOS/PALSAR (Japão). Alguns métodos têm sido desenvolvidos para corrigir a rotação de *Faraday*, como em Freeman e Saatchi (2004), que é baseado em dados PolSAR com a correção prévia do *cross-talk*, para posterior estimação conjunta do *channel imbalance* e da rotação de *Faraday*; em Fujita (2005) é apresentado um método conjunto de calibração do *cross-talk*, *channel imbalance* e da rotação de *Faraday*, empregando-se dois refletores de canto, um triédrico e outro diédrico, e um PARC, onde nenhuma suposição sobre os alvos ou sobre o sistema SAR é considerada.

Em Freeman (2004) são comparados três métodos de calibração da rotação de *Faraday*, onde a matriz de espalhamento observada $[O]$ isenta de quaisquer outras distorções, pode ser representada em função da matriz de espalhamento ideal recíproca $[S]$:

$$\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\text{sen}(\Omega) \\ \text{sen}(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix}}_{[R(\Omega)]} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\text{sen}(\Omega) \\ \text{sen}(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix}}_{[R(\Omega)]} \quad (3.21)$$

onde Ω é o ângulo da rotação de *Faraday*, cuja estimação é menos sensível a erros residuais da calibração polarimétrica, empregando-se uma transformação da matriz $[O]$ para uma base circular (Tabela 2.1), da seguinte forma (BICKEL e BATES, 1965):

$$\begin{bmatrix} O_{RR} & O_{LR} \\ O_{RL} & O_{LL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} O_{hh} & O_{vh} \\ O_{hv} & O_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \Omega = \frac{1}{4} \text{Arg}(\langle O_{LR} O_{RL}^* \rangle) \quad (3.22)$$

Segundo Freeman (2004), os valores de Ω estão compreendidos entre $\pm\pi/4$, em função dos limites da função $\text{Arg}(\)$, onde o erro de estimação de Ω será igual a $\pm\pi/2$. Para detectar um erro igual a $\pi/2$ no valor estimado de Ω podem ser empregadas algumas

estratégias, conforme descrito em Freeman (2004). A estratégia mais prática para avaliação do aludido erro é baseada na análise de alvos planos, ligeiramente rugosos, existentes nas imagens PolSAR que deveriam apresentar o retorno da componente VV maior ou igual que a componente HH, sendo que o não atendimento dessa condição indica a presença de erros de estimação de Ω .

Para as análises que envolvam os dados PolSAR, onde se está interessado nas imagens obtidas da multiplicação das componentes polarimétricas, um erro da ordem de $\pm n\pi$, decorrente da detecção de um erro de estimação de Ω igual a $\pi/2$, pode ser considerado irrelevante, segundo descrito em Freeman (2004).

É importante destacar que, a presença de pequenos ângulos da rotação de *Faraday* impede a reciprocidade da matriz $[S]$ ($S_{hv} \neq S_{vh}$), além de poder ocasionar uma considerável correlação entre as polarizações cruzadas e co-polarizadas (SANT'ANNA, 2009).

3.5.3 Compensação da influência da topografia

A topografia de uma região com relevo bastante movimentado afeta a potência medida pelo sistema SAR, uma vez que erros são introduzidos na correção do padrão da antena, no valor obtido da seção cruzada do radar por unidade de área, e no estado de polarização da onda EM, pois a inclinação do terreno no sentido azimutal, em relação à vertical do lugar, induz a uma alteração no ângulo de orientação de polarização (Seção 2.1.1). Portanto, são descritos a seguir os principais aspectos envolvidos na compensação da influência da topografia da região imageada sobre o sinal medido pelo radar, visando à calibração radiométrica de imagens PolSAR.

3.5.3.1 Correção do padrão da antena e da área do espalhador

O processo de calibração radiométrica durante o processamento SAR é baseado na correção do padrão da antena SAR, que depende do ângulo de visada do radar e da topografia local da área imageada. A relação, também conhecida como *equação radar*,

entre a potência transmitida (P_t) e recebida (P_r) pelo radar é dada por (VAN ZYL et al., 1993):

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 G_t(\gamma) G_r(\gamma)}{(4\pi)^3 R_r^2 R_t^2} \sigma^0 A_{gr} \Rightarrow \sigma^0 = \frac{K(R_r, R_t, \gamma)}{A_{gr}}, \quad (3.23)$$

onde $G_t(\gamma)$ e $G_r(\gamma)$ representam o ganho da antena de recepção e transmissão, respectivamente, para um ângulo de visada γ , e R_t e R_r representam as distância do espalhador de área A_{gr} até a antena de recepção e transmissão, respectivamente.

As distâncias R_j na direção radial são medidas pelo radar com grande acurácia, enquanto que o ângulo γ é calculado com base na altitude da plataforma, considerando-se um plano de referência, e na suposição que a superfície terrestre é plana (sistema aerotransportado) ou esférica (sistema orbital), desprezando-se a topografia local, o que introduz erros no cálculo da função $K(R_r, R_t, \gamma)$. Além disso, o cálculo da área A_{gr} do espalhador, projetada no terreno, é baseado no ângulo de incidência θ , que por sua vez é calculado com base na aproximação obtida para o ângulo de visada γ . Portanto, o valor da seção cruzada do espalhador normalizada σ^0 , obtido após o processamento SAR, conterá erros induzidos pela geometria local de espalhamento, que pode ultrapassar em vários decibéis o valor desejado de $\pm 0,5$ - $1,0$ decibéis (BROWN et al., 1993).

Para compensar eventuais distorções da função $K(R_r, R_t, \gamma)$ e da área efetiva A_{gr} , emprega-se o modelo digital de elevação da área imageada, considerando-se a inclinação do espalhador em relação à vertical do lugar, além do processo de correção do padrão da antena, conforme descrito na Seção 3.5.1.

É importante destacar que, devido a pequenas diferenças nos padrões de ganho das antenas de um sistema SAR polarimétrico, os erros devido à topografia serão dependentes da polarização e afetarão a calibração relativa entre os canais de polarização. Segundo Van Zyl et al. (1993), devido à altitude da plataforma ser muito maior que as altitudes topográficas, é esperado que os erros percentuais causados, na

maior parte do tempo, ao ângulo de visada do radar, não sejam o principal problema para os sistemas SAR orbitais. Entretanto, para os sistemas SAR aerotransportados, especialmente em regiões de moderada a alta movimentação do terreno, os erros devido à topografia podem chegar a vários decibéis, e dependendo da aplicação dos dados SAR, estes precisam ser corrigidos.

Maiores detalhes a respeito da correção do erro de estimativa da área do espalhador, induzido pela topografia da região de imageamento, podem ser obtidos em Van Zyl et al. (1993) e Ulander (1996), que têm por base a extração da inclinação do espalhador a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e na técnica de interferometria SAR, respectivamente, ou ainda em Luckman (1998a, b).

3.5.3.2 Correção do ângulo de orientação de polarização

Quando um sistema PolSAR realiza o imageamento de uma superfície horizontal, a componente horizontal do vetor campo elétrico é paralela à superfície. Entretanto, para uma superfície inclinada, a componente horizontal não é paralela à superfície. Conseqüentemente, as componentes da matriz de espalhamento serão afetadas pela rampa de inclinação da superfície imageada.

A rotação induzida pela inclinação da rampa sobre o ângulo de orientação de polarização (Seção 2.1.1) pode ser entendida como uma rotação na base de polarização (\vec{h}, \vec{v}) em relação à linha de visada do radar, semelhante à rotação de *Faraday* (Figura 3.3), onde a componente horizontal espalhada se torna paralela a superfície inclinada. A correção envolve a rotação da matriz de espalhamento observada em torno da linha de visada por um valor negativo do ângulo de orientação de polarização induzido.

Existem duas maneiras de corrigir essa rotação: a primeira, que tem uma acurácia maior, é baseada na informação de declividade extraída de MDE (LEE et al., 2000), e a segunda, que será abordada a seguir, é baseada na estimativa do ângulo de rotação de orientação a partir dos próprios dados PolSAR.

O efeito da topografia do terreno imposto aos dados PolSAR é representado por uma matriz de rotação, cujo relacionamento com a matriz de espalhamento observada $[O]$ e a matriz de espalhamento ideal $[S]$, distorcida apenas pela rotação θ_s , da orientação de polarização, dado por (LEE et al., 2002):

$$\begin{bmatrix} O_{hh} & O_{hv} \\ O_{vh} & O_{vv} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \text{sen}(\theta_s) \\ -\text{sen}(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix}}_{[R(\theta_s)]} \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\text{sen}(\theta_s) \\ \text{sen}(\theta_s) & \cos(\theta_s) \end{bmatrix}}_{[R(\theta_s)]^T}, \quad (3.24)$$

Diferentes técnicas têm sido propostas para estimar o ângulo θ_s , diretamente dos dados SAR polarimétricos (SCHULER et al., 1996; POTTIER, 1998; POTTIER et al., 1999; LEE et al., 2002), independente da disponibilidade do modelo digital de elevação. Porém, os resultados mais consistentes foram obtidos por Lee et al. (2002), além da simplicidade da formulação e da eficiência computacional, conforme descrito abaixo.

Segundo Lee et al. (2002), a calibração polarimétrica (Seção 3.4) é um processo fundamental para derivação da estimativa do ângulo de rotação θ_s , que é afetado pela acurácia da calibração de fase e amplitude dos dados SAR polarimétricos. Muitos métodos de calibração polarimétrica são baseados na suposição que a correlação entre as componentes de co-polarização e de polarização cruzada é igual à zero. Essa suposição pode introduzir erros na estimativa do ângulo de rotação θ_s , além do ângulo de rotação da plataforma do radar em relação a linha de vôo (*pitch*) que introduz uma tendência no ângulo θ_s .

Portanto, para o desenvolvimento a seguir, é considerado que a matriz de espalhamento observada contém a influência apenas da distorção causada pelo ângulo θ_s . Além disso, considerando-se que a topografia não altera a condição de reciprocidade, os dados SAR devem estar previamente simetrizados ($O_{hv} = O_{vh}$), antes da realização da correção do ângulo de orientação de polarização.

Com base na suposição de reciprocidade da cena imageada ($S_{hv} = S_{vh}$), na simetrização dos dados PolSAR ($O_{hv} = O_{vh}$) e nas Equações 3.24 e 3.22, pode-se obter as três componentes da base de polarização circular $\{R, L\}$, em função da base de polarização linear (\vec{h}, \vec{v}) , onde:

$$\begin{cases} O_{RR} = (O_{hh} - O_{vv} + i2O_{hv})/2 = S_{RR} \exp(-i2\theta_s) \\ O_{LL} = (O_{vv} - O_{hh} + i2O_{hv})/2 = S_{LL} \exp(i2\theta_s) \\ O_{RL} = i(O_{hh} + O_{vv})/2 = S_{RL} \end{cases} \quad (3.25)$$

Para diminuir o alto nível de ruído (*speckle*) existente nas componentes complexas da matriz $[O]$, visando à obtenção de uma estimativa menos ruidosa para o ângulo θ_s , deve-se aplicar um processo de filtragem antes dessa estimativa. Em Lee et al. (2002) é utilizada a filtragem baseada na matriz de covariância (LEE et al., 1999b), que reduz o efeito *speckle* e preserva as características polarimétricas dos dados. Com base no conceito de simetria de reflexão (NGHIEM et al., 1992; YUEH et al., 1994) e no produto $\langle O_{RR} O_{LL}^* \rangle$ da matriz de covariância filtrada, foi derivado em Lee et al. (2002) uma estimativa para o ângulo θ_s dada por:

$$\theta_s = \begin{cases} \eta, & \text{se } \eta \leq \pi/4 \\ \eta - \pi/2, & \text{se } \eta > \pi/4 \end{cases} \quad (3.26)$$

$$\eta = \frac{1}{4} [Arg(\langle O_{RR} O_{LL}^* \rangle) + \pi] = \frac{1}{4} \left[\tan^{-1} \left(\frac{-4\Re(\langle (O_{hh} - O_{vv}) O_{hv}^* \rangle)}{-\langle |O_{hh} - O_{vv}|^2 \rangle + 4\langle |O_{hv}|^2 \rangle} \right) + \pi \right] \quad (3.27)$$

Segundo Lee et al. (2002), a compensação da declividade deve ser aplicada aos dados PolSAR nas bandas L e P, e não deve ser aplicado para a banda C e frequências maiores, que apresentam resultados ruidosos. As altas frequências PolSAR são menos sensíveis a variação da declividade, devido ao fato que as ondas eletromagnéticas com menor comprimento de onda têm menor poder de penetração e são mais sensíveis aos menores espalhadores da célula de resolução. Os resultados na banda P, a qual apresenta

uma maior penetração e menor sensibilidade aos pequenos espalhadores em função do maior comprimento de onda, são melhores que os resultados obtidos com a banda L.

3.6 Modelo geral de distorção

Conforme descrito acima, existem diversas fontes de distorções, internas e externas ao sistema SAR, que alteram a informação contida no sinal medido pelo radar, referente ao espalhamento da radiação incidente sobre os alvos terrestres. O processo de minimização dessas distorções dependerá das características internas do sistema SAR, da geometria de iluminação, do meio de propagação e da topografia da região imageada.

Portanto, com base na fundamentação matemática apresentada anteriormente, é possível sintetizar as distorções impostas pelo sensor, pelo meio e pela topografia, que afetam a matriz de espalhamento ideal $[S]$ dos alvos de interesse, por meio de um único modelo de distorção linear representado pela seguinte equação:

$$[O] = A \underbrace{[R]}_{\text{sensor}} \underbrace{[R(\Omega)]}_{\text{meio}} \underbrace{[R(\theta_s)]}_{\text{topografia}} \underbrace{[S]}_{\text{alvo}} \underbrace{[R(\theta_s)]^T}_{\text{topografia}} \underbrace{[R(\Omega)]}_{\text{meio}} \underbrace{[T]}_{\text{sensor}} + \underbrace{[N]}_{\text{sensor}} \quad (3.28)$$

O caráter mais geral da Equação 3.28 possibilita entender como se deve modelar o relacionamento entre as matrizes de espalhamento $[O]$ e $[S]$, de acordo com a influência de duas ou mais fontes de distorções, visando à minimização dessas distorções por intermédio da combinação do processo de calibração polarimétrica, ou da correção da rotação de *Faraday* ou da correção do ângulo de orientação de polarização induzido pela topografia do terreno.

Além disso, o modelo matemático representado pela Equação 3.28 contém de forma clara a hierarquia de correção existente entre as referidas distorções, fornecendo o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da ferramenta computacional de processamento em lote descrita na Seção B.5.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Neste capítulo é apresentada a metodologia de trabalho empregada para obtenção dos resultados descritos no Capítulo 6, enfocando os principais aspectos envolvidos na fase de campo, imageamento e processamento SAR, e desenvolvimento e avaliação dos métodos de calibração de imagens PolSAR que foram objetos de estudo neste trabalho.

4.1 Introdução

Para atingir os resultados de interesse deste trabalho, em concordância com os objetivos propostos no Capítulo 1, foi desenvolvida uma metodologia de trabalho baseada no fluxograma apresentado na Figura 4.1, onde se destacam as seguintes fases:

- a) Seleção do sistema sensor;
- b) Definição da área de estudo;
- c) Planejamento do trabalho de campo;
- d) Execução do trabalho de campo;
- e) Imageamento SAR;
- f) Processamento SAR;
- g) Desenvolvimento e implementação do método automático de calibração polarimétrica *multi-look*;
- h) Implementação do método de calibração polarimétrica proposto por Kimura et al. (2004);
- i) Desenvolvimento e implementação de ferramentas de calibração de imagens PolSAR;
- j) Análise da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR, na banda L, do sistema R99B;
- k) Avaliação comparativa entre os métodos de calibração polarimétrica estudados;
- l) Avaliação da influência do processo de calibração polarimétrica na decomposição da entropia/ângulo α .

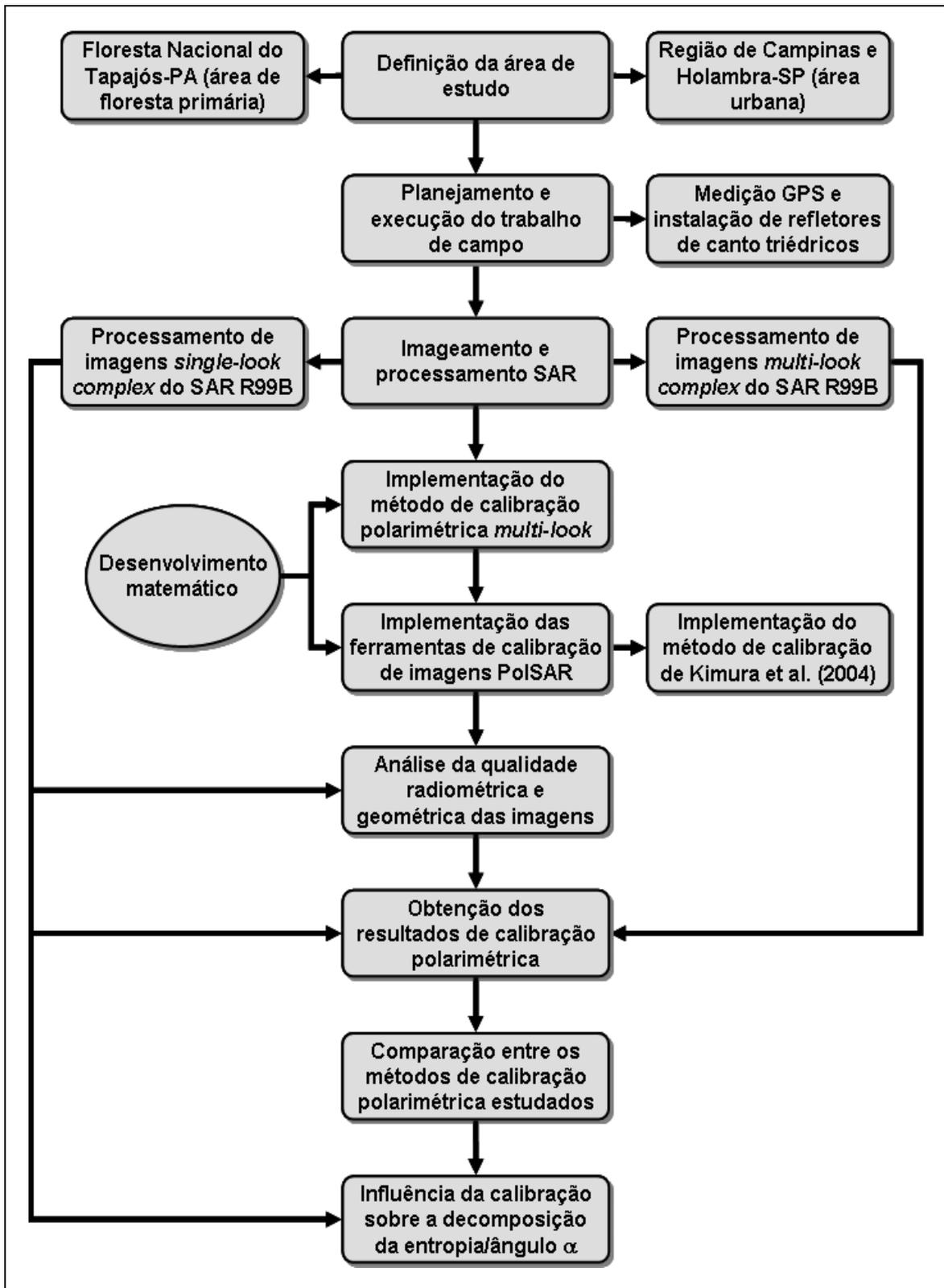


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de trabalho.

A seguir, são descritos os diferentes procedimentos, técnicas e métodos que foram empregados no desenvolvimento deste trabalho, com a finalidade de atingir os objetivos definidos em cada uma das fases constantes da metodologia em questão.

4.2 Seleção do sistema sensor

Atualmente, está em estudo, entre o INPE e o DLR (Agência Espacial Alemã), o desenvolvimento de um sensor SAR orbital polarimétrico na banda L, denominado MAPSAR (*Multi-Application Purpose SAR*), cujas principais características técnicas estão descritas em Schroder et al. (2005). Uma das fases do seu ciclo de desenvolvimento consistiu em simular as imagens que serão geradas por este sensor. Para essa simulação foi empregado, em várias regiões do Brasil, o sistema sensor SAR aerotransportado do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM), denominado de R99B, que opera em banda L, cujas principais características técnicas estão apresentadas na Tabela 4.1. Maiores detalhes técnicos e operacionais do sistema SAR R99B podem ser obtidos em Andrade (2007).

Tabela 4.1 – Características técnicas do sistema sensor SAR R99B do SIPAM.

PARÂMETROS	BANDA X	BANDA L
Frequência central (GHz)	9,3	1,28
Comprimento de onda (cm)	3,1	23,9
Número de antenas	2 (X1 e X2)	1
Máxima largura de banda radial (MHz)	50	50
Polarização	HH	HH/HV/VH/VV
PRF (<i>pulse repetition frequency</i>) (Hz)	378,78	378,78
Angulo de incidência (altitude de 11277 m)	36,34° a 83,52°	36,34° a 83,52°
Modo de aquisição InSAR (<i>cross track</i>)	1 passagem	2 passagens
Máxima resolução espacial radial (m)	3	3
Máxima resolução espacial azimutal (m)	0,95	0,95
Largura da faixa de imageamento (Km)	10 - 60	20 a 120
Abertura Azimutal da Antena (rad)	0,02268	0,17453
Velocidade da aeronave (m/s)	115 – 195	115 – 195
Sistema de posicionamento (*)	GPS+INS	GPS+INS

(*) - Erro esférico provável = 76 metros

FONTE: Adaptado de Andrade (2007).

Inserido neste contexto, os dados obtidos em campo e as imagens produzidas na simulação em questão foram empregados no presente trabalho, visando o desenvolvimento de um procedimento de calibração polarimétrica das imagens SAR do sensor R99B. Portanto, essa simulação foi a base para a definição da área de estudo, planejamento e execução do trabalho de campo, imageamento e processamento SAR, conforme previsto na metodologia descrita a seguir. Outros sistemas SAR polarimétricos, como por exemplo, o aerotransportado brasileiro OrbiSAR-ORBISAT (ROMBACH, 2003) e o orbital japonês ALOS/PALSAR-JAXA (SHIMADA et al., 2005), que operam em banda P e L, respectivamente, não foram utilizados devido à indisponibilidade de imagens PolSAR conjugadas com dados de campo.

4.3 Definição da área de estudo

Inicialmente, a área de estudo estava vinculada à missão de simulação do sistema MAPSAR, conforme descrito anteriormente. Porém, em virtude da oportunidade de testar os resultados de calibração em áreas urbanas, foram definidas duas áreas de estudo, com características de espalhamento bem distintas, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Área de estudo 1 - Tapajós-PA

A simulação do sistema MAPSAR foi executada para várias regiões do Brasil, com diferentes propósitos de aplicação, sendo que uma dessas áreas situa-se no estado do Pará, próxima à cidade de Santarém. O principal objetivo da simulação para a região próxima a Santarém foi realizar a calibração das imagens polarimétricas complexas, o que corresponde a um dos objetivos específicos descritos no Capítulo 1. Portanto, a região em questão foi selecionada como área de estudo da metodologia de calibração polarimétrica proposta neste trabalho.

A área de estudo 1 foi dividida em duas partes, que correspondem às faixas de simulação da órbita descendente e ascendente do sistema MAPSAR, que englobam uma porção da Floresta Nacional do Tapajós (FLONA) e arredores, onde se encontra a Vila de São Jorge. Na Figura 4.2, é apresentada a posição geográfica e a geometria de imageamento SAR das duas faixas em questão.

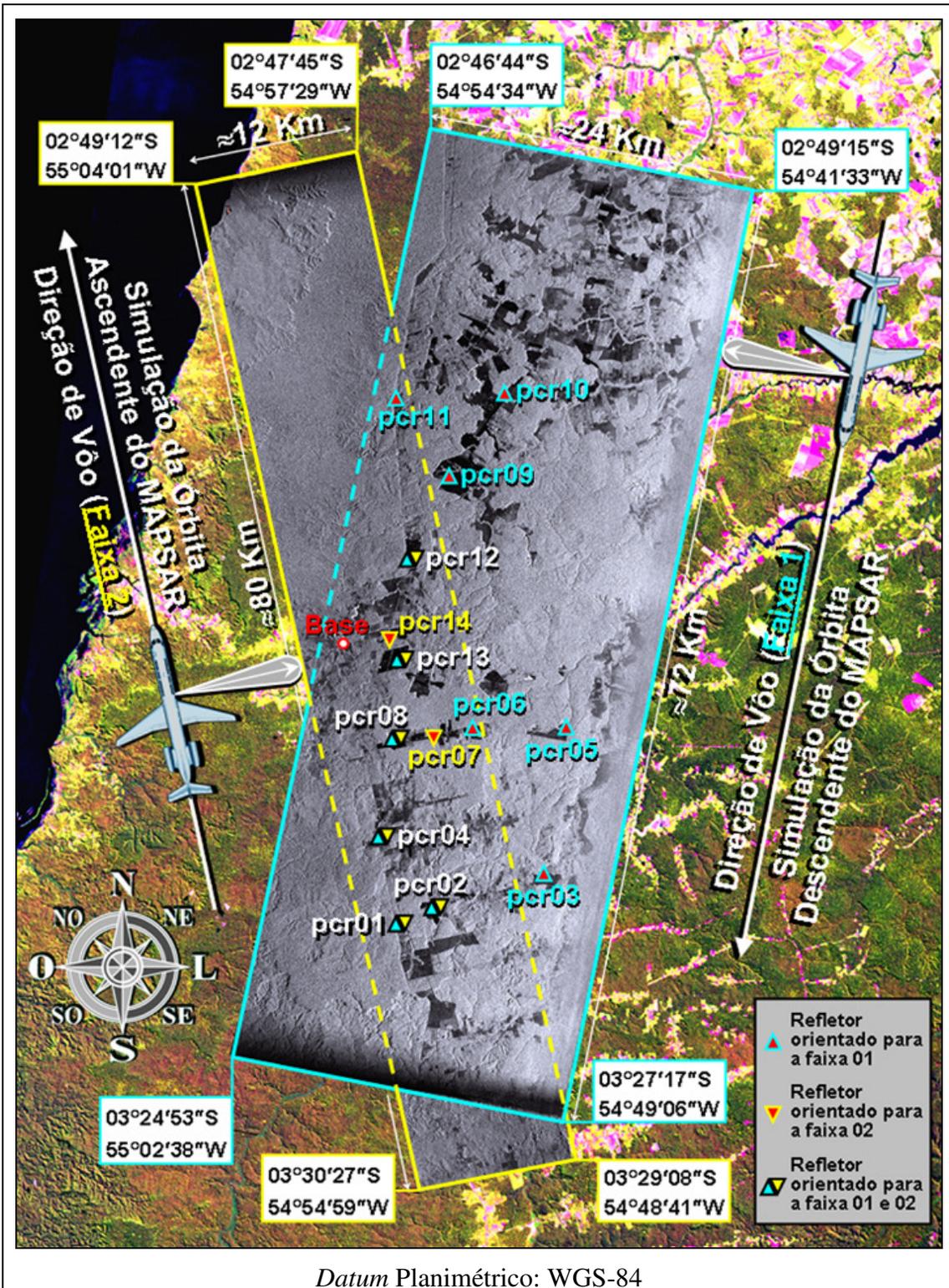


Figura 4.2 – Localização geográfica das faixas imageadas e dos refletores instalados na área de estudo 1 (FLONA).

A área da FLONA tem sido objeto de estudo do grupo de radar da Divisão de Processamento de Imagens/Observação da Terra do INPE. A escolha dessa área de estudo foi motivada pelo grande volume de trabalhos desenvolvidos (YANASSE et al., 1997; MURA et al., 2001; SANTOS et al., 2003) e a quantidade de dados adquiridos, tanto de campo quanto de imagens de diferentes sensores ativos e passivos, ao longo das últimas duas décadas.

Outra característica importante da região em questão está relacionada com a existência de várias áreas desmatadas, com pouco ou nenhuma cobertura vegetal, em decorrência do processo de antropização destinado para a atividade agrícola. Essa característica da região proporcionou a seleção de locais adequados para instalação dos refletores de canto triédricos, que foram utilizados na avaliação dos resultados de calibração.

4.3.2 Área de estudo 2 – Campinas-SP

A seleção de outra área de estudo foi motivada pela oportunidade de utilização de imagens SAR adquiridas sobre uma área urbana com grande adensamento populacional. Para tal, foram adquiridas imagens da região de Campinas-SP, empregando-se o mesmo sensor SAR R99B da área de estudo 1, com a finalidade de atender ao projeto de cooperação técnica entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Divisão de Geointeligência do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), que integra o Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial (CTA).

Com base nas imagens PolSAR obtidas sobre uma área urbana, foi possível obter a complementação da informação polarimétrica proveniente de outros alvos naturais e artificiais, que não estavam disponíveis na área de estudo 1, com a finalidade de ampliar a avaliação dos resultados obtidos com o processo de calibração polarimétrica. Na Figura 4.3 é apresentada a posição geográfica e a geometria de imageamento SAR da faixa obtida na área de estudo 2 (*Faixa 3*), que recobre toda a cidade de Holambra-SP e parte da cidade de Campinas-SP.

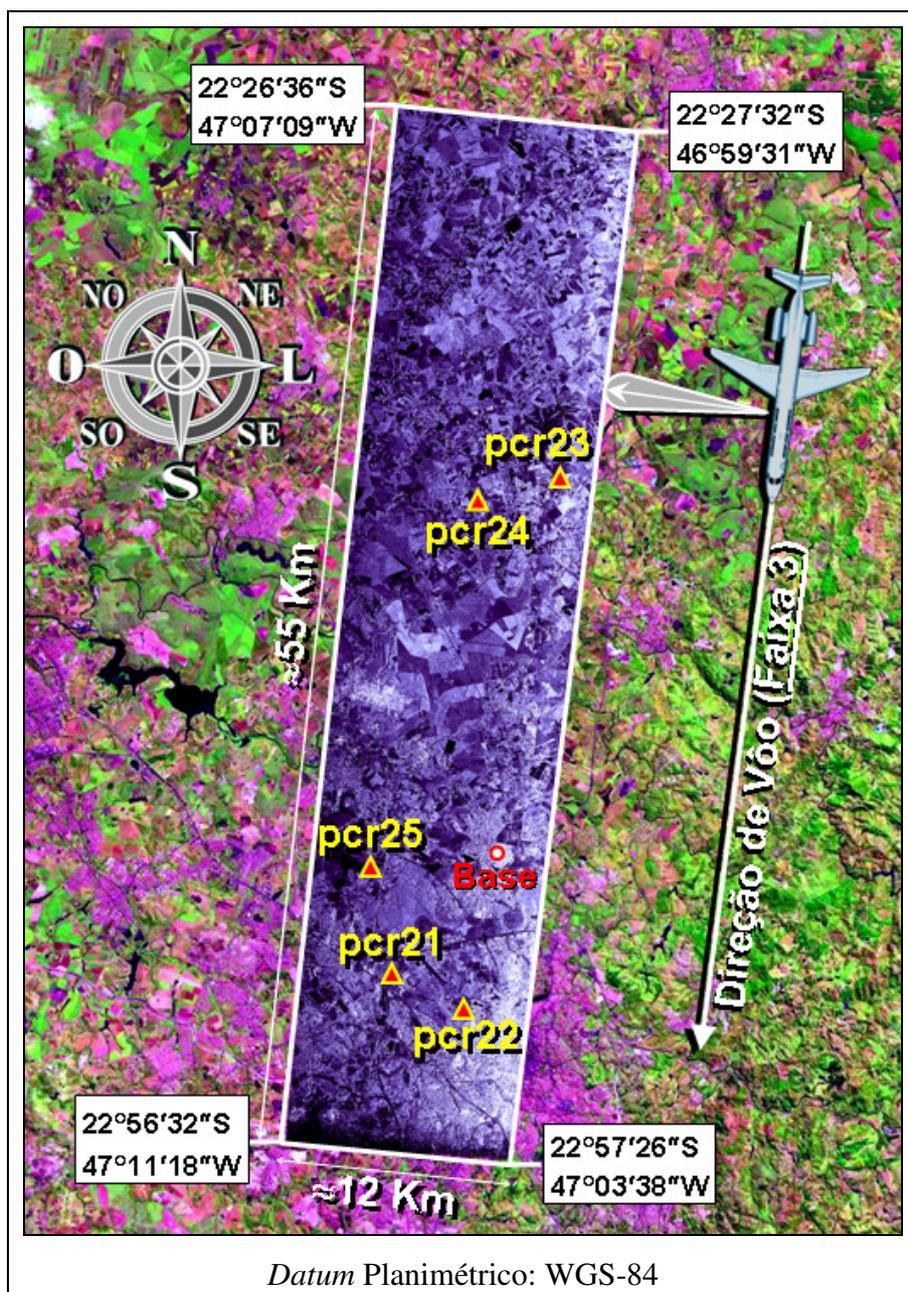


Figura 4.3 – Localização geográfica da faixa imageada e dos refletores instalados na área de estudo 2 (Campinas/Holambra-SP).

4.4 Planejamento do trabalho de campo

Essa fase do trabalho envolveu a determinação dos prováveis locais, dentro das duas áreas de estudo, onde seriam instalados os refletores de canto triédricos, que foram empregados na avaliação do processo de calibração, com base na resposta polarimétrica

desses alvos (Seção 2.4.2). Para tal, empregando-se imagens do satélite/sensor Landsat5/TM, foram selecionadas áreas que possibilitassem, além do fácil acesso, um bom contraste na imagem SAR entre a resposta do refletor de canto e o seu entorno, como por exemplo, áreas de solo exposto, o que permitiria a perfeita identificação desses alvos artificiais nas imagens PolSAR. Com isso, seria possível extrair o valor de retorno referente ao refletor de canto e obter a respectiva resposta polarimétrica, que foi comparada antes e depois do processo de calibração.

Com a finalidade de proceder a uma adequada avaliação do processo de calibração em toda a imagem SAR, os refletores de canto deveriam ser distribuídos ao longo de toda a área de estudo, abrangendo toda a faixa de imageamento, pois as distorções de recepção e transmissão do sistema SAR variam ao longo da direção radial (VAN ZYL, 1990; KLEIN, 1992). Porém, era importante quantificar também, se essas distorções se mantinham constante ao longo da direção de azimute, o que permitiria avaliar a estabilidade do sistema sensor SAR R99B, em banda L. Além disso, seria possível realizar uma avaliação mais rigorosa da sensibilidade dos métodos de calibração empregados, em relação a não estabilidade dessas distorções na direção azimutal.

Para a área de estudo 1, foi possível planejar o apoio logístico, o número de equipes, e a quantidade de recursos financeiros necessários para a execução do trabalho de campo. Tudo isso foi viável em função da missão de simulação do MAPSAR ter sido planejada com uma grande antecedência à execução da missão de imageamento SAR. Entretanto, para a área de estudo 2, essa previsão não foi possível, devido ao caráter inesperado da missão, o que inviabilizou a solicitação de recursos e limitou o tempo de execução do trabalho de campo, conforme descrito a seguir.

4.5 Execução do trabalho de campo

Com base nos planejamentos desenvolvidos, foram executados os trabalhos de campo para as duas áreas de estudo, de acordo com as seguintes etapas: reconhecimento, medição das coordenadas por rastreamento GPS, e instalação dos refletores de canto. A seguir, são descritas as principais características do trabalho de campo realizado nas duas áreas de estudo.

4.5.1 Área de estudo 1 – Tapajós-PA

Inicialmente, no período de 6 a 8 de setembro de 2005, foi realizado um reconhecimento dos locais onde seriam instalados os refletores, que foram previamente definidos no planejamento. Ao final da etapa de reconhecimento, todos os pontos de instalação dos refletores tinham sido materializados (instalação de estacas de madeira), cuja localização final, conforme apresentado na Figura 4.2, obedeceu às seguintes condições:

- a) Áreas planas, sem vegetação arbustiva ou arbórea, ou com vegetação rasteira (pastagem ou culturas em estágio inicial de crescimento), onde as árvores altas ou eventuais obstruções que pudessem interferir na visada refletor-radar, e nas medições GPS, estavam distantes, pelo menos, 100 m do ponto selecionado. Na Figura 4.4a pode-se observar o entorno do ponto PCR04, que se encontra livre de obstruções em todas as direções;
- b) Limpeza da área em torno do refletor, em um raio de pelo menos 50 metros, onde foram removidos tocos, troncos e galhos de árvore, que pudessem produzir um alto retorno, afetando a identificação do refletor na imagem SAR;
- c) Foram evitadas áreas com edificações ou peças metálicas próximas, a pelo menos 200 m de distância;
- d) Considerando-se que existia superposição entre as faixas 1 e 2 (Figura 4.2), alguns pontos de instalação dos refletores foram comuns às duas faixas, somente modificando a sua orientação, o que otimizou o trabalho de campo.

Concluída a fase de materialização dos pontos onde seriam instalados os refletores de canto, foi executado no período de 9 a 10 de setembro de 2005 a etapa de medição propriamente dita das coordenadas geodésicas de um ponto de apoio, obtido a partir do ponto-base, e dos pontos selecionados para instalação dos refletores. O desmembramento da fase de materialização e medição dos pontos possibilitou uma maior eficiência e aumento do tempo destinado ao trabalho de medição, permitindo com que eventuais problemas pudessem ser solucionados. As coordenadas dos pontos em

questão foram determinadas a partir do levantamento com rastreadores GPS de uma frequência (modelo *Stratus L1/Sokkia*), utilizando-se o método de posicionamento diferencial (DGPS), visando atingir a precisão definida pelo fabricante do GPS, da ordem de $10\text{mm} \pm 2\text{ppm} \times D$ (SOKKIA, 2007), onde D é a distância do ponto rastreado até a base. O processamento das coordenadas, em campo, foi realizado pelo aplicativo *Spectrum Survey/Sokkia*, cujas coordenadas obtidas encontram-se na Tabela 4.2.

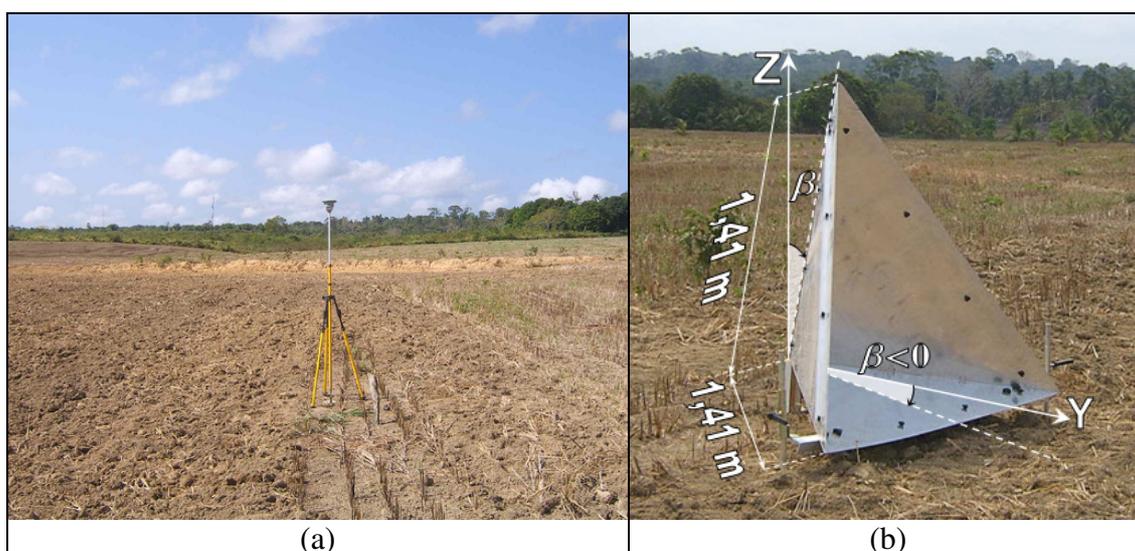


Figura 4.4 – (a) Características da área de entorno e (b) orientação do refletor de canto triédrico instalado no ponto PCR04.

A distribuição dos refletores de canto ao longo de toda a cena imageada, associado com a precisão obtida com o rastreamento DGPS (da ordem de ± 1 cm) dos pontos de instalação dos refletores, apesar do enfoque para a calibração, também tem aplicação em trabalhos voltados para a avaliação geométrica de imagens SAR, em decorrência da fácil identificação e resposta quase pontual desses alvos artificiais.

Após a materialização e medição dos pontos, foi executada no dia 11 de setembro de 2005, um dia antes do voo, a instalação dos refletores de canto, confeccionados em alumínio (material leve e perfeitamente condutor), para sinalização durante o imageamento SAR (Figura 4.4b). As condições de orientação dos refletores, conforme descrito na Seção 2.4.2, foram observadas, com base nos valores: $\varphi=0^\circ$ e

$\beta = 90^\circ - \theta_{inc} - 35,26^\circ$. Devido à variação do ângulo de incidência do sistema sensor SAR R99B (Tabela 4.1), a maioria dos ângulos de elevação β foram negativos, o que significa que a parte de trás do refletor teve que ser levantada (Figura 4.4b).

Tabela 4.2 – Coordenadas do ponto base e de localização dos refletores de canto triédricos instalados na área de estudo 1.

Ponto	Coordenadas Geodésicas ⁴		Coordenadas Planas ⁴		Altitude Elipsoidal (m)	RMS (m)
	Latitude (S)	Longitude (W)	E (m)	N (m)		
BASE ¹	03° 07' 59,02"	54° 58' 06,34"	725774,83	9653480,00	73,648	
PCR01≡PCR15 ²	03° 19' 28,24"	54° 55' 47,98"	730004,67	9632296,17	142,902	0,009
PCR02≡PCR16 ²	03° 18' 50,37"	54° 54' 18,66"	732785,91	9633563,83	100,601	0,015
PCR03	03° 17' 28,98"	54° 49' 55,49"	740897,08	9635937,26	74,978	0,013
PCR04≡PCR17 ^{2,3}	03° 15' 59,21"	54° 56' 30,79"	728696,14	9638721,30	79,869	0,018
PCR05	03° 11' 29,07"	54° 49' 03,98"	742511,80	9646992,33	69,251	0,014
PCR06	03° 11' 22,46"	54° 52' 44,39"	735704,92	9647209,94	143,629	0,016
PCR07	03° 11' 47,33"	54° 54' 28,47"	732489,22	9646452,26	133,850	0,0007
PCR08≡PCR18 ²	03° 11' 51,83"	54° 55' 51,63"	729920,76	9646319,14	163,448	0,016
PCR09	03° 01' 10,82"	54° 53' 48,17"	733772,57	9666006,26	94,226	0,018
PCR10	02° 57' 49,06"	54° 51' 35,95"	737868,75	9672197,18	56,214	0,018
PCR11	02° 57' 59,15"	54° 55' 56,18"	729830,03	9671902,63	82,345	0,013
PCR12≡PCR19 ²	03° 04' 30,68"	54° 55' 22,44"	730848,94	9659871,11	88,449	0,013
PCR13≡PCR20 ²	03° 08' 41,02"	54° 55' 47,99"	730044,74	9652181,39	131,869	0,011
PCR14	03° 07' 48,16"	54° 56' 16,53"	729166,68	9653807,20	98,961	0,010

1 – Ponto denominado BEC2, que se encontra materializado junto à cerca de entrada da Companhia do São Jorge, na BR 163, subordinada ao 8º Batalhão de Engenharia de Construção (Santarém-PA).

2 – No decorrer do trabalho, para evitar erros de interpretação, os pontos PCR01, 02, 04, 08, 12 e 13 serão denotados por PCR15, 16, 17, 18, 19 e 20, respectivamente, quando se referirem a *Faixa 2*.

3 – Ponto de apoio para os pontos PCR01, 02, 03, cuja finalidade foi eliminar as linhas de base de rastreio maiores que 20 Km, além de ter sido utilizado como ponto de instalação de um refletor.

4 – *Datum* planimétrico: WGS-84 (Fuso 21).

Como resumo final do trabalho de campo na área de estudo 1, alguns aspectos devem ser destacados:

- a) A época do ano em que foi realizado o trabalho de campo foi adequada, pois coincidiu com o período de estiagem, o que facilitou os deslocamentos pelas vias de acesso na região de estudo. Além disso, nas áreas desmatadas destinadas ao plantio de soja, a colheita tinha ocorrido recentemente, o que facilitou a escolha dos locais de instalação dos refletores, obedecendo às condições supracitadas;

- b) Devido ao conhecimento da região, por parte dos pesquisadores do INPE que participaram do trabalho, ao apoio logístico (instalações, alimentação e viaturas) concedido pela LBA, ao planejamento prévio realizado, e a divisão de duas equipes de campo, previamente definidas no planejamento da missão, o tempo de execução foi adequado para reconhecimento, materialização, medição e instalação de 12 refletores de canto, com uma antecedência de 6 dias ao imageamento SAR.

4.5.2 Área de estudo 2 – Campinas-SP

Conforme citado na Seção 4.4, a missão de imageamento SAR na região de Campinas-SP, não estava prevista no cronograma de atividades deste trabalho, pois não havia previsão de recursos financeiros e disponibilidade de pessoal para realizar o trabalho de campo. Entretanto, em função da alocação de pessoal especializado e uma viatura, disponibilizados pela EMBRAPA Monitoramento por Satélite, localizada na cidade de Campinas-SP, foi possível realizar o trabalho de campo na área de estudo 2. Em função dessas limitações, e da necessidade de instalação dos refletores dois dias antes do imageamento SAR, o que aumentava a possibilidade de furto dos refletores, por se tratar de material de grande interesse econômico, o tempo destinado para o trabalho de campo foi limitado pelo número de refletores que seriam instalados.

Inicialmente, no período de 20 a 21 de outubro de 2005, foi realizado o reconhecimento dos locais, previamente definidos no planejamento, para instalação de 6 refletores de canto. Porém, em função do tempo disponível para o trabalho de campo, do adensamento populacional, das dimensões reduzidas das áreas destinadas à atividade agrícola (áreas planas desmatadas), dos obstáculos naturais e artificiais à visada radar-refletor, e da garantia de segurança dos refletores na área de estudo, somente foi possível a materialização de cinco locais de instalação dos refletores, conforme apresentado na Figura 4.3.

Devido ao reduzido tempo disponível para a realização do apoio de campo antes do imageamento SAR, a fase de medição não foi realizada, tendo sido postergada para

outro período, conforme descrito a seguir. No dia 21 de outubro de 2005, três dias antes do vôo, foi realizada a instalação dos refletores de canto para sinalização durante o imageamento SAR. As condições de orientação dos refletores seguiu o mesmo procedimento realizado na área de estudo 1.

Em virtude da indisponibilidade do par de rastreadores GPS, devido ao seu emprego em outros trabalhos de campo, a fase de medição DGPS das coordenadas geodésicas dos pontos materializados para instalação dos refletores, foi realizada somente no dia 30 de novembro de 2005, com base nas mesmas especificações técnicas aplicadas para os pontos da área de estudo 1. É importante mencionar que, apesar de terem sido instalados cinco refletores, apenas quatro pontos foram medidos pelo método DGPS, devido ao fato que o dono da propriedade rural onde foi materializado o ponto PCR24 retirou a respectiva estaca de madeira. As coordenadas geodésicas dos pontos medidos pelo método DGPS e do ponto PCR24, medido pelo método absoluto após a fase de materialização, estão apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coordenadas do ponto base e de localização dos refletores de canto triédricos instalados na área de estudo 2.

Ponto	Coordenadas Geodésicas ³		Coordenadas Planas ³		Altitude Elipsoidal (m)	RMS (m)
	Latitude (S)	Longitude (W)	E (m)	N (m)		
BASE ¹	22° 48' 16,67"	47° 04' 22,66"	287222,52	7476614,70	596,808	
PCR21	22° 51' 46,97"	47° 07' 37,50"	281758,67	7470066,21	629,276	0,011
PCR22	22° 52' 50,43"	47° 05' 25,50"	285549,38	7468167,68	670,109	0,013
PCR23	22° 37' 30,79"	47° 02' 10,09"	290730,81	7496536,25	636,927	0,011
PCR24 ²	22° 38' 08,85"	47° 04' 44,10"	286349,00	7495305,00		
PCR25	22° 48' 39,90"	47° 08' 14,09"	280631,96	7475805,99	587,691	0,010

1 – Ponto pertencente à rede geodésica do município de Campinas (SEPLAMA, 2001), denominado de PMC-2005, materializado em chapa de bronze e localizado na sarjeta da Rua Dr. Alfredo A. Martinelli, próximo à esquina da Rua Professor João Fiorello Reginato, na Cidade Universitária.

2 – Coordenadas obtidas com rastreador GPS da marca *Garmin II Plus* (método absoluto).

3 – *Datum* planimétrico: WGS-84 (Fuso 23).

Como resumo final do trabalho de campo na área de estudo 2, alguns aspectos devem ser destacados:

- a) Foi difícil conseguir uma distribuição adequada dos refletores ao longo de toda a faixa de imageamento, principalmente pela limitação de áreas disponíveis que atendessem a condição (a), descrita na Seção 4.5.1, e, principalmente, pela falta

de segurança em deixar os refletores instalados sem a devida vigilância, o que motivou a eliminação de diversas áreas abertas;

- b) Facilidade em selecionar pontos de coordenadas geodésicas conhecidas para apoiar o trabalho de medição DGPS, em virtude da existência de uma rede geodésica GPS do município de Campinas-SP (SEPLAMA, 2001);
- c) Dificuldade em conseguir áreas livres da influência de obstáculos, especialmente de construções, conforme a condição (c), descrita na Seção 4.5.1;
- d) Devido à participação de pesquisadores experientes, com um grande conhecimento da região, e o apoio em viatura disponibilizado pela EMBRAPA, mesmo com um tempo bastante limitado, foi possível a execução do reconhecimento e instalação de cinco refletores, com uma antecedência mínima de dois dias ao imageamento SAR.

4.6 Imageamento SAR

A fase de imageamento SAR foi planejada para ocorrer imediatamente após a instalação dos refletores de canto, garantindo assim, uma adequada sinalização das imagens, com o propósito de avaliar os resultados de calibração. A seguir, são descritas as especificações técnicas e operacionais das diferentes configurações do imageamento SAR realizado nas duas áreas de estudo deste trabalho.

4.6.1 Área de estudo 1 – Tapajós-PA

No período de 12 a 15 de setembro de 2005, foi executado o imageamento SAR para a área de estudo 1. No primeiro dia de vôo, foram imageados 10 segmentos (altitude de vôo de 11.278 m) com largura no terreno e resolução espacial radial de 24 km e 6 m, respectivamente, com a finalidade de simular diferentes configurações de visada do sistema MAPSAR (órbita descendente). Dos 10 segmentos imageados, apenas o primeiro, que contém 12 refletores e está representado na Figura 4.2 pela *Faixa 1*, foi empregado no presente trabalho. Nos demais dias, foi tentado o imageamento de sete segmentos (altitude de vôo de 11.278 m) com largura e resolução espacial radial de 12 km e 3 m, respectivamente, separados por linhas de base de 100 m, visando a obtenção

de dados SAR polarimétricos e interferométricos (PolInSAR) na banda L, além de simular a órbita ascendente do sistema MAPSAR. Entretanto, apenas três segmentos foram imageados no dia 14, devido às condições de vento intenso na região, o que impediu a manutenção da linha de base especificada. Na Figura 4.2 está representado o segundo segmento (*Faixa 2*), dos sete segmentos planejados, contendo 8 refletores que também foram utilizados para obtenção dos resultados descritos no Capítulo 6.

É importante destacar que devido às diferentes resoluções espaciais que foram utilizadas no imageamento SAR da área de estudo 1, foi possível avaliar o impacto da resolução espacial no processo de calibração, com base nas respostas polarimétricas dos refletores de canto instalados.

4.6.2 Área de estudo 2 – Campinas-SP

No dia 24 de outubro de 2005, foi executado o imageamento SAR para a área de estudo 2, onde foram imageados 2 segmentos (altitude de voo de 9144 m na direção norte-sul) com largura no terreno e resolução espacial radial de 12 km e 3 m, respectivamente, separados por uma linha de base de 50 m, visando a obtenção de dados PolInSAR na banda L. Na Figura 4.3 pode-se observar a localização geográfica e a geometria de imageamento SAR referente ao primeiro dos dois segmentos planejados para a área de estudo 2, contendo os 5 refletores de canto que foram instalados na fase de campo.

A missão de imageamento SAR da área de estudo 2 contemplava a obtenção de mais 3 segmentos (direção leste-oeste) de interesse da EMBRAPA, com a finalidade de recobrimento total do município de Campinas-SP com largura no terreno e resolução espacial radial de 12 km e 3 m, respectivamente. Os dados obtidos desses três segmentos não foram utilizadas no presente trabalho, devido a inexistência de refletores de canto nas respectivas imagens PolSAR, que somente foram instalados e orientados em relação às duas faixas norte-sul. A impossibilidade de instalação e/ou reorientação dos refletores para as três faixas leste-oeste foi devido ao número insuficiente de equipes de campo e ao curto espaço de tempo destinado à fase de campo e execução do imageamento SAR, conforme descrito na Seção 4.5.2.

4.7 Processamento SAR

Os dados (ecos) adquiridos pelo sistema SAR são processados para a geração da respectiva imagem digital, onde as bandas de frequência B_{rg} (Equação 2.9) e B_{az} (Equação 2.10) influenciam nas resoluções espaciais radiais e azimutais, respectivamente, quanto maiores, menores são as resoluções. Portanto, as imagens processadas com a máxima banda de frequência são denominadas de imagens *full resolution* ou *single-look complex* (SLC), e apresentam a vantagem de representarem a cena imageada com a máxima resolução possível. Em contrapartida, as imagens SLC apresentam a desvantagem de possuírem o maior grau de ruído (*speckle*).

Para diminuir o ruído presente nas imagens SAR, que é fortemente influenciado pela posição de visada do radar (CUMMING e WONG, 2005), é empregada a técnica denominada de *multi-look*, durante o processamento SAR, que consiste em dividir a abertura sintética em N_l visadas (*looks*) ou, de modo equivalente, dividir a banda de frequência azimutal (B_{az}) em N_l bandas menores de frequência (B_{look}) (Figura 2.2). A imagem SAR gerada pelo processamento *multi-look* é composta pela média das imagens em intensidade¹³ de cada *look* da cena imageada (PORCELLO et al., 1976). Esta técnica aumenta a relação sinal-ruído da imagem final, proporcional à raiz quadrada do número de *looks*, diminuindo o efeito do ruído *speckle*, uma vez que, as imagens em intensidade de cada *look* são altamente correlacionadas.

O processamento *multi-look* é normalmente realizado na direção azimutal devido à melhor resolução espacial, quando comparada com a direção radial, o que permite a degradação da resolução azimutal. No caso em que não existe sobreposição entre as N_l bandas de frequência B_{look} , onde $B_{look} = B_{az}/N_l$, as imagens correspondentes a cada *look* possuem uma resolução azimutal N_l vezes menor que a da imagem *single-look*. Essa característica de não sobreposição entre as funções de referência azimutal, relativas a diferentes visadas (*looks*), faz com que as respectivas imagens complexas obtidas, denominadas de *multi-look complex* (MLC), sejam descorrelacionadas (FERNANDES,

¹³ As imagens em intensidade representam à amplitude ou módulo da imagem complexa ao quadrado.

1993), que é a suposição base do novo método de calibração polarimétrica desenvolvido neste trabalho e descrito no Capítulo 5.

O processamento das imagens SAR do sensor R99B, na banda L, foi realizado por intermédio do aplicativo *SPSAR* (**S**istema de **P**rocessamento **SAR**), desenvolvido por pesquisadores do IEAV/CTA, com base na plataforma de processamento de imagens *ENVI* (*ENvironment for Visualizing Images*) e com recursos da linguagem de programação *IDL* (*Interactive Data Language*) (ITT, 2006). A grande vantagem do aplicativo *SPSAR* é devido à funcionalidade de emprego de diferentes configurações de processamento, onde as imagens foram processadas com diferentes espaçamentos entre *pixels*, com diferentes formatos de dados, incluindo dados complexos (SLC e MLC), que constituíram a base de dados PolSAR empregados no presente trabalho.

Devido à incerteza no conhecimento teórico do padrão de irradiação das antenas do sensor SAR R99B, foi desenvolvido pelos pesquisadores do IEAV/CTA um padrão de correção baseado nos dados brutos, o que nem sempre produz resultados satisfatórios para essa correção. Portanto, o processamento SAR foi realizado sem esse padrão, para posterior correção das imagens com o padrão estimado sobre uma região homogênea (Seção 3.5.1), conforme os resultados descritos no Capítulo 6. Além disso, devido à indisponibilidade dos fatores de calibração absoluta para o sensor SAR R99B, as imagens processadas não foram corrigidas das variações do ganho do sinal recebido, o que ocasionou a variação radiométrica entre as faixas de vôo apresentada na Figura 6.6.

Devido ao grande volume de dados gerados na fase de imageamento SAR, somente alguns blocos¹⁴ foram processados por faixa (Figura 4.5), basicamente aqueles em que refletores de canto triédricos foram instalados. As especificações das imagens PolSAR, referentes a cada bloco processado sem o padrão de correção da antena, estão descritas na Tabela 4.4, onde pode-se observar o grande volume de dados gerado, em função da alta resolução espacial das imagens.

¹⁴ O aplicativo *SPSAR* processa os dados brutos em blocos com tamanho definido pelo usuário, com um controle do máximo tamanho que pode ser processado, devido a limitações de memória do computador.

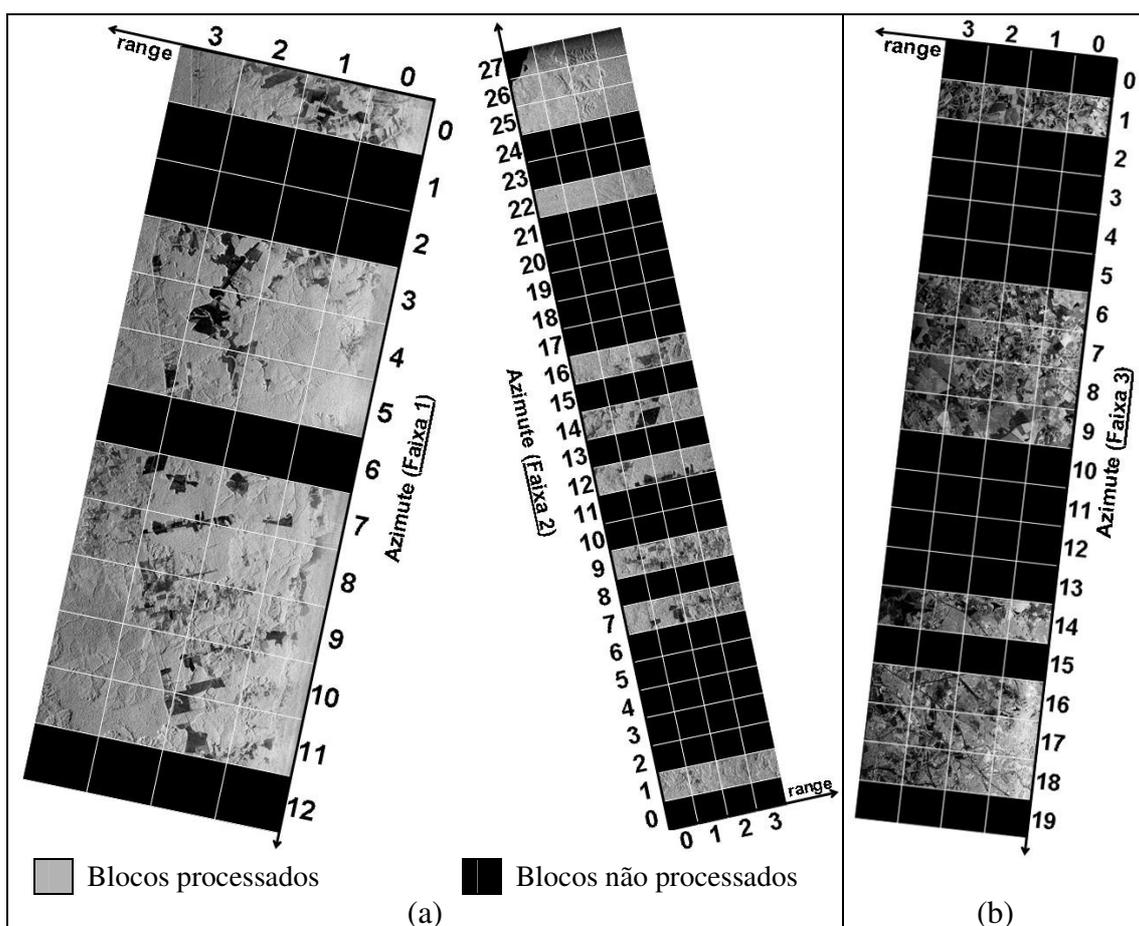


Figura 4.5 – Localização dos blocos processados por faixa, referentes as áreas de estudo na região do (a) Tapajós-PA e de (b) Campinas/Holambra-SP.

Tabela 4.4 – Especificações das imagens PolSAR processadas.

Área de Estudo	Nº Faixa	Blocos		Dimensões (em <i>pixel</i>)		Espaçamento (m)	
		Azimute	Range	Nº de Linhas	Nº de Colunas	Azimutal	Radial
1	1	0,3,4,5,7,8,9,10,11	0 a 3	≈ 11400 ^(*)	1115	≈ 0,5 ^(*)	5
	2	1,7,9,12,14,16,22,25,26,27	0 a 3	≈ 5450 ^(*)	1115	≈ 0,5 ^(*)	2,5
2	3	1,6,7,8,9,14,16,17,18	0 a 3	≈ 5450 ^(*)	1115	≈ 0,5 ^(*)	2,5

(*) – Em função de variações na velocidade da aeronave, o espaçamento na direção azimutal é alterado, o que ocasiona imagens com diferentes dimensões azimutais, por isso, foi utilizado o símbolo ≈ para denotar a ordem de grandeza do número de linhas.

Com a finalidade de facilitar a descrição e localização dos blocos de imagens PolSAR utilizadas para obtenção dos resultados descritos no Capítulo 6, será considerada uma notação baseada no sistema de coordenadas retangulares apresentado na Figura 4.5. Desta forma, a imagem PolSAR correspondente ao bloco localizado na posição azimutal

= {10} e radial = {02} será denotado por Az10_Rg02, e o mosaico dos blocos radiais = {0,1,2,3}, na referida posição azimutal, será denotado por Az10_Rg00-03. Na Tabela 4.5 é apresentada a localização dos refletores de canto em cada uma das três faixas de imageamento empregadas neste trabalho, de acordo com a referida nomenclatura dos blocos processados, além do respectivo valor do ângulo de visada.

Tabela 4.5 – Localização por bloco dos 25 refletores de canto triédricos.

Refletor	Faixa Imageada	Bloco		Ângulo de Visada
		Azimute	Range	
PCR01	1	10	2	56,89
PCR02	1	10	1	53,85
PCR03	1	9	0	45,13
PCR04	1	9	2	60,25
PCR05	1	7	0	45,95
PCR06	1	7	1	53,83
PCR08	1	8	2	60,72
PCR09	1	4	2	61,22
PCR10	1	3	2	57,79
PCR11	1	3	3	67,83
PCR12	1	5	3	63,24
PCR13	1	7	2	60,04
PCR07	2	12	2	68,71
PCR14	2	14	2	67,53
PCR15	2	7	0	65,07
PCR16	2	7	1	67,07
PCR17	2	9	0	65,11
PCR18	2	12	1	66,96
PCR19	2	16	3	69,52
PCR20	2	14	2	67,88
PCR21	3	16	2	59,88
PCR22	3	17	1	54,09
PCR23	3	6	0	51,63
PCR24	3	7	1	57,58
PCR25	3	14	2	62,58

As imagens PolSAR da banda L (HH, HV, VH e VH), correspondentes aos blocos processados para as duas áreas de estudo, foram sintetizadas nos formatos *single-look* e *multi-look* (3 *looks*) complexo, visando o desenvolvimento do novo método de calibração polarimétrica, descrito no Capítulo 5. As imagens *single-look* processadas foram empregadas para a obtenção dos resultados de calibração obtidos com os métodos

de Quegan (1994) e Kimura et al. (2004), bem como na avaliação da influência do processo de calibração sobre a decomposição da entropia e do ângulo α , de acordo com os resultados discutidos no Capítulo 6.

Ao final da fase de processamento SAR, foi realizada a correção do padrão de irradiação da antena do sensor SAR R99B, por intermédio da extração de regiões homogêneas, conforme o procedimento descrito na Seção 3.5.1, cujos resultados obtidos para as três faixas imageadas estão descritos na Seção 6.2.

4.8 Análise da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR

Antes de iniciar o desenvolvimento dos métodos de calibração que foram avaliados no presente trabalho, em função da disponibilidade de vários refletores, foi realizada uma avaliação da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR processadas e da visibilidade dos refletores instalados nas áreas de estudo, com base na análise do retroespalhamento polarimétrico destes refletores.

O procedimento mais empregado para a caracterização da qualidade das imagens SAR é baseado na avaliação da forma da *função resposta impulsiva* (também chamada de *point spread function*) de um alvo pontual com refletividade unitária (*função Delta de Dirac*) (FREEMAN, 1992). Na Figura 4.6, é apresentado o formato da resposta impulsiva, ou sinal de retorno processado, de um alvo pontual imageado por um sistema SAR com resolução espacial azimutal e radial diferentes, o que acarreta alteração no espaçamento entre os lóbulos nas duas direções.

Segundo Freeman (1992), a verificação da qualidade da resposta impulsiva é geralmente obtida do retroespalhamento de alvos pontuais, como é o caso de refletores de canto triédricos com um alto valor de σ . Dependendo da geometria de visada do radar, do valor de σ , e da condição de visibilidade em relação ao seu entorno, o retroespalhamento dos refletores se aproxima muito da função apresentada na Figura 4.6. A condição de visibilidade do refletor em relação aos alvos ao seu redor, denominado de *clutter*, é medida pela seguinte expressão (FREEMAN, 1992):

$$SCR = \frac{\sigma_{pq}^T}{\langle \sigma_{pq}^C \rangle} = \frac{\sigma_{pq}^T \sin(\theta_i)}{\langle \sigma_{pq}^0 \rangle \delta_r \delta_a}, \quad (4.1)$$

onde SCR é a abreviação de *Signal-to-ClutterRatio*, σ_{pq}^T é a seção cruzada do alvo pontual na componente polarimétrica pq , $\langle \sigma_{pq}^C \rangle$ e $\langle \sigma_{pq}^0 \rangle$ representam, respectivamente, a seção cruzada média e o coeficiente de retroespalhamento médio do *clutter* (Equação 2.30). Na prática, a medida SCR é obtida pela razão entre o valor de pico da resposta impulsiva (lóbulo principal) do refletor e o valor médio de potência do *clutter*, estimado sobre uma área próximo ao refletor (FREEMAN, 1992).

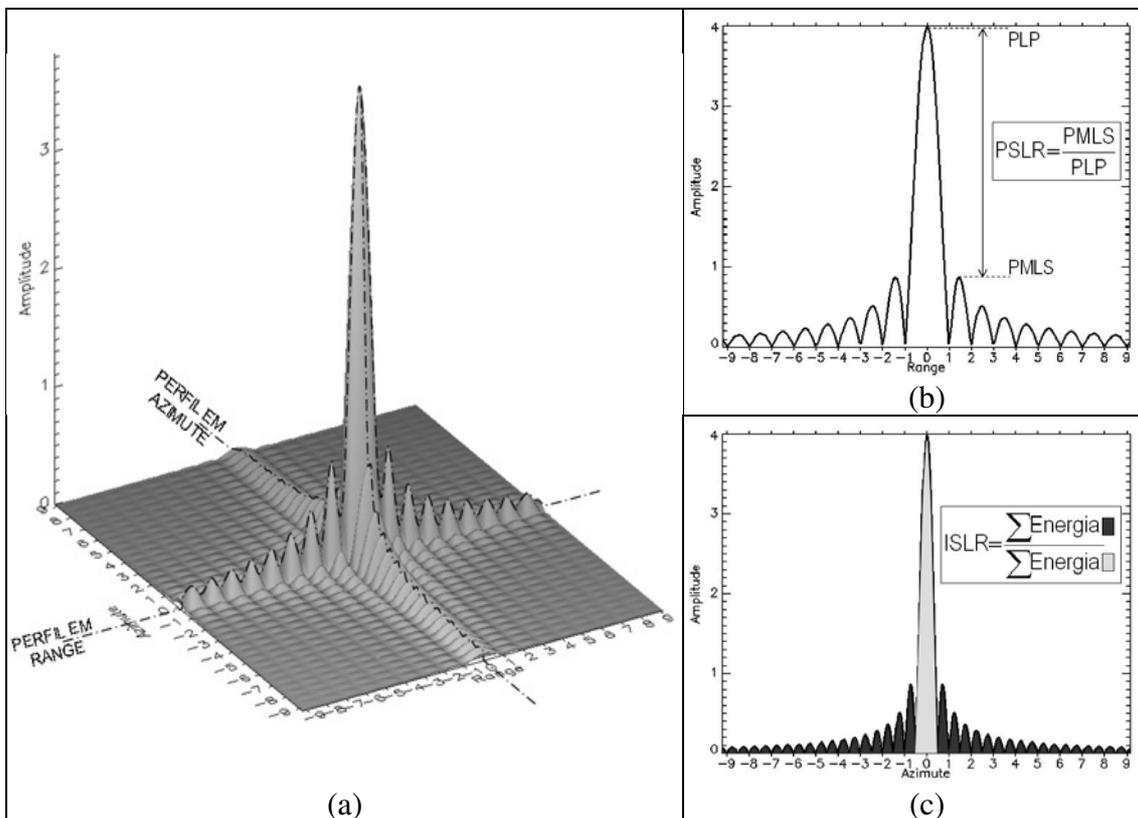


Figura 4.6 – (a) Resposta impulsiva bidimensional de um alvo pontual com os perfis na direção (b) radial e (c) azimutal que passam pelo pico de potência.

Além da razão SCR , foram empregadas na avaliação da qualidade radiométrica das imagens PolSAR processadas, os valores azimutais e radiais da $PSLR$ (*Peak of Side*

Lobe Ratio), que representa a razão entre os valores de amplitude de pico do maior lóbulo secundário e do lóbulo principal (Figura 4.6b), e da *ISLR* (*Integrated Side Lobe Ratio*), que representa a razão entre a energia total dos lóbulos secundários e a energia do lóbulo principal (FREEMAN, 1992; FREEMAN et al., 1995). As razões SCR, PSLR e ISLR foram calculadas para as componentes polarimétricas HH e VV, a partir dos 25 refletores empregados no trabalho, conforme está descrito no Capítulo 6.

A instalação e medição por rastreamento GPS das coordenadas geodésicas dos refletores de cantos possibilitaram também a realização da avaliação geométrica das imagens PolSAR, que consistiu da medição das resoluções espaciais azimutais e radiais, do registro entre as componentes polarimétricas e o erro de posicionamento global das imagens SAR, cujos resultados obtidos estão descritos no Capítulo 6.

No caso das imagens do sensor SAR R99B é empregado um filtro passa-banda de Kaiser (coeficiente do filtro $\beta=2,5$) durante o processamento para diminuir o efeito dos lóbulos secundários na imagem SAR processada. Com isso, os valores teóricos da resolução espacial na direção radial e azimutal, representados pelas equações 2.9 e 2.10, respectivamente, que correspondente a ≈ -4 dB (Figura 4.7), devem ser multiplicadas por um fator de 1,18 (CUMMING e WONG, 2005).

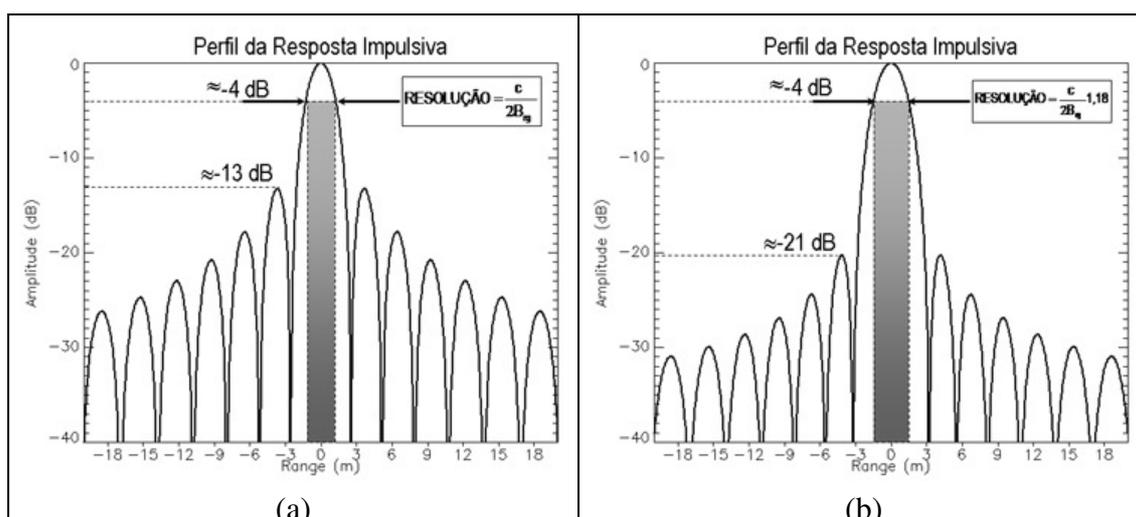


Figura 4.7 – Perfil da resposta impulsiva de um alvo pontual (a) sem e (b) com o filtro passa-banda de Kaiser.

Portanto, com base na resposta impulsiva azimutal e radial transformadas para decibéis, foram medidas as respectivas resoluções espaciais correspondente ao valor de 4 dB, para todos os refletores de cantos e posteriormente foram comparadas com os valores teóricos descritos anteriormente.

A verificação da qualidade do registro entre as componentes polarimétricas foi baseada na medida da distância entre o pico da resposta impulsiva nas direções azimutais e radiais para as componentes HH e VV dos 25 refletores de canto, conforme apresentado na Figura 4.8. Vale lembrar que, somente para as componentes polarimétricas HH e VV é possível a caracterização da resposta impulsiva, de acordo com a matriz de espalhamento ideal para refletores de cantos triédricos, conforme apresentado na Equação 2.33.

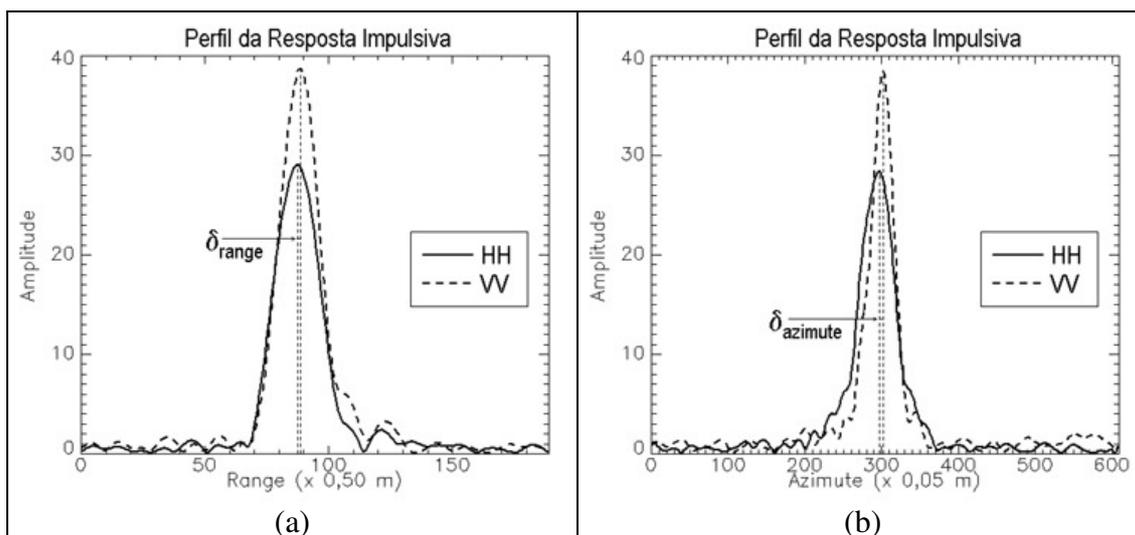


Figura 4.8 – Deslocamento entre o pico da resposta impulsiva das componentes polarimétricas HH e VV na direção (a) radial e (b) azimutal.

Finalmente, considerando-se que o aplicativo SPSAR tem a funcionalidade de produzir imagens SAR georreferenciadas, com base nas coordenadas GPS e na atitude da plataforma do sensor SAR R99B medida pelo sistema de navegação inercial (IMU), foi realizada uma avaliação do erro de posicionamento global das aludidas imagens, com a finalidade de comprovar para que escalas de mapeamento topográfico as imagens em questão poderiam ser empregadas diretamente, sem a necessidade de utilização de

pontos de controle. Para essa análise, as coordenadas geodésicas medidas por GPS e extraídas das imagens PolSAR referente aos 25 refletores de canto disponíveis nas áreas de estudo, foram comparadas e permitiram a obtenção do erro médio quadrático, que pode ser associado a um padrão de exatidão de posicionamento para futuras aplicações cartográficas das imagens em questão.

4.9 Implementação do método de calibração polarimétrica proposto por Kimura et al. (2004)

O método tradicional proposto por Quegan (1994) foi aprimorado em Kimura et al. (2004), considerando-se que o ruído não é recíproco, o que acarreta a necessidade de estimação da razão $m=N_{vh}/N_{hv}$ (Seção 3.4.2), com base em regiões da imagem onde o *backscatter* é desprezível em relação ao ruído. Porém, dependendo da cena imageada, a relação sinal/ruído muito baixa pode não ocorrer, o que invalida a estimação da razão em questão, ao contrário do novo método proposto, onde os parâmetros N_j são estimados diretamente pelo sistema de equações não-lineares descrito na Seção 5.5.3.

Apesar das limitações apresentadas, o método de Kimura et al. (2004) possui uma abordagem de aplicação mais abrangente quando comparado com os demais métodos de calibração polarimétrica. A partir dessa condição mais geral, foi desenvolvido um estudo com a finalidade de quantificar as distorções polarimétricas do sensor SAR R99B e identificar as possíveis limitações de aplicação do método em questão, cujos procedimentos adotados foram:

- a) Implementação do método de Kimura et al. (2004) empregando-se a linguagem de programação IDL, agregando-se várias funcionalidades, como por exemplo, o uso da função de autocorrelação espacial para a definição da janela de filtragem da imagem covariância (Seção 5.3.4.3), a seleção de amostras de treinamento para estimação dos parâmetros m e k , e o ajuste polinomial, por mínimos quadrados, para cada perfil radial estimado para os parâmetros α , u , v , w e z . Além disso, é apresentado o histograma da diferença de fase de co-polarização e entre as componentes cruzadas e co-polarizadas, antes e depois da calibração polarimétrica, pois, segundo Touzi et al. (1993), os histogramas das imagens

$S_{hh}S_{hv}^*$ e $S_{vv}S_{hv}^*$ apresentam antes e depois do processo de calibração, respectivamente, uma distribuição não-uniforme e uniforme de frequência (Figura 4.9a e b). Isso é esperado, pois as respectivas imagens diferença de fase não apresentam nenhuma informação, conforme os resultados apresentados em Touzi et al. (1993) e Correia (1998). Com relação à diferença de fase $S_{hh}S_{vv}^*$ deve ocorrer que os histogramas das respectivas imagens tenham um comportamento não-gaussiano e gaussiano (média próximo de zero), respectivamente, ante e depois processo de calibração (Figura 4.9c e d);

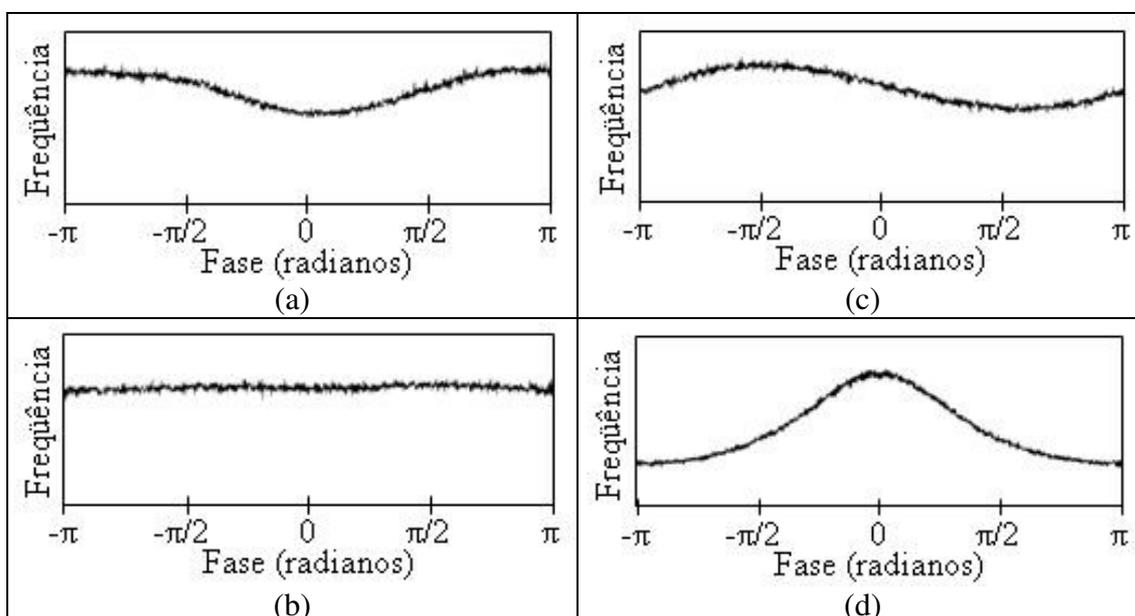


Figura 4.9 – Histograma da imagem diferença de fase $S_{hh}S_{hv}^*$, (a) antes e (b) depois da calibração polarimétrica, e também para a imagem diferença de fase $S_{hh}S_{vv}^*$ antes (c) e (d) depois da calibração.

- b) Avaliação dos seguintes fatores na estimação dos parâmetros de calibração: (1) tempo de processamento por bloco; (2) variação da resolução espacial; e (3) utilização de alvos com diferentes graus de homogeneidade e/ou com baixa correlação entre as componentes polarimétricas cruzadas e co-polarizadas;

- c) Comparação entre as respostas polarimétricas teórica, observada e calibrada dos 25 refletores de canto, com a finalidade de avaliar os resultados de correção do *cross-talk* e do *channel imbalance* obtidos com o aludido método de calibração;
- d) Caracterização das matrizes de distorção de transmissão $[T]$ e de recepção $[R]$ do sensor SAR R99B, por intermédio da estimativa dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance*.

O detalhamento da fundamentação teórica e da implementação computacional do método de Kimura et al. (2004) estão descritos no Capítulo 3 e no Apêndice B, respectivamente, enquanto que os resultados obtidos a partir dos procedimentos (c) e (d) descritos acima, são apresentados no Capítulo 6. Ao final dessa fase do trabalho foi possível identificar os requisitos operacionais que deveriam ser incorporados às ferramentas de calibração, conforme descrito a seguir.

4.10 Desenvolvimento e implementação de ferramentas de calibração de imagens PolSAR

Com base na teoria apresentada nos Capítulos 2 e 3 e nos requisitos operacionais identificados na fase de investigação do método de calibração polarimétrica proposto por Kimura et al. (2004), foi desenvolvido um conjunto de ferramentas de calibração com a finalidade de aplicação em dados PolSAR multi-sensor e multi-plataforma. As ferramentas de calibração foram implementadas com funções do aplicativo ENVI e recursos disponíveis na linguagem IDL, com base nos seguintes requisitos operacionais fundamentais:

- a) Totalmente amigável ao usuário, com base em interfaces gráficas;
- b) Suporte para entrada e saída dos principais formatos de imagens SAR monoespectrias e PolSAR;
- c) Geração de relatórios técnicos sobre os diferentes processos de calibração disponíveis;

- d) Seleção de regiões de interesse para a obtenção de respostas polarimétricas calibradas e não-calibradas;
- e) Banco de dados de respostas polarimétricas de diferentes alvos;
- f) Disponibilidade de metodologias automatizadas de calibração mais adequadas aos dados PolSAR de entrada, e que são transparentes aos usuários não especializados;
- g) Flexibilidade de seleção de diferentes metodologias ou processos de calibração que serão aplicados aos dados PolSAR de entrada;
- h) Visualização gráfica dos parâmetros e/ou resultados obtidos com os diferentes processos de calibração implementados.

A descrição detalhada do modelo conceitual das ferramentas de calibração de imagens PolSAR está descrita no Capítulo 6, enquanto que as funcionalidades disponíveis, interfaces gráficas implementadas e potencialidades dessas ferramentas são apresentadas no Apêndice B.

4.11 Desenvolvimento e implementação do método de calibração polarimétrica *multi-look*

Concluída a fase de desenvolvimento das ferramentas computacionais de calibração, foi realizado o desenvolvimento de um novo método de calibração polarimétrica *multi-look*, que independe da cena imageada e de alvos externos à imagem, cuja descrição detalhada encontra-se no Capítulo 5, devido à inovação apresentada.

O novo método de calibração polarimétrica proposto, diferentemente dos métodos tradicionais, como Quegan (1994) e Van Zyl (1990), não é baseado na suposição de que a cena é dominada por alvos com simetria azimutal para estimar os parâmetros de calibração, o que nem sempre é verdadeiro. Além disso, não é necessária a suposição da reciprocidade do ruído do sistema, o que conduz a um caráter mais geral do novo método em comparação com os métodos tradicionais.

A outra vantagem do novo método de calibração consiste na estimação do *channel imbalance* a partir dos próprios dados SAR, ao contrário dos métodos tradicionais que dependem do uso de alvos artificiais ou conhecimento de alvos naturais existentes na cena imageada. Porém, o caráter mais geral da nova metodologia de calibração está baseado na estimação conjunta dos parâmetros do *cross-talk*, *channel imbalance* e da rotação de *Faraday*, diferentemente dos outros métodos existentes, que pressupõem, pelo menos, a inexistência do *cross-talk* para corrigir a rotação de *Faraday*.

A implementação do método em questão foi baseada na linguagem de programação IDL e em rotinas consagradas da linguagem de programação Fortran, que são utilizadas para solução, pelo método dos mínimos quadrados, de sistemas de equações não-lineares sobre-determinados.

Os resultados obtidos e as respectivas avaliações de desempenho realizadas a cerca do novo método de calibração desenvolvido estão descritas no Capítulo 6, com base nos seguintes procedimentos:

- a) Estimação da correlação *multi-look*, com base na metodologia descrita na Seção 5.2 e na utilização de alvos com diferentes graus de homogeneidade existentes nas duas áreas de estudo, com vistas à validação da condição de decorrelação entre as imagens MLC. Essa abordagem de avaliação preliminar das imagens MLC envolveu também a verificação do registro entre as componentes polarimétricas e entre as imagens *multi-look* complexas, além da validação da suposição de invariância, para cada *look*, das matrizes de distorções de recepção $[R]$ e transmissão $[T]$ do sistema sensor SAR R99B;
- b) Comparação entre as respostas polarimétricas de imagens PolSAR com e sem calibração, referentes aos 25 refletores instalados nas duas áreas de estudo;
- c) Avaliação dos seguintes fatores na estimação dos parâmetros de calibração: (1) tempo de processamento por bloco; (2) variação da resolução espacial; e (3) utilização de alvos com diferentes graus de homogeneidade e/ou com baixa correlação entre as componentes polarimétricas cruzadas e co-polarizadas.

4.12 Avaliação comparativa entre os métodos de calibração polarimétrica estudados

Para concluir o estudo desenvolvido sobre os diferentes métodos de calibração polarimétrica abordados no presente trabalho, foi realizada a avaliação comparativa dos resultados obtidos com o tradicional método semi-automático de Quegan (1994), com as melhorias propostas por Kimura et al. (2004), e com o novo método automático *multi-look*.

A sistemática de avaliação dos resultados de calibração obtidos, conforme descrito no Capítulo 6, foi baseada nos seguintes procedimentos:

- a) Comparação dos resultados de estimação dos parâmetros α , u , v , w e z , obtidos pelos métodos de calibração em questão;
- b) Comparação dos resultados obtidos na estimação do *channel imbalance* pelo método de calibração polarimétrica *multi-look* e por intermédio da informação polarimétrica do pico da resposta impulsiva dos 25 refletores disponíveis;
- c) Comparação entre as respostas polarimétricas calibradas pelos métodos em questão, com base nesses refletores.

4.13 Avaliação da influência do processo de calibração polarimétrica na decomposição da entropia/ângulo α

A classificação digital de imagens é uma importante ferramenta de reconhecimento de padrões utilizada para aplicações de uso e cobertura da Terra. Os métodos de classificação de dados SAR polarimétricos podem ser divididos, basicamente, em quatro classes: (1) algoritmos baseados, diretamente, em técnicas de classificação supervisionada (redes neurais) ou não-supervisionada (K-médias), sem nenhum modelo estatístico para os dados, onde, normalmente, não são utilizados os dados complexos; (2) algoritmos de classificação supervisionada baseados em um modelo estatístico para os dados; (3) algoritmos de classificação supervisionada ou não-supervisionada baseados nos mecanismos de espalhamento dos alvos; e (4) algoritmos híbridos que utilizam as técnicas (2) e (3).

Em relação à classe (4), vários métodos têm sido desenvolvidos para aproveitar o potencial de separação e de discriminação dos diferentes mecanismos de espalhamento, com base na teoria de decomposição da entropia e do ângulo α , juntamente com uma modelagem estatística apropriada para os dados SAR polarimétricos. Entretanto, existe uma carência de pesquisas voltadas para a avaliação da influência do processo de calibração sobre as classificações obtidas com as imagens PolSAR complexos.

Com a finalidade de exemplificar a real necessidade de calibração polarimétrica dessas imagens, para emprego em métodos de classificação por decomposição de alvos, foi desenvolvido neste trabalho uma avaliação preliminar da influência dessa calibração sobre as imagens da entropia e do ângulo α descritas na Seção 2.5.2.

A sistemática de avaliação dessa influência foi baseada nos seguintes procedimentos, conforme descrito no Capítulo 6:

- a) Seleção de dois blocos de imagens PolSAR, um da Faixa 1 e outro da Faixa 3, que apresentam uma grande variedade de mecanismos de espalhamento correspondentes às diferentes zonas do plano $(H_s, \bar{\alpha})$;
- b) Avaliação da dispersão dos *pixels* e dos deslocamentos dos centros das classes de interesse no plano $(H_s, \bar{\alpha})$, em função da aplicação de diferentes procedimentos de calibração polarimétrica.

5 MÉTODO DE CALIBRAÇÃO POLARIMÉTRICA MULTI-LOOK

O processo de calibração polarimétrica envolve a minimização das distorções presentes em um sistema SAR polarimétrico em relação a fase e a amplitude relativa entre os canais polarimétricos, o que é de suma importância para garantir uma adequada análise dos dados SAR obtidos. No Capítulo 3 foram abordados os métodos mais tradicionais de calibração polarimétrica, que são baseados em algumas suposições. O método de Van Zyl (1990) é baseado na suposição de que a matriz de espalhamento e o sistema são recíprocos, e que a cena é dominada por alvos com simetria azimutal; o método de Quegan (1994) é baseado na simetria azimutal e reciprocidade da matriz de espalhamento. Os métodos em questão podem falhar quando o coeficiente de retroespalhamento é desprezivelmente baixo, além de serem baseados no conhecimento de alguns alvos na imagem para estimar certos parâmetros de calibração.

As limitações citadas anteriormente motivaram o desenvolvimento de um novo método iterativo de calibração polarimétrica, proposto no presente trabalho. Nenhuma suposição sobre a reciprocidade do modelo de transmissão, recepção e ruído do sistema, ou mesmo sobre o domínio de alvos com simetria azimutal na cena são considerados no novo método proposto. As únicas suposições impostas são que a matriz de espalhamento é recíproca e que as matrizes de distorção de recepção, transmissão e ruído do sistema são as mesmas para diferentes imagens *multi-look* complexas independentes, que são geradas no processo de formação das imagens SAR.

Pelo exposto acima, este Capítulo tem por objetivo apresentar a fundamentação matemática que garante a independência entre as imagens MLC, sem sobreposição entre os *looks*, bem como, a metodologia empregada para estimação dessa correlação, utilizando-se as imagens do sensor SAR R99B, adquiridas nas duas áreas de estudo. Por fim é apresentado o desenvolvimento teórico do novo método em questão, abordando as questões relativas a suposições impostas pelo método, ao sistema de equações não-lineares e ao método numérico de solução adotado para estimação dos parâmetros de calibração polarimétrica.

5.1 Análise teórica da correlação multi-look

A função de correlação de dois sinais complexos z_1 e z_2 , observados no tempo $t_1 = t$ e $t_2 = t + \tau$, é definida tanto no domínio temporal t quanto no domínio da frequência f , empregando-se as propriedades da *Transformada de Fourier*, que fornecem a seguinte expressão (SCHAFER e OPPENHEIM, 1975):

$$R_{(z_1, z_2)}(\tau) \stackrel{def}{=} \int_{-\infty}^{+\infty} z_1^*(t) z_2(t + \tau) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} Z_1^*(f) Z_2(f) \exp(i2\pi f\tau) df, \quad (5.1)$$

onde $Z_1(f)$ e $Z_2(f)$ são as transformadas de *Fourier* de $z_1(t)$ e $z_2(t)$, respectivamente. No processamento *multi-look*, os espectros $Z_1(f) = G(f)W_1(f)$ e $Z_2(f) = G(f)W_2(f)$, de cada *look*, são obtidos pela técnica de filtragem passa-banda (SCHAFER e OPPENHEIM, 1975), onde o espectro azimutal com compressão de pulso $G(f) \in C$, oriundo dos dados brutos, é multiplicado pelo espectro de filtros com largura de banda fixa $W_1(f) \in C$ e $W_2(f) \in C$, posicionados simetricamente em relação à frequência Doppler centróide¹⁵. Geralmente, são utilizados vários espectros de filtros passa-banda com superposição, para diminuir o ruído *speckle* e a perda na resolução azimutal (MOREIRA, 1990).

Supondo-se que os espectros dos filtros $W_1(f)$ e $W_2(f)$ não têm superposição, ou seja, $W_1(f)W_2(f) = W_1^*(f)W_2(f) = 0$, a Equação 5.1 se reduz a:

$$R_{(z_1, z_2)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(f) G^*(f) \underbrace{W_1^*(f)W_2(f)}_{=0} \exp(i2\pi f\tau) df = 0 \quad (5.2)$$

Teoricamente, a correlação de duas imagens complexas *multi-look*, sem superposição, é igual a zero, ou seja, os dados são independentes. Porém, na prática, devido à natureza finita da transformação inversa de *Fourier* do domínio da frequência para o domínio temporal, alguns truncamentos são realizados, o que acarreta uma pequena correlação entre os *looks*, mesmo que os espectros $W_1(f)$ e $W_2(f)$ não tenham superposição.

¹⁵ Quando o centro do feixe da antena SAR está sobre o alvo tem-se a frequência Doppler centróide.

Para validar a suposição que a correlação entre os *looks* não é significativa, pois essa é a condição primordial do novo método de calibração polarimétrica, é necessário estimar essa correlação. Para tal, é descrito a seguir a metodologia que foi aplicada às imagens MLC do sensor SAR R99B para estimar a correlação *multi-look*.

5.2 Estimação da correlação multi-look

O coeficiente de correlação complexa entre dois sinais com média zero $z_1 \in C$ e $z_2 \in C$, e a sua respectiva estimativa foram definidos na Seção A.3. Considerando-se que a magnitude \hat{D} e a fase $\hat{\varphi}$ deste coeficiente são estimativas tendenciosas (TOUZI e LOPES, 1996), foi derivado em Touzi et al. (1999) a estatística de $\hat{\rho}_L$, como uma função do número de amostras independentes L , dado por:

$$E(\hat{\rho}_L) = \frac{\Gamma^2(L+1/2)}{\Gamma(L)\Gamma(L+1)} D(1-D^2)^L F(L+1/2, L+1/2; L+1; D^2) \exp(i\varphi), \quad (5.3)$$

onde F é a função hipergeométrica Gaussiana (Seção A.5), Γ é a função Gamma de Euler (Seção A.4), e φ é a fase da coerência, estimada como o argumento de $E(\hat{\rho}_L)$, que é não tendenciosa, isto é, $Arg(E(\hat{\rho}_L)) = \varphi$. Entretanto, a magnitude $|E(\hat{\rho}_L)|$ obtida pela Equação 5.3 é tendenciosa, sendo que essa tendência decresce com o aumento do número de amostras independentes L , conforme pode ser visto na Figura 5.1, onde a utilização de apenas três amostras independentes é capaz de reduzir a tendência do estimador $|E(\hat{\rho}_L)|$, em relação ao grau de coerência D .

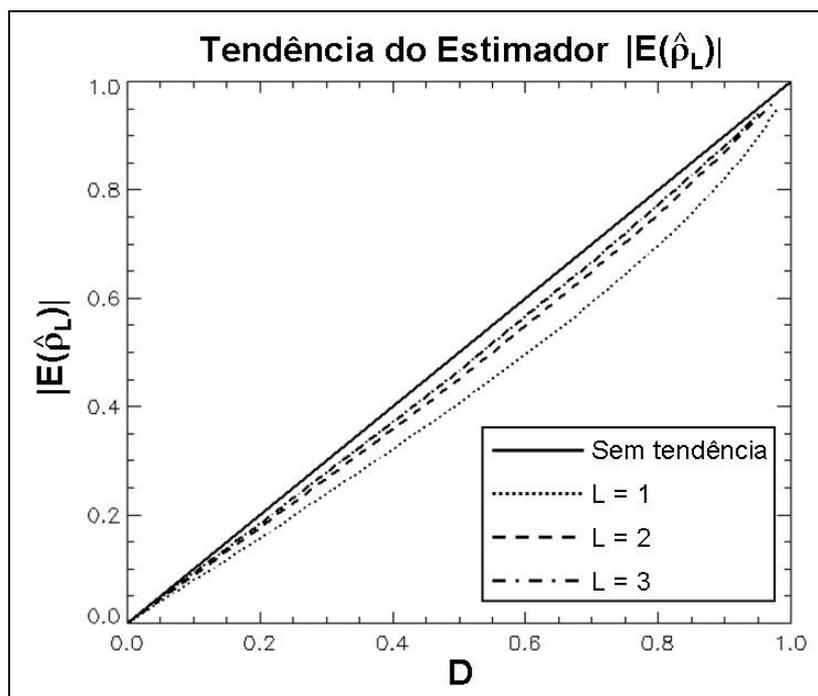


Figura 5.1 – Tendência da magnitude do estimador $|E(\hat{\rho}_L)|$ em função do aumento do número de amostras independentes L .

Com base na suposição que a correlação é estacionária e ergódica (em média) na área de estudo, a média amostral $\langle \hat{\rho}_L \rangle$ fornece uma estimativa não tendenciosa de $E(\hat{\rho}_L)$. Segundo Touzi et al. (1999), $\langle \hat{\rho}_L \rangle$ é um estimador de máxima verossimilhança de $E(\hat{\rho}_L)$, com precisão fixada pela variância de $\hat{\rho}_L$ e pelo número de amostras N computadas no cálculo de $\langle \hat{\rho}_L \rangle$ ($Var(\hat{\rho}_L)/N$), onde se deve utilizar um número suficientemente grande N de L amostras independentes. Portanto, os estimadores não tendenciosos \hat{D} e $\hat{\phi}$ podem ser obtidos pela inversão da Equação 5.3, considerando-se $E(\hat{\rho}_L) = \langle \hat{\rho}_L \rangle$, onde:

$$\hat{D} = Func^{-1}(|E(\hat{\rho}_L)| = |\langle \hat{\rho}_L \rangle|) \quad e \quad \hat{\phi} = Arg(\langle \hat{\rho}_L \rangle) \quad (5.4)$$

Para um número N suficientemente grande, \hat{D} é normalmente distribuído sobre D com variância $Var_{CR}(\hat{D})/N$ e intervalo de confiança estimado por:

$$CI = \left[\hat{D} - z_c \sqrt{\text{Var}_{CR}(\hat{D})/N}, \hat{D} + z_c \sqrt{\text{Var}_{CR}(\hat{D})/N} \right], \quad (5.5)$$

onde z_c determina o nível de confiança desejado, e $\text{Var}_{CR}(\hat{D})$ é a variância de *Cramer-Rao*, somente aplicada para estimativas não tendenciosas de D , dada por:

$$\text{Var}_{CR}(D) = \frac{(1-D^2)^2}{2L} \leq \text{Var}(\hat{D}), \quad (5.6)$$

Touzi et al. (1999) mostra que a estatística da coerência amostral \hat{D} derivada para regiões gaussianas podem ser ampliadas para regiões não-gaussianas que satisfazem o modelo multiplicativo. Portanto, a formulação descrita acima foi empregada para estimar a correlação *multi-look* de alvos com diferentes graus de heterogeneidade, presentes nas duas áreas de estudo, conforme apresentado no Capítulo 6.

5.3 Método de calibração polarimétrica multi-look

Com base nos fundamentos apresentados anteriormente, é descrito a seguir o novo método de calibração polarimétrica desenvolvido no presente trabalho. Para tal, são abordados nas seções seguintes as suposições do método, o modelo matemático e o algoritmo de solução numérica adotado para desenvolvimento do método em questão.

5.3.1 Motivação

Conforme descrito no Capítulo 3, diversos métodos de calibração polarimétrica têm sido propostos nos últimos anos, porém, com algumas condições que precisam ser satisfeitas em relação à arquitetura do sistema SAR e/ou a existência de alvos com características específicas na cena imageada. Portanto, a motivação para o desenvolvimento de um novo método de calibração polarimétrica foi apoiada nas seguintes considerações:

- a) Alguns métodos consideram a existência de reciprocidade do sistema SAR, ou seja, $[R] = [T]^T$, o que nem sempre é válido;

- b) Vários métodos desprezam o ruído do sistema no modelo de distorção linear;
- c) Necessidade de utilização de alvos conhecidos na imagem para obter a calibração do *channel imbalance*;
- d) Segundo Klein e Freeman (1991), a suposição de que as distorções $[R]$ e $[T]$ são constantes sobre todo o intervalo de coleta dos dados SAR pode não ser verdadeira, pois pode ocorrer que os ganhos de recepção podem ser permutados entre dois valores, dependendo se um retorno co-polarizado ou polarizado cruzado é esperado;
- e) Segundo Klein (1992), para sistemas SAR polarimétricos bem projetados, as matrizes $[R]$ e $[T]$ não são singulares, e as matrizes $[S]$ e $[N]$ são independentes;
- f) Segundo Ainsworth e Lee (2001), se a suposição de simetria azimutal dos alvos presentes na imagem não for consistente com os dados SAR, o que conduz a descorrelação das componentes cruzadas e co-polarizadas da matriz $[S]$, o processo de calibração irá forçar essa condição, o que irá ocasionar uma distorção na informação polarimétrica desejada;
- g) Conforme apresentado na Seção 5.1, a não correlação entre as imagens complexas *multi-look*, quando não existe superposição entre as funções de referência azimutal, relativas a diferentes visadas (*looks*), proporciona a obtenção de dados suficientes para a estimativa dos parâmetros de distorção dos sistemas PolSAR;
- h) Todas as distorções de amplitude e fase inseridas nos dados polarimétricos são causadas pelo sistema SAR, e, portanto são independentes da cena imageada.

De acordo com essas considerações, é proposto um novo método de calibração polarimétrica que independe da cena imageada e de alvos externos à imagem, baseado nas suposições a seguir descritas.

5.3.2 Suposições

A estimativa dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance*, referente ao novo método de calibração polarimétrica descrito no decorrer deste capítulo, é baseada nas seguintes suposições relativas ao sistema PolSAR e ao processo de formação das imagens polarimétricas:

- a) O modelo de distorção do sistema é linear e obedece à Equação 3.28, podendo ser modificado para $[O] = [R][R(\Omega)][S][R(\Omega)][T] + [N]$, nos casos onde o fenômeno da rotação de *Faraday* seja considerado, conforme descrito na Seção 3.5.2. Essa flexibilidade no modelo de distorção adotado possibilita que a suposição (b) tenha sempre validade;
- b) Existe reciprocidade na cena imageada, ou seja, $[S] = [S]^T$ ou $S_{hv} = S_{vh}$;
- c) As matrizes $[R]$ e $[T]$ não são singulares, ou seja, $|[R]| \neq 0$ e $|[T]| \neq 0$, o que permite a sua inversão;
- d) O ruído não é simétrico ($N_{hv} \neq N_{vh}$) e não correlacionado entre canais ($\langle N_p^* N_q \rangle = 0$, para $p, q = \{hh, hv, vv\}$ e $p \neq q$);
- e) O ruído não é correlacionado com o sinal ($\langle N_p S_p \rangle = 0$, para $p, q = \{hh, hv, vv\}$ e $p \neq q$), ou seja, as matrizes $[S]$ e $[N]$ são independentes;
- f) As matrizes de covariância de $[S]$, $[N]$ e $[O]$ podem ser aproximadas pela média amostral sobre uma região da imagem SAR (KLEIN, 1992);
- g) A informação proveniente de diferentes visadas (*looks*) na direção azimutal, sem superposição entre as funções de referência, produzirá matrizes $[S]$ descorrelacionadas;
- h) As distorções do sistema $[R]$, $[T]$ e $[N]$ são constantes para cada *look*;

5.3.3 Modelo matemático de calibração

O modelo matemático do novo método de calibração é baseado na Equação 3.11 e na suposição (b), de onde se obtém a seguinte equação:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{o}_{4L}} = \underbrace{\begin{bmatrix} Yk^2\alpha & (Yk\alpha w + Ykv) & Ywv \\ Yk^2\alpha u & (Yk\alpha + Ykuv) & Yv \\ Yk^2\alpha z & (Yk\alpha zw + Yk) & Yw \\ Yk^2\alpha uz & (Yk\alpha z + Yku) & Y \end{bmatrix}}_{[D_3]} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{hh} \\ n_{vh} \\ n_{hv} \\ n_{vv} \end{bmatrix}, \quad (5.7)$$

onde o vetor \mathbf{o}_{4L} representa as imagens PolSAR SLC. A partir da Equação 5.7 e das suposições (d), (e) e (f) da Seção 5.3.2, pode-se obter a equação que relaciona a matriz de distorção $[D_3]$ e a matriz de covariância observada $[Co] = \langle \mathbf{o}_{4L} \mathbf{o}_{4L}^\dagger \rangle$, dada por:

$$[Co] = \langle \mathbf{o}_{4L} \mathbf{o}_{4L}^\dagger \rangle = \underbrace{\begin{bmatrix} Cs_1 & Cs_{12} & Cs_{13} \\ Cs_{12}^* & Cs_2 & Cs_{23} \\ Cs_{13}^* & Cs_{23}^* & Cs_3 \end{bmatrix}}_{[Cs]} [D_3]^\dagger + \underbrace{\begin{bmatrix} N_{hh} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{vh} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{hv} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{vv} \end{bmatrix}}_{[Cn]}, \quad (5.8)$$

onde $Cs_p = \langle |S_p|^2 \rangle$, $Cs_{pq} = \langle S_p S_q^* \rangle$ e $N_j = \langle |n_j|^2 \rangle$ (onde $p, q = \{1, 2, 3\} = \{hh, hv, vv\}$ e $j = \{hh, hv, vh, vv\}$).

O método de calibração proposto consiste em solucionar um sistema de equações não-lineares e complexas, representado pela Equação 5.8, composto por 4 equações reais e 6 complexas, e 10 incógnitas complexas ($u, v, w, z, \alpha, k, Y, Cs_p$) e 7 incógnitas reais (N_j, Cs_{pq}), o que conduz a um sistema de equações indeterminado. Entretanto, é possível resolver essa indeterminação considerando-se as suposições (g) e (h), o que significa considerar que as matrizes de distorção do sistema $[D_3]$ e de covariância do ruído $[Cn]$ sejam iguais para todos os *pixels* localizados na mesma posição radial.

Considerando-se um conjunto de três de imagens PolSAR MLC, oriundas de 3 *looks* sem superposição, e supondo que a Equação 5.8 é válida para cada *look*, obtém-se um sistema não-linear composto por 30 equações (12 reais e 18 complexas) e 16 incógnitas complexas $(u, v, w, z, \alpha, k, Y, Cs_{p1}, Cs_{p2}, Cs_{p3})$ e 13 incógnitas reais $(N_j, Cs_{pq1}, Cs_{pq2}, Cs_{pq3})$, dado por:

$$f(X)_{(48 \times 1)} = \begin{bmatrix} \text{Vec}([D_3][Cs_1][D_3]^\dagger + [Cn] - [Co_1])_{(16 \times 1)} \\ \text{Vec}([D_3][Cs_2][D_3]^\dagger + [Cn] - [Co_2])_{(16 \times 1)} \\ \text{Vec}([D_3][Cs_3][D_3]^\dagger + [Cn] - [Co_3])_{(16 \times 1)} \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

onde $\text{Vec}(\cdot)$ é o operador de vetorização de matriz, $f(X) \in \mathfrak{R}$, $X = \{\Re\{x\}, \Im\{x\}\}$, $x = \{u, v, w, z, \alpha, k, Y, N_j, Cs_{pl}, Cs_{pql}\}$, e $[Co_l]$ e $[Cs_l]$ representam as matrizes de covariância observada e de espalhamento, respectivamente, para cada *look* $l = \{1, 2, 3\}$. Uma vez definido o modelo matemático para estimar os parâmetros de calibração $(u, v, w, z, \alpha, k, Y)$, empregou-se um método numérico iterativo para resolver o sistema de 48 equações reais não-lineares com 45 incógnitas, conforme descrito a seguir.

5.3.4 Método numérico de solução

Considerando-se que o número de incógnitas ou parâmetros ($N = 45$) é menor que o número de equações ($M = 48$), é necessário empregar um método de minimização baseado na técnica de mínimos quadrados para solucionar o sistema de equações representado pela Equação 5.9. A seguir é descrito o método de *Levenberg-Marquardt*, que foi utilizado para estimação dos parâmetros de calibração.

5.3.4.1 Método de Levenberg-Marquardt

O método de minimização de *Levenberg-Marquardt* utiliza as técnicas de mínimos quadrados para solução de sistemas de equações não-lineares, sendo considerado um método de convergência global. O termo “global” significa que o método converge para uma solução, a partir de qualquer condição inicial, caso esta solução exista. Muitos

métodos globalmente convergentes adotam como critério de avaliação do progresso do algoritmo a seguinte função objetivo:

$$F(X) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M f_j^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{f}(X)\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{f}(X)^T \mathbf{f}(X), \quad (5.10)$$

onde $\mathbf{f}(X)$ vem da Equação 5.9. O método clássico para minimizar qualquer função não-linear $F(X)$ é o método de Newton, que é baseado na linearização da função objetivo por meio da expansão em série de Taylor. Sendo $X^{(k)}$ a k -ésima estimativa de F , o valor de F é dado por (SILVA, 2003):

$$F(X + \Delta X) = F(X^{(k)}) + \Delta X^T \nabla F(X^{(k)}) + \frac{1}{2} \Delta X^T \nabla^2 F(X^{(k)}) \Delta X + \dots, \quad (5.11)$$

onde $\Delta X = X^{(k+1)} - X^{(k)}$, e $\nabla F = \mathbf{g}$ e $\nabla^2 F = [H]$ são o vetor jacobiano e a matriz hessiana, contendo, respectivamente, as derivadas parciais de primeira e segunda ordem de $F(X)$. A derivada da Equação 5.11, desprezando-se os termos de terceira ordem e superiores, é dada por:

$$\nabla F(X) \approx \mathbf{g}^{(k)} + [H]^{(k)} (X^{(k+1)} - X^{(k)}), \quad (5.12)$$

Igualando a Equação 5.12 à zero, para encontrar o mínimo da função, e sabendo-se que a relação entre a matriz hessiana $[H]$ e o vetor jacobiano \mathbf{g} , com a matriz jacobiana $[A]$, é dada por:

$$[H] = \left([A]^T [A] + \sum_{j=1}^M f_j \nabla^2 f_j \right) = ([A]^T [A] + [B]) \quad \text{e} \quad \mathbf{g} = [A]^T \mathbf{f}(X), \quad (5.13)$$

pode-se obter a solução iterativa do sistema descrito pela Equação 5.9, da seguinte forma:

$$([A]^T [A] + [B])(X^{(k+1)} - X^{(k)}) = -([A]^{(k)})^T \mathbf{f}(X^{(k)}) \quad (5.14)$$

A matriz $[A]^T [A]$, que precisa ser invertida a cada iteração, pode apresentar problemas de mal-condicionamento, o que pode conduzir a resultados divergentes e até mesmo a singularidade de $[A]^T [A]$. Para evitar esses problemas é usual adotar o método de *Levenberg-Marquardt* (JENNINGS e MCKEOWN, 1992), onde a matriz a ser invertida é modificada, fazendo-se $[B]=\nu[I]$ na Equação 5.14 ($\nu > 0$ e $[I]$ é a matriz identidade). Portanto, a chave do algoritmo de *Levenberg-Marquardt* é a escolha cuidadosa do parâmetro ν , que precisa ser relacionado com o módulo de $[A]^T [A]$, uma medida provida pelo traço dessa matriz. Maiores detalhes da implementação do algoritmo *Levenberg-Marquardt* podem ser obtidos em Levenberg (1944), Marquardt (1963) e Jennings e Mckeown (1992).

O algoritmo de *Levenberg-Marquardt* utilizado no presente trabalho foi extraído da biblioteca MINPACK (NETLIB, 2007), que é composta por códigos abertos na linguagem Fortran para solução de sistemas de equações não-lineares e problemas de mínimos quadrados não-lineares.

5.3.4.2 Solução inicial

Considerando-se a natureza iterativa do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, é necessário que uma solução inicial seja adotada para dar início ao processo de minimização da função objetivo $F(X)$. É importante que essa solução seja a mais próxima possível da solução desejada, para que o tempo de convergência do algoritmo seja reduzido, além de minimizar problemas de identificação de mínimos locais por parte do algoritmo utilizado. Portanto, devido à proximidade da solução desejada, os valores obtidos pelas Equações 3.14 a 3.17, com base nas imagens SLC, são utilizados como solução inicial dos parâmetros u, v, w, z, α e $N_1 = N_2 = N_3 = N_4$.

O método de estimativa dos valores iniciais dos parâmetros k e Y é baseado na Equação 3.12, suprimindo-se o vetor de ruído do sistema, de onde se obtém a seguinte equação:

$$\mathbf{o}_{4L} = \begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{bmatrix} = Y \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & \alpha w + v & vw \\ \alpha u & \alpha & v \\ \alpha z & 1 & w \\ \alpha uz & \alpha z + u & 1 \end{bmatrix}}_{[D_1]} \underbrace{\begin{bmatrix} k^2 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{[D_2]} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix}, \quad (5.15)$$

onde $[D_1]$ é determinada pela estimativa inicial dos parâmetros u, v, w, z, α . Considerando-se três conjuntos de imagens PolSAR MLC, oriundas de 3 *looks* sem superposição, e assumindo-se que a Equação 5.15 é válida para cada *look*, obtém-se um sistema não-linear composto por 12 equações complexas (24 reais) e 11 incógnitas complexas (22 reais), dado por:

$$\mathbf{f}(X)_{(24,x1)} = \begin{bmatrix} \left(Y[D_1][D_2][S_{hh1} \ S_{hv1} \ S_{vv1}]^T - \mathbf{o}_{4L1} \right)_{(8,x1)} \\ \left(Y[D_1][D_2][S_{hh2} \ S_{hv2} \ S_{vv2}]^T - \mathbf{o}_{4L2} \right)_{(8,x1)} \\ \left(Y[D_1][D_2][S_{hh3} \ S_{hv3} \ S_{vv3}]^T - \mathbf{o}_{4L3} \right)_{(8,x1)} \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

onde $\mathbf{f}(X) \in \mathfrak{R}$, $X = \{\Re\{x\}, \Im\{x\}\}$, $x = \{k, Y, S_{hh1}, S_{hv1}, S_{vv1}\}$, e \mathbf{o}_{4L} representa o vetor de espalhamento observado para cada *look* $l = \{1, 2, 3\}$. Com base no sistema não-linear definido pela Equação 5.16 e utilizando-se a função objetiva descrita pela Equação 5.10, é aplicado o método de *Levenberg-Marquardt* para estimar os parâmetros de calibração k e Y , onde a solução inicial é obtida por funções que geram valores de amplitude e fase normalmente e uniformemente distribuídos entre $[-\pi, \pi]$ e $[0, 1]$, respectivamente. Essa estimativa inicial é empregada para diferentes posições em *range*, representando as colunas pares, de modo a compreender toda a faixa de imageamento. Em seguida, os valores estimados para os parâmetros k e Y são interpolados para extrair os respectivos valores correspondentes às colunas ímpares, que não foram utilizados no cálculo inicial, de modo a obter valores refinados dos parâmetros em questão.

5.3.4.3 Determinação do tamanho do filtro da imagem covariância

Uma vez definido o modelo matemático, o algoritmo iterativo de solução e os valores iniciais do método numérico de solução, restam apenas para serem definidos mais dois

parâmetros que estão implícitos na nova metodologia de calibração polarimétrica, que são as dimensões da janela de filtragem para obtenção da imagem covariância, conforme apresentado na Equação 5.8.

Para determinar as dimensões dessa janela, a solução adotada foi baseada no cálculo da *Função de Autocorrelação Espacial* (ACF), que descreve a correlação entre os processos, séries ou sinais em diferentes pontos no tempo ou espaço. Considerando-se que as imagens SAR representam sinais estacionários de segunda ordem, ou seja, os momentos de 1ª e 2ª ordem não variam no espaço, pode-se calcular o valor da ACF para as direções x (linhas) e y (colunas) da imagem de interesse $z \in C$, com base na seguinte equação:

$$R_d(lag) = \frac{\left| \sum_{j=1}^N (z_j - \bar{z})(z_{j+lag} - \bar{z})^* \right|}{\sqrt{\sum_{j=1}^N |z_j - \bar{z}|^2} \sqrt{\sum_{j=1}^N |z_{j+lag} - \bar{z}|^2}} \quad d = \{x, y\}, \quad (5.17)$$

onde o valor de $R_d(lag)$ estará compreendido no intervalo $(0,1]$, e lag é a distância em *pixels*, em uma dada direção d , entre as imagens z_j e z_{j+lag} . A medida que o valor da variável lag aumenta, o valor da ACF $\rightarrow 0$, o que indica que as imagens z_j e z_{j+lag} tendem a serem descorrelacionadas.

Com base nessa idéia, durante a fase de estimativa dos parâmetros de calibração, a imagem PolSAR é dividida em blocos, e para cada bloco são calculados as distâncias na direção das linhas ($lagx$) e colunas ($lagy$), que fornecem valores de autocorrelação menores que um determinado limiar. No caso do presente trabalho foi definido o limiar de 0,05 para indicar que os *pixels* que estejam afastados por uma distância superior ao lag calculado, em uma determinada direção, possam ser considerados descorrelacionados. Com isso, apenas valores correlacionados serão considerados na estimativa da covariância, onde o tamanho da janela de filtragem será de $(2lagx + 1) \times (2lagy + 1)$. A vantagem desse procedimento adotado é que a janela que irá

ser utilizada para calcular a imagem covariância será “adaptativa”, ou seja, dependerá dos alvos presente no bloco que está sendo processado.

5.3.5 Obtenção dos dados calibrados

Dependendo das análises a serem realizadas com a matriz de espalhamento, e caso se deseje analisar o comportamento separado das componentes HV e VH, pode-se obter os dados PolSAR calibrados não simetrizados ($S_{hv} \neq S_{vh}$). Com base nas imagens PolSAR SLC, representas pelo vetor \mathbf{o}_{4L} , e na Equação 3.11, desprezando-se o vetor dos ruídos e empregando-se os parâmetros de calibração estimados, obtêm-se os elementos da matriz de espalhamento não simetrizada por meio da seguinte equação:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{o}_{4L}} = \underbrace{\begin{bmatrix} Yk^2\alpha & Yk\alpha w & Ykv & Ywv \\ Yk^2\alpha u & Yk\alpha & Ykuv & Yv \\ Yk^2\alpha z & Yk\alpha zw & Yk & Yw \\ Yk^2\alpha uz & Yk\alpha z & Yku & Y \end{bmatrix}}_{[D_4]} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

A outra abordagem de calibração que pode ser empregada é a obtenção da matriz de espalhamento simetrizada, com base na Equação 5.18, onde:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} O_{hh} \\ O_{vh} \\ O_{hv} \\ O_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{o}_{4L}} = \underbrace{\begin{bmatrix} Yk^2\alpha & (Yk\alpha w + Ykv) & Ywv \\ Yk^2\alpha u & (Yk\alpha + Ykuv) & Yv \\ Yk^2\alpha z & (Yk\alpha zw + Yk) & Yw \\ Yk^2\alpha uz & (Yk\alpha z + Yku) & Y \end{bmatrix}}_{[D_3]} \underbrace{\begin{bmatrix} S_{hh} \\ \bar{S}_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix}}_{\mathbf{s}} \quad (5.19)$$

O sistema definido pela Equação 5.19 é sobre determinado para o vetor de interesse $\mathbf{s} = [S_{hh} \quad \bar{S}_{hv} \quad S_{vv}]^T$, com solução definida pelo método de mínimos quadrados, dada por (Quegan, 1994):

$$\mathbf{s} = ([D_3]^\dagger [D_3])^{-1} [D_3]^\dagger \mathbf{o}_{4L} \quad (5.20)$$

A vantagem dessa abordagem é que o processo de simetrização da matriz de espalhamento calibrada não é tratado como uma operação separada do processo de calibração, e sim, está embutida no processo, conforme descrito em Quegan (1994). Além disso, a componente polarizada cruzada simetrizada (\bar{S}_{hv}) não é calculada pela simples média aritmética das componentes O_{hv} e O_{vh} , e sim pela aplicação de pesos a cada componente, conforme descrito em Quegan (1994), onde a simplificação da Equação 5.20 fornece a seguinte expressão:

$$\bar{S}_{hv} = \frac{O_{hv} + \alpha^* O_{vh}}{1 + |\alpha|^2} \quad (5.21)$$

Em Quegan (1994) foi demonstrado que, dependendo de certas condições de imageamento SAR, em que o parâmetro α se afaste significativamente do valor unitário, é necessário empregar a ponderação das componentes O_{hv} e O_{vh} , por meio da Equação 5.20. Portanto, essa abordagem de simetrização é mais geral que outras descritas na literatura (FREEMAN et al., 1992; VAN ZYL, 1990) e pode ser empregada em qualquer situação, ao invés da simples média das componentes polarizadas cruzadas.

5.3.6 Considerações sobre a rotação de Faraday

Conforme descrito na Seção 3.5.2, o fenômeno da rotação de *Faraday* não afeta os dados provenientes de sistemas PolSAR aerotransportados, porém para dados orbitais com certas características operacionais, esse fenômeno não pode ser desprezado. Por se tratar de uma correção necessária em determinadas condições de imageamento, será descrito a seguir pequenas modificações que podem ser realizadas no modelo matemático descrito na Seção 5.3.3, de modo a permitir que a calibração polarimétrica seja realizada simultaneamente com a correção da rotação de *Faraday*. Apesar de não ter sido avaliada no presente trabalho, devido a indisponibilidade de imagens PolSAR orbitais, essa abordagem demonstra a flexibilidade e o caráter mais abrangente do novo método de calibração desenvolvido, quando comparado com os demais métodos existentes.

Calculando-se a matriz de covariância observada $[Co] = \langle \mathbf{o}_{4L} \mathbf{o}_{4L}^\dagger \rangle$, com base nas Equações 3.11 e 3.24, obtém-se o seguinte modelo de calibração para dados PolSAR que tenham sido afetados pela rotação de *Faraday*:

$$\mathbf{f}(X)_{(48 \times 1)} = \begin{bmatrix} \text{Vec}([M][Cs_1][M]^\dagger + [Cn] - [Co_1])_{(16 \times 1)} \\ \text{Vec}([M][Cs_2][M]^\dagger + [Cn] - [Co_2])_{(16 \times 1)} \\ \text{Vec}([M][Cs_3][M]^\dagger + [Cn] - [Co_3])_{(16 \times 1)} \end{bmatrix}, \quad (5.22)$$

onde $\mathbf{f}(X) \in \mathfrak{R}$, $X = \{\Re\{x\}, \Im\{x\}\}$, $X = \{u, v, w, z, \alpha, k, Y, \Omega, N_j, Cs_{pl}, Cs_{pql}\}$, Ω é o ângulo devido a rotação de *Faraday*, e a matriz $[M]$ é dada por:

$$[M] = \left(\begin{bmatrix} \alpha k & \alpha k z \\ v & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\text{sen}(\Omega) \\ \text{sen}(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix} \right)^T \otimes \left(\begin{bmatrix} Yk & Yw \\ Yuk & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Omega) & -\text{sen}(\Omega) \\ \text{sen}(\Omega) & \cos(\Omega) \end{bmatrix} \right) \quad (5.23)$$

A Equação 5.22 define o modelo matemático para estimar os parâmetros de calibração $(u, v, w, z, \alpha, k, Y, \Omega)$, onde o método numérico iterativo descrito anteriormente pode ser empregado para resolver o sistema de 48 equações reais não-lineares com 46 incógnitas. Com relação à solução inicial do parâmetro Ω , pode-se empregar a mesma metodologia descrita na Seção 5.3.4.2, onde a Equação 5.16 pode ser substituída por:

$$\mathbf{f}(X)_{(24 \times 1)} = \begin{bmatrix} ([M][S_{hh1} \ S_{hv1} \ S_{vv1}]^T - \mathbf{o}_{4L1})_{(8 \times 1)} \\ ([M][S_{hh2} \ S_{hv2} \ S_{vv2}]^T - \mathbf{o}_{4L2})_{(8 \times 1)} \\ ([M][S_{hh3} \ S_{hv3} \ S_{vv3}]^T - \mathbf{o}_{4L3})_{(8 \times 1)} \end{bmatrix}, \quad (5.24)$$

onde $\mathbf{f}(X) \in \mathfrak{R}$, $X = \{\Re\{x\}, \Im\{x\}\}$, e $x = \{k, Y, \Omega, S_{hh1}, S_{hv1}, S_{vv1}\}$. Neste caso, obtém-se um sistema não-linear composto por 12 equações complexas (24 equações reais) e 11 incógnitas complexas e uma real (23 incógnitas reais), a estimativa inicial do parâmetro Ω pode ser obtida com uma função que gera valores normalmente distribuídos entre $[-\pi, \pi]$.

De modo análogo ao que foi descrito na Seção 5.3.5, pode-se obter a matriz de espalhamento calibrada simetrizada, com a minimização das distorções impostas pelo sistema SAR e pela rotação de *Faraday*, por meio da seguinte expressão:

$$\mathbf{s} = \left([\mathbf{M}]^\dagger [\mathbf{M}] \right)^{-1} [\mathbf{M}]^\dagger \mathbf{o}_{4L} \quad (5.25)$$

onde a matriz $[\mathbf{M}]$ é dada pela Equação 5.23.

É importante destacar que, a inclusão da matriz de correção $[\mathbf{R}(\Omega)]$ no modelo de calibração mantém válida a condição de reciprocidade da matriz $[\mathbf{S}]$, de acordo com a suposição (a) da Seção 5.3.2.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os aspectos que motivaram o desenvolvimento das ferramentas computacionais de calibração e os resultados obtidos nas diferentes etapas de pós-processamento das imagens PolSAR descritas no Capítulo 4. Esses resultados englobam desde a correção do padrão de irradiação da antena do sensor SAR R99B, passando por uma análise radiométrica e geométrica das imagens em questão, seguido de uma comparação entre os métodos de calibração polarimétrica abordados nesse trabalho e por fim uma avaliação preliminar da influência do processo de calibração polarimétrica sobre as imagens da entropia e do ângulo α .

6.1 Desenvolvimento e implementação de ferramentas de calibração de imagens PolSAR

6.1.1 Motivação

Concluída a fase de definição metodológica deste trabalho, contatou-se que, a obtenção dos resultados de interesse, que compreendem a calibração de imagens PolSAR, geração de relatórios técnicos, e a visualização gráfica dos resultados, demandaria o emprego de diversas ferramentas computacionais para processamento dos dados PolSAR.

Em função disso, foi realizada uma análise detalhada das funcionalidades dos principais aplicativos comerciais e livres disponíveis na área de pós-processamento digital de imagens SAR, com a finalidade de identificar o aplicativo que atenderia a demanda de calibração proposta no presente trabalho. Na Tabela 6.1 estão descritos os principais aplicativos pesquisados, que dispõem de algum tipo de ferramenta para visualização e/ou calibração de dados PolSAR no formato complexo ou em amplitude.

Analisando as informações contidas na Tabela 6.1, conclui-se que a demanda de processamento exigida neste trabalho não seria satisfeita pelos aplicativos em questão, pois, atualmente, não existe um único aplicativo comercial ou livre que consolide as principais metodologias de calibração de dados PolSAR, e que estejam associadas às funcionalidades interativas com o usuário de visualização gráfica e de saída de dados.

Tabela 6.1 – Principais aplicativos para pós-processamento de dados PolSAR.

Aplicativo	Instituição	Distribuição	Iteratividade com o Usuário	Ferramentas Disponíveis	Inclusão de Ferramentas pelo Usuário	Referência Bibliográfica
CALPRO	VEXCEL	Comercial	Disponível	(b), (d), (f), (m)	Não disponível	VEXCEL (2008)
SARP3	<i>Canadian Space Agency</i>	Livre	Disponível	(o)	Não disponível	VAN DER SANDEN e THOMAS (2004)
Gamma SAR and INSAR	<i>Gamma Remote Sensing</i>	Comercial	Disponível	(c), (l), (m)	Disponível	GAMMA (2006)
ENVI	<i>ITT Visual Information Solution</i>	Comercial	Disponível	(a), (d), (l), (m), (n), (o)	Disponível	ITT (2006)
Geomatica	PCI Geomatics	Comercial	Disponível	(a), (d), (i), (l), (m), (o)	Disponível	PCI GEOMATICS (2005 e 2006)
SARscape	Sarmap	Comercial	Disponível	(d), (f), (i), (l), (m), (o)	Não disponível	SARMAP (2007)
POLCAL	JPL/NASA	Não disponível	Não disponível	(c), (d), (e), (f), (h), (i), (p)	Não disponível	VAN ZYL et al. (1990)
RAT	<i>Berlin University of Technology</i>	Livre	Disponível	(c), (f), (h), (l), (m), (o)	Disponível	BUT (2008)
PolSARPro	ESA	Livre	Parcial	(f), (m), (k), (o)	Disponível	ESA (2008)
SARCON		Não disponível	Disponível	(b), (c), (d), (m), (p)	Não disponível	MEADOWS (2002)
BEST		Livre	Disponível	(d), (q)	Não disponível	ESA (2006)
PWS	<i>Canadian Centre for Remote Sensing</i>	Livre	Disponível	(c), (o)	Não disponível	TOUZI e CHARBONNEAU (2004)

Legenda:

- (a) Correção do Padrão da Antena SAR com base na imagem completa;
- (b) Correção do Padrão da Antena SAR com base em alvos homogêneos;
- (c) Análise da resposta impulsiva de alvos pontuais;
- (d) Calibração absoluta (imagens σ^0). No caso do ENVI, apenas para os satélites ERS e RADARSAT;
- (e) Calibração de Fase;
- (f) Calibração Polarimétrica;
- (g) Correção da rotação de *Faraday*;
- (h) Simetrização ($S_{hv} = S_{vh}$);
- (i) Correção da área do espalhador devido à declividade;
- (j) Correção da orientação de polarização devido à declividade;
- (k) Processamento dos métodos de calibração em lote (*batch*);
- (l) Visualização gráfica dos resultados;
- (m) Suporte para entrada e saída de diferentes formatos de imagens SAR;
- (n) Armazenamento e visualização da resposta polarimétrica apenas para os sensores AIRSAR e SIR-C;
- (o) Visualização da resposta polarimétrica;
- (p) Geração de relatórios técnicos;
- (q) Suporte apenas para o sensor/satélite ASAR/ENVISAT.

Portanto, a necessidade de implementação de alguns processos de calibração PolSAR, a não disponibilidade de funcionalidades gráficas e de saída de dados em um único ambiente de processamento SAR, a necessidade de desenvolver ferramentas de processamento para os blocos SAR gerados pelo aplicativo SPSAR, e a utilização de um aplicativo que possibilitasse o desenvolvimento e a integração de novas funcionalidades com aquelas existentes, foram os principais aspectos que motivaram o desenvolvimento de um conjunto de ferramentas computacionais que agregassem quase a totalidade das funcionalidades apresentadas na Tabela 6.1, conforme descrito a seguir.

6.1.2 Concepção das ferramentas desenvolvidas

O objetivo desta fase do trabalho foi o desenvolvimento do maior número possível de ferramentas de calibração, que estivessem disponíveis em um único ambiente amigável de processamento de imagens PolSAR, agregando funcionalidades interativas com usuários, especializados ou não na área de calibração SAR, compostas por interfaces gráficas, mensagens de erro e manuais de ajuda integrados com as ferramentas desenvolvidas. Além disso, a concepção das aludidas ferramentas foi baseada na idéia de apresentar, sempre que possível, a visualização/edição gráfica e geração de relatórios técnicos dos resultados obtidos. É importante destacar que todas as informações gráficas e relatórios podem ser exportados, respectivamente, para formatos genéricos de imagem (TIFF, BMP, JPEG, etc.) e de texto (ASCII), com a finalidade de facilitar o trabalho de análise e a publicação dos resultados obtidos pelo usuário.

Com exceção da calibração de fase, que está embutida na calibração polarimétrica baseada no método de Quegan (Seção 3.4.1), e da correção da área do espalhador devido à topografia, que necessita de modelos digitais de elevação para realizar tal correção e que não é objeto deste trabalho, foi possível agregar em um único ambiente de processamento de imagens SAR um conjunto bem abrangente de técnicas de calibração e de ferramentas auxiliares para visualização de dados que não estão disponíveis em outros aplicativos. As ferramentas computacionais desenvolvidas podem ser divididas em dois grupos, a saber:

- a) **Ferramentas de calibração SAR:** agregam os processos de calibração de dados PolSAR complexos e em amplitude, conforme descrito no Capítulo 3, que por sua vez, foram subdivididas em:
- **Calibração de amplitude:** composta por quatro ferramentas computacionais voltadas para a correção das distorções impostas às amplitudes da matriz $[S]$ pelo sistema SAR, pelo meio de propagação e pela topografia da região imageada, e que executam a *Calibração Absoluta*, *Calibração do Padrão da Antena*, *Calibração da Rotação de Faraday* e a *Calibração da Orientação de Polarização*;
 - **Calibração polarimétrica:** ferramenta computacional voltada para a correção do *cross-talk* e do *channel imbalance*, sendo baseada no método de calibração polarimétrica de Kimura/Quegan e em alvos pontuais de referência;
 - **Calibração em lote (*Batch*):** tem por finalidade a automatização do processo de calibração, por intermédio do processamento em lote (*batch*) das ferramentas de calibração desenvolvidas, considerando-se as características do sensor radar empregado no imageamento, do meio de propagação, da topografia da cena imageada, dos formatos dos dados SAR de entrada e saída, e, fundamentalmente, do nível de especialização do usuário na área de calibração SAR.
- b) **Ferramentas auxiliares:** agregam algumas funcionalidades de processamento de imagens PolSAR complexas e de análise/visualização gráfica de resultados, em complemento as ferramentas de calibração desenvolvidas, compostas pelas seguintes ferramentas computacionais:
- **Análise de alvos:** tem por finalidade a visualização gráfica da resposta polarimétrica e a análise dos dados PolSAR de alvos pontuais e distribuídos;
 - **Processamento de blocos SPSAR:** agrega várias funcionalidades de processamento digital de imagens (reamostragem, mosaico, conversão de

formatos, etc.), direcionadas para os blocos de imagens PolSAR complexas geradas pelo aplicativo SPSAR, conforme descrito na Seção 4.7;

- **Entropia/ângulo α /anisotropia:** tem por finalidade a geração de imagens referentes aos parâmetros entropia, ângulo α e anisotropia (Seção 2.5.2), e a visualização de dados no plano Entropia/Ângulo α (Seção 2.5.3).

Para a implementação das ferramentas de calibração e auxiliares, buscou-se identificar um sistema de processamento digital de imagens SAR que permitisse o desenvolvimento das funcionalidades requeridas, e que fosse acessível para uma parcela significativa da comunidade de usuários de sensoriamento remoto. Das opções existentes, foi selecionado o sistema ENVI/IDL, em função das seguintes vantagens:

- a) O ENVI é um sistema amigável, amplamente difundido na comunidade de usuários de sensoriamento remoto, baseado em interfaces gráficas *ponto-e-click* interativas com o usuário (*GUI*) para processamento de imagens de vários tamanhos e formatos (real e complexo), e para a visualização e análise de dados obtidos por sensores remotos aerotransportados e orbitais. Além disso, o ENVI possui uma série de funções para processamento de imagens SAR monoespectrais e polarimétricas;
- b) A linguagem de programação IDL é um ambiente de trabalho completo para análise e visualização interativa de dados de qualquer natureza, combinando o poder de uma linguagem de quarta geração, estruturada e baseada em vetores, com avançadas ferramentas de análise matemático-estatísticas, de representação gráfica, processamento integrado de imagens, e com a capacidade de exibir com facilidade conjuntos de ferramentas para o uso das *GUI*;
- c) O uso combinado do ENVI e do IDL possibilita que, o próprio usuário desenvolva e integre, ao sistema ENVI, novas ferramentas de processamento digital de imagens (ex: classificação, segmentação, filtragem, etc.), pois o ENVI possui uma biblioteca de rotinas escritas em IDL, que incorporam diversas funcionalidades proprietárias do ENVI, e que podem ser combinadas com as rotinas disponíveis no ambiente de programação IDL.

Apesar do aplicativo ENVI ser dotado de algumas funções de processamento de imagens SAR, as opções disponíveis na versão atual (ENVI 4.5) não são adequadas para a calibração de imagens PolSAR, conforme apresentado na Tabela 6.1. Com a finalidade de aprimorar as funcionalidades do aplicativo em questão e aproveitar as várias funções auxiliares disponíveis (leitura de imagens de vários formatos, biblioteca de rotinas, etc.) e as de processamento de dados SAR (filtragem, correções geométricas, etc.), as ferramentas de calibração para dados PolSAR foram desenvolvidas em IDL e integradas ao ENVI, conforme descrito no Apêndice B. Com base nessas ferramentas foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

6.2 Correção do padrão de irradiação da antena

O primeiro pós-processamento realizado com as imagens SAR foi a correção do padrão de irradiação da antena SAR na banda L. Com base em alvos homogêneos dispostos ao longo da direção radial, foram obtidas as respectivas variações radiométricas das componentes polarimétricas para as três faixas de estudo, sendo que para as Faixas 1 e 2 (área de estudo 1) foram selecionadas amostras de floresta primária, e para a Faixa 3 (área de estudo 2) foram selecionadas amostras de corpos d'água.

Empregando-se a rotina descrita na Seção B.3.1 foram obtidos os perfis ajustados por polinômios do 7º, do 6º e do 5º grau, referentes à variação radiométrica na direção radial dos referidos alvos, para as Faixas 1, 2 e 3, respectivamente. A partir das composições coloridas (R-HH, G-HV e B-VV) apresentadas nas Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3, é possível observar os efeitos radiométricos antes e depois da correção do padrão de irradiação, aplicado a um pequeno trecho azimutal, compreendendo toda a largura radial das três faixas de imageamento empregadas neste trabalho.

A imagem apresentada na Figura 6.1 corresponde ao mosaico dos blocos da Faixa 1 localizados na posição de Azimute = {7} e de Range = {0,1,2,3}. Para a Faixa 2, a imagem apresentada na Figura 6.2 corresponde ao mosaico dos blocos localizados na posição de Azimute = {22} e de Range = {0,1,2,3}. No caso da Faixa 3, a imagem apresentada na Figura 6.3 corresponde ao mosaico dos blocos localizados na posição de Azimute = {18} e de Range = {0,1,2,3}.

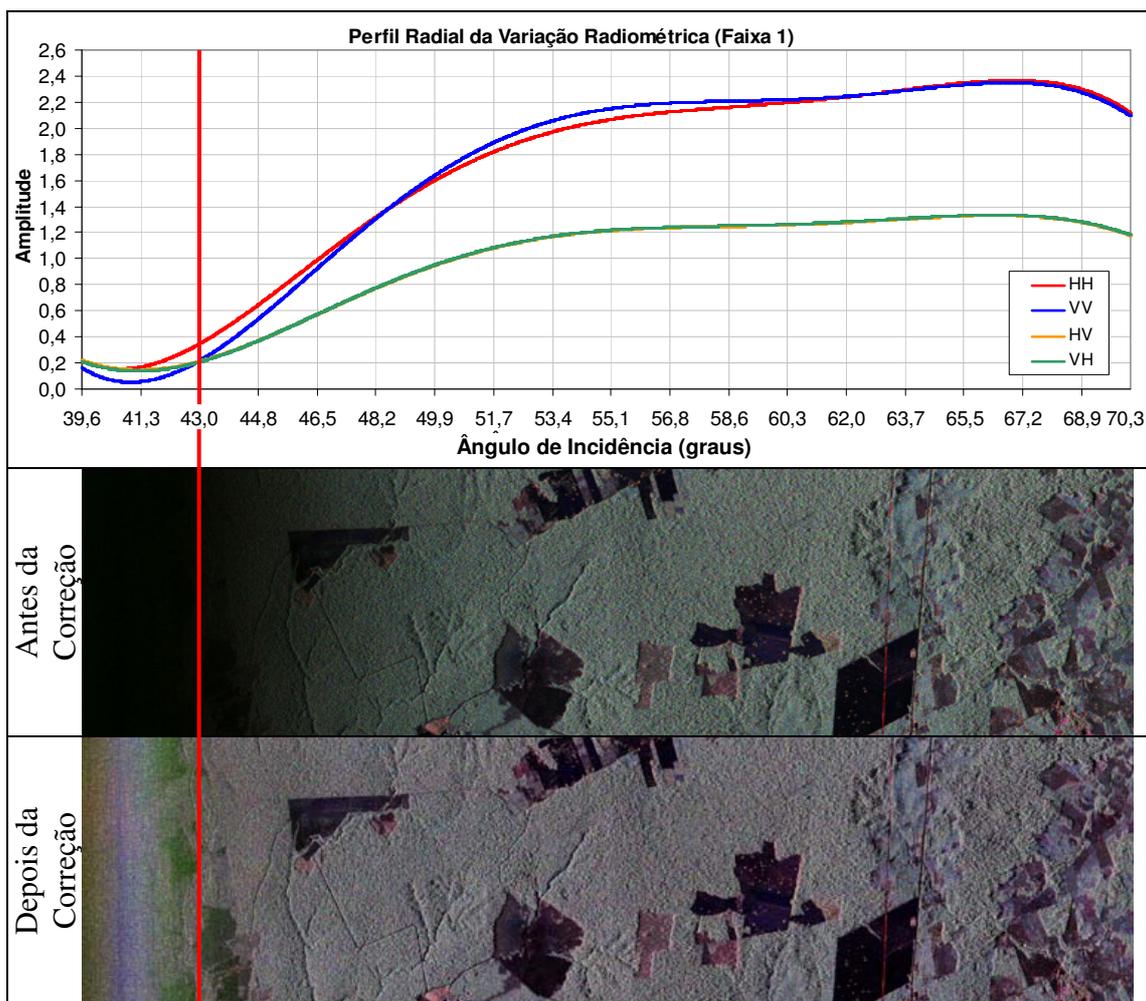


Figura 6.1 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Tapajós-PA (Faixa 1).

A correção radiométrica do padrão de irradiação da antena para as imagens em amplitude HH, VV, HV e VH, foi baseada no método multiplicativo. Uma parte da imagem da Faixa 1, correspondente ao alcance próximo (*near range*), não foi utilizada, como mostra a Figura 6.1, pois os baixos valores radiométricos nesta faixa possuem estatísticas diferentes dos alvos equivalentes localizados no restante da faixa utilizada.

A explicação desse fato se deve à geometria de imageamento, conforme apresentado na Figura 6.4, onde para a Faixa 1, a região do *near range*, compreendida entre os valores de $39,6^\circ$ a $43,0^\circ$ do ângulo de incidência, conforme destacado por uma linha vermelha na Figura 6.1, o que equivale a 500 pixels na imagem, foi iluminada pelo radar com

muito pouca radiação, quando comparada com a região localizada a partir do ângulo de incidência de aproximadamente 61°, referente a direção do lóbulo principal da radiação emitida pelo radar. A consequência desse fato foi a diminuição significativa da relação sinal/ruído dessa região, sem informação relevante do sinal de retorno dos alvos existentes nesta porção das componentes polarimétricas, conforme pode se observado na composição colorida após a correção do padrão da antena apresentada na Figura 6.1.

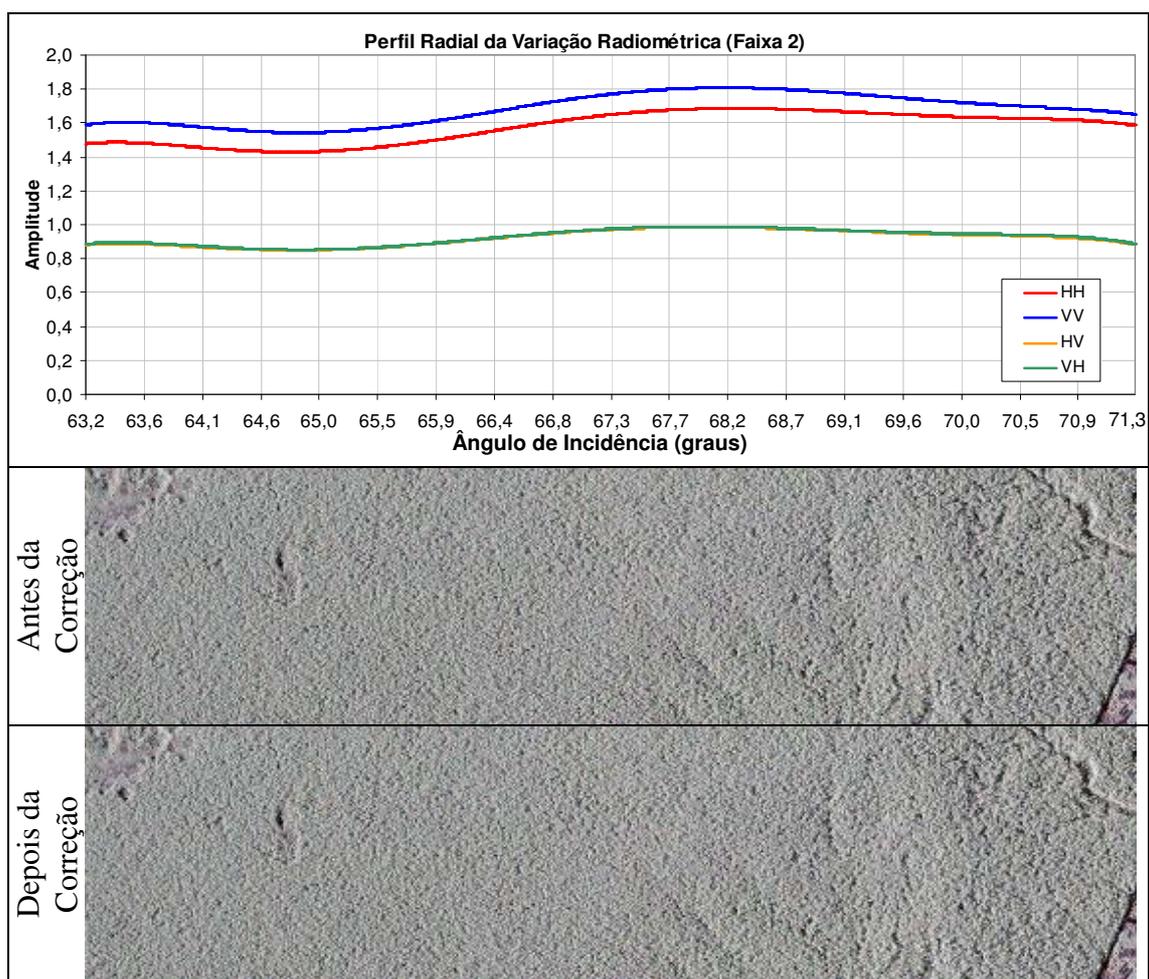


Figura 6.2 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Tapajós-PA (Faixa 2).

Outro aspecto interessante a se notar é com relação à variação radiométrica mais pronunciada no perfil da Faixa 1, quando comparado com os perfis das Faixas 2 e 3, o que novamente é explicado pela maior largura radial da faixa de imageamento,

conforme apresentado na Figura 6.4. Entretanto, considerando-se o mesmo intervalo do ângulo de incidência para as três faixas de estudo, observa-se uma concordância entre os perfis ajustados, conforme se pode observar quando comparamos o range de $49,2^\circ$ a $67,2^\circ$ entre as Faixas 1 e 3, e para o intervalo de $63,2^\circ$ a $70,3^\circ$ entre as Faixas 1 e 2.

Para a Faixa 2, devido a pequena variação dos valores do ângulo de incidência próximos a direção do lóbulo principal da antena SAR, ocorre uma variação radiométrica bem menor entre os *pixels* ao longo da direção radial, o que ocasiona uma correção quase que imperceptível nos níveis de cinza das respectivas imagens, conforme observado na Figura 6.2, antes e depois da correção em questão.

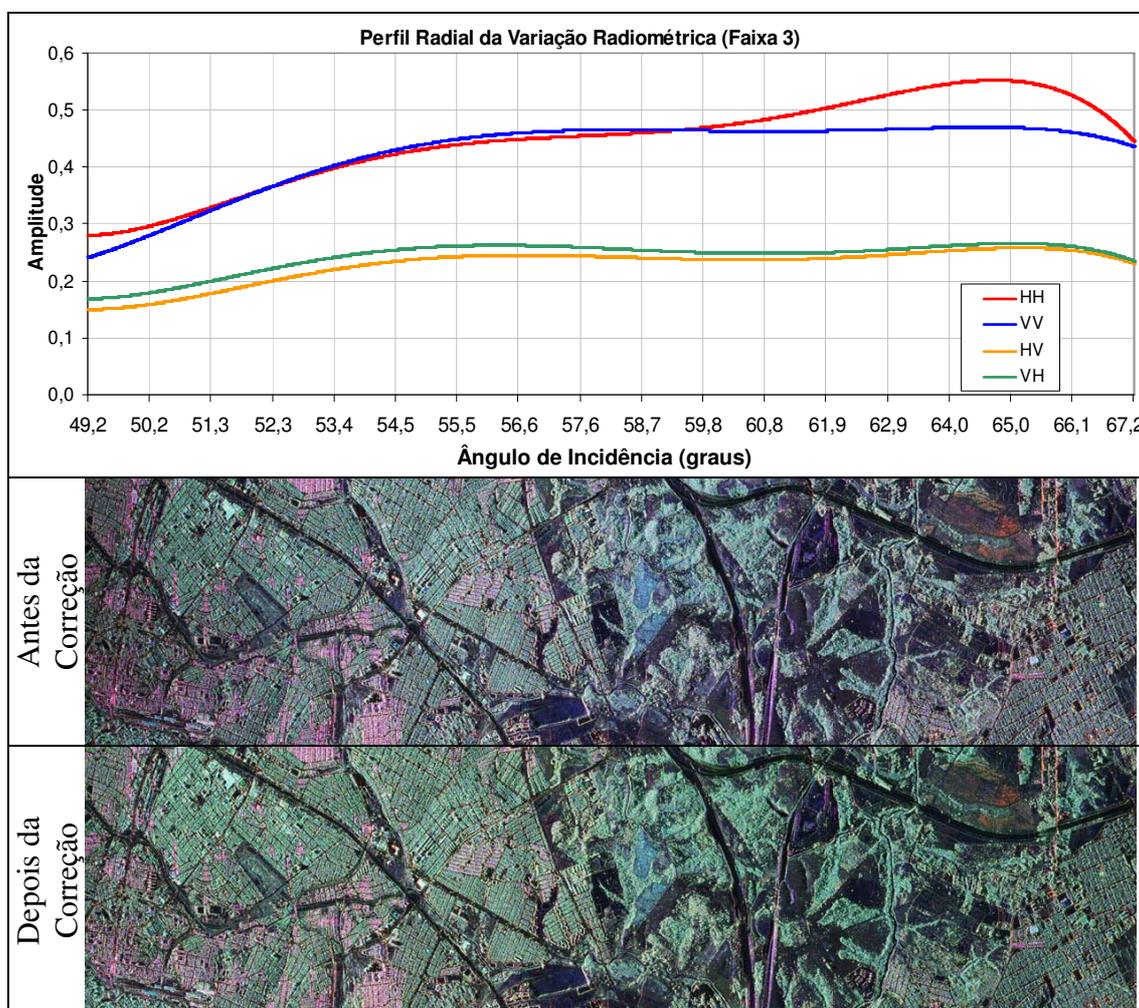


Figura 6.3 – Perfil da variação radiométrica das componentes polarimétricas na direção de alcance na região de Campinas-SP (Faixa 3).

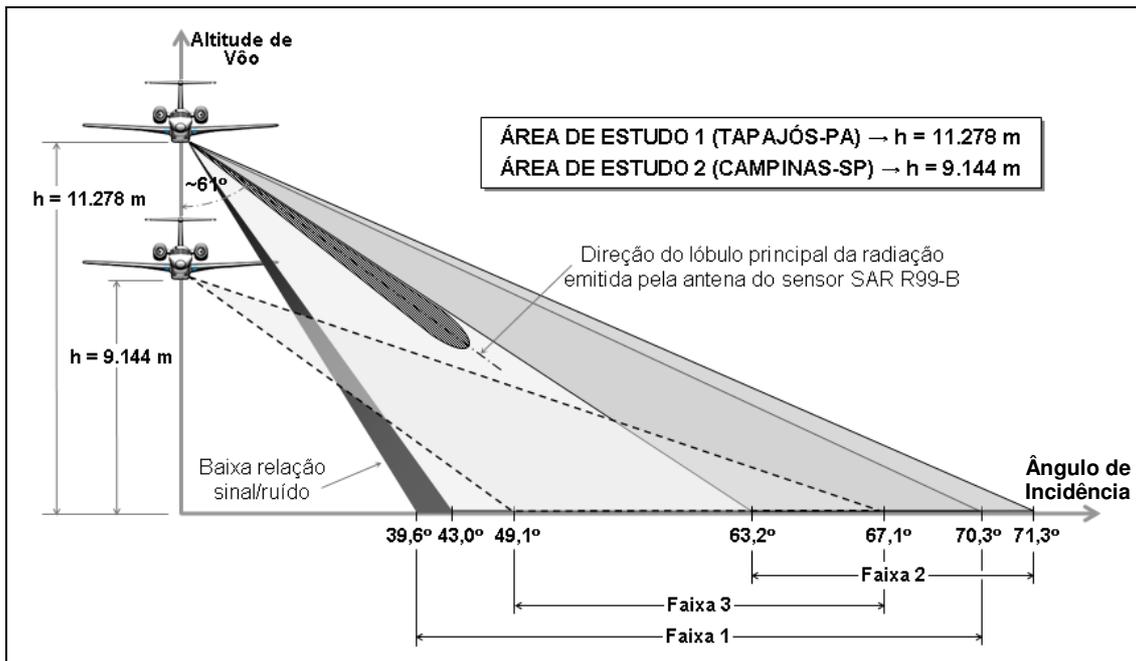


Figura 6.4 – Geometria de imageamento para as Faixas 1, 2 e 3 das áreas de estudo.

6.3 Análise preliminar das imagens PolSAR

A recente disponibilidade de um grande número de imagens PolSAR, a demanda dos usuários de sensoriamento remoto no Brasil, a carência de estudos científicos mais aprofundados e a oportunidade de utilizar, como referência, um número significativo de refletores de canto, em diferentes áreas de estudo, motivou a avaliação detalhada da qualidade radiométrica e geométrica das imagens do sensor SAR R99B, conforme descrito a seguir.

6.3.1 Avaliação radiométrica

Concluída a correção do padrão de irradiação da antena SAR, a primeira análise realizada sobre as imagens processadas foi baseada na verificação do retroespalhamento polarimétrico produzido pelos refletores instalados nas áreas de estudo, com a finalidade de identificar possíveis distorções no processamento SAR e na qualidade do sinal de retorno dos refletores. Pode-se observar na Figura 6.5 que, para o refletor instalado no ponto PCR01 (área de estudo 1), e que foi facilmente identificado na imagem SAR, o sinal de retorno das componentes co-polarizadas (HH e VV) são bem maiores que o

signal das componentes polarizadas cruzadas (HV e VH). Esse resultado é comprovado para todos os refletores instalados nas áreas de estudo, conforme a análise qualitativa do gráfico apresentado na Figura 6.6, cujos resultados estão coerentes com a matriz de espalhamento ideal do alvo artificial em questão, conforme descrito na Seção 2.4.2.

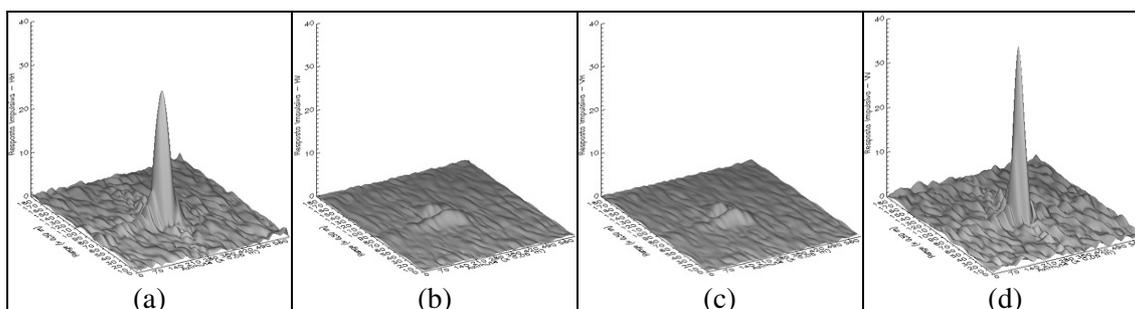


Figura 6.5 – Valores da amplitude das componentes polarimétricas (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV, referentes ao sinal de retorno do refletor PCR01.

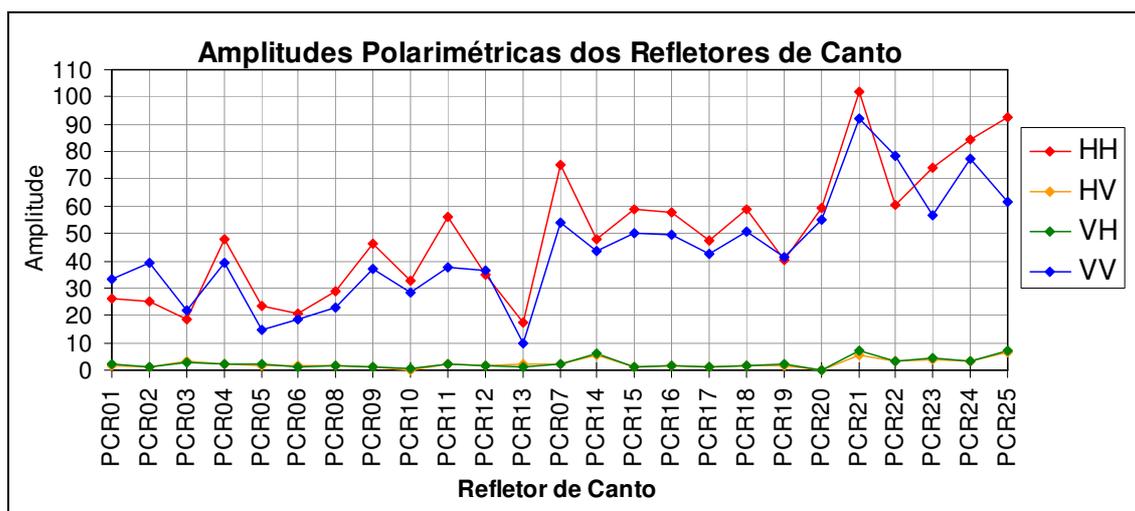


Figura 6.6 – Valores da amplitude das componentes polarimétricas HH, HV, VH e VV referentes ao sinal de retorno dos 25 refletores de cantos.

É importante destacar que, para o desenvolvimento de todas as análises radiométricas e geométricas realizadas neste trabalho, foi empregada a técnica de interpolação denominada de *zero-padding* por *FFT* (*Fast Fourier Transformation*), com um fator de reamostragem igual a 8 (FREEMAN et al., 1990), com a finalidade de melhorar a caracterização da resposta impulsiva observada, quando comparada com a resposta

impulsiva ideal (Figura 4.5), além de garantir uma análise mais precisa, especificamente no que se refere a análise geométrica a nível de *subpixel*. Essa técnica de interpolação é baseada na função denominada de $\text{sinc}(x) = \text{sen}(x)/x$, que representa matematicamente a resposta impulsiva de um alvo pontual com refletividade unitária (*função Delta de Dirac*), conforme descrito na Seção 4.8. Essa melhor caracterização da resposta impulsiva pode ser observada no exemplo apresentado na Figura 6.7a e Figura 6.7b.

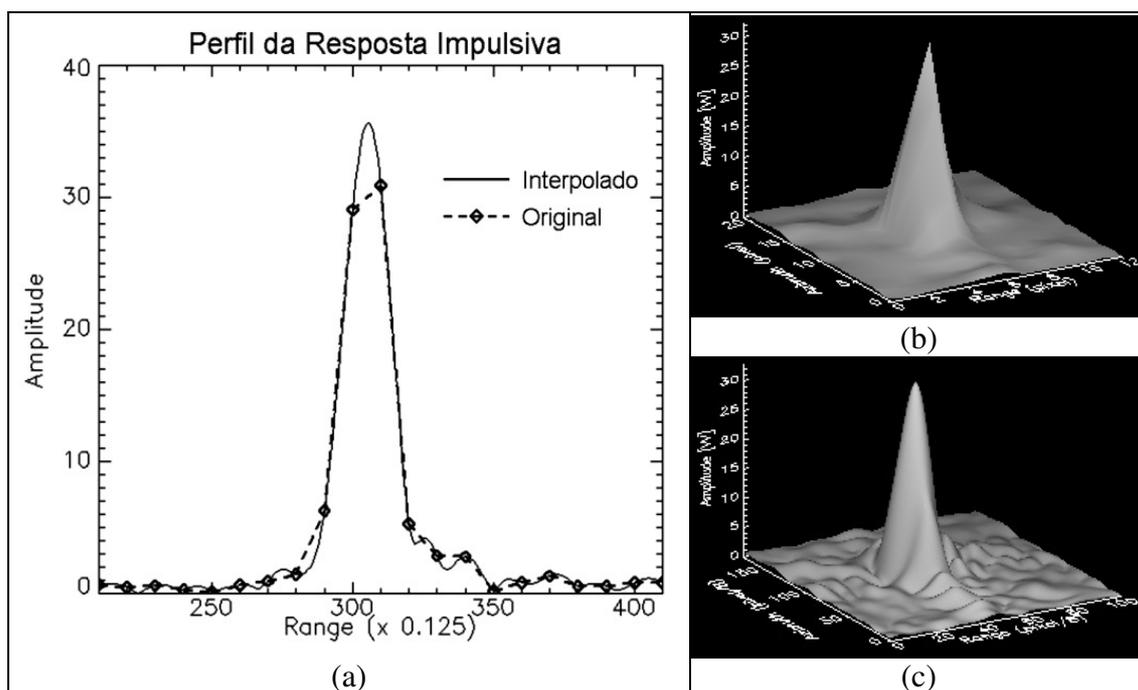


Figura 6.7 – (a) Perfil radial da resposta impulsiva com a interpolação *Zero Padding* (fator = 8) e resposta impulsiva (b) sem e (c) com interpolação.

O primeiro aspecto radiométrico avaliado se refere ao valor do parâmetro SCR, de acordo com a teoria descrita na Seção 4.8. Segundo Freeman (1992), para que os refletores tenham um adequado grau de visibilidade nas imagens SAR, o valor do parâmetro SCR deve ser maior que 20 dB. Com base na ferramenta computacional descrita na Seção B.6.2 foram calculados os valores de média e desvio-padrão do parâmetro SCR, para as componentes HH e VV, considerando os 25 refletores de canto disponíveis.

Da análise dos valores apresentados na Tabela 6.2, pode-se atestar o adequado grau de visibilidade dos refletores nas imagens SAR consideradas, como consequência do correto processamento SAR realizado e da escolha adequada dos locais de instalação dos refletores. É importante observar que, os valores da medida SCR obtidos garantem a adequada aplicação dos métodos de calibração absoluta descritos na Seção 3.2, especialmente o método do pico de potência, e do *channel imbalance*, conforme os resultados apresentados na Seção 6.4.3.

Além do parâmetro SCR, também foram obtidos, de acordo com a teoria descrita na Seção 4.8 e com o auxílio da ferramenta computacional descrita na Seção B.6.2, os valores dos parâmetros PSLR e ISLR. Na Tabela 6.2 também são apresentados os valores médios e os respectivos desvios-padrões desses parâmetros, discriminados pelas componentes polarimétricas HH e VV, tanto na direção radial quanto azimutal, e em função das duas resoluções espaciais radiais empregadas neste trabalho.

Tabela 6.2 – Valores de média e de desvio-padrão dos parâmetros PSLR, ISLR e SCR.

Parâmetro	Direção	Polarização	Banda de Frequência Radial		Valor Ideal	
			25 MHz ¹	50 MHz ²	25 MHz	50 MHz
PSLR	Radial	HH	-28,57 ± 4,18	-29,88 ± 1,63	<-21dB	
		VV	-23,75 ± 1,71	-25,82 ± 4,29		
	Azimutal	HH	-22,43 ± 4,18	-19,26 ± 3,62		
		VV	-20,52 ± 3,49	-18,33 ± 3,92		
ISLR	Radial	HH	-22,24 ± 2,51	-22,84 ± 0,73	<-17dB	
		VV	-17,34 ± 1,39	-17,83 ± 2,89		
	Azimutal	HH	-15,63 ± 3,14	-14,14 ± 3,15		
		VV	-15,76 ± 2,86	-17,83 ± 3,42		
SCR		HH	40,48 ± 5,09	39,79 ± 5,84	> 20dB	
		VV	33,71 ± 3,95	36,00 ± 3,93		

1 – Foram utilizadas as respostas impulsivas dos 12 refletores da *Faixa 1*.

2 – Foram utilizadas as respostas impulsivas dos 13 refletores da *Faixa 2* e da *Faixa 3*.

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.2 pode-se concluir que os valores calculados para os parâmetros PSLR e ISLR indicam uma boa proximidade com os valores teóricos ideais, o que permite afirmar que as imagens na banda L do sensor SAR

R99B avaliadas apresentam uma boa qualidade radiométrica, no que se refere à forma da função resposta impulsiva de um alvo quase pontual, como é o caso dos refletores de canto triédricos estudados, além da interferência mínima do sinal de retorno dos alvos localizados no entorno dos refletores em questão, o que indica, novamente, a boa escolha dos locais de instalação dos refletores.

A análise radiométrica das componentes polarimétricas envolveu também a estimativa de determinados parâmetros, que devem ser comparados com valores de referência, de modo a permitir ao final do processo de calibração atestar a qualidade dos dados SAR calibrados, onde, segundo Freeman et al. (1990), os valores de referência para a calibração polarimétrica e absoluta estão descritos na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Valores de Referência para Calibração Polarimétrica e Absoluta.

Tipo de Calibração	Valor de Referência
Absoluta (para todas as componentes polarimétricas)	± 3 dB
Amplitude Relativa (Amplitude do <i>Channel imbalance</i>)	$\pm 0,4$ dB
Fase Relativa (Fase do <i>Channel imbalance</i>)	$\pm 10^\circ$
Isolamento dos Canais (<i>Cross-talk</i>)	-30 dB

Fonte: Freeman et al. (1990).

Empregando-se o método do pico de potência descrito na Seção 3.2, foram obtidos os valores de amplitude e de fase referentes ao pico da resposta impulsiva de todos os 25 refletores de cantos identificados nas três faixas de imageamento consideradas no presente trabalho. Com base nesses valores de amplitude e de fase foram gerados os gráficos apresentados na Figura 6.8, que descrevem a amplitude e a fase relativa entre as componentes co-polarizadas HH e VV com as componentes polarizadas cruzadas HV e VH, obtendo-se a amplitude e a fase das seguintes razões: HH/VV, HV/VH, HV/HH e VH/VV.

A informação disponível nesses gráficos possibilita que seja realizada uma inferência preliminar do nível de desbalanceamento (*channel imbalance*) e de contaminação (*cross-talk*) entre o canal horizontal e o vertical do sensor SAR R99B, antes da realização do processo de calibração polarimétrica.

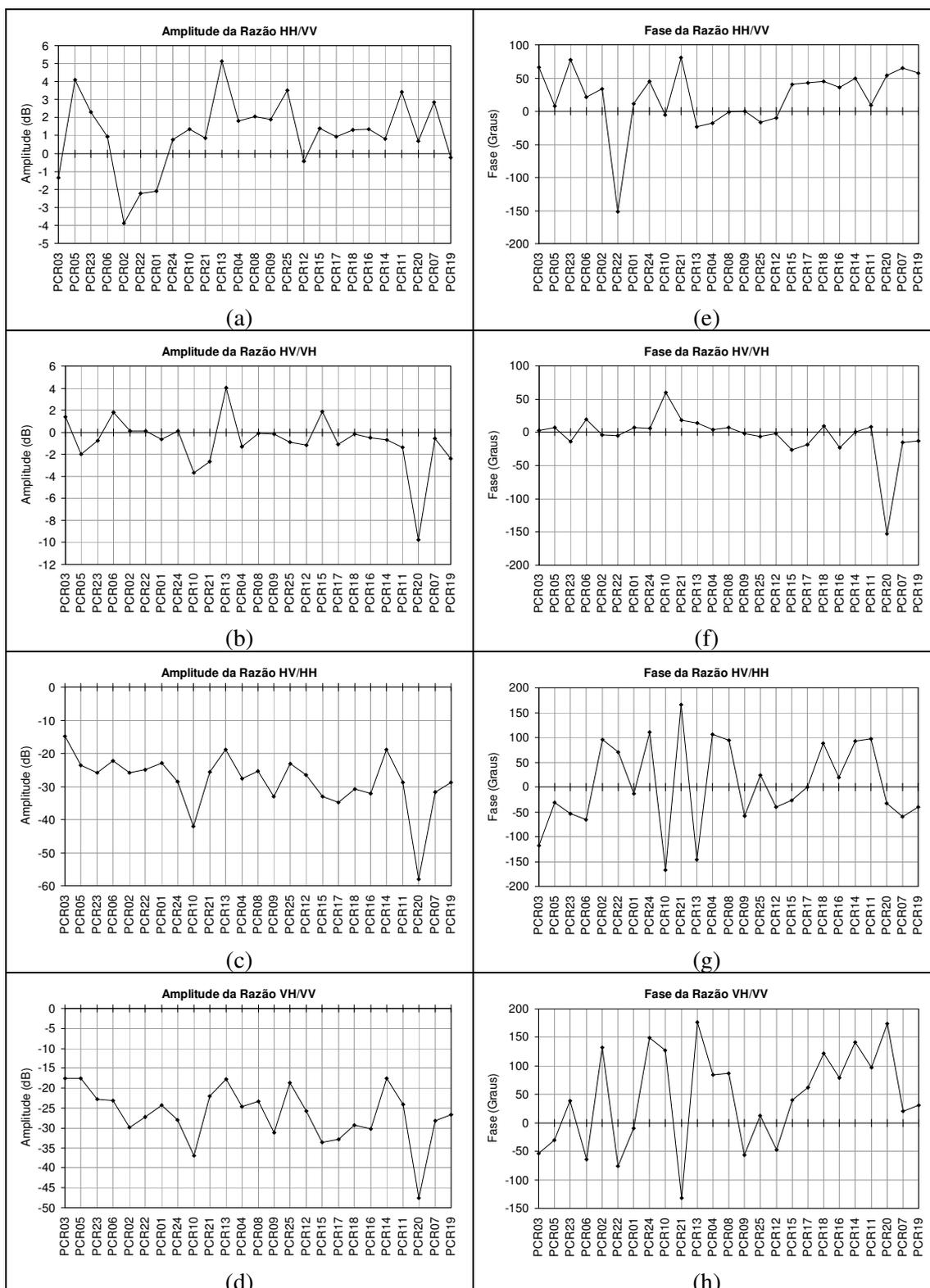


Figura 6.8 – Valores da (a),(b),(c),(d) amplitude e da (e),(f),(g),(h) fase relativa entre as componentes HH/VV, HV/VH, HV/HH e VH/VV medidas para os 25 refletores de cantos antes da calibração polarimétrica.

Os valores de amplitude e de fase apresentados nos gráficos da Figura 6.8 foram ordenados, da esquerda para a direita, em função do aumento do valor do ângulo de incidência do sistema SAR para cada refletor, independentemente da faixa imageada. Da análise da Figura 6.8a, pode-se concluir que o valor médio obtido para a razão entre as amplitudes das componentes HH e VV foi igual a 1,09 dB, o que extrapolou, em módulo, o limite de referência de 0,4 dB. Esse resultado é o primeiro indicador da existência do efeito do *channel imbalance* entre os canais H e V do sistema sensor SAR R99B, o que reforça a necessidade de aplicação do processo de calibração polarimétrica. Com relação ao módulo da fase relativa entre as componentes HH e VV, pode-se observar que ocorre uma pequena diferença de fase, maior que o limite de 10°, o que deve ser causado pela fase introduzida pelo caminho percorrido pelo sinal no interior do radar e por pequenas imperfeições na construção ou montagem dos refletores de canto (ausência de ortogonalidade entre as faces e a presença de pequenas curvaturas nas superfícies refletoras), o que alteram o centro de fase do alvo em questão.

Com base nos valores obtidos para a razão entre as amplitudes das componentes HV e VH, estimou-se a existência de um pequeno valor médio igual a -0,814 dB, considerando-se os 25 refletores, e uma redução desse valor para -0,441 dB, retirando-se o refletor PCR20, cujo resultado indica que a suposição de reciprocidade entre as matrizes de distorção de transmissão $[T]$ e de recepção $[R]$ poderia ser considerada para o sistema SAR R99B. Por outro lado, a análise da amplitude relativa entre as razões HV/HH e VH/VV indica que o nível da distorção do *cross-talk* é baixo, conforme pode ser observado na Figura 6.8c e Figura 6.8d, cujos valores médios e os respectivos desvios-padrões calculados para cada faixa imageada estão descritos na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Valores de média e de desvio-padrão do *cross-talk* e do *channel imbalance* antes da calibração polarimétrica.

Faixa de Imageamento	Nº de Refletores	<i>Cross-talk</i> (HV/HH e VH/VV)	Amplitude Relativa (HH/VV)	Fase Relativa (HH/VV)
1	12	-25,32 ± 6,28 dB	1,07 ± 2,63 dB	7,64° ± 24,54°
2	8	-32,13 ± 9,59 dB	1,14 ± 0,86 dB	48,78° ± 9,72°
3	5	-24,66 ± 3,06 dB	1,04 ± 2,15 dB	7,09° ± 96,84°
1, 2 e 3	25	-27,37 ± 7,70 dB	1,09 ± 2,04 dB	20,69° ± 47,47°

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.4 pode-se concluir que, a distorção do *cross-talk* terá uma influência muito reduzida, quase desprezível, na resposta e na informação polarimétrica dos alvos presentes nas imagens PolSAR avaliadas, devido ao baixo valor médio calculado igual a $-27,37 \pm 7,70$ dB, diferentemente do *channel imbalance*, onde, os módulos da amplitude e da fase relativa foram iguais a $1,09 \pm 2,04$ dB e a $20,69^\circ \pm 47,47^\circ$, respectivamente. Esses resultados reforçam a afirmação previamente considerada, da existência de um significativo grau de desbalanceamento entre as amplitudes medidas para os canais H e V, da ordem de 2,7 vezes o valor ideal, e um pequeno valor para a fase relativa, quando comparada, em módulo, com o valor ideal de 10° . Desta forma, é esperado que os valores do *channel imbalance* de recepção e de transmissão para o canal vertical, representados pelos termos r_{vv} e t_{vv} , quando estimados após a aplicação do processo de calibração polarimétrica descrito na Seção 6.4, apresentem valores menores que os parâmetros r_{hh} e t_{hh} , sendo, portanto a maior fonte de distorção existente entre os canais H e V do sensor SAR R99B.

Com a finalidade de permitir uma análise quantitativa, e não somente qualitativa, do grau de concordância entre a resposta polarimétrica normalizada observada (σ_{co}^{obs} e σ_{cross}^{obs}) e de referência (σ_{co}^{ref} e σ_{cross}^{ref}) (Figura 2.8), tanto de co-polarização (*co*) quanto de polarização cruzada (*cross*), foi calculado para cada um dos 25 refletores o respectivo *Erro Médio Quadrático (EMQ)* entre as aludidas respostas polarimétricas, cujos resultados apresentados na Figura 6.9, antes do processo de calibração polarimétrica, foram obtidos por intermédio da seguinte expressão:

$$EMQ_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{36} \sum_{j=1}^{18} (\sigma_k^{obs}(i, j) - \sigma_k^{ref}(i, j))^2}{648}}, \quad (6.1)$$

onde $k = \{co, cross\}$ e os valores σ_k^{obs} e σ_k^{ref} são representados por matrizes de 36 linhas x 18 colunas, contendo em cada célula os valores de $\sigma(i, j)$, em intervalos de $5^\circ \times 5^\circ$ para os ângulos de polarização ψ e χ , respectivamente, sendo que $-\pi/2 \leq \psi \leq \pi/2$ e $-\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4$.

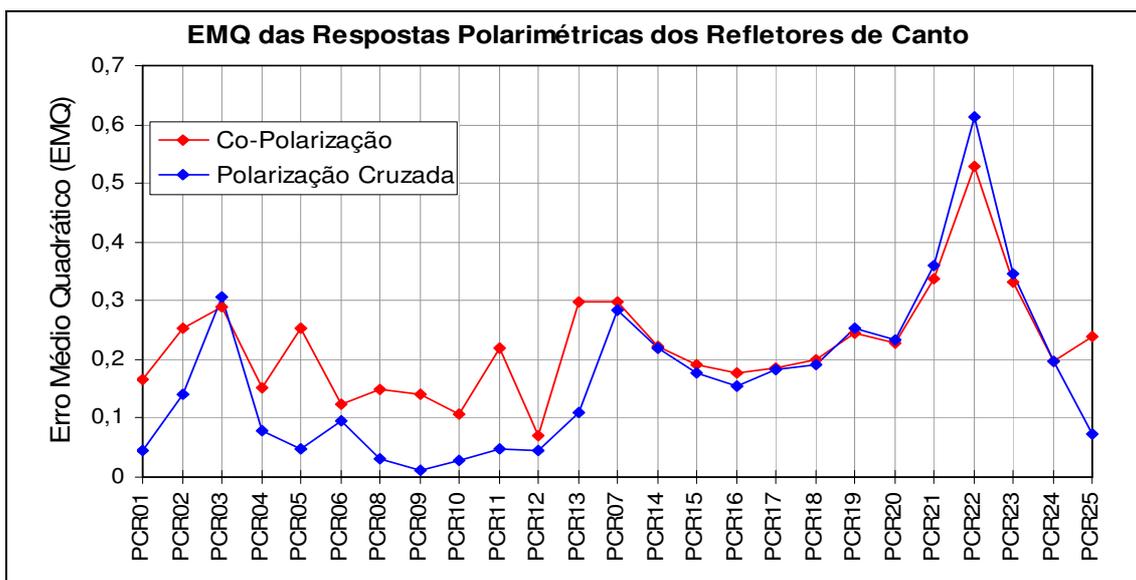


Figura 6.9 – Valores do EMQ calculado entre as respostas polarimétricas normalizadas de co-polarização e de polarização cruzada observadas e de referência, para os 25 refletores, antes da calibração polarimétrica.

Para ilustrar a pertinência da escolha do valor do EMQ como sendo uma medida quantitativa confiável para a comparação dos resultados obtidos entre diferentes respostas polarimétricas, foram selecionados da Figura 6.9 os refletores que apresentaram o menor, a mediana e o maior valor do EMQ_{co} , que correspondem, respectivamente, aos refletores PCR12, PCR11 e PCR22. Na Figura 6.10 estão representadas as respostas polarimétricas desses três refletores, de onde se pode constatar a concordância obtida entre a análise qualitativa e a quantitativa, com base nos valores do EMQ obtidos.

Sem a utilização dos valores do EMQ seria difícil, baseado apenas em uma análise visual, determinar dentre as respostas polarimétricas de co-polarização dos refletores PCR08 (Figura 6.10b) e PCR11 (Figura 6.10c), com valores do EMQ iguais a 0,1501 e 0,2188, respectivamente, aquela que mais se aproxima da resposta ideal, o que é mais um fator que ratifica a escolha da medida de qualidade do ajuste da respostas polarimétricas em relação à resposta ideal. Portanto, o valor do EMQ em questão pode ser considerado como uma medida da forma da resposta polarimétrica em relação à referência.

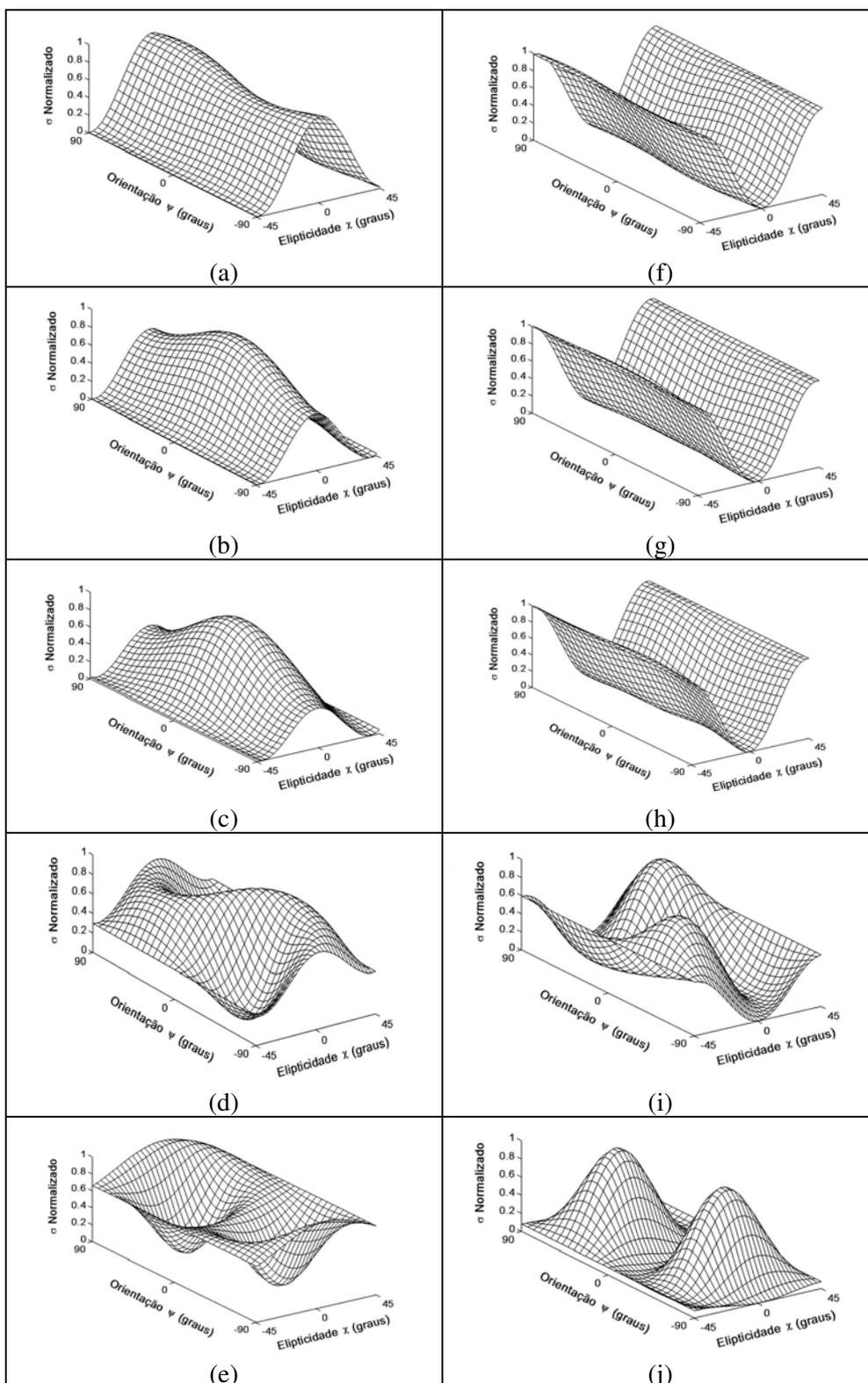


Figura 6.10 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, antes da calibração polarimétrica.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 6.10, pode-se concluir que, apesar das maiores amplitudes do *channel imbalance* terem ocorrido para os refletores PCR05 e PCR13 (Figura 6.8a), os piores resultados para a resposta polarimétrica ocorreram para os refletores PCR21 e PCR22. No caso do refletor PCR21, devido à topografia irregular do local de instalação do mesmo, o que demandou uma pequena escavação do terreno na parte frontal do refletor para que fosse atingido o ângulo de elevação adequado, pode ter ocorrido uma interação da radiação com o terreno e com o refletor, o que distorceu a resposta polarimétrica do refletor.

É interessante notar que o valor do desvio-padrão da fase do *channel imbalance* para a Faixa 3 (Tabela 6.4) é bastante afetado pela presença de uma discrepância na fase relativa do refletor PCR22 igual a $-151,2^\circ$ (Figura 6.8e). Como consequência, essa variação da fase da ordem de -180° ocasiona uma resposta polarimétrica semelhante à esperada para um alvo que apresente um retorno do tipo *double-bounce*, o que pode ser verificado pela comparação entre a Figura 6.10e e Figura 6.10j com a Figura 2.6a e Figura 2.6b, respectivamente. Isso indica que pode ter ocorrido um erro na orientação em azimute e/ou na elevação do refletor em questão, em relação à linha de vôo, cuja interação pode ter acontecido em apenas uma das faces do refletor com o terreno ou em apenas duas faces do refletor, o que ocasionou uma diferença de fase da ordem de -180 graus.

Ao final dessa etapa preliminar de análise da qualidade radiométrica da amplitude e da fase das componentes polarimétricas e das respectivas razões, mesmo sem a aplicação do processo de calibração polarimétrica, foi possível identificar alguns pontos importantes em relação ao nível de distorção existentes nos dados PolSAR analisados, que servirão de referência para as análises que se seguem, essas já apoiadas na correção dos efeitos do *cross-talk* e do *channel imbalance*.

6.3.2 Avaliação geométrica

Concluída a fase de avaliação radiométrica preliminar das imagens PolSAR empregadas no presente trabalho, foi realizada uma avaliação geométrica das imagens em questão,

com o objetivo de aproveitar a instalação e medição GPS das coordenadas geodésicas dos 25 refletores de canto disponíveis nas áreas de estudo, visando a comprovação das resoluções espaciais disponíveis, quando comparadas com os valores teóricos esperados, o registro entre as componentes polarimétricas HH e VV e o erro de posicionamento global das imagens SAR.

6.3.2.1 Avaliação da resolução espacial

Com base na teoria descrita na Seção 4.8, foram medidos os valores das resoluções espaciais nas direções azimutal e radial para os 25 refletores disponíveis, empregando-se a ferramenta computacional desenvolvida para este trabalho e descrita na Seção B.6.2. Na Tabela 6.5 estão discriminadas os valores médios e os respectivos desvios-padrões calculados para as aludidas resoluções espaciais, separadas para as duas bandas de frequência radial de 25 MHz, correspondente a Faixa 1 de imageamento com resolução radial de 6 metros, e de 50 MHz, correspondente as Faixas 2 e 3 de imageamento com resolução radial de 3 metros.

Tabela 6.5 – Valores de média e de desvio-padrão das resoluções espaciais azimutal e radial das imagens PolSAR do sensor SAR R99B.

Direção	Polarização	Banda de Frequência Radial		Valor Ideal	
		25 MHz ¹	50 MHz ²	25 MHz	50 MHz
Radial	HH	7,92 ± 0,49	3,92 ± 0,25	7,08 m	3,54 m
	VV	7,76 ± 0,46	3,91 ± 0,27		
Azimutal	HH	1,62 ± 0,73	1,42 ± 0,57	1,12 m	
	VV	1,86 ± 1,17	1,30 ± 0,31		

1 – Foram utilizadas as respostas impulsivas dos 12 refletores da *Faixa 1*.

2 – Foram utilizadas as respostas impulsivas dos 13 refletores instalados na *Faixa 2* e na *Faixa 3*.

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.5, destaca-se que, os maiores valores de desvio-padrão calculados dentre todos os conjuntos observados, ocorrem para a resolução espacial azimutal das componentes polarimétricas HH e VV, para imagens de 25 MHz de banda de frequência radial. Esse fato tem origem na forma distorcida da resposta impulsiva, quando comparada com a resposta ideal, referente ao

sinal de retorno dessas componentes que foram medidos para os refletores PCR06 e PCR08, conforme os gráficos apresentados na Figura 6.11, cujos respectivos valores da resolução espacial medidos foram: $\delta_{hh}^{PCR06} = 2,40$ m, $\delta_{vv}^{PCR06} = 4,11$ m, $\delta_{hh}^{PCR08} = 3,47$ m e $\delta_{vv}^{PCR08} = 3,47$ m. No caso das imagens com banda de frequência radial de 50 MHz, o que contribuiu para o aumento no valor do desvio-padrão referente a resolução espacial azimutal da componente HH, foi a distorção encontrada para a resposta impulsiva dos refletores PCR19, cuja forma é similar à da Figura 6.11b, e PCR22, conforme o gráfico apresentado na Figura 6.12, onde os respectivos valores da resolução espacial medidos foram de $\delta_{hh}^{PCR19} = 2,23$ m e $\delta_{hh}^{PCR22} = 3,17$ m.

As prováveis causas que podem explicar as referidas distorções das respostas impulsivas se referem a uma correção não adequada da migração em *range* dos dados brutos e/ou a uma correção não adequada da compensação de movimento da aeronave, ocorridas durante o processo de geração das respectivas imagens SAR das componentes HH e VV, causando um desfocamento dessas imagens na direção azimutal.

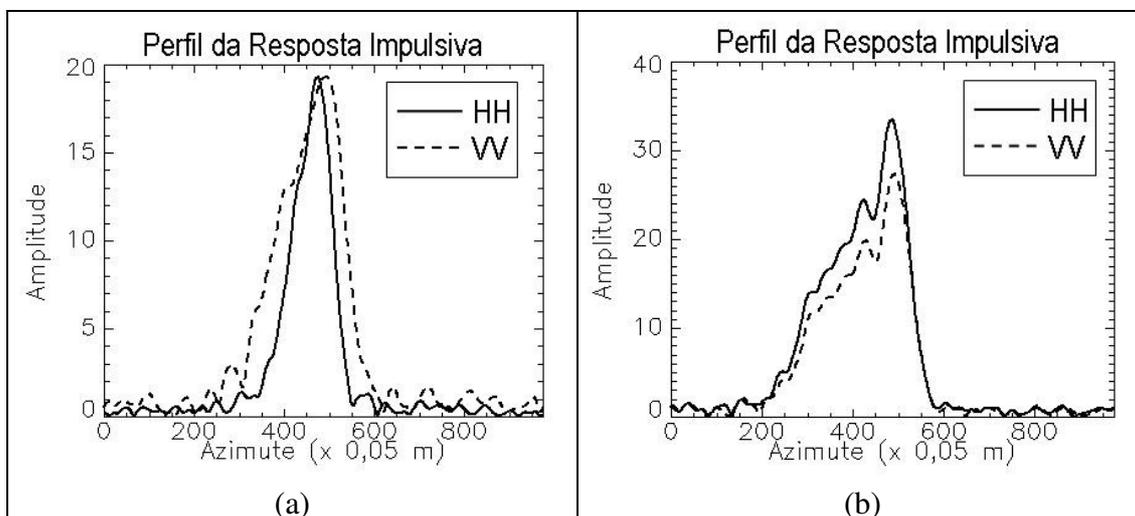


Figura 6.11 – Perfil da resposta impulsiva para as componentes HH e VV, na direção azimutal, referentes aos refletores (a) PCR06 e (b) PCR08.

De acordo com os resultados obtidos para as resoluções espaciais na direção azimutal e radial, quando comparados com os valores ideais descritos na Tabela 6.5, pode-se

concluir que esses resultados, referentes aos refletores avaliados, estão de acordo com o esperado, o que é um primeiro indicador da qualidade geométrica das imagens PolSAR oriundas do sensor SAR R99B, com resoluções espaciais de 3 m e 6 m, correspondentes às bandas de frequência radial de 50 MHz e 25 MHz, respectivamente.

6.3.2.2 Avaliação do registro entre as componentes HH e VV

A segunda avaliação geométrica realizada com as imagens PolSAR do sensor SAR R99B foi referente à quantificação do erro de registro existente entre as componentes polarimétricas HH e VV, para os 25 refletores disponíveis, que apresentam um alto retorno somente nessas componentes. Para tal, foi calculado para um dado conjunto de refletores, o respectivo valor do EMQ que quantifica o erro de registro entre as aludidas componentes polarimétricas, cujos resultados apresentados na Tabela 6.6, foram obtidos por intermédio da seguinte expressão:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left((\delta_{az}^{hh}(i) - \delta_{az}^{vv}(i))^2 + (\delta_{rg}^{hh}(i) - \delta_{rg}^{vv}(i))^2 \right)}{n}}, \quad (6.2)$$

onde n é o número de refletores considerados no cálculo do EMQ e os valores $\delta_x^j(i)$ representam as distâncias medidas (em unidades de *pixel*) para um dado refletor i , entre a posição do pico da resposta impulsiva da componente $j = \{hh, vv\}$, na direção de imageamento $x = \{az, rg\}$.

Tabela 6.6 – Valores do EMQ referente ao registro entre as componentes HH e VV das imagens PolSAR do sensor SAR R99B.

Faixa de Imageamento	Resolução das Imagens (m)	Número de Refletores	EMQ
1	6	12	0,4766
2 e 3	3	13	0,8943
		11 ^(*)	0,4283
1, 2 e 3	3 e 6	25	0,7245
1, 2 e 3	3 e 6	23 ^(*)	0,4541

(*) – Os refletores PCR22 e PCR25 não foram considerados no cálculo.

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.6, destaca-se a ocorrência de um registro satisfatório entre as componentes polarimétricas HH e VV, tanto para as imagens da Faixa 1 (resolução espacial de 6 m) quanto das Faixas 2 e 3 (resolução espacial de 3 m), com valores do EMQ menores que $\frac{1}{2}$ e 1 *pixel*, respectivamente.

Os resultados obtidos para o EMQ, considerando-se apenas as imagens das Faixas 2 e 3, foram bastante influenciados pelos valores calculados para os refletores PCR22 e PCR25, que apresentaram uma maior discrepância em relação aos demais valores, da ordem de 2 *pixels*, o que pode ser constatado pelos gráficos apresentados na Figura 6.12. Excluindo esses dois pontos do cálculo do EMQ, chega-se a valores considerados ideais para o registro entre as componentes HH e VV, da ordem de $\frac{1}{2}$ *pixel*.

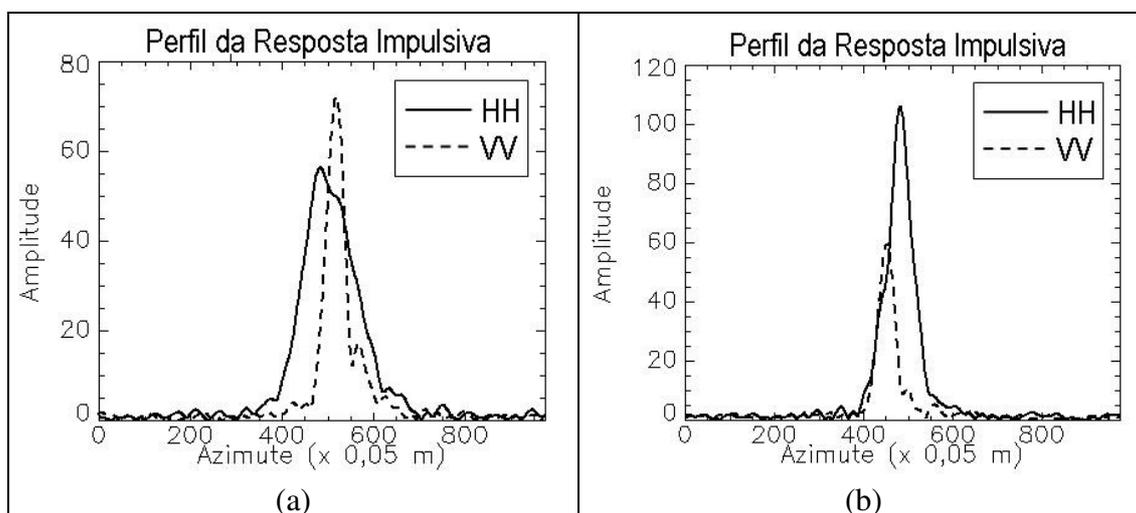


Figura 6.12 – Perfil da resposta impulsiva para as componentes HH e VV, na direção azimutal, referentes aos refletores (a) PCR22 e (b) PCR25.

Portanto, pode-se afirmar que as imagens PolSAR do sensor SAR R99B avaliadas, com resoluções espaciais de 3 m e 6 m, correspondentes às bandas de frequência radial de 50 MHz e 25 MHz, respectivamente, apresentaram um bom registro entre as componentes polarimétricas HH e VV, fato esse comprovado pelo valor do EMQ não ter ultrapassado $\frac{1}{2}$ *pixel*, quando os refletores PCR22 e PCR25 não foram considerados no cálculo em questão. Esses resultados garantem que todos os processos de análise radiométrica e de calibração polarimétrica que foram realizados no presente trabalho atendem a uma

premissa básica para esse tipo de processamento, que é a garantia de um registro adequado entre as componentes polarimétricas.

6.3.2.3 Avaliação do erro global de posicionamento das imagens SAR

Para realizar a quantificação do erro global (geodésico) de posicionamento das imagens do sensor SAR R99B processadas e georreferenciadas pelo aplicativo SPSAR (Seção 4.7), foram medidas as coordenadas geodésicas referentes ao pico da resposta impulsiva da componente HH, para os 25 refletores de canto, conforme os valores apresentados na Tabela 6.7. Em seguida, foram calculados os erros quadráticos de posicionamento entre as coordenadas planas UTM (*Datum* WGS-84) medidas para os refletores nas imagens SAR e no terreno, por rastreamento DGPS (Tabela 4.1 e Tabela 4.2), cujos valores encontram-se descritos a seguir na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Valores do erro quadrático de posicionamento para os 25 refletores de canto disponíveis nas imagens na banda L do sensor SAR R99B.

Refletor	Coordenada E	Coordenada N	ΔE^2	ΔN^2	$\Delta = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$
PCR01	729969,06	9632310,99	1268,21	219,54	38,57
PCR02	732709,06	9633475,99	5906,23	7716,39	116,72
PCR03	740809,06	9635960,99	7747,87	562,97	91,16
PCR04	728634,06	9638735,99	3854,17	215,71	63,80
PCR05	742424,06	9647015,99	7698,66	559,65	90,88
PCR06	735664,06	9647220,99	1669,70	122,04	42,33
PCR08	729889,06	9646340,99	1005,02	477,29	38,50
PCR09	733714,06	9666020,99	3423,65	216,88	60,34
PCR10	737794,06	9672205,99	5578,89	77,56	75,21
PCR11	729764,06	9671910,99	4352,30	69,84	66,50
PCR12	730784,06	9659880,99	4209,67	97,56	65,63
PCR13	730004,06	9652200,99	1655,03	384,04	45,16
PCR07	732526,43	9646472,76	1384,21	420,21	42,48
PCR14	729218,93	9653825,26	2729,54	326,13	55,28
PCR15	730036,43	9632302,76	1008,38	43,41	32,43
PCR16	732813,93	9633465,26	784,84	9716,24	102,47
PCR17	728756,43	9638737,76	3634,28	270,90	62,49
PCR18	729946,43	9646335,26	658,69	259,82	30,31
PCR19	730903,93	9659882,76	3023,35	135,70	56,21
PCR20	730081,43	9652195,26	1345,79	192,35	39,22
PCR21	281664,56	7470079,85	8856,69	186,00	95,09
PCR22	285469,56	7468182,35	6371,23	215,15	81,16
PCR23	290623,72	7496550,43	11468,91	201,07	108,03
PCR24	286246,22	7495320,43	10564,35	238,08	103,93
PCR25	280524,56	7475819,85	11534,76	192,04	108,29

É importante destacar que, as coordenadas dos refletores obtidas por rastreamento DGPS foram consideradas como pontos de controle ou de referência para a quantificação do erro de posicionamento global das imagens SAR em questão, em decorrência da alta precisão planimétrica obtida, da ordem de 1 cm, ao final do processamento das aludidas coordenadas.

De posse dos erros quadráticos apresentados na Tabela 6.7, foram calculados, por intermédio da Equação 6.2, os valores do erro médio quadrático, ou erro global de posicionamento, para diferentes conjuntos de refletores, cujos resultados obtidos foram consolidados na Tabela 6.8 a seguir.

Tabela 6.8 – Valores do erro médio quadrático, ou erro global de posicionamento, das imagens na banda L do sensor SAR R99B correspondentes as faixas imageadas.

Faixa de Imageamento	Número de Refletores	EMQ (m)
1	12	70,17
2 e 3	13	76,34
1, 2 e 3	25	73,44

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.7, pode-se concluir que, todos os pontos de refletores analisados, independente da faixa imageada, apresentaram um erro local de posicionamento menor que 125,0 m, que corresponde a erros menores que 0,5 mm na escala de 1:250.000. Desta forma, os erros obtidos são menores que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) planimétrico de documentos cartográficos classificado como padrão *Classe A*, que estabelece um erro máximo aceitável de 0,5 mm na escala da carta em, pelo menos, 90% dos pontos de controle utilizados para avaliação da exatidão cartográfica (CONCAR, 1986).

Portanto, concluiu-se que as imagens do sensor SAR R99B avaliadas neste trabalho são compatíveis com a planimetria de documentos cartográficos em escalas igual ou menores que 1:250.000. Além disso, o erro global de posicionamento obtido (73,44 m) se aproxima muito do erro esférico teórico de posicionamento (76 m) para as referidas imagens, conforme apresentado na Tabela 4.1.

6.4 Calibração polarimétrica pelo método de Kimura et al. (2004)

Concluída a fase de avaliação radiométrica e geométrica preliminar das imagens PolSAR do sensor SAR R99B, que forneceu alguns resultados importantes com relação ao nível de distorção polarimétrica existente nas aludidas imagens, procedeu-se a estimação dos parâmetros que compõe o método de calibração polarimétrica proposto em Kimura et al. (2004), empregando-se a ferramenta computacional descrita na Seção B.4. Com base nos resultados descritos a seguir, foi possível realizar a quantificação aproximada das matrizes de distorção de transmissão $[T]$ e de recepção $[R]$ do sensor SAR R99B, por intermédio da estimativa dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance*, que servirão de referência para avaliar os resultados obtidos com o novo método de calibração polarimétrica descrito no Capítulo 5.

6.4.1 Estimação do parâmetro m

De acordo com a teoria descrita na Seção 3.4, a estimação do parâmetro m (*VH/HV Noise Imbalance*) deve ser realizada com base em amostras correspondentes a alvos existentes nas imagens PolSAR que apresentem uma baixa relação sinal/ruído, como é o caso de corpos d'água.

Para a Faixa 1, devido à impossibilidade de seleção de amostras de corpos d'água ou outros alvos que se estendessem ao longo de toda a direção radial da faixa imageada, a estimação do parâmetro m foi realizada a partir de uma área de solo exposto, bastante plana (Figura 6.13a) e com baixo retorno, localizada na imagem correspondente ao bloco Az08_Rg02, conforme as amostras destacadas na cor azul da Figura 6.13b. Na Figura 6.15a é apresentado a variação dessa estimativa, ao longo das posições radiais compreendidas pelas amostras selecionadas, e o respectivo valor médio (em vermelho) do parâmetro m para a Faixa 1, igual a 0,9853.

A estimativa do parâmetro m para a Faixa 2 foi baseada na seleção de uma amostra de corpo d'água, localizada na imagem correspondente ao bloco Az27_Rg00, conforme a região destacada na cor azul na Figura 6.14a, que possui um retroespalhamento adequado para a estimação em questão. Na Figura 6.15b é apresentado a variação dessa

estimativa, ao longo das posições radiais compreendidas pela amostra selecionada, e o respectivo valor médio (em vermelho) do parâmetro m para a Faixa 2, igual a 1,8201.

Somente para a Faixa 3 é que foi possível realizar a estimativa do parâmetro m ao longo de toda a direção radial da faixa imageada, a partir de uma amostra de corpo d'água localizada na imagem correspondente ao mosaico dos blocos Az08-09_Rg00-03, conforme a amostra destacada na cor azul da Figura 6.14b. Na Figura 6.15c é apresentado a variação dessa estimativa, ao longo de toda a direção radial, e o respectivo valor médio (em vermelho) do parâmetro m para a Faixa 3, igual a 1,1180.



Figura 6.13 – (a) Área de solo exposto bastante plana e as respectivas (b) amostras selecionadas na imagem correspondente ao bloco Az08_Rg02, para a estimação do parâmetro m da Faixa 1.

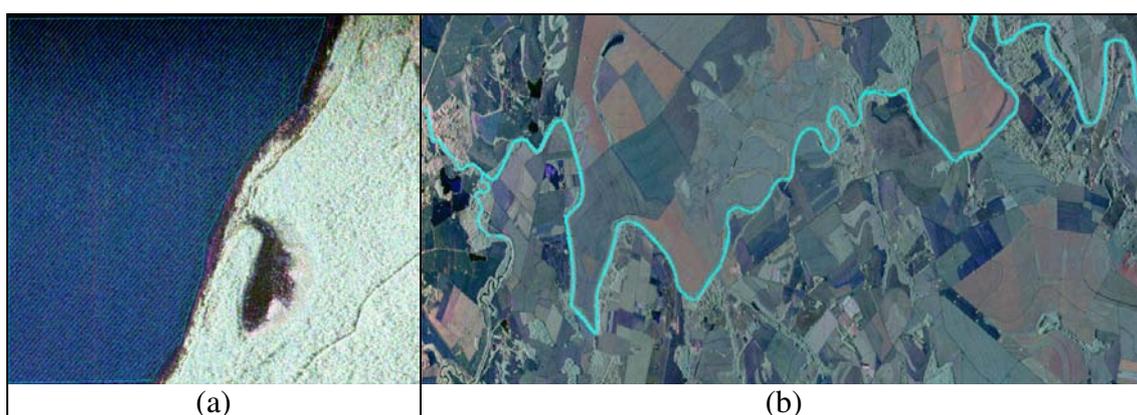


Figura 6.14 – Amostras de corpos d'água selecionadas para a estimação do parâmetro m nas imagens correspondentes ao (a) bloco Az27_Rg00 da Faixa 2 e ao (b) mosaico dos blocos Az08-09_Rg00-03 da Faixa 3.

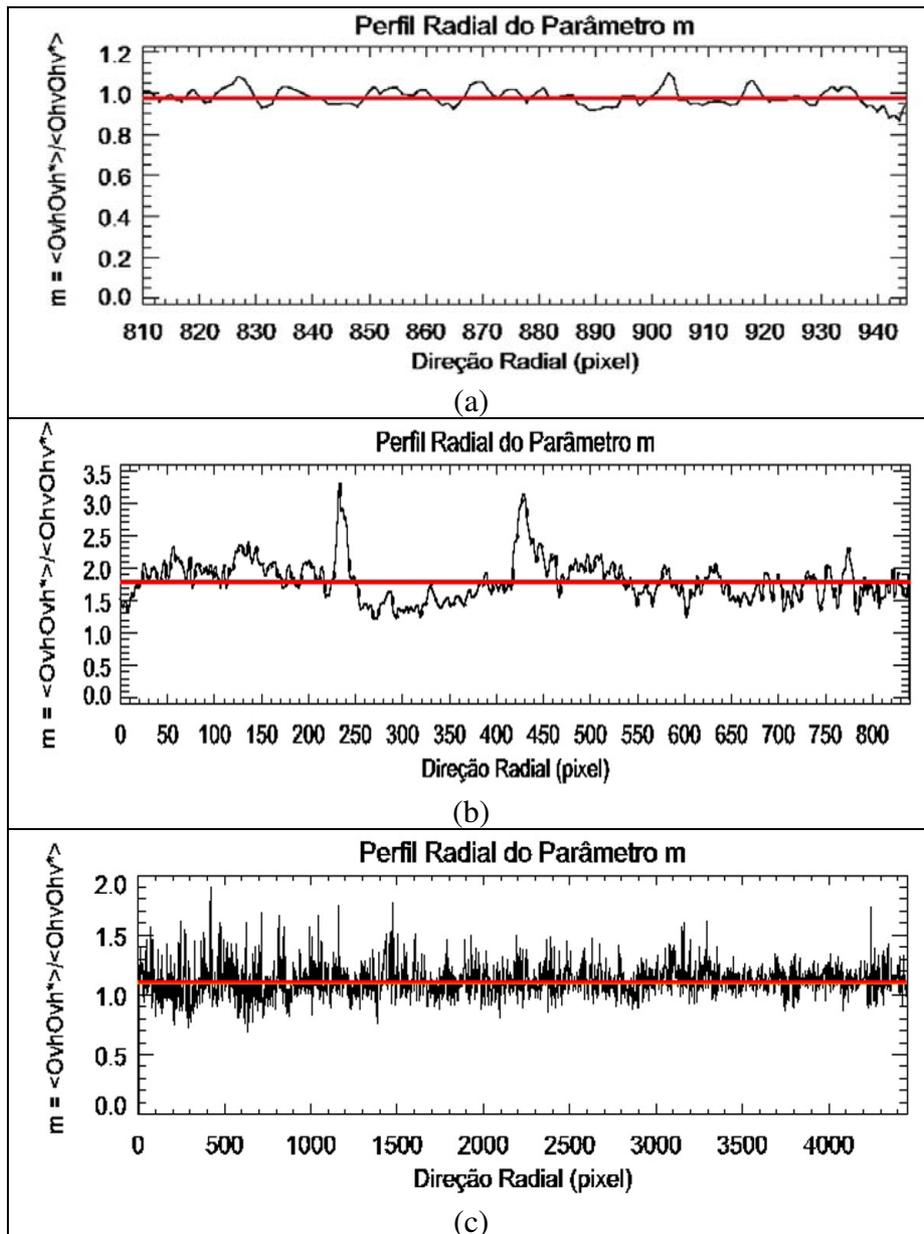


Figura 6.15 – Estimativa do parâmetro m para a (a) Faixa 1, (b) Faixa 2 e (c) Faixa 3.

De acordo com os resultados descritos em Kimura et al. (2004), a estimação do parâmetro m , com base em imagens do sensor aerotransportado Pi-SAR na banda L, para três datas distintas (2001, 2002 e 2003), conduziu a valores iguais a 4,0, 1,3 e 2,1, respectivamente. Essa variação na estimação do parâmetro m foi associada por Kimura et al. (2004) a uma degradação encontrada no canal vertical do aludido sensor, que é a causa do alto valor do parâmetro m estimado para as imagens de 2001.

No caso do presente trabalho, dentre os três sensores SAR do SIPAM disponíveis, o mesmo sensor SAR R99B foi empregado para obtenção das imagens das duas áreas de estudo, e o resultados encontrados para o parâmetro m indicam que para o período avaliado, o sistema SAR se mostrou estável, pois o maior valor do parâmetro m encontrado, igual a 1,8201 para a Faixa 2, não caracteriza a degradação em questão.

De posse dos valores estimados para o parâmetro m , para as três faixas imageadas disponíveis, foi realizada a estimação dos parâmetros do *cross-talk*, cujos resultados são descritos a seguir.

6.4.2 Estimação dos parâmetros do *cross-talk*

Na Seção 3.4 foi descrito o método de calibração polarimétrica proposto em Kimura et al. (2004), cuja metodologia é baseada em pequenas modificações introduzidas no método tradicional desenvolvido em Quegan (1994). Ambos os métodos se baseiam em algumas suposições relativas ao retroespalhamento dos alvos e do funcionamento do sistema SAR. Com a finalidade de investigar as limitações do método de Kimura et al. (2004), foi realizada a estimação dos parâmetros do *cross-talk* (α, u, v, w, z) para diferentes conjuntos de imagens PolSAR (blocos individuais e mosaico de blocos) das três faixas imageadas, que foram denominados, por convenção, de *homogêneos* ou *heterogêneos*, em função da presença de um ou mais alvos naturais nas respectivas imagens.

Ao final dessa investigação, em decorrência da variedade de alvos e dos conjuntos de imagens PolSAR analisados, foi possível minimizar a incerteza na estimação dos parâmetros do *cross-talk* e contribuir com a caracterização mais realista possível das distorções impostas pelo sistema sensor SAR R99B às imagens PolSAR, conforme os resultados descritos na Seção 6.4.4.

6.4.2.1 Estimação por blocos heterogêneos

A partir das imagens PolSAR correspondentes aos blocos considerados heterogêneos descritos na Tabela 4.5, que contêm diferentes alvos naturais e pelos um alvo artificial

de referência (refletor de canto), foram obtidas as funções polinomiais de ajuste ou perfis radiais ajustados, por intermédio da solução definida pelo método de mínimos quadrados, tanto para a amplitude quanto para a fase dos parâmetros do *cross-talk*. Na Figura 6.16 são apresentados os gráficos que exemplificam a estimação (em preto) e as respectivas funções ajustadas para a amplitude (em vermelho) e para a fase (em azul) dos parâmetros α , u , v , w e z , correspondentes ao bloco Az14_Rg02 da Faixa 2.

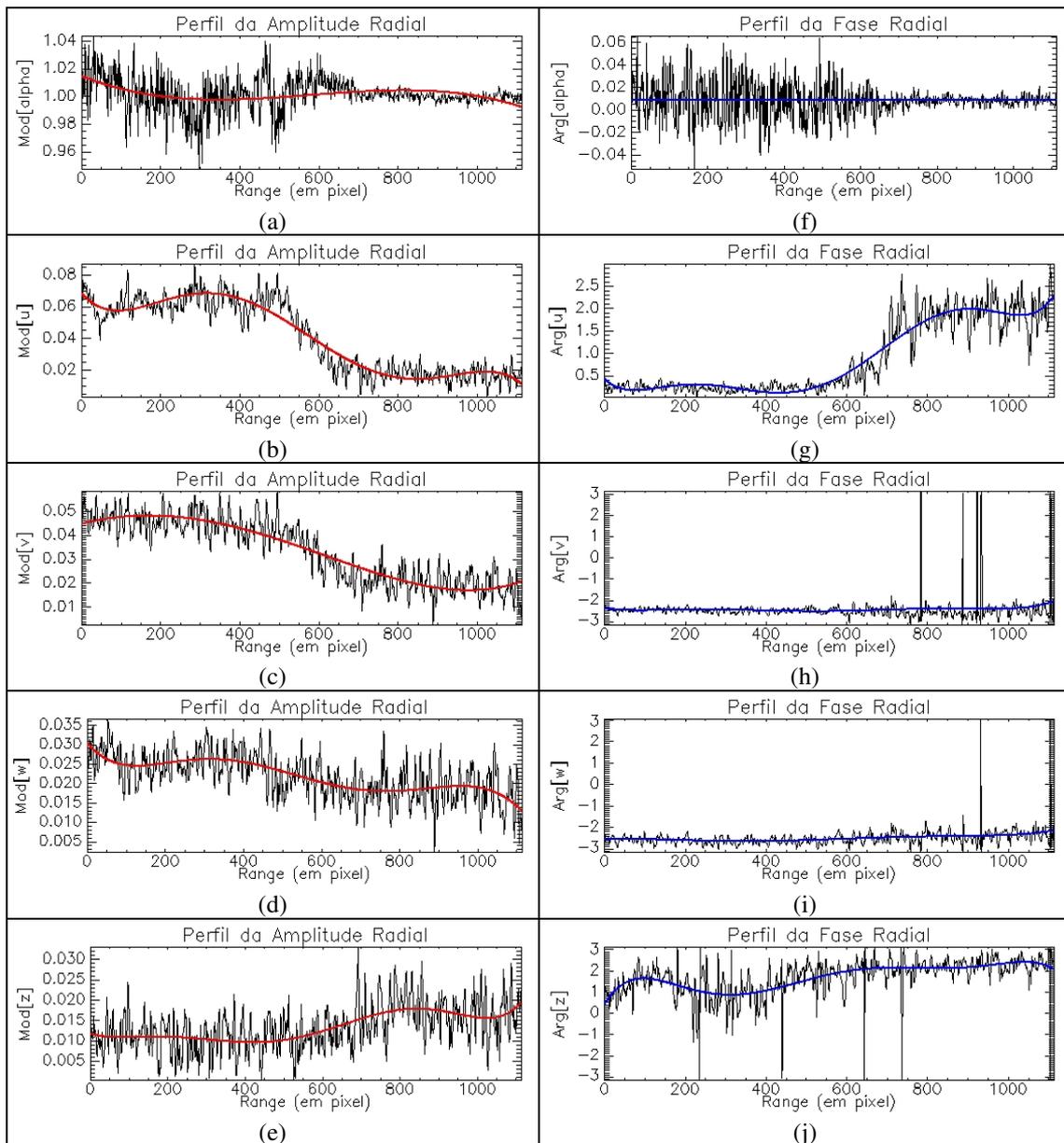


Figura 6.16 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do *cross-talk* estimados para o bloco Az14_Rg02 da Faixa 2.

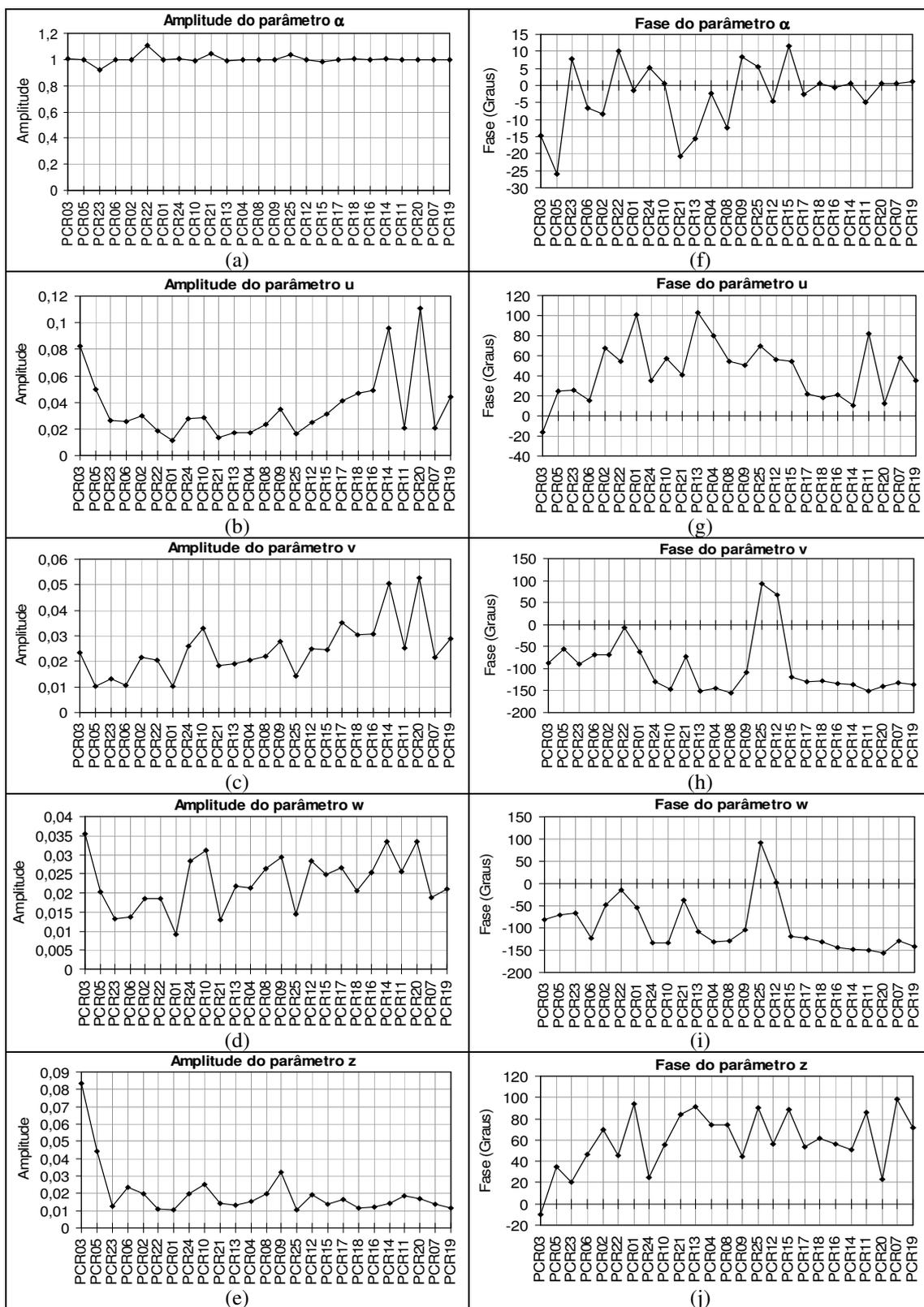


Figura 6.17 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do *cross-talk* medidos em cada refletor.

De posse dos perfis ajustados para cada bloco foram extraídos os valores da amplitude e da fase dos parâmetros α , u , v , w e z , correspondentes a posição radial do refletor dentro do respectivo bloco, cujos resultados obtidos para os 25 refletores estão consolidados nos gráficos apresentados na Figura 6.17. Após uma análise preliminar dos gráficos da Figura 6.17 é possível identificar a existência de uma tendência central para os valores da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk*. Essa tendência é representada pelos respectivos valores de média e de desvio-padrão apresentados na Tabela 6.9, que confirmam os resultados apresentados da Tabela 6.4, com relação ao baixo nível de distorção do *cross-talk* presente no sensor SAR R99B.

Deve-se destacar que alguns dos resultados apresentados na Tabela 6.9 não foram obtidos com os 25 refletores, em virtude da ocorrência de discrepâncias na estimação dos valores da amplitude e da fase de parâmetros do *cross-talk* para determinados refletores, como foi o caso dos refletores PCR03, PCR12, PCR14, PCR20 e PCR25, conforme as razões descritas a seguir.

Tabela 6.9 – Valores de média e de desvio-padrão dos parâmetros do *cross-talk* para os refletores de canto após a calibração polarimétrica.

Parâmetro do <i>Cross-Talk</i>	Observação	Amplitude do Parâmetro		Fase do Parâmetro
α	(1)	1,003±0,031		-2,26° ± 9,28°
u	(1)(2)	0,028 ± 0,012	-31,744 ± 3,65 dB	47,87° ± 26,92°
v	(1)(2)(3)	0,022 ± 0,007	-33,604 ± 3,26 dB	-112,36° ± 40,05°
w	(1)(3)	0,022 ± 0,007	-33,458 ± 2,92 dB	-109,02° ± 40,73°
z	(1)	0,017 ± 0,008	-35,815 ± 3,17 dB	62,37° ± 23,46°

(1) – O refletor PCR03 foi excluído do cálculo da amplitude e da fase.

(2) – Os refletores PCR14 e PCR20 foram excluídos do cálculo da amplitude.

(3) – Os refletores PCR12 e PCR25 foram excluídos do cálculo da fase.

Ao se realizar uma análise mais detalhada dos resultados da Figura 6.17, observa-se que as estimativas dos parâmetros u e z , referentes ao refletor PCR03, ao longo das posições radiais mais próximas do *near range*, foram altamente influenciadas pelo baixo retorno ocorrido nessa porção da Faixa 1, conforme os respectivos gráficos apresentados na Figura 6.18. Esses valores incorretos estimados para os referidos parâmetros são

comprovados ao se analisar os histogramas da diferença de fase entre as componentes polarimétricas HH-HV e VV-VH, antes e depois da calibração polarimétrica, conforme os gráficos apresentados na Figura 6.19, onde era esperado que esses histogramas da fase, após a calibração polarimétrica, possuissem uma distribuição uniforme de frequência, de acordo com o exemplo apresentado na Figura 4.8b.

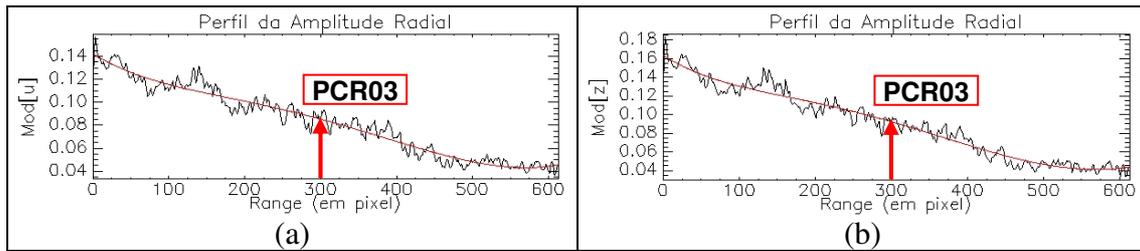


Figura 6.18 – Perfil radial da amplitude estimada dos parâmetros (a) u e (b) z para o bloco Az09_Rg00 da Faixa 1, onde se localiza o refletor PCR03 na posição radial igual a 305, ou ângulo de incidência igual a $45,13^\circ$.

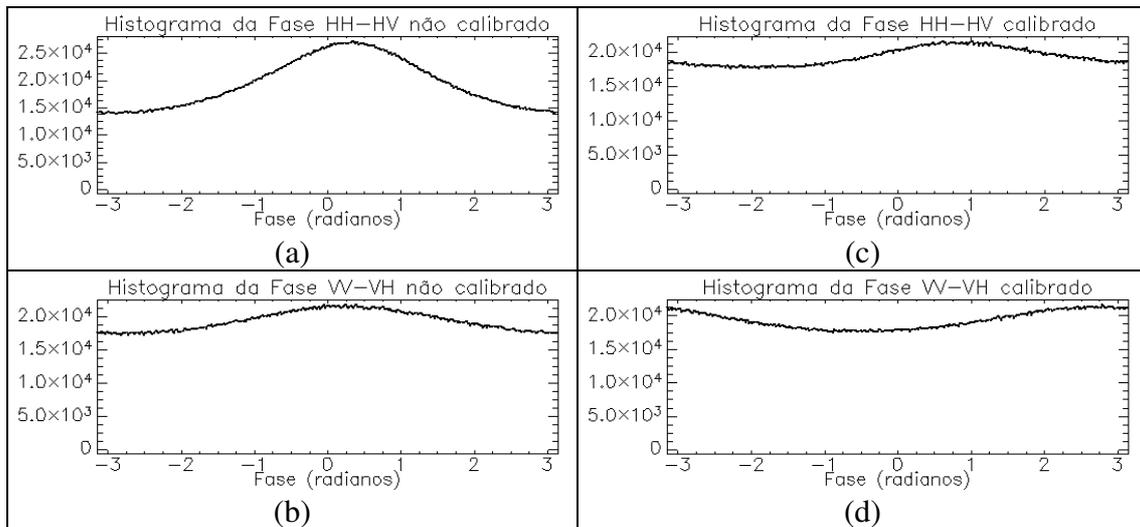


Figura 6.19 – Histograma da fase entre as componentes HH-HV e VV-VH do bloco Az09_Rg00, (a),(b) antes e (c),(d) depois da calibração polarimétrica.

Portanto, além dos primeiros 500 *pixels* descartados apenas pela análise visual das imagens da Faixa 1 (Figura 6.1), outros 500 *pixels* pertencentes aos blocos situados na posição Rg00 da Faixa 1 não foram considerados, o que ratifica os resultados descritos em Mura et al. (2007), que descartou os primeiros 1000 *pixels* do mesmo bloco, pois os

baixos valores radiométricos nesta faixa possuem estatísticas diferentes dos alvos equivalentes localizados no restante da faixa utilizada. Desta forma, as futuras missões com o sensor SAR R99B, com a mesma geometria de imageamento da Faixa 1, produzirão imagens de 25 MHz de banda de frequência radial com uma faixa útil de dados SAR de aproximadamente 18.614 km na direção de *ground range*, compreendidas entre 46,47° e 70,34° de ângulo de incidência.

É interessante notar que, para a Faixa 2, devido ao maior valor obtido na estimação do parâmetro m igual a 1,8201 dentre os demais, ocorreu uma pequena influência na respectiva estimação do parâmetro α , conforme os gráficos apresentados na Figura 6.20, que correspondem à variação radial da amplitude do parâmetro α para o bloco Az07_Rg01, com e sem a utilização do parâmetro m . Apesar da pequena influência apresentada, que é ainda é minimizada pelo baixo nível do *cross-talk* calculado, essa conclusão confirma a necessidade da estimação do parâmetro m , conforme os resultados apresentados em Kimura et al. (2004), principalmente em imagens PolSAR que apresentem um razoável nível de contaminação ou degradação nos canais polarimétricos do sensor SAR.

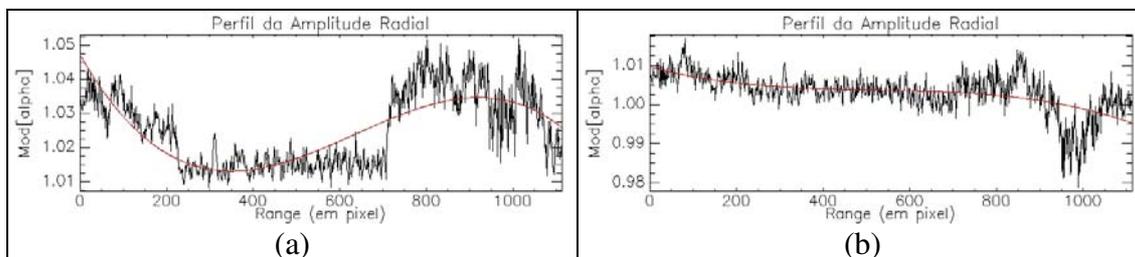


Figura 6.20 – Amplitude estimada do parâmetro α (a) sem e (b) com a utilização do parâmetro m para o bloco Az07_Rg01 da Faixa 2.

Os parâmetros do *cross-talk* para os refletores PCR14 e PCR20 foram obtidos de um único conjunto de perfis radiais, referentes a cada um desses parâmetros, em virtude da localização desses refletores em diferentes posições radiais no mesmo bloco Az14_Rg02 da Faixa 2. Conforme os resultados apresentados na Tabela 6.9, os valores da amplitude dos parâmetros u e v estimados para esses refletores apresentam uma

discrepância em relação aos demais refletores. A razão para esse fato ter ocorrido pode ser explicada pela predominância de alvos com baixo retorno ao longo de uma determinada faixa radial, onde estão localizados esses refletores, conforme pode ser observado na Figura 6.21a.

Comparando-se os resultados obtidos na estimação da amplitude do parâmetro u do bloco Az12_Rg02 (Figura 6.21b), onde está localizado o refletor PCR07 em uma posição radial com valor do ângulo de incidência próximo aos pontos PCR14 e PCR20, e que cobre a mesma faixa de ângulo de incidência do supracitado bloco, verifica-se que essa discrepância não ocorreu, devido a predominância da classe floresta no bloco em questão. Essa influência de alvos de baixo retorno fica bem evidenciada em cada uma das três porções do perfil radial estimado para a amplitude do parâmetro u do bloco Az14_Rg02, onde à medida que diminui a presença desse tipo de alvo ao longo da direção radial, diminui os erros de estimação desse parâmetro, onde, na porção 3, ocorre a concordância dos valores estimados para os dois blocos em questão.

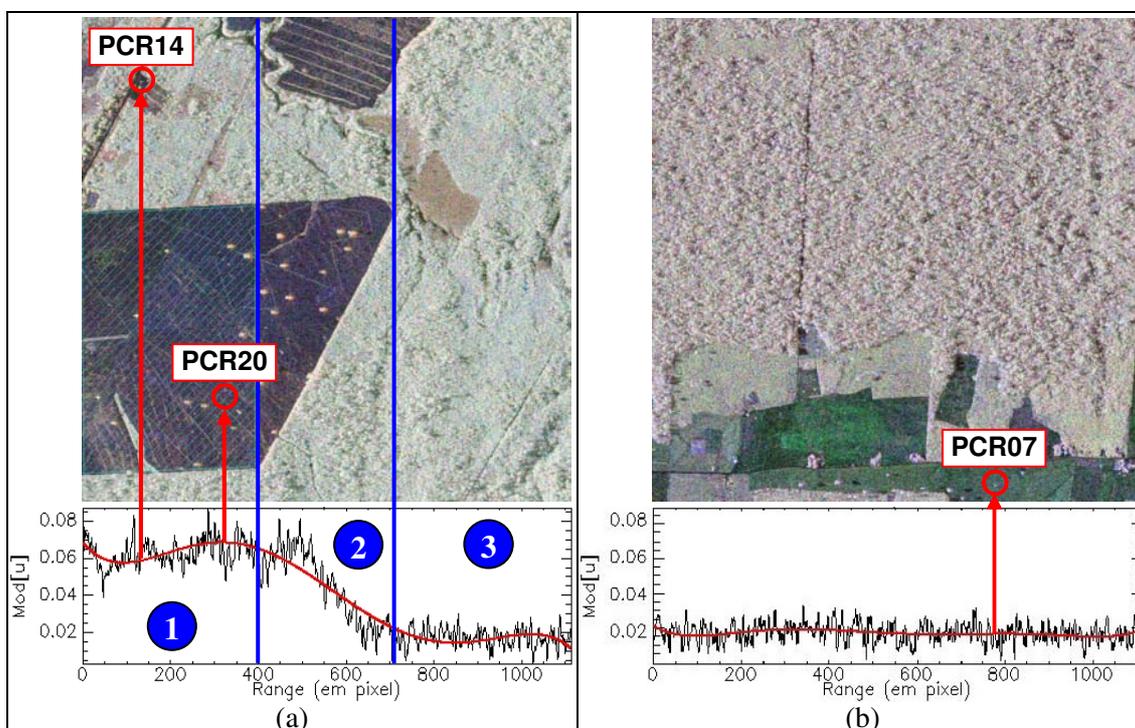


Figura 6.21 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV e estimação da amplitude do parâmetro u para os blocos (a) Az14_Rg02 e (b) Az12_Rg02 da Faixa 2.

É importante destacar que essa região anômala para estimação dos parâmetros do *cross-talk* também influenciam os valores estimados para a fase, conforme pode ser observado na Figura 6.16g, onde, a influência dessa região ocorre de maneira inversa ao reportado para a amplitude, e por conseqüência, produziu uma discrepância no valor da fase do parâmetro u para os refletores PCR14 e PCR20 (Figura 6.17g).

Esse mesmo problema é descrito em Ainsworth et al. (2006), conforme o gráfico apresentado na Figura 6.22, que ilustra a variação da amplitude do parâmetro z , estimado para uma porção da imagem do sensor na banda L PiSAR, onde os primeiros 300 *pixels* correspondem a uma área de corpo d'água com baixo retorno, onde ocorre o erro de estimação do parâmetro z .

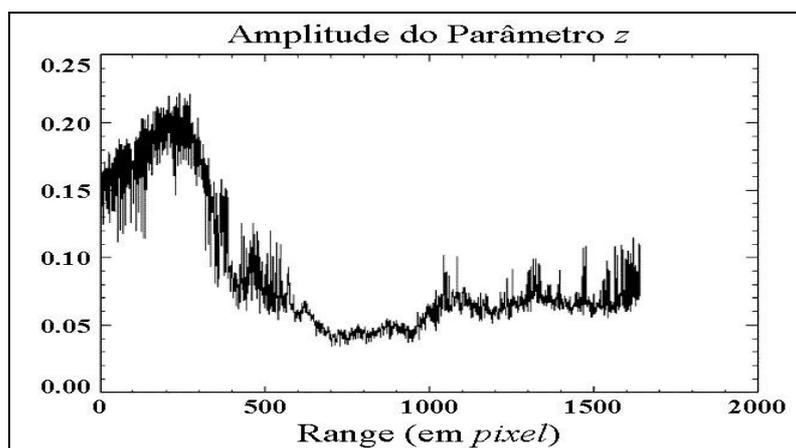


Figura 6.22 – Estimação da amplitude do parâmetro z para uma imagem PolSAR, na banda L, do sensor PiSAR em uma área litorânea no Japão.
FONTE: Adaptada de Ainsworth et al. (2006).

Esses resultados exemplificam o que foi abordado no Capítulo 3, onde o método de calibração em questão pode falhar quando o coeficiente de retroespalhamento é muito baixo, como ocorre para o alvo em questão. Conforme descrito em Quegan (1994), a estimação dos parâmetros do *cross-talk* depende de regiões da imagem onde a correlação entre as componentes co-polarizadas e polarizadas cruzadas não pode ser negligenciada, devido ao fato que as componentes polarizadas cruzadas são mais afetadas pelo ruído nessas regiões, e de acordo com a equação 3.14, esses parâmetros dependem dessa correlação. Esse é um caso típico descrito em Quegan (1994) como

sendo de uma região anômala para a estimação desses parâmetros, que podem ser estimados localmente, porém com o cuidado de evitar esse tipo de região.

Além dos erros de estimação na amplitude dos parâmetros do *cross-talk* descritos anteriormente, foi verificado a existência de discrepâncias nos valores estimados para a fase dos parâmetros v e w referentes ao refletor PCR12, conforme os resultados apresentados na Figura 6.17h e Figura 6.17i. Esses erros são devidos ao caráter cíclico da fase, igual a 2π , e da variância do estimador da fase dos referidos parâmetros, de acordo com os valores apresentados na Tabela 6.10, onde, o valor da esperança da fase próximo ao limite do respectivo intervalo de domínio da fase, compreendido entre $\pm\pi$, pode ser estimado como pertencente ao limite oposto desse intervalo. Esse problema pode ser visualizado nas Figura 6.23b e Figura 6.23c, referentes aos valores estimados da fase para os parâmetros v e w da imagem correspondente ao bloco Az05_rg03 da Faixa 1 (Figura 6.24a).

Os valores de desvio-padrão estimados para a amplitude e a fase dos parâmetros do *cross-talk* apresentados na Tabela 6.10 foram obtidos por intermédio do bloco Az25_Rg00 da Faixa 2, que corresponde a um trecho homogêneo de imagem PolSAR contendo apenas o retroespalhamento de floresta primária, o que permite a inferência da ordem de grandeza da variância desses estimadores.

Tabela 6.10 – Valores de desvio-padrão calculados para a estimação da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk* para o bloco Az25_Rg00 da Faixa2.

Parâmetro do <i>Cross-Talk</i>	Desvio-Padrão	
	Amplitude	Fase (radianos)
α	0,00116	0,08780
u	0,00713	0,47716
v	0,00611	0,60911
w	0,00596	0,45458
z	0,00665	0,84173

Analisando os gráficos apresentados na Figura 6.23f e Figura 6.23g, referentes aos valores estimados da fase para os parâmetros v e w da imagem correspondente ao bloco Az14_rg02 da Faixa 3 (Figura 6.24b), pode-se verificar que não ocorreu uma flutuação

na estimação da fase, conforme descrito para o refletor PCR12. Porém, a fase radial estimada sofreu um deslocamento da ordem de 3,5 radianos, quando comparada com o valor médio apresentado na Tabela 6.9, ocasionando uma discrepância no valor estimado da fase desses parâmetros para o refletor PCR25, de acordo com os resultados apresentados na Figura 6.17h e Figura 6.17i.

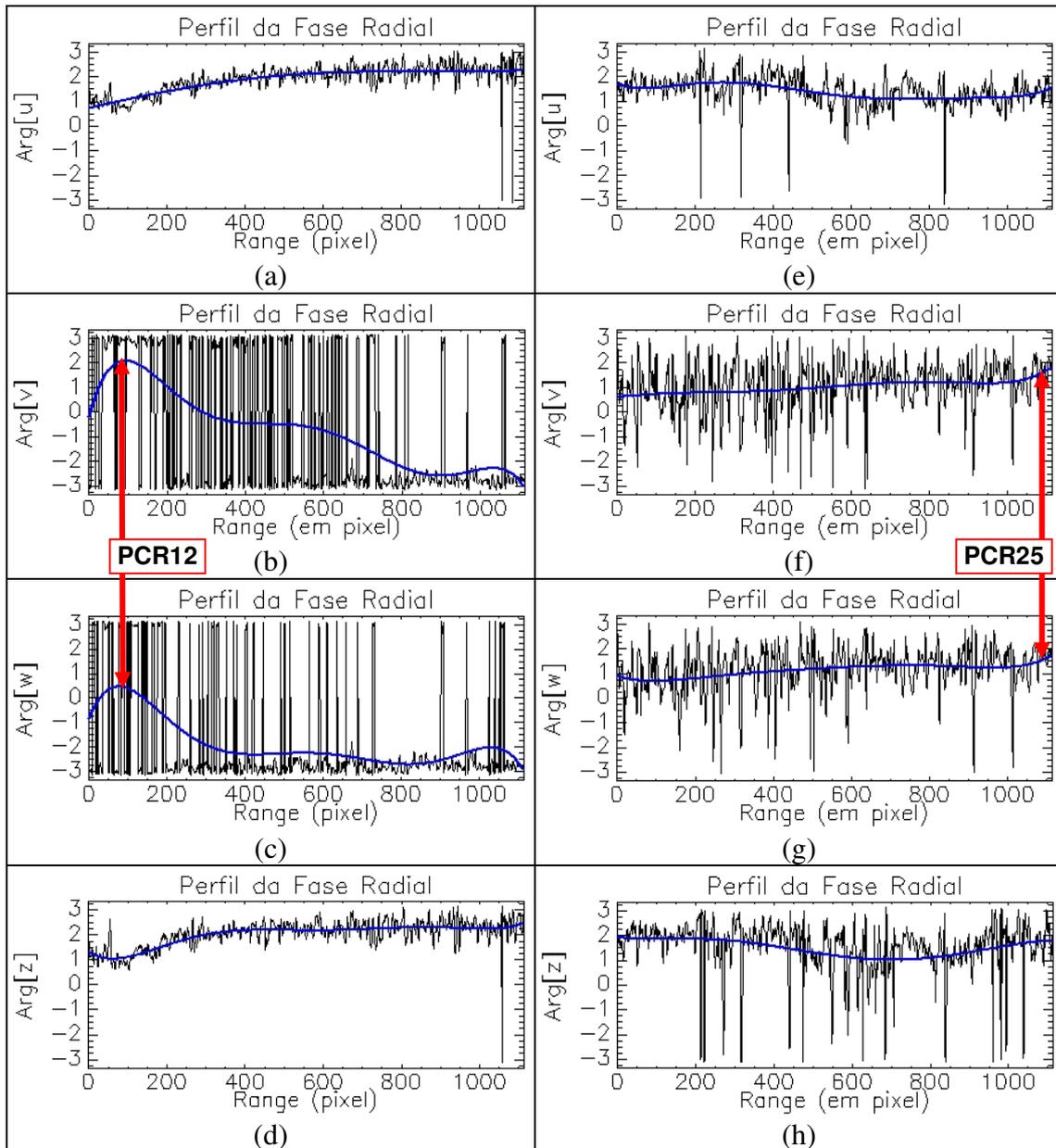


Figura 6.23 – Perfis radiais da fase dos parâmetros do *cross-talk* estimados para os blocos (a),(b),(c),(d) Az05_Rg03 da Faixa 1 (PCR12) e (e),(f),(g),(h) Az14_Rg02 da Faixa 3 (PCR25).

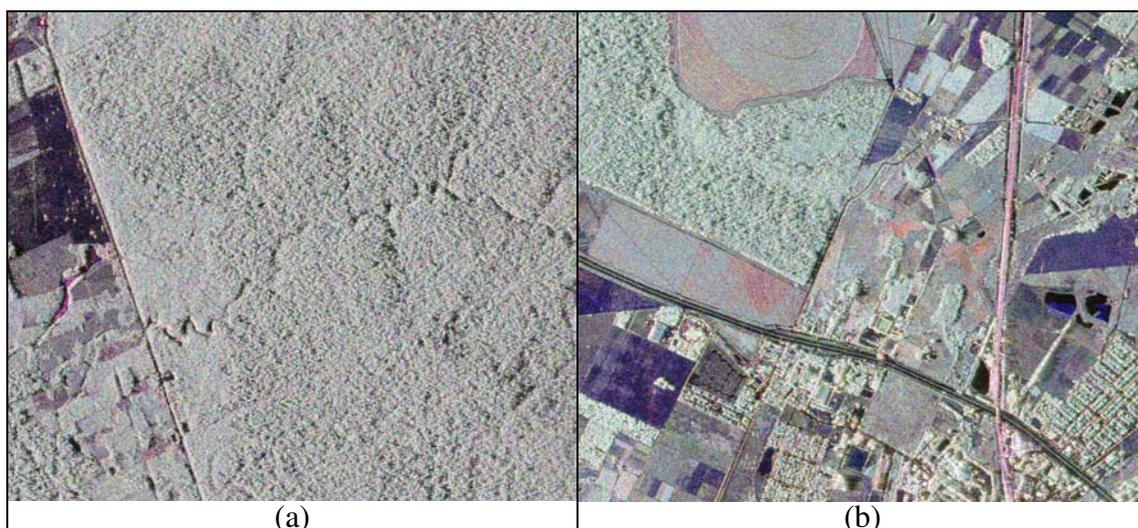


Figura 6.24 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV dos blocos (a) Az05_Rg03 da Faixa 2 e (b) Az14_Rg02 da Faixa 3.

É interessante notar que, a anomalia descrita anteriormente na estimação da fase dos parâmetros v e w , para os blocos Az05_Rg03 da Faixa 1 e Az14_Rg02 da Faixa 3, não tem origem em alvos com baixo retorno presentes nas respectivas imagens apresentadas na Figura 6.24, onde ocorre o predomínio de alvos que não atendem essa condição de retrospalhamento, o que poderia afetar as estimações em tela.

6.4.2.2 Variabilidade azimutal na estimação do *cross-talk*

As discrepâncias na estimação do *cross-talk* descritas na seção anterior mostram que, apesar dos parâmetros α , u , v , w e z serem, teoricamente, variáveis globais, ou seja, que podem ser estimadas localmente nas imagens PolSAR ao longo da direção radial e depois aplicados para toda a faixa de imageamento, é sempre desejável realizar uma análise dos respectivos valores de amplitude e da fase obtidos para os aludidos parâmetros. Além disso, outra suposição que está inserida nessa estimação local é que, as distorções $[R]$ e $[T]$ são constantes sobre todo o intervalo de coleta dos dados SAR, o que pode não ser verdadeiro, segundo descrito em Klein e Freeman (1991).

Com base na análise dos resultados apresentados na Figura 6.17, desprezando-se as discrepâncias na amplitude e na fase abordadas anteriormente, pode-se concluir que a

referida suposição, para o sensor SAR R99B, possui uma tendência de ser verdadeira, pelo fato de que diferentes blocos azimutais e radiais heterogêneos foram empregados na estimativa das distorções do *cross-talk*. Portanto, com a finalidade de investigar a estabilidade na estimação dos parâmetros do *cross-talk*, ao longo de toda a faixa de imageamento, foram empregados blocos quase homogêneos para as Faixas 1 e 2, com predomínio de floresta primária, e blocos heterogêneos para a Faixa 3, com predomínio de áreas cultivadas e urbana, considerando-se o mesmo intervalo radial, porém em posições azimutais localizadas no início e no final das faixas imageadas.

As composições coloridas das imagens correspondentes a esses blocos são apresentadas na Figura 6.25, a saber: Az00_Rg03 (Figura 6.25a) e Az11_Rg03 (Figura 6.25b) da Faixa 1; Az01_Rg00 (Figura 6.25c) e Az25_Rg00 (Figura 6.25d) da Faixa 2; e Az01_Rg03 (Figura 6.25e) e Az18_Rg03 (Figura 6.25f) da Faixa 3. Na Tabela 6.11 são apresentados os intervalos de variação do ângulo de incidência do sensor SAR R99B, para cada um dos quatro blocos radiais que compõem as três faixas imageadas, sendo que os intervalos destacados na cor cinza representam as posições radiais de cada faixa que foram selecionadas para a verificação da estabilidade na estimação do *cross-talk*.

Tabela 6.11 – Intervalos de variação do ângulo de incidência para cada bloco radial que compõem as três faixas imageadas.

Faixa	Posição Rg00		Posição Rg01		Posição Rg02		Posição Rg03		Varição
1	39,57°	47,26°	47,27°	54,95°	54,96°	62,65°	62,66°	70,34°	30,77°
2	63,19°	65,23°	65,24°	67,28°	67,28°	69,32°	69,33°	71,37°	8,18°
3	49,17°	53,67°	53,67°	58,17°	58,17°	62,66°	62,67°	67,17°	18,00°

Em função do pequeno intervalo de valores do ângulo de incidência, onde estão compreendidos os seis blocos em questão, foi utilizada uma função de ajuste polinomial do 1º grau, como solução do método de mínimos quadrados, para representar matematicamente a variação radial dos valores de amplitude e de fase estimados para os parâmetros do *cross-talk*, com exceção da fase do parâmetro α , que foi ajustada por uma constante, conforme os gráficos apresentados na Figura 6.26, que possibilitam a comparação entre os resultados obtidos para esses blocos.

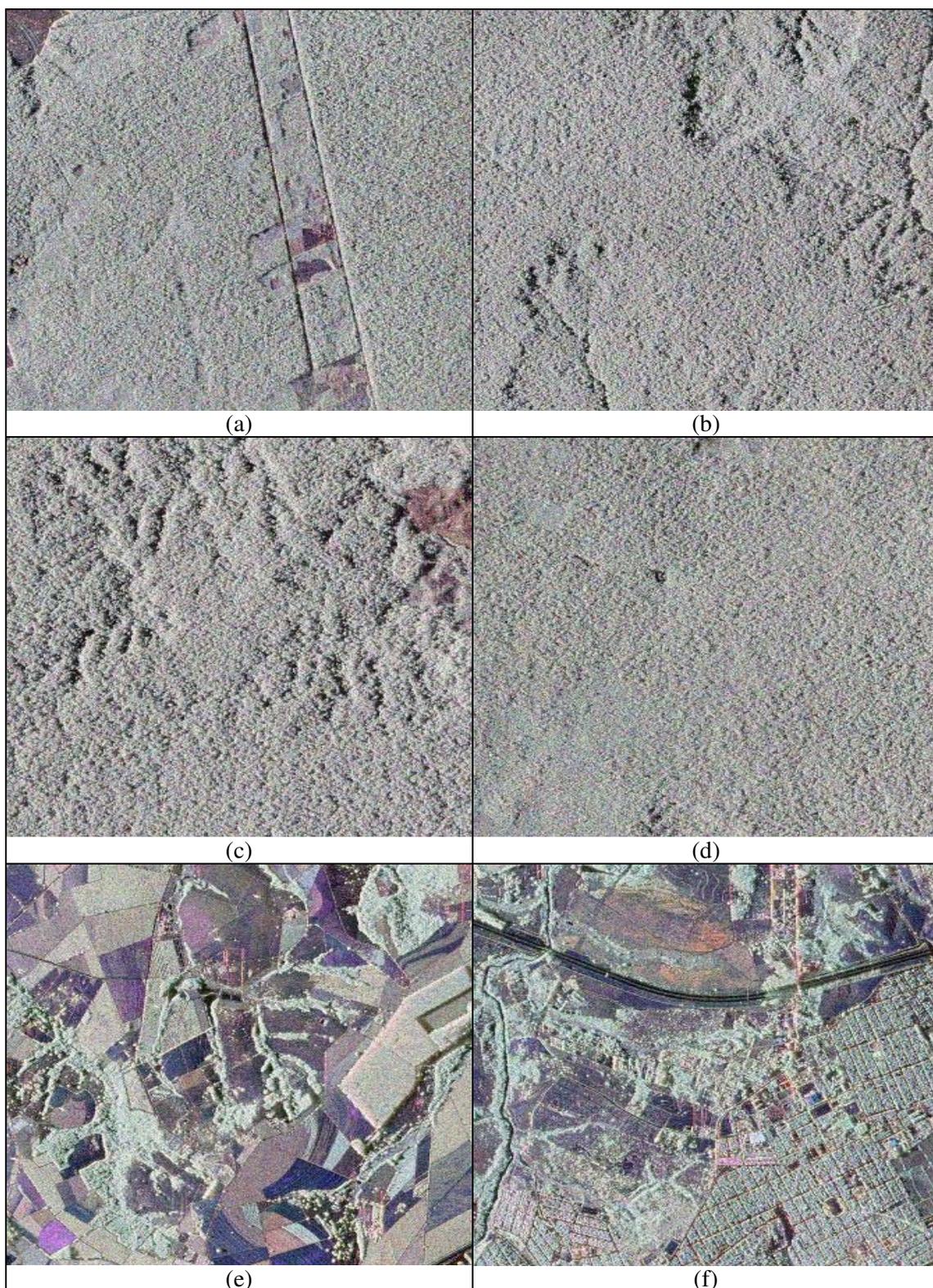


Figura 6.25 – Composições coloridas R-HH, G-HV, B-VV dos blocos (a) Az00_Rg03 e (b) Az11_Rg03 da Faixa 1, (c) Az01_Rg00 e (d) Az25_Rg00 da Faixa 2 e (e) Az01_Rg03 e (f) Az18_Rg03 da Faixa 3.

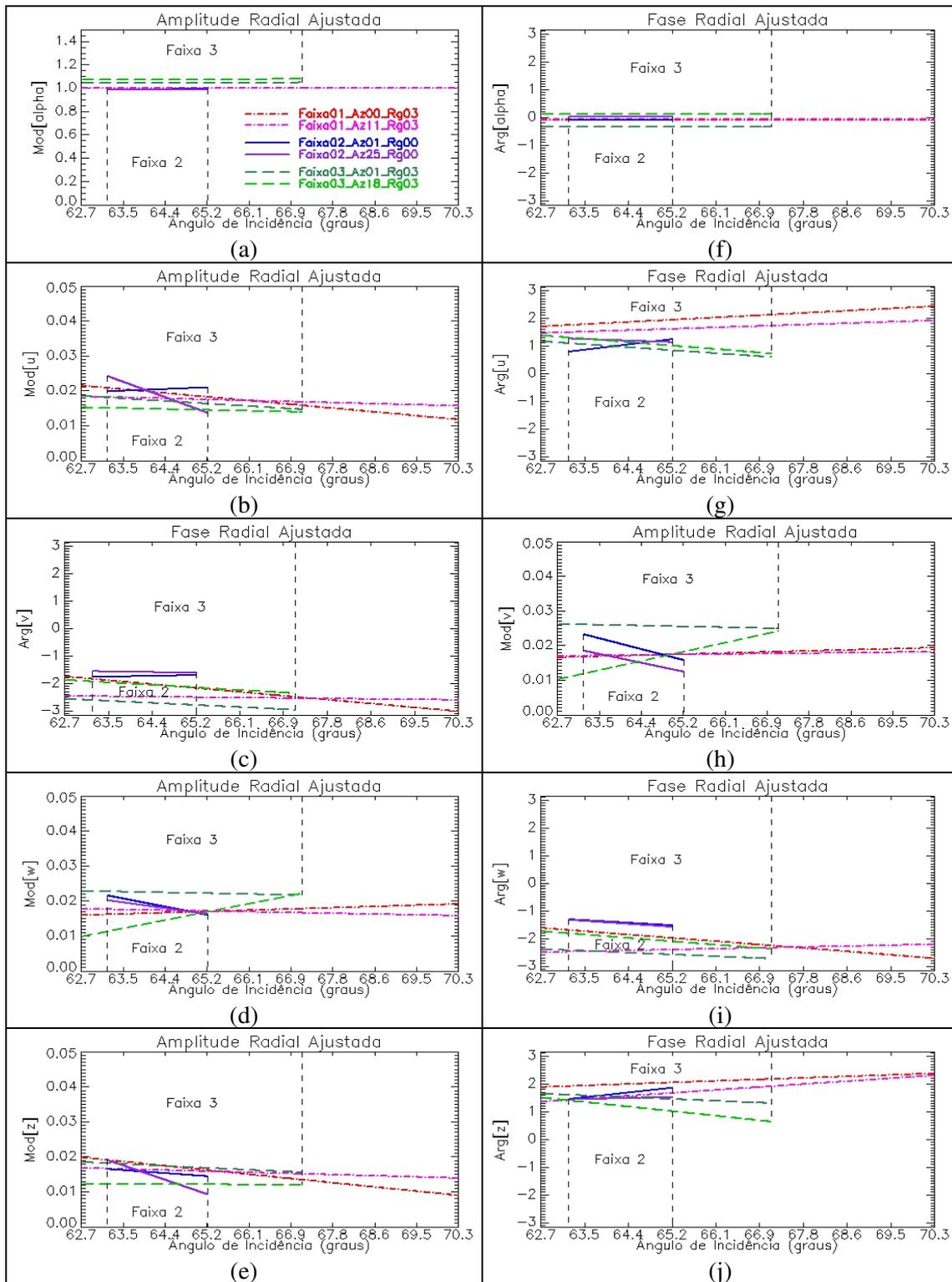


Figura 6.26 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do *cross-talk* estimados para os blocos Az00_Rg03 e Az11_Rg03 da Faixa 1, Az01_Rg00 e Az25_Rg00 da Faixa 2 e Az01_Rg03 e Az18_Rg03 da Faixa 3.

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 6.26, com relação à estimação dos parâmetros do *cross-talk*, pode-se concluir que:

- a) Com exceção das amplitudes dos parâmetros v e w , estimados para os blocos da Faixa 3, os demais ajustes polinomiais, tanto para a amplitude quanto para a fase, apresentaram uma boa concordância entre as funções radiais ajustadas para os blocos localizados em posições azimutais opostas na mesma faixa imageada. Porém, se forem considerados os valores de desvio-padrão descritos na Tabela 6.10, associado com a heterogeneidade dos alvos disponíveis nas respectivas imagens, pode-se dizer que as discrepâncias apresentadas para os blocos da Faixa 3 não foram significativas, o que não invalida a suposição em tela;
- b) A comparação entre os resultados obtidos para as Faixas 1 e 2, considerando-se o mesmo intervalo do ângulo de incidência e o mesmo alvo dominante, mostrou, novamente, uma boa concordância entre as funções radiais ajustadas para os blocos localizados em posições azimutais opostas e em diferentes faixas imageadas, com diferentes resoluções espaciais e geometrias de imageamento;
- c) A comparação entre os resultados obtidos para as Faixas 1 e 3, considerando-se o mesmo intervalo do ângulo de incidência e diferentes alvos, mostrou, visualmente, uma pequena variabilidade ao longo da direção azimutal, como foi o caso das amplitudes dos parâmetros v e w e da fase dos parâmetros u e z . Porém, se considerarmos os valores de desvio-padrão descritos na Tabela 6.10, pode-se concluir que a diferença entre os valores estimados de amplitude e de fase para os parâmetros do *cross-talk* não é significativa, quando são utilizados blocos localizados em posições azimutais opostas e em diferentes faixas imageadas, com diferentes resoluções espaciais e geometrias de imageamento.

Pelo exposto acima, pode-se dizer que, para as imagens PolSAR do sensor SAR R99B empregadas neste trabalho, existe uma estabilidade ao longo da direção azimutal na estimação dos parâmetros do *cross-talk*, independente da faixa imageada, onde essa estabilidade se torna mais visível quando alvos homogêneos são empregados para tal finalidade.

6.4.2.3 Variabilidade radial na estimação do *cross-talk*

Uma vez analisado o grau de variabilidade da distorção do *cross-talk* ao longo da direção azimutal, procedeu-se a investigação da dependência dessa distorção na direção radial, em função da variação do ângulo de incidência do sensor SAR R99B, onde, os resultados apresentados na Figura 6.26 indicam que, apesar do pequeno intervalo do ângulo de incidência considerado, essa dependência não é significativa.

De modo análogo ao descrito na seção anterior, era desejável a seleção de mosaicos de blocos radiais ao longo de todas as três faixas de imageamento, que pudessem ser considerados homogêneos, ou que pelo menos, existisse o predomínio de um determinado alvo nesses mosaicos. No caso da Faixa 1, devido ao alto grau de antropização da região compreendida nessa faixa imageada, não foi possível selecionar uma posição azimutal que contivesse apenas áreas de floresta. Por essa razão, a solução adotada foi baseada na escolha de uma porção da Faixa 1 que apresenta, ao longo de toda a direção radial de imageamento, o predomínio de áreas de floresta primária. Essa dificuldade não existiu para a Faixa 2, devido a grande porção de área de floresta primária recoberta, e para a Faixa 3, foi possível selecionar uma porção imageada que contivesse, predominantemente, área urbana.

Portanto, com a finalidade de avaliar a referida dependência radial na estimação do *cross-talk*, foram empregados três mosaicos de blocos radiais, correspondentes as posições azimutais Az07 da Faixa 1, Az22 da Faixa 2 e Az18 da Faixa 3, cujas respectivas imagens são apresentadas na Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3, respectivamente.

Em função do amplo intervalo de valores do ângulo de incidência, onde estão localizados os três mosaicos em questão, foi utilizada uma função de ajuste polinomial do 3^o grau, como solução do método de mínimos quadrados, para representar matematicamente a variação radial dos valores de amplitude e de fase estimados para os parâmetros do *cross-talk*, com exceção da fase do parâmetro α , que foi ajustada por uma constante, conforme os gráficos apresentados na Figura 6.27, que possibilitam a comparação entre os resultados obtidos para esses mosaicos.

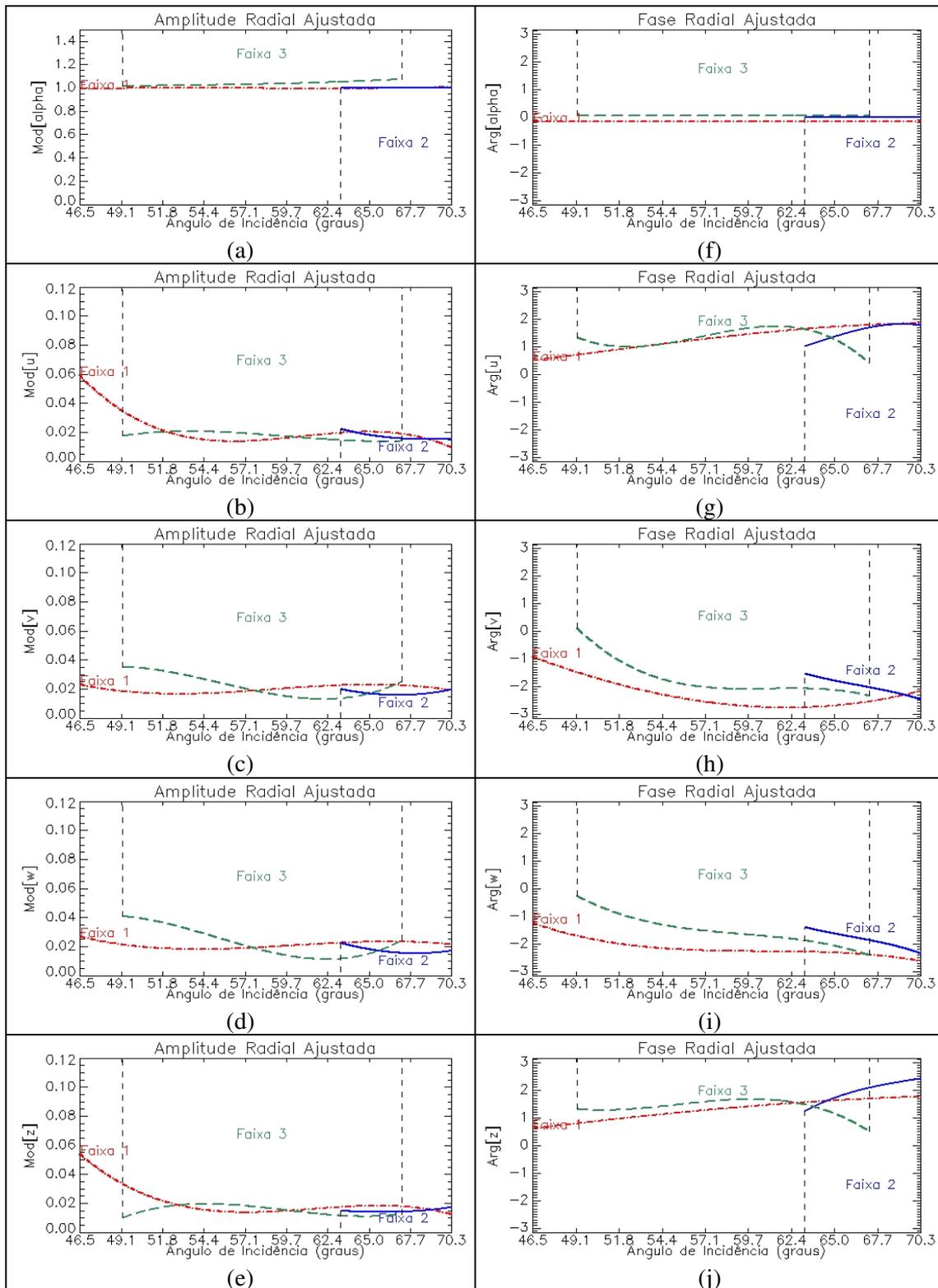


Figura 6.27 – Perfis radiais da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do *cross-talk* estimados para toda a largura radial útil da Faixa 1 (Az07), Faixa 2 (Az22) e Faixa 3 (Az18).

Da análise dos gráficos apresentados na Figura 6.27, com relação à estimação dos parâmetros do *cross-talk*, pode-se concluir que:

- a) Com relação aos valores de amplitude estimados, a comparação entre os resultados obtidos para as três faixas de imageamento, considerando-se o mesmo intervalo radial, mostrou uma boa proximidade entre as funções radiais ajustadas para todos os parâmetros do *cross-talk* e uma pequena dependência em função da variação do ângulo de incidência. Pode-se notar também que as amplitudes dos parâmetros u e z sofrem maior influência à medida que ocorre um maior afastamento entre o ângulo de incidência do radar e a direção principal de irradiação da antena SAR;
- b) Com relação aos valores de fase estimados, a comparação entre os resultados obtidos para as três faixas de imageamento, considerando-se o mesmo intervalo radial, mostrou uma boa proximidade entre as funções radiais ajustadas para os parâmetros u e z e um pequeno afastamento entre as referidas funções para os parâmetros v e w das Faixas 1 e 3, o que não é significativo, se forem considerados os valores de desvio-padrão descritos na Tabela 6.10. Além disso, percebe-se também uma pequena dependência dos valores estimados para a fase, em função da variação do ângulo de incidência, onde essa dependência foi mais acentuada para os parâmetros v e w da Faixa 3;

Pelo exposto acima, pode-se dizer que, para as imagens PolSAR do sensor SAR R99B empregadas neste trabalho, existe uma razoável estabilidade ao longo da direção radial na estimação da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk*, independente da faixa imageada, com exceção da fase estimada para os parâmetros v e w da Faixa 3, que apresentou uma pequena variabilidade.

É importante destacar que as fases introduzidas no sinal de microondas pelos termos de distorções do *channel imbalance* (r_{jj} e t_{jj}) são constantes ao longo de toda a faixa de imageamento, em função do comprimento físico constante dos caminhos de recepção e de transmissão percorridos pelo sinal no interior do sistema SAR. Como consequência, a fase do parâmetro α , que é definido pela razão desses termos (Equação 3.11), também

será constante, o que explica a adoção de um valor constante descrito anteriormente, para representar a fase desse parâmetro, conforme pode ser observado na Figura 6.27f.

A partir dos perfis radiais apresentados na Figura 6.27, e motivado pela pequena variação ocorrida ao longo da direção radial e azimutal das três faixas de imageamento, foram obtidos os respectivos valores médios da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk*, cujos resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Valores médios da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk* calculados para as Faixas 1, 2 e 3.

Parâmetro do <i>Cross-Talk</i>	Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3	
	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase
α	0,99769	-9,879°	0,99852	-0,408°	1,03669	2,758°
u	0,02124	74,470°	0,01678	90,039°	0,01749	74,447°
v	0,01993	-131,286°	0,01758	-118,734°	0,02193	-100,790°
w	0,02113	-123,219°	0,01727	-109,849°	0,02255	-86,526°
z	0,02042	73,757°	0,01521	115,697°	0,01514	79,612°

De posse dos valores descritos na Tabela 6.12, foi realizada a correção da distorção do *cross-talk* para todos os refletores, de acordo com a respectiva faixa de imageamento, onde, ao final dessa correção, foram obtidas as matrizes de espalhamento simetrizadas ($\tilde{O}_{hv} = \tilde{O}_{vh}$) para cada refletor, pois não existia nenhuma outra fonte de distorção que impedia a condição de reciprocidade dos dados PolSAR calibrados. A partir da análise dos gráficos da Figura 6.28, pode-se constatar a afirmação apresentada na Seção 6.3.1, onde a correção do *cross-talk* não modificou a forma da resposta polarimétrica, conforme exemplificado para os refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22.

Os valores médios apresentados na Tabela 6.12 representam a ordem de grandeza das distorções do *cross-talk* introduzidas pelo sistema sensor SAR R99B, e são concordantes com os valores apresentados na Tabela 6.9, onde a maior discrepância identificada é devido a fase dos parâmetros u e z da Faixa 2. A partir desses valores, e da estimação do *channel imbalance* descrita a seguir, foi possível obter uma caracterização mais próxima do ideal das distorções de recepção e de transmissão, de acordo com os resultados abordados na Seção 6.4.4.

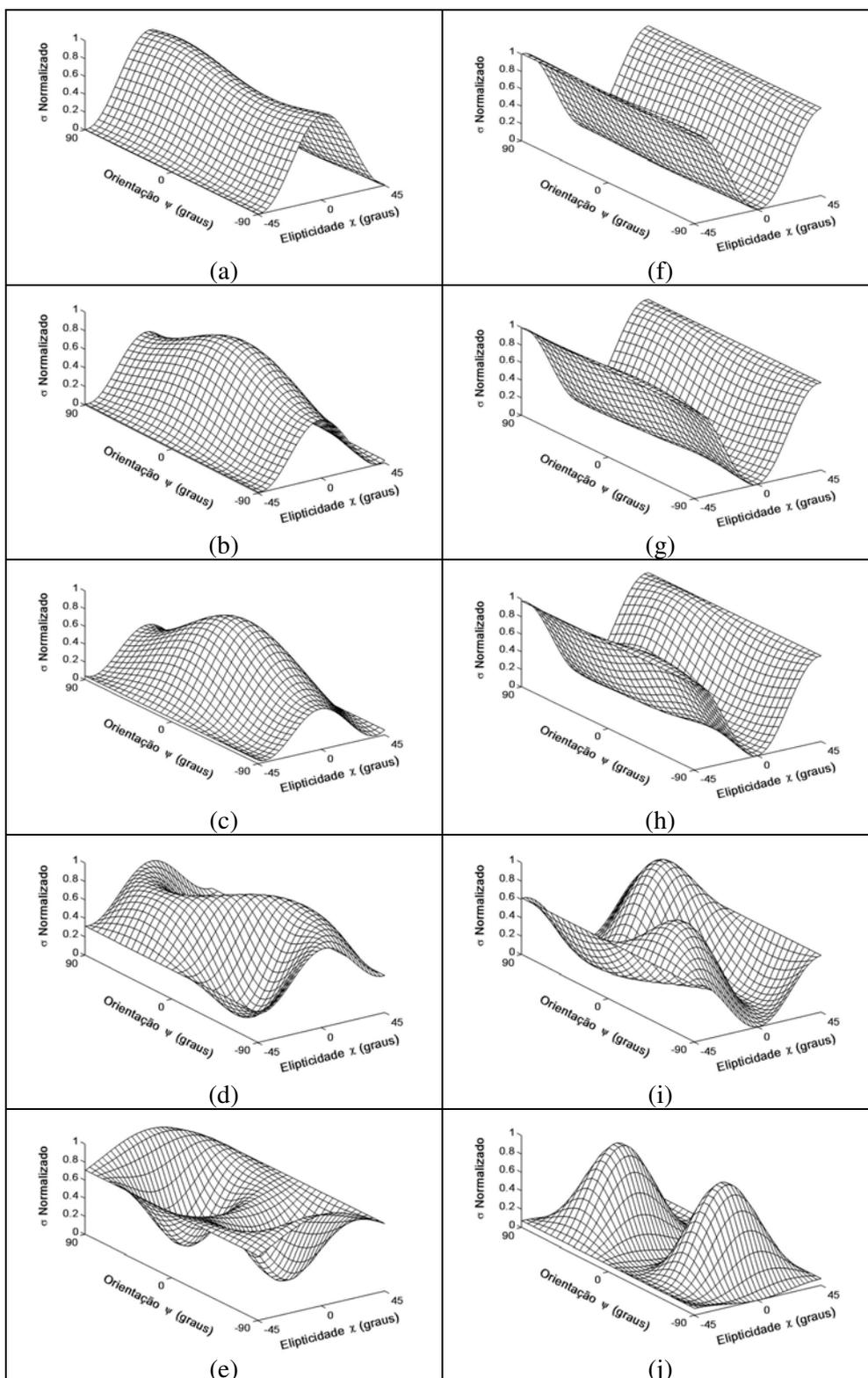


Figura 6.28 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletorres PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, depois da correção do *cross-talk*.

6.4.3 Estimação do *channel imbalance*

A etapa de estimação do parâmetro k (*channel imbalance*) foi baseada nos valores de amplitude e de fase relativa da razão HH/VV com a correção do *cross-talk*, referentes ao pico da resposta impulsiva de cada refletor. Deve-se destacar a pequena diferença média encontrada de $0,05 \pm 0,14$ dB e $5,54^\circ \pm 4,35^\circ$ entre os valores, respectivamente, da amplitude e da fase relativa antes (Tabela 6.4) e depois da referida correção, o que já era esperado em função do baixo nível do *cross-talk* estimado. De posse desses valores da amplitude e da fase relativa corrigidos, e empregando-se a Equação 3.19, foram calculados os valores do parâmetro k em cada refletor, cujos resultados obtidos e os respectivos valores médios para cada faixa são apresentados, respectivamente, nos gráficos da Figura 6.29 e na Tabela 6.13. Para garantir uma caracterização mais realista possível da distorção do *channel imbalance*, o refletor PCR22 não foi considerado no cálculo do valor médio do parâmetro k , devido à discrepância encontrada na estimação da fase desse refletor (Figura 6.29b).

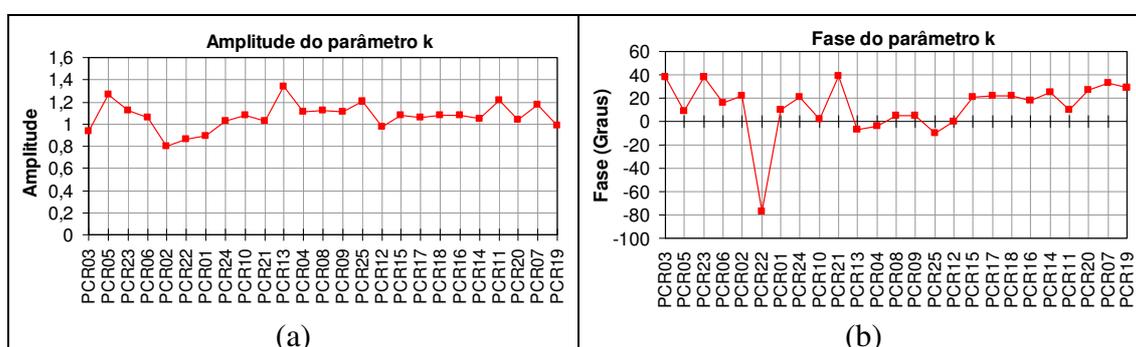


Figura 6.29 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase do parâmetro k medidos em cada refletor para estimação do *channel imbalance*.

Tabela 6.13 – Valores de média e de desvio-padrão do parâmetro k (*channel imbalance*), para cada faixa imageada, obtidos da razão HH/VV dos refletores.

Faixa	Amplitude		Fase
1	$1,08 \pm 0,16$	$0,55 \pm 1,31$ dB	$8,76^\circ \pm 12,28^\circ$
2	$1,07 \pm 0,05$	$0,57 \pm 0,43$ dB	$24,62^\circ \pm 4,87^\circ$
3 ^(*)	$1,09 \pm 0,08$	$0,77 \pm 0,65$ dB	$22,00^\circ \pm 22,64^\circ$
1, 2 e 3 ^(*)	$1,07 \pm 0,12$	$0,59 \pm 0,97$ dB	$16,25^\circ \pm 14,38^\circ$

^(*) O refletor PCR22 não foi considerado no cálculo

Após a correção do *channel imbalance*, empregando-se os valores do parâmetro k apresentados na Figura 6.29, foram calculados os valores da amplitude e da fase relativa da razão HH/VV dos refletores, cujos resultados apresentados na Figura 6.30, antes (Figura 6.8) e depois dessa correção, comprovam a adequação dos parâmetros estimados. Portanto, após a correção do *cross-talk* e do *channel imbalance*, o desbalanceamento médio de amplitude e de fase entre os canais polarimétricos, que era de 1,09 dB e de 20,69°, respectivamente, foram eliminados.

É importante destacar que, se fossem empregados nessa correção os valores médios ou alguma função polinomial de ajuste para a amplitude do parâmetro k , não seria possível eliminar totalmente essa distorção para todos os refletores, principalmente para a Faixa 1, que apresentou a maior variância entre os valores estimados. Com isso, seria necessário eliminar alguns refletores para a estimação desse parâmetro, o que não foi realizado, pois o objetivo principal deste trabalho é a comparação de diferentes métodos de calibração, sendo importante o emprego do maior número possível de refletores.

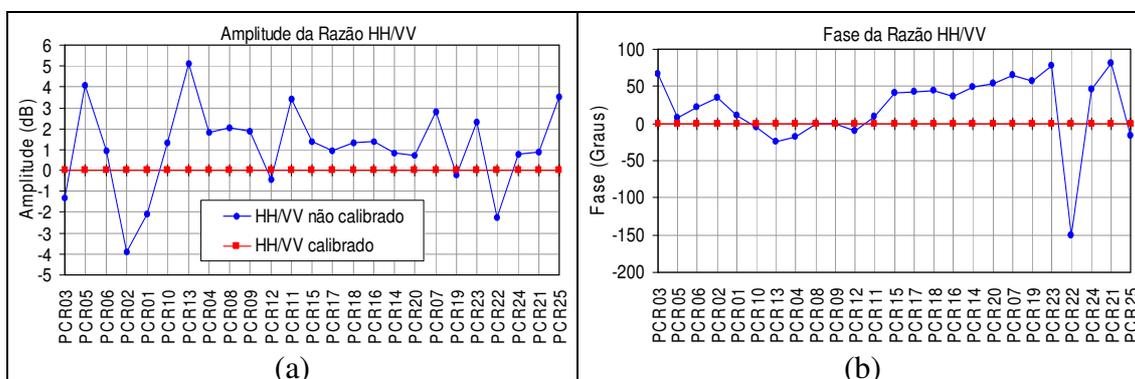


Figura 6.30 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase relativa medidos em cada refletor antes (Figura 6.8) e depois da calibração do *channel imbalance*.

Com base nos valores médios da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance* apresentados, respectivamente, na Tabela 6.12 e na Figura 6.29, foram obtidas as matrizes de espalhamento corrigidas para cada um dos refletores, cujos valores do EMQ entre as respostas polarimétricas observadas e calibradas, quando comparadas com a resposta ideal, são apresentados na Figura 6.31. Em função da utilização dos valores individuais da amplitude e da fase do parâmetro k na obtenção das

referidas matrizes, ao invés dos valores médios por faixa apresentados na Tabela 6.13, foi possível obter uma redução satisfatória nos valores do EMQ para as respostas polarimétricas calibradas, até mesmo para os refletores que apresentaram valores discrepantes do *channel imbalance*, como foi o caso do refletor PCR22.

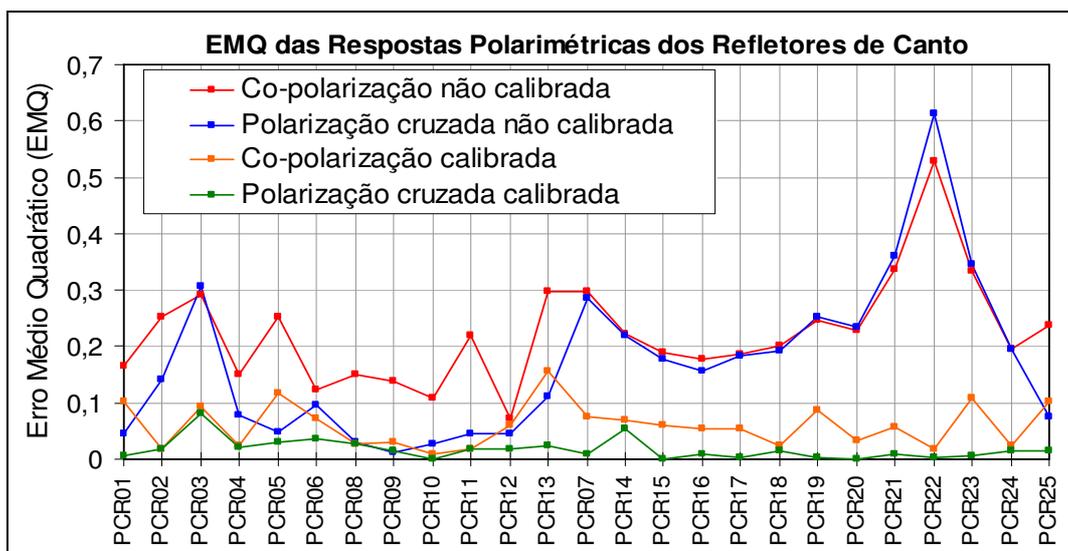


Figura 6.31 – Valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de co-polarização e de polarização cruzada observadas e de referência, para os 25 refletores, antes e depois da calibração polarimétrica.

Além da diminuição dos valores do EMQ apresentados na Figura 6.31, pode-se constatar a minimização das distorções do *cross-talk* e do *channel imbalance* obtidas para os 25 refletores, por intermédio da comparação entre as respostas polarimétricas dos refletores PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, antes (Figura 6.10) e depois (Figura 6.32) da execução do processo de calibração polarimétrica. É interessante notar que, mesmo para o refletor PCR22, que apresentou o valor do EMQ mais baixo antes da calibração, foi obtida uma resposta polarimétrica próxima ao ideal após a correção do *channel imbalance*.

Em função desses resultados, todos os refletores foram considerados na avaliação do novo método de calibração *multi-look*, conforme apresentado na Figura 6.31, sendo assim possível verificar, com maior consistência, os resultados de calibração obtidos por esse novo método.

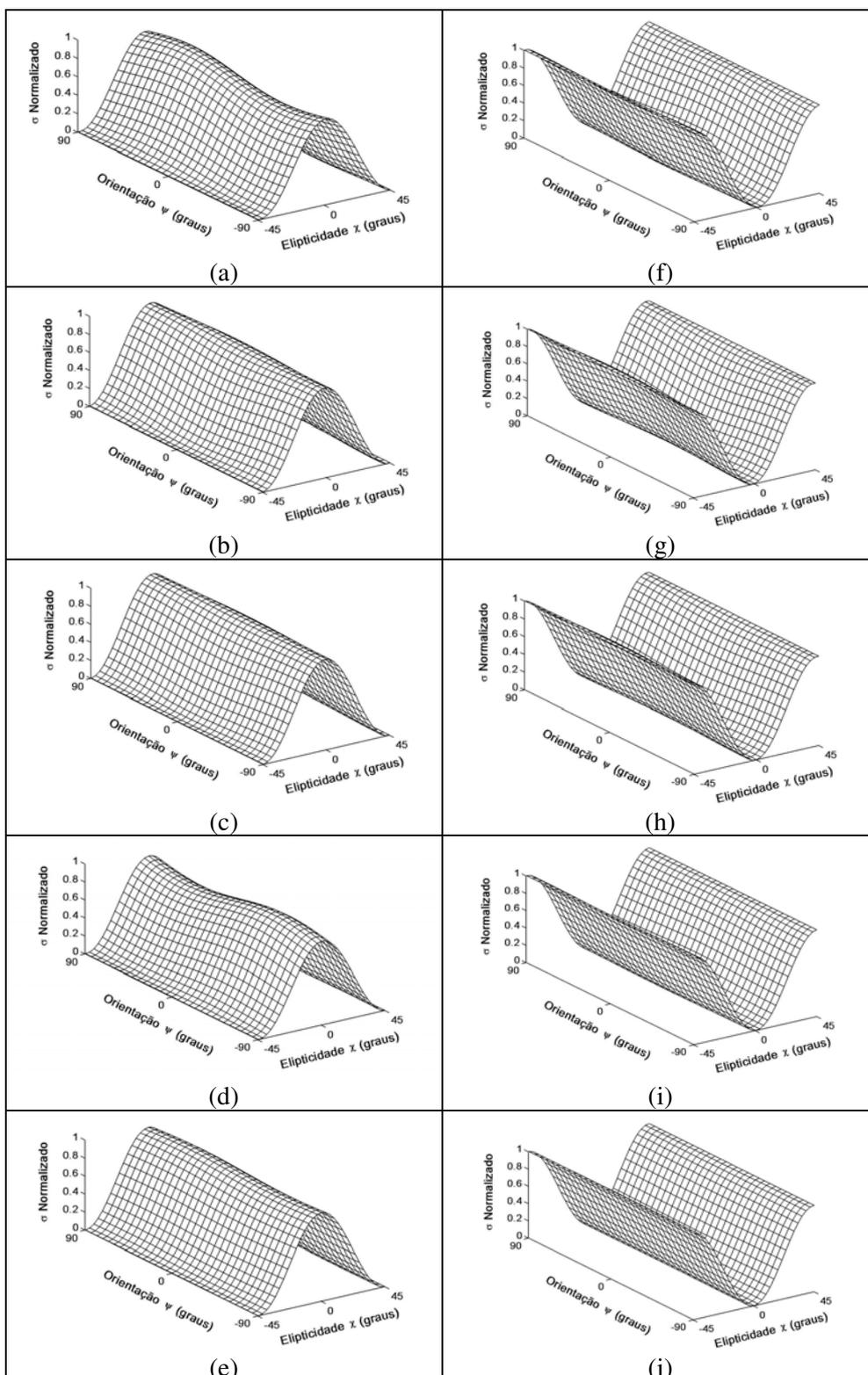


Figura 6.32 – Respostas polarimétricas de (a),(b),(c),(d),(e) co-polarização e de (f),(g), (h),(i),(j) polarização cruzada para os refletorres PCR12, PCR08, PCR11, PCR21 e PCR22, respectivamente, depois da calibração polarimétrica.

Pelo exposto, com base nas imagens PolSAR empregadas neste trabalho, pode-se concluir que existe um pequeno grau de desbalanceamento entre os canais polarimétricos do sistema sensor SAR R99B. Além disso, percebe-se também que não existe a dependência dos valores estimados para a amplitude e a fase do parâmetro k , em função da variação do ângulo de incidência.

6.4.4 Síntese dos resultados de calibração

Todo o esforço de quantificação dos termos r_{pq} e t_{pq} , onde $p, q = \{h, v\}$, das matrizes de distorção de recepção $[R]$ e de transmissão $[T]$ do sensor SAR R99B esbarra na impossibilidade de obtê-los por intermédio dos parâmetros α , u , v , w , z e k , conforme a modelagem matemática do método tradicional de Quegan (1994), mesmo que o parâmetro Y , que é desprezado, fosse estimado. Entretanto, se considerarmos a normalização das matrizes $[R]$ e $[T]$ pelos termos r_{vv} e t_{vv} , respectivamente, é possível obter uma caracterização mais próxima do ideal do nível de distorção apresentado por esse sensor, no decorrer das missões de imageamento descritas neste trabalho.

Para tal, se considerarmos que os termos r_{vv} e t_{vv} são constantes ao longo de toda a faixa de imageamento, o que é uma suposição bastante plausível, em virtude dos resultados de variabilidade azimutal e radial na estimação dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance* descritos anteriormente, pode-se obter, com base na Equação 3.11, a seguinte representação das matrizes $[R]$ e $[T]$:

$$[R] = \begin{bmatrix} r_{hh} & r_{hv} \\ r_{vh} & r_{vv} \end{bmatrix} = r_{vv} \begin{bmatrix} k & w \\ uk & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [T] = \begin{bmatrix} t_{hh} & t_{hv} \\ t_{vh} & t_{vv} \end{bmatrix} = t_{vv} \begin{bmatrix} \alpha k & \alpha kz \\ v & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Com base nas matrizes apresentadas na Equação 6.3 e nos valores médios da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk* (Tabela 6.12) e do *channel imbalance* (Tabela 6.13), foram obtidos os valores que caracterizam quantitativamente os termos das matrizes de distorção $[R_j]$ e $[T_j]$, para a faixa de imageamento $j = \{1, 2, 3\}$, onde:

$$[R_1] = \begin{bmatrix} 1,076 \angle 8,7^\circ & 0,021 \angle -123,2^\circ \\ 0,023 \angle 83,2^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix}, [T_1] = \begin{bmatrix} 1,074 \angle -1,1^\circ & 0,022 \angle 72,6^\circ \\ 0,020 \angle -131,3^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 1,069 \angle 24,6^\circ & 0,017 \angle -109,8^\circ \\ 0,018 \angle 114,6^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix}, [T_2] = \begin{bmatrix} 1,067 \angle 24,2^\circ & 0,016 \angle 139,9^\circ \\ 0,017 \angle -118,7^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$[R_3] = \begin{bmatrix} 1,095 \angle 22,0^\circ & 0,022 \angle -86,5^\circ \\ 0,019 \angle 96,4^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix}, [T_3] = \begin{bmatrix} 1,13 \angle 24,75^\circ & 0,017 \angle 104,4^\circ \\ 0,022 \angle -100,8^\circ & 1,0 \angle 0,0^\circ \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Da análise dos resultados apresentados nas Equações 6.4, 6.5 e 6.6, considerando-se as distorções polarimétricas do sistema sensor SAR R99B, pode-se concluir que:

- a) Os termos equivalentes das matrizes de distorção de recepção e de transmissão obtidas para as três faixas de estudo, independente das diferentes resoluções espaciais, dos alvos disponíveis e das geometrias de imageamento, apresentaram valores próximos, evidenciando a estabilidade do sensor ao longo do período de tempo referente à aquisição das imagens PolSAR avaliadas;
- b) Após a normalização pelos termos r_{vv} e t_{vv} , os valores obtidos para as razões $k = r_{hh}/r_{vv}$ e $\alpha k = t_{hh}/t_{vv}$ são maiores que 1, o que ratifica a conclusão apresentada na Seção 6.3.1, onde os termos r_{vv} e t_{vv} deveriam apresentar valores menores que os parâmetros r_{hh} e t_{hh} ;
- c) A suposição de reciprocidade das matrizes de distorção do sistema, ou seja, $[R] = cte[T]^T$, pode ser considerada, ratificando os resultados preliminares apresentados na Seção 6.3.1, pois a razão média entre as amplitudes dos termos do *cross-talk* r_{pq} e t_{qp} ($p \neq q$) e do *channel imbalance* r_{jj} e t_{jj} , para as três faixas imageadas, foram iguais a 0,46 dB e -0,08 dB, respectivamente;
- d) A distorção do *cross-talk* apresentou valores médios de recepção e de transmissão iguais a -34,03 dB e -34,49 dB, respectivamente, enquanto que a distorção do *channel imbalance* apresentou valores médios de recepção e de transmissão iguais a 0,66 dB \angle 18,43° e 0,74 dB \angle 15,95°, respectivamente.

A obtenção das matrizes de distorções apresentadas anteriormente possibilitou a caracterização das distorções de recepção e de transmissão do sensor SAR R99B, representando o ineditismo deste estudo detalhado para esse sensor. Além disso, buscou-se a minimização da incerteza na estimação dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance*, o que contribuiu para a quantificação mais realista possível das distorções impostas pelo sistema sensor SAR R99B às imagens PolSAR em questão.

6.5 Método de calibração polarimétrica *multi-look*

Concluída a avaliação dos resultados obtidos com o método de calibração polarimétrica proposto por Quegan (1994), e modificado em Kimura et al. (2004), procedeu-se a aplicação do novo método de calibração polarimétrica *multi-look* descrito no Capítulo 6. Os resultados obtidos por este método foram empregados na comprovação da segunda hipótese do trabalho, que se refere à possibilidade de empregar somente as imagens PolSAR para a calibração automática do *cross-talk* e do *channel imbalance*.

A fase de análise dos resultados obtidos com o novo método de calibração foi precedida de uma avaliação criteriosa da qualidade radiométrica e geométrica das imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B. Para tal, foi realizada a quantificação do erro de registro, da resolução espacial, e do grau de correlação entre os *looks*, visando à comprovação da qualidade dessas imagens e de determinadas suposições teóricas descritas na Seção 5.3.2, para emprego do método em questão, cujos resultados obtidos são descritos a seguir.

6.5.1 Avaliação do registro entre as imagens *multi-look complex*

A primeira análise geométrica realizada com as imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B foi referente à quantificação do erro de registro existente entre essas imagens. Para tal, conforme ilustrado na Figura 6.33, foram calculados os erros quadráticos de deslocamento, em *pixel*, para as imagens correspondentes aos *look 1* e *look 3*, em relação ao *look 2*, com base nas respectivas posições azimutais e radiais do pico da resposta impulsiva dos 25 refletores. Os resultados obtidos para esses deslocamentos, para as componentes polarimétricas HH e VV, podem ser observados nos gráficos

constantes da Figura 6.34, cujos respectivos valores do EMQ (em *pixel*) calculados para as faixas imageadas estão descritos na Tabela 6.14.

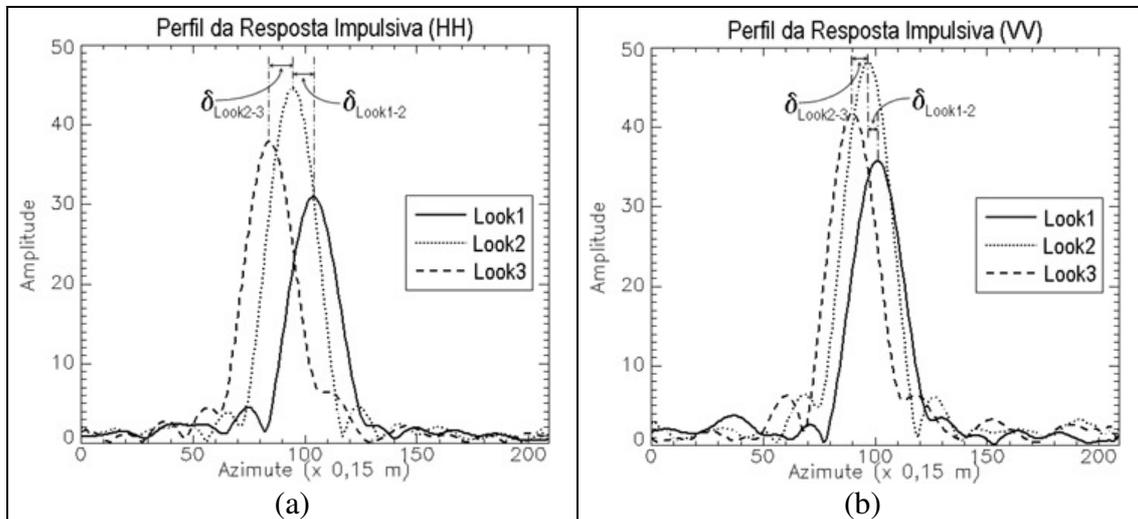


Figura 6.33 – Deslocamento azimutal entre as respostas impulsivas do refletor PCR01, referentes às componentes (a) HH e (b) VV das três imagens MLC.

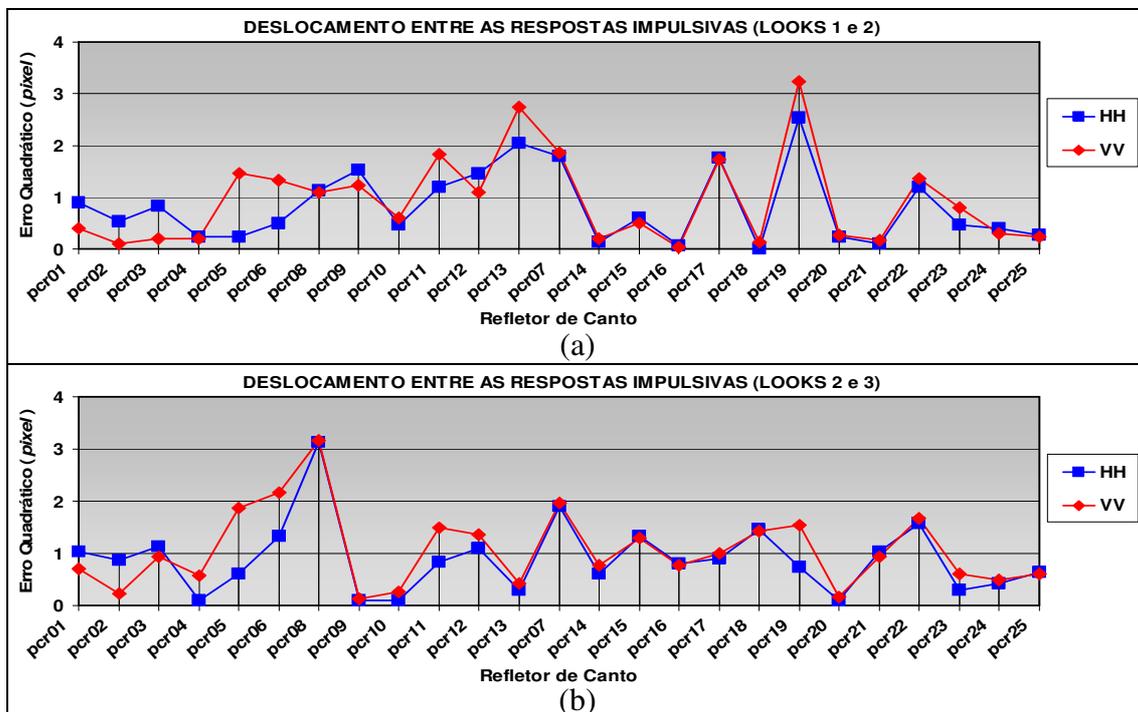


Figura 6.34 – Deslocamento (em *pixel*) entre as imagens correspondentes aos (a) looks 1 e 2 e (b) looks 2 e 3, para as componentes HH e VV, com base na posição do pico da resposta impulsiva dos 25 refletores.

Tabela 6.14 – Valores do EMQ (em *pixel*) referente ao registro entre as imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B, para as componentes HH e VV.

Faixa de Imageamento	Polarização	Look 1-Look2	Look 2-Look3
1	HH	1,0695	1,1931
	VV	1,2686	1,4241
2 e 3	HH	1,0782	1,0413
	VV	1,2404	1,1363
1, 2 e 3	HH	1,0740	1,1168
	VV	1,2540	1,2825

É importante destacar que, de modo análogo ao ocorrido na fase de verificação do erro de registro entre as componentes HH e VV, conforme descrito na Seção 6.3.2.2, foram obtidos valores desprezíveis de deslocamento na direção radial, entre as imagens PolSAR MLC, para todos os 25 refletores empregados, o que é esperado para um adequado processo de geração de imagens SAR.

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.14, destaca-se a existência de um pequeno erro de registro entre as imagens PolSAR correspondentes ao *look 1* e *look 3*, em relação ao *look 2*, para as três faixas de imageamento, o que é comprovado pelos valores do EMQ terem ultrapassado 1 *pixel*. Portanto, foi necessário realizar a correção do registro para os blocos de imagens PolSAR MLC que apresentaram valores de erro quadrático maiores que 1 *pixel*, conforme os resultados apresentados na Figura 6.34, sendo empregado apenas uma pequena translação na direção azimutal, cujos valores variaram de 1 a 3 *pixels*.

Deve-se destacar que os maiores erros de registro entre as imagens MLC, iguais a 3 *pixels*, ocorreram para os refletores PCR08 e PCR19, cuja explicação para esse fato tem origem na forma distorcida das respectivas respostas impulsivas desses refletores, de acordo com os resultados abordados na Seção 6.3.2.1.

Ao final dessa etapa do trabalho, foi possível atestar que as imagens PolSAR MLC apresentavam um registro adequado, da ordem de *subpixel*, o que atende a um dos requisitos básicos para avaliação do novo método de calibração proposto. Outra

conclusão importante que pode ser obtida da análise dos dados apresentados na Figura 6.34, ratificando os resultados apresentados na Seção 6.3.2.2, se refere à qualidade do registro existente entre as componentes HH e VV das imagens MLC, da ordem de $\frac{1}{2}$ *pixel*, cujos valores do EMQ calculados entre as imagens correspondentes aos *look* 1 e *look* 3, em relação ao *look* 2, foram iguais a 0,4593 e 0,4832 *pixel*, respectivamente.

6.5.2 Avaliação da resolução espacial das imagens *multi-look complex*

Com a finalidade de verificar a qualidade do processamento *multi-look* realizado para a geração das três imagens PolSAR MLC de interesse neste trabalho, foram calculados para as componentes polarimétricas HH e VV das imagens em questão, de modo análogo ao descrito na Seção 6.3.2.1, os valores médios e os respectivos desvios-padrões da resolução espacial azimutal para os 25 refletores, cujos resultados obtidos estão discriminados na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Valores de média e de desvio-padrão da resolução espacial azimutal para as componentes HH e VV, das imagens PolSAR MLC do sensor SAR R99B.

Polarização	Resolução Espacial Azimutal Estimada			Valor Ideal
	Look 1	Look 2	Look 3	
HH	3,24 ± 0,09	3,21 ± 0,10	3,23 ± 0,10	3,36 m
VV	3,22 ± 0,08	3,23 ± 0,11	3,24 ± 0,10	

Da análise dos resultados descritos acima, pode-se concluir que os valores médios obtidos para a resolução espacial azimutal, para as componentes HH e VV, estão bem próximos do valor ideal descrito na Tabela 6.15, que corresponde a uma resolução espacial três vezes maior que ao valor ideal das imagens SLC, conforme apresentado na Tabela 6.5.

Esses resultados ratificam as conclusões apresentadas na Seção 6.3.2.1, referentes à boa qualidade geométrica das imagens em questão, e é um indicador preliminar do apropriado processamento *multi-look* realizado por intermédio do aplicativo SPSAR, sem a sobreposição entre as funções de referência azimutal, referentes à três visadas independentes. Portanto, com base nesses resultados, é esperado que as respectivas

imagens complexas obtidas sejam descorrelacionadas, o que satisfaz a segunda condição importante para aplicação do novo método de calibração, sendo que tal comprovação é descrita a seguir.

6.5.3 Avaliação da correlação espacial entre as imagens *multi-look complex*

Uma vez alcançado um erro de registro aceitável entre as três imagens PolSAR MLC de cada bloco processado, com valores inferiores a 1 *pixel*, foi possível então quantificar o grau de correlação espacial existente entre essas imagens. Essa quantificação teve por finalidade ratificar a conclusão preliminar apresentada anteriormente, com relação à descorrelação existente entre as matrizes de espalhamento $[S]$ produzidas para cada *look*, ao final da fase de geração das imagens SAR.

A estimação da correlação *multi-look*, de acordo com a teoria descrita na Seção 5.2, foi baseada na seleção de amostras de alvos naturais, com diferentes graus de heterogeneidade, presentes nas imagens PolSAR correspondentes às três faixas imageadas. Para tal, foram identificadas 23 (vinte e três) classes distintas, que caracterizam adequadamente a grande diversidade de mecanismos de espalhamento existentes nessas imagens, englobando desde alvos homogêneos, onde o *backscatter* é modelado por uma constante, como é o caso de corpos d'água, passando por alvos heterogêneos, que são representados por áreas de floresta primária, até chegar aos alvos extremamente heterogêneos, que são bem caracterizados por áreas urbanas.

Inicialmente, foram definidas as dimensões na direção radial e azimutal da janela retangular que foi empregada no processo de filtragem passa-baixa da média das imagens PolSAR MLC, de modo que essa janela contivesse um número de amostras independentes $L \geq 1$ (Figura 5.1), necessárias para a estimação da correlação complexa *multi-look*. Para tal, foram determinados os valores de distância na direção radial (*lag x*) e azimutal (*lag y*) que forneceram valores da Função de Autocorrelação Espacial (ACF) menores que um limiar igual a 0,10, onde, a partir desse limiar, os *pixels* separados pelo respectivo *lag* foram considerados descorrelacionados. Esse procedimento foi aplicado para cada uma das 23 regiões que foram extraídas das imagens para representar a

variação radiométrica dos alvos de interesse, cujo número de amostras não independentes selecionadas para cada classe variou de 7.304 a 271.311 *pixels*.

Ao final desse procedimento, foram obtidos os mesmos valores para o *lag x* e *lag y*, iguais a 3 e 8, respectivamente, para todas as amostras selecionadas e para as quatro componentes polarimétricas das imagens MLC disponíveis. Na Figura 6.35 são apresentados os gráficos que ilustram, para a classe *regeneração2*, as variações dos valores da ACF, ao longo da direção radial (*lag x*) e azimutal (*lag y*), que foram calculadas para a componente HH de cada uma das três imagens MLC.

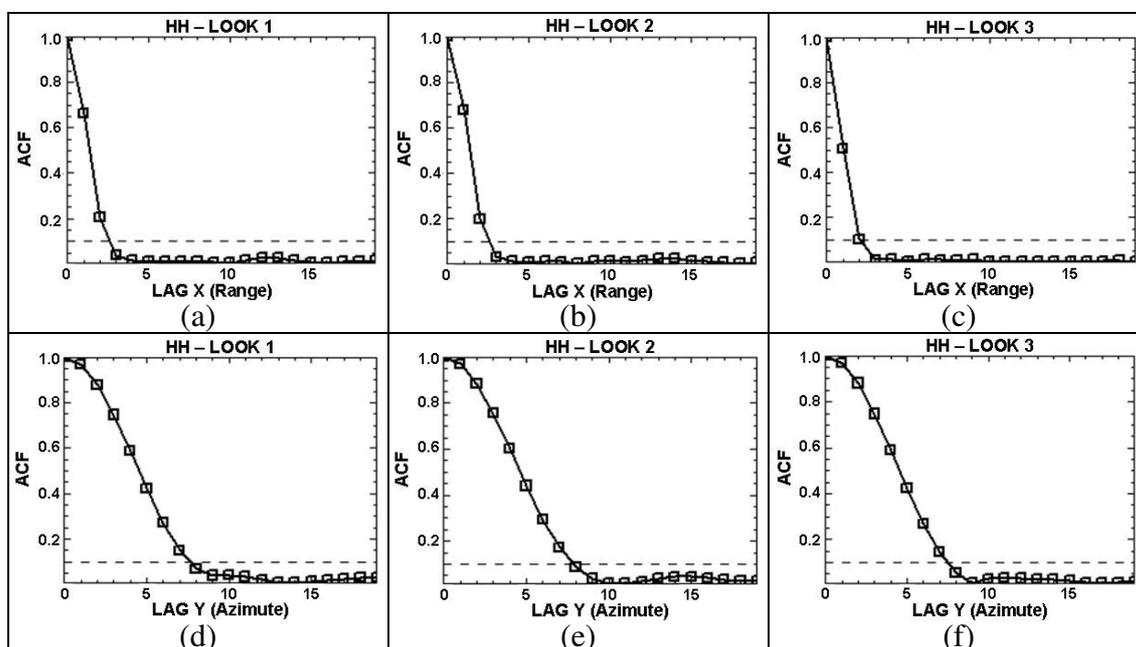


Figura 6.35 – Função de Autocorrelação Espacial calculada para a classe *regeneração2* na direção (a),(b),(c) radial e (d),(e),(f) azimutal, para a componente HH das imagens correspondentes ao *look 1*, *look 2* e *look 3*, respectivamente.

Com a finalidade de garantir que pelos menos uma amostra independente fosse considerada no cálculo da correlação complexa, foi definida uma janela de filtragem de tamanho radial e azimutal igual a 5 e a 9 *pixels*, respectivamente, o que forneceu um valor de $L = 45 / (3 \times 8) = 1,875$. Com base nessa janela, foi realizado o processo de filtragem das imagens PolSAR MLC, de onde foram extraídas as amostras necessárias para o cálculo do módulo da média amostral $\left\langle \hat{p}_L \right\rangle$ de cada classe, a partir dos valores

estimados, por intermédio da Equação A.8, para o coeficiente de correlação complexa amostral $\hat{\rho}_L$ entre os *looks* 2 e 3 em relação ao *look* 1.

Uma vez conhecido o número de amostras independentes L e os valores $|E(\hat{\rho}_L)| = |\langle \hat{\rho}_L \rangle|$ referentes a cada classe de interesse, procedeu-se ao cálculo dos respectivos estimadores não tendenciosos \hat{D} , por intermédio da inversão da Equação 5.3. Na Figura 6.36 são apresentados os gráficos que contêm os valores do estimador \hat{D} e o respectivo intervalo de confiança de 99%, obtidos por intermédio da Equação 5.5 e Equação 5.6, respectivamente, onde o número N de amostras independentes selecionadas para cada classe de interesse variou de aproximadamente 304 a 11.304, considerando-se a existência de uma amostra independente para cada conjunto de 3×8 *pixels*.

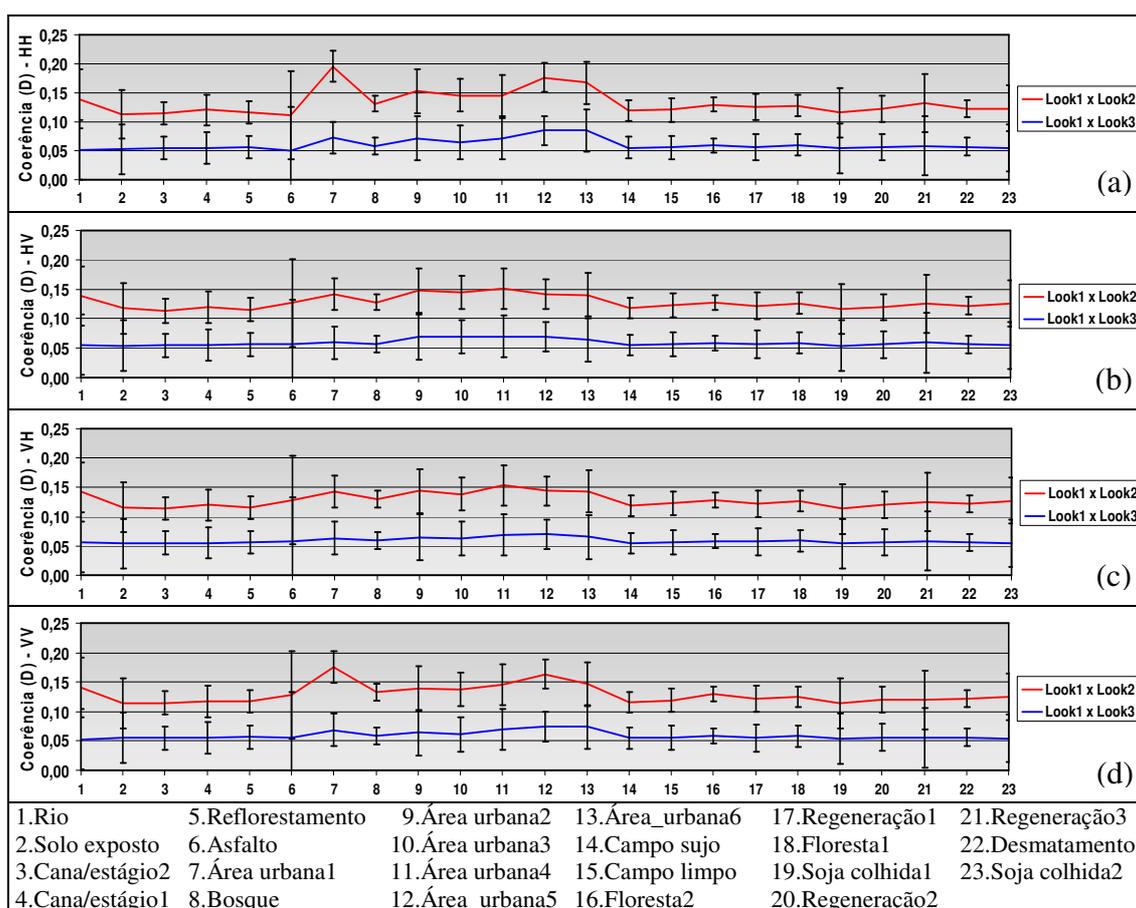


Figura 6.36 – Valores de coerência amostral de 23 classes nas componentes (a) HH, (b) HV, (c) VH e (d) VV, que foram estimados sobre as imagens correspondentes aos *looks* 1 e *look* 3, em relação ao *looks* 2.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.36, foram calculados os respectivos valores médios, referente às 23 classes de interesse, da coerência *multi-look* para as quatro componentes polarimétricas, considerando-se a correlação existentes entre os *looks* 2 e 3, em relação ao *look* 1, cujos resultados estão descritos na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 – Valores médios da coerência *multi-look*, referente às 23 classes de interesse, estimados para as componentes polarimétricas.

Polarização	Coerência média entre os <i>looks</i> 1 e 2	Coerência média entre os <i>looks</i> 1 e 3
HH	0,1334	0,0609
HV	0,1283	0,0589
VH	0,1285	0,0587
VV	0,1297	0,0591

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.16, pode-se concluir que os valores médios obtidos para a coerência entre os *looks* 1 e 2, independente da componente polarimétrica considerada, foram baixos, o que indica a utilização de funções de referência azimutal com uma sobreposição mínima para geração das respectivas imagens. No caso da coerência média estimada para as componentes polarimétricas entre os *looks* 1 e 3, os valores obtidos foram extremamente baixos, o que permite afirmar que foram empregadas funções de referência azimutal com sobreposição desprezível para a geração das respectivas imagens.

Portanto, com base nos resultados obtidos para a correlação espacial entre as imagens PolSAR MLC empregadas neste trabalho, o que ratifica a conclusão preliminar apresentada na Seção 6.5.2, é possível considerar que essas imagens são descorrelacionadas, o que satisfaz a primeira condição fundamental, descrita na letra (g) da Seção 5.3.2, referente ao adequado processo de formação dessas imagens para aplicação do novo método de calibração polarimétrica.

6.5.4 Avaliação da calibração polarimétrica para as imagens *multi-look complex*

Além da confirmação da descorrelação existente entre as imagens PolSAR MLC, o outro requisito fundamental que foi avaliado, antes da aplicação do novo método de

calibração, se refere à suposição descrita na letra (h) da Seção 5.3.2, com relação à invariância para cada *look*, das matrizes de distorções $[R]$ e $[T]$ do sensor SAR R99B, que são representadas pelos parâmetros α , u , v , w , z e k (Equação 4.11). Para tal, foram processados 25 conjuntos de dados PolSAR constituídos de três imagens no formato MLC e uma no formato SLC, com dimensão radial e azimutal de 256×2562 *pixels*, respectivamente, a partir dos blocos descritos na Tabela 4.5, e contendo o sinal de retorno de um refletor, conforme os exemplos da Figura 6.37. Esse procedimento de recorte dos blocos teve por finalidade reduzir o volume de dados armazenados em disco rígido e o tempo de processamento necessário à obtenção de todos os resultados que serão descritos a seguir, referentes à avaliação do novo método de calibração.

Com base nesses conjuntos de imagens PolSAR foram estimados quatro perfis radiais ajustados, tanto para a amplitude quanto para a fase, de cada um dos parâmetros do *cross-talk*. De posse desses perfis ajustados foram extraídos, de acordo com a posição radial do refletor dentro de cada imagem, os respectivos valores da amplitude e da fase dos parâmetros α , u , v , w , z e k , cujos resultados obtidos para 23 refletores estão consolidados nos gráficos apresentados na Figura 6.38 e Figura 6.39. Deve-se destacar que a estimação dos parâmetros em questão não foi realizada para os refletores PCR03 e PCR05, devido à localização dos mesmos em uma porção da Faixa 1 que apresentou valores radiométricos discrepantes, o que resultaria em estimativas não confiáveis para esses parâmetros, conforme abordado na Seção 6.4.2.1.

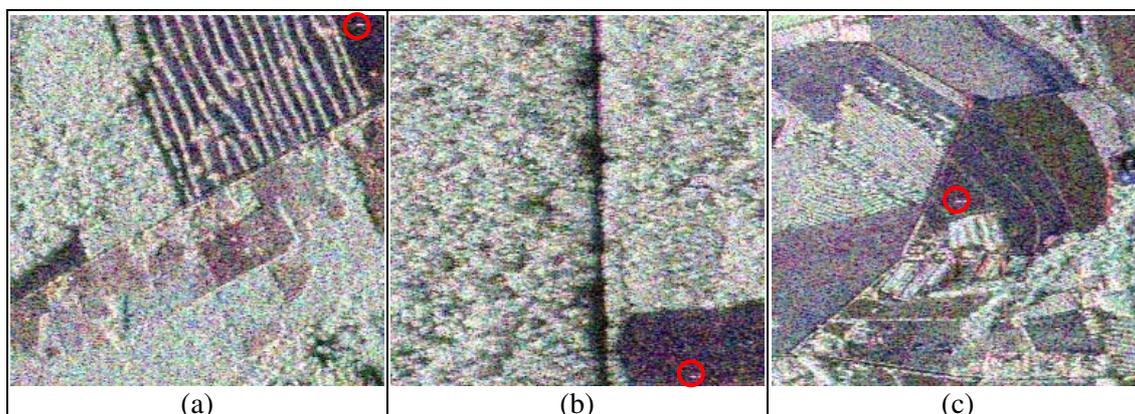


Figura 6.37 – Composições coloridas R-HH,G-HV,B-VV de três sub-blocos, com os refletores (a) PCR02, (b) PCR15 e (c) PCR24, destacados em vermelho.

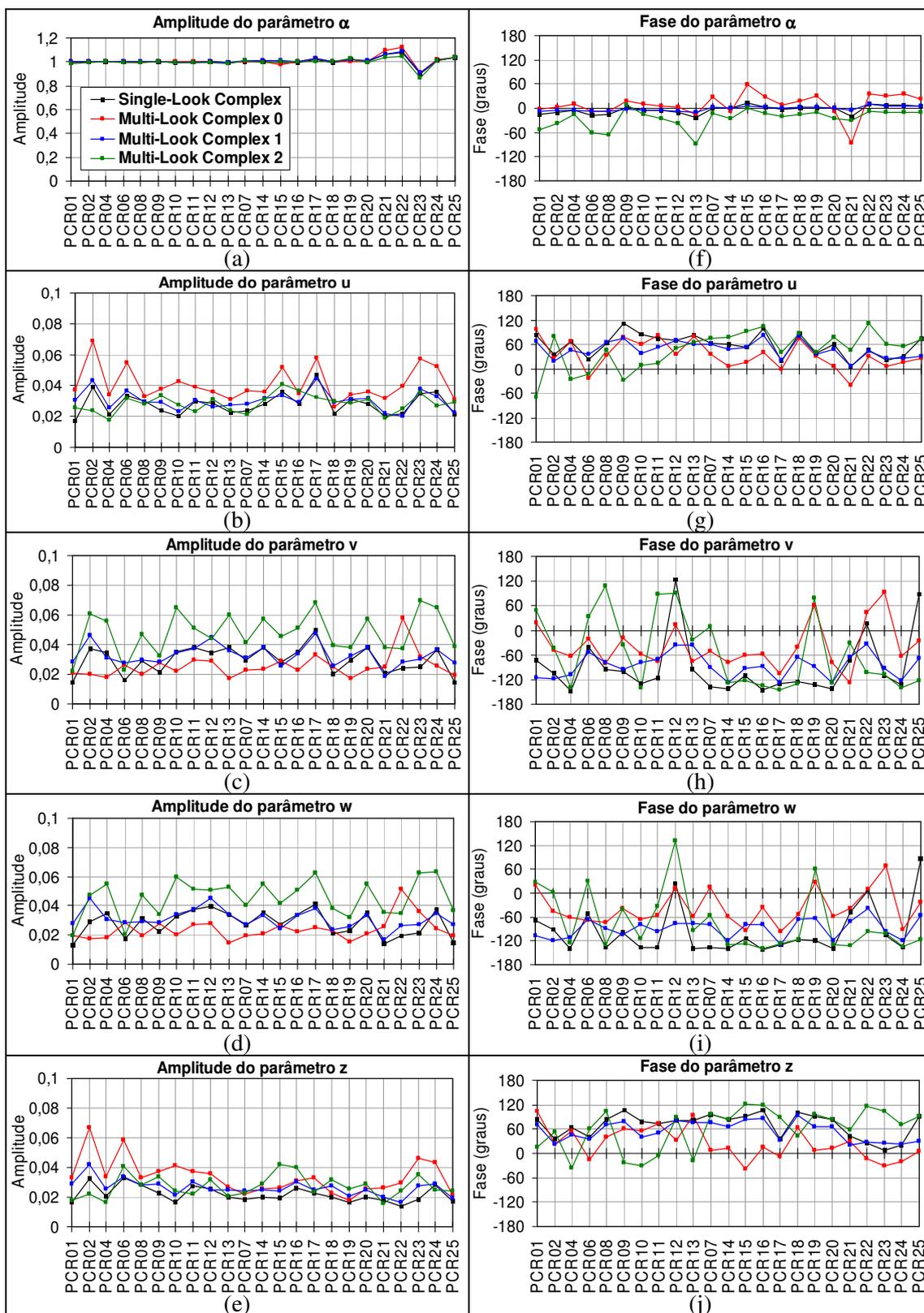


Figura 6.38 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros do *cross-talk* em cada refletor, para as imagens MLC e SLC.

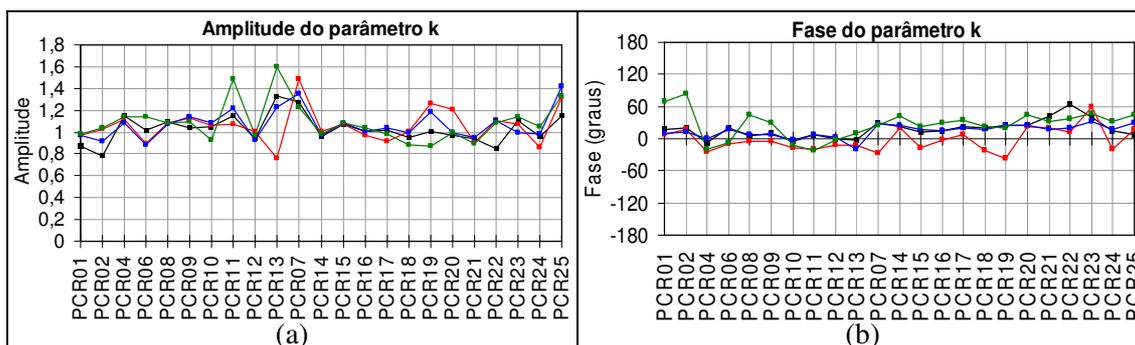


Figura 6.39 – Valores da (a) amplitudes e da (b) fase do *channel imbalance* em cada refletor, para as imagens MLC e SLC.

É importante destacar também que todos os 23 conjuntos de dados PolSAR foram selecionados em regiões das áreas de estudo que não apresentavam o predomínio de alvos com baixo retroespalhamento, conforme os exemplos apresentados na Figura 6.37, de modo a evitar os problemas de estimação dos parâmetros do *cross-talk* que foram descritos na Seção 6.4.2.1.

Com a finalidade de quantificar o afastamento existente entre os valores dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance* estimados para as imagens MLC, em relação aos respectivos valores de referência estimados para as imagens SLC, foram calculados, para os 23 refletores avaliados, os valores da amplitude (em dB) e da fase relativa entre esses parâmetros. Em seguida, foram obtidos os respectivos valores médios relativos para a amplitude e a fase de cada parâmetro, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Valores médios da amplitude e da fase relativa dos parâmetros de calibração obtidos para as imagens MLC e SLC, com base em 23 refletores.

Parâmetro	Razão <i>Look 1</i> /SLC		Razão <i>Look 2</i> /SLC		Razão <i>Look 3</i> /SLC	
	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase
α	0,026 dB	12,251°	0,038 dB	1,856°	-0,053 dB	-21,895°
u	3,320 dB	-24,836°	0,815 dB	-11,533°	0,257 dB	-12,412°
v	-1,281 dB	50,690°	1,086 dB	3,680°	4,199 dB	36,541°
w	-1,198 dB	58,556°	1,189 dB	7,656°	4,320 dB	22,463°
z	3,559 dB	-44,443°	1,655 dB	-13,838°	1,842 dB	-9,191°
k	0,200 dB	5,414°	0,322 dB	-4,830°	0,440 dB	10,088°

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 6.17, com relação à invariância para cada *look*, das matrizes de distorções $[R]$ e $[T]$ do sistema sensor SAR R99B, e considerando que os valores de $\pm 0,4$ dB e de $\pm 10^\circ$ (Tabela 6.3) representam, respectivamente, a tolerância para o erro de afastamento para os valores calculados da amplitude e da fase relativa, pode-se concluir que:

- a) Os valores médios calculados para os parâmetros α e k atendem a essas tolerâncias, integralmente para a amplitude e predominantemente para a fase, indicando, portanto que a suposição de invariância desses parâmetros para cada *look*, pode ser considerada válida;
- b) Os valores médios calculados para os parâmetros u , v , w e z não atendem a essas tolerâncias, principalmente para a amplitude, indicando, portanto que a suposição de invariância desses parâmetros para cada *look*, não pode ser considerada válida. Entretanto, se for considerado o nível baixo da distorção do *cross-talk* existente no referido sensor, essas discrepâncias estimadas entre as amplitudes desses parâmetros, para as imagens MLC e SLC, devem ter uma influência mínima nos resultados finais do novo método de calibração baseado na suposição em tela. Além disso, deve-se destacar que as discrepâncias encontradas na fase devem ter sido ocasionadas pelos valores estimados para o desvio-padrão da fase desses parâmetros (Tabela 6.10).

Pelo exposto, além do *channel imbalance*, também foi considerada a invariância para cada *look*, dos parâmetros do *cross-talk*, em função da maior magnitude dos parâmetros α e k , em relação aos demais parâmetros u , v , w e z , e da maior influência da distorção do *channel imbalance* em relação à do *cross-talk*, conforme abordado na Seção 6.4.4. Portanto, a suposição descrita na letra (h) da Seção 5.3.2, com relação à invariância para cada *look*, das matrizes de distorções $[R]$ e $[T]$ do sensor SAR R99B foi considerada válida na aplicação do método de calibração polarimétrica *multi-look*, cujos resultados obtidos com o novo método são descritos a seguir.

6.5.5 Estimação dos parâmetros de calibração

Uma vez concluída todas as avaliações preliminares das imagens PolSAR MLC, teve início a fase de estimação dos parâmetros de calibração pelo novo método de calibração polarimétrica *multi-look*, com base nos 25 conjuntos de imagens PolSAR de 256 x 2562 *pixels*. Com a finalidade de avaliar a influência das áreas de baixo retorno nos resultados obtidos pelo método em questão, foram considerados nessa estimação, ao contrário do procedimento descrito anteriormente, os conjuntos de imagens referentes aos refletores PCR03 e PCR05.

Para cada um dos 25 conjuntos de imagens PolSAR foram estimados os perfis radiais ajustados, tanto para a amplitude quanto para a fase, referentes à solução inicial dos parâmetros α , u , v , w , z , k e Y , de acordo com a teoria descrita na Seção 5.3.4.2. A partir desses perfis ajustados foram extraídos, de acordo com a posição radial do refletor dentro de cada imagem, os respectivos valores iniciais da amplitude e da fase dos parâmetros, para solução iterativa do novo método em questão.

A partir desses valores iniciais foram executadas as rotinas computacionais necessárias para obtenção da solução final dos parâmetros de calibração, cujos respectivos valores de amplitude e de fase para as faixas imageadas estão descritos na Tabela 6.18. Na Figura 6.40 e Figura 6.41 são apresentados os gráficos contendo os valores da solução inicial e final estimados para cada refletor.

Tabela 6.18 – Valores finais da amplitude e da fase dos parâmetros do *cross-talk* e do *channel imbalance* calculados para as Faixas 1, 2 e 3 pelo método *multi-look*.

Parâmetro	Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3	
	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase
α	1,00908	-15,992°	1,08594	0,758°	1,04714	1,284°
u	0,04606	30,032°	0,05308	52,881°	0,04661	43,055°
v	0,03275	-60,436°	0,04687	-137,526°	0,03520	-58,024°
w	0,03880	-72,728°	0,04021	-69,971°	0,04754	-33,862°
z	0,04195	64,263°	0,01965	68,753°	0,04308	0,757°
k	0,99003	11,179°	0,98181	15,164°	0,99338	13,529°
Y	0,97067	0,220°	1,00259	1,172°	0,98383	-1,031°

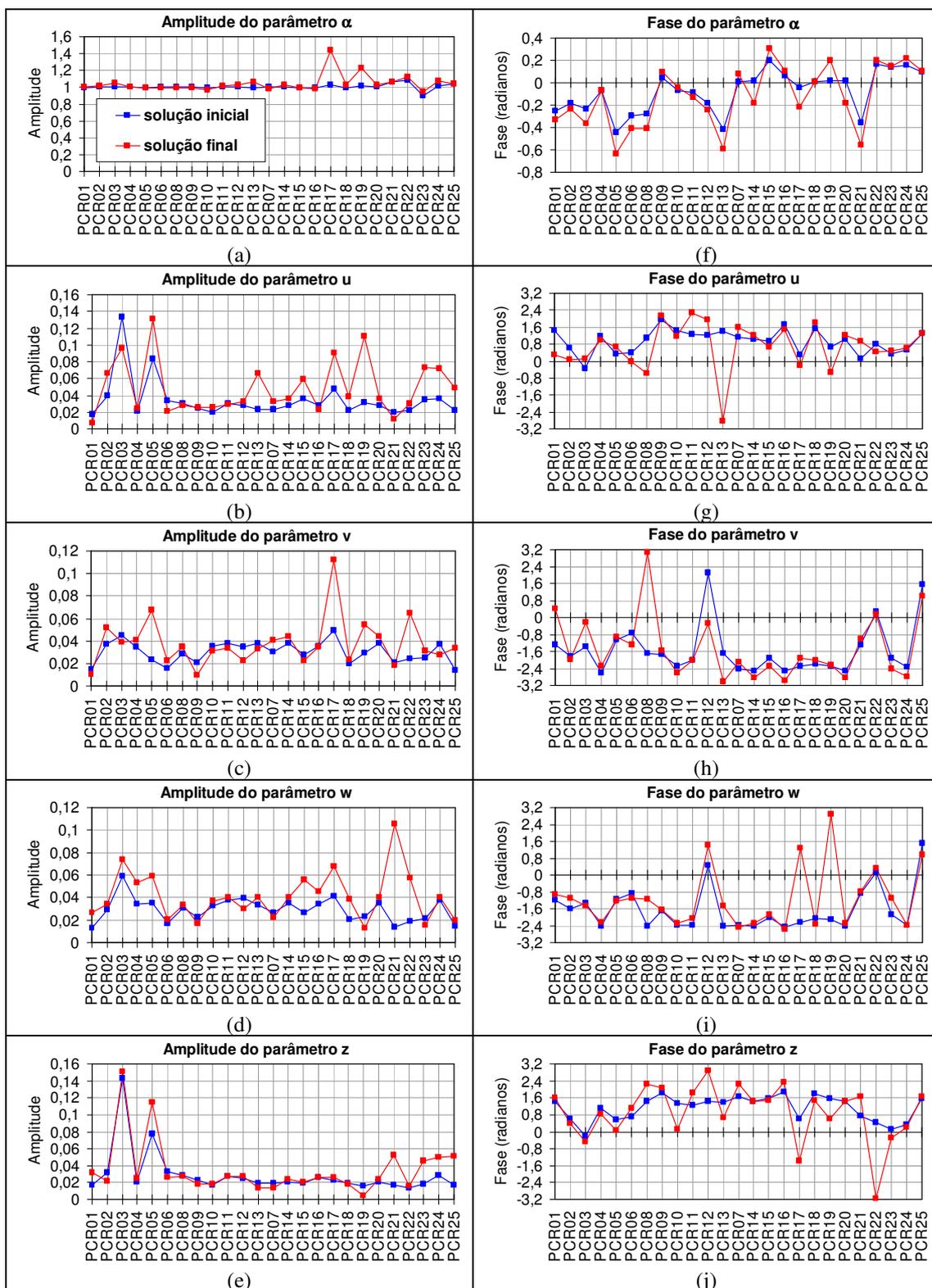


Figura 6.40 – Valores da (a),(b),(c),(d),(e) amplitude e da (f),(g),(h),(i),(j) fase dos parâmetros α , u , v , w e z , em cada refletor, que compõem os vetores de solução inicial e final do método de calibração polarimétrica *multi-look*.

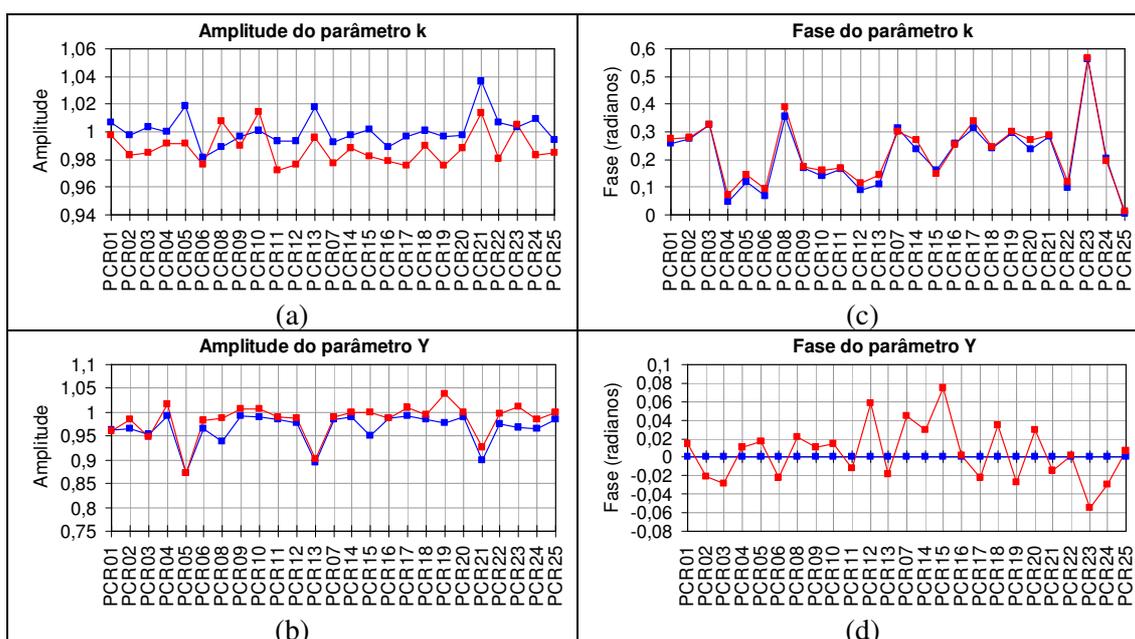


Figura 6.41 – Valores da (a),(b) amplitude e da (c),(d) fase dos parâmetros k e Y , em cada refletor, que compõem os vetores de solução inicial e final do método de calibração polarimétrica *multi-look*.

Da análise dos valores da amplitude e da fase dos parâmetros de calibração representados nos gráficos da Figura 6.40 e Figura 6.41, pode-se concluir que ocorreu uma pequena variação entre os vetores da solução inicial e final do novo método de calibração, com exceção dos refletores PCR08 e PCR13 da Faixa 1, PCR17 e PCR 19 da Faixa 2 e PCR21 e PCR 22 da Faixa 3, que apresentaram as maiores discrepâncias em amplitude e na fase.

É importante destacar que, as discrepâncias observadas na Figura 6.40b e Figura 6.40e, referentes aos valores da amplitude dos parâmetros u e z estimados para os refletores PCR03 e PCR05, indicam que a estimação dos parâmetros de calibração pelo método *multi-look* também é afetada pelas áreas com baixa relação sinal/ruído localizadas nas posições radiais mais próximas do *near range* da Faixa 1, de modo análogo ao descrito na Seção 6.4.2.1.

Essa discrepância detectada na estimação dos parâmetros de calibração, por intermédio do método em questão, empregando-se regiões da imagem com baixo retorno, tanto para a estimação da solução inicial quanto da solução final, motivou o desenvolvimento

de uma análise mais detalhada de outras causas que influenciam essa estimação, conforme descrito a seguir.

6.5.6 Influências na estimação dos parâmetros

A existência de regiões com baixo retroespalhamento, que induzem à estimação incorreta dos parâmetros de calibração pelo método tradicional, conforme abordado na Seção 6.4.2.1, é um aspecto importante que foi considerado nesta fase de avaliação dos principais fatores que podem influenciar os resultados obtidos com o novo método de calibração. Além disso, outro ponto importante que foi avaliado e que tem influência direta nos resultados obtidos é a solução inicial do método iterativo, que deve ser a mais próxima possível da solução desejada, para minimizar o tempo de convergência e problemas de identificação de mínimos locais do algoritmo.

Para o desenvolvimento dessa avaliação, foi selecionada uma porção de imagem do bloco Az04_Rg02 da Faixa 1, contendo o refletor PCR09, de acordo com a composição colorida (R-HH,G-HV,B-VV) apresentada na Figura 6.42. Esse sub-bloco é composto por duas áreas bem distintas e praticamente homogêneas, sendo uma de floresta primária com alto retorno, e a outra de solo exposto com baixo retorno, que estão localizadas, respectivamente, na metade superior e inferior da Figura 6.42.

A metodologia de avaliação dessa influência foi baseada nas duas etapas ilustradas na Figura 6.42, a saber: na primeira, a solução inicial dos parâmetros de calibração foi estimada na área de alto retorno, para posterior obtenção da solução final sobre a área de baixo retorno; na segunda, a solução inicial foi estimada na área de baixo retorno, para posterior obtenção da solução final sobre a área de alto retorno. Os resultados obtidos para a solução inicial e final dos parâmetros de calibração, considerando essas duas etapas de avaliação, estão consolidados nos gráficos apresentados na Figura 6.43. Os valores denominados por *solução-base* ou de *referência* foram retirados dos gráficos da Figura 6.40 e Figura 6.41, para o refletor o PCR09, onde a estimativa das soluções inicial e final foram processadas sobre a área de alto retorno da Figura 6.42, e, portanto, podem ser consideradas como referência para as etapas de avaliação.

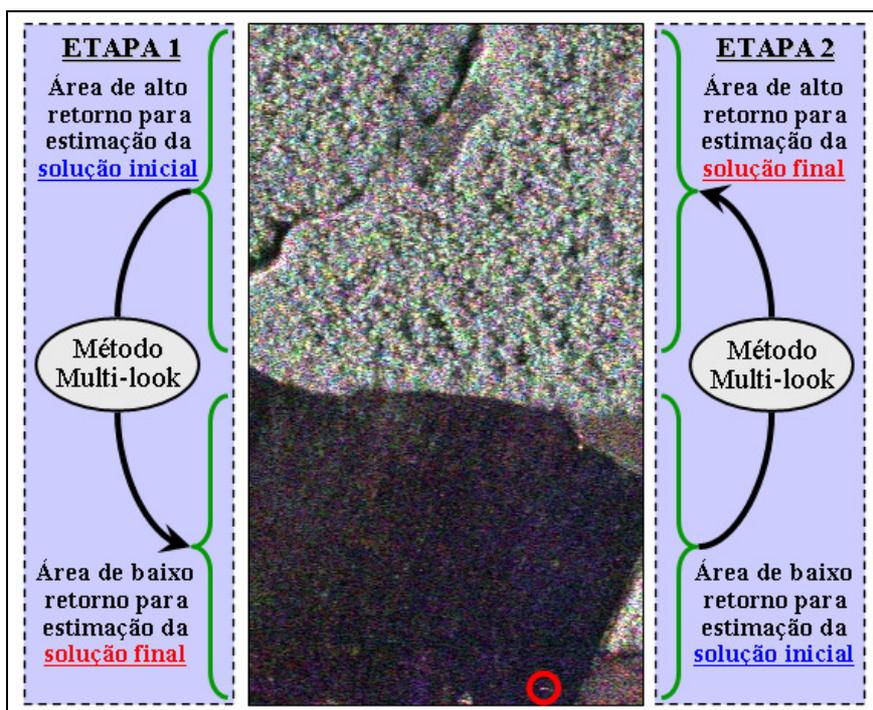


Figura 6.42 – Composição colorida R-HH,G-HV,B-VV do sub-bloco que contém o refletor PCR09 (destacado em vermelho), e que foi empregado para avaliar os fatores que influenciam os resultados do método *multi-look*.

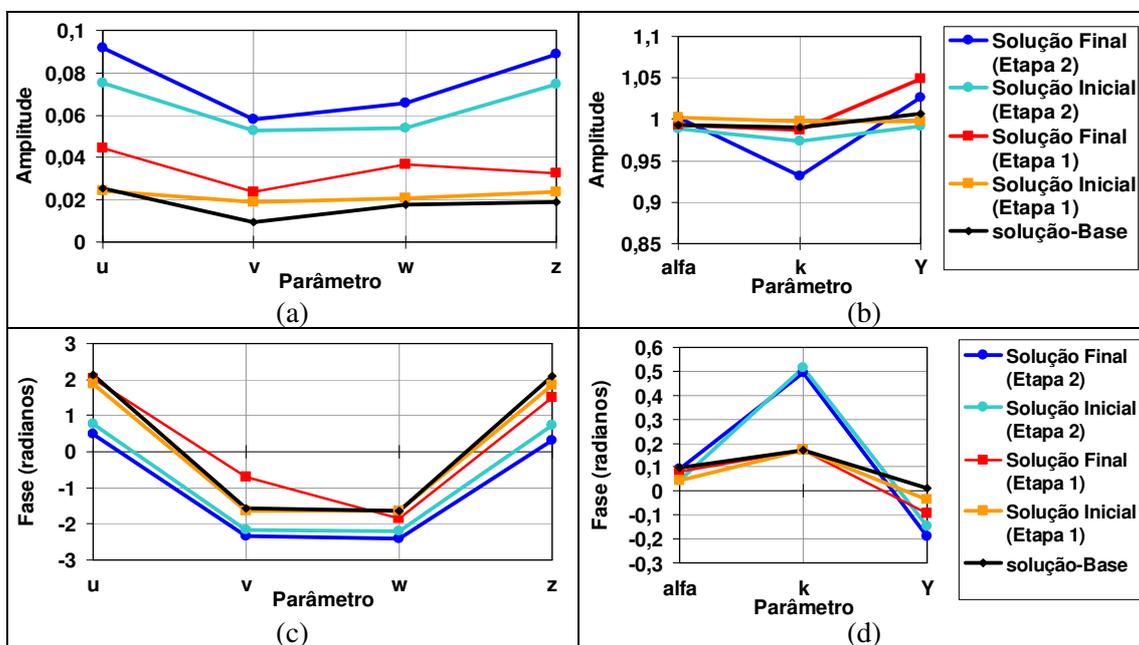


Figura 6.43 – Valores da (a),(b) amplitude e da (c),(d) fase dos parâmetros α , u , v , w , z , k e Y , para o refletor PCR09, que compõem os vetores de solução inicial e final das etapas de avaliação dos fatores que afetam o método *multi-look*.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 6.43, com relação à influência da solução inicial e de áreas de baixo retorno nos resultados obtidos pelo método de calibração polarimétrica *multi-look*, pode-se concluir que:

- a) Para a 1^a etapa de avaliação, os valores finais da amplitude e da fase dos parâmetros de calibração foram pouco influenciados pela área de baixo retorno empregada na estimação da solução final, em função da boa aproximação fornecida pela solução inicial em relação à referência;
- b) Para a 2^a etapa de avaliação, os valores finais da amplitude dos parâmetros u , v , w e z e da fase do parâmetro k foram bastante influenciados pela área de baixo retorno empregada na estimação da solução inicial. Portanto, a estimação da solução final sobre a área de alto retorno não conseguiu compensar o razoável afastamento existente entre os valores da solução inicial e de referência.

Com base nas conclusões apresentadas acima, pode-se afirmar que a áreas de baixo retorno tem uma maior influência quando são empregadas na estimação da solução inicial dos parâmetros. Essa influência é aumentada quando as referida áreas são empregadas também para a estimação da solução final do novo método, repetindo assim, os erros de estimação apresentados para os refletores PCR03, PCR05, PCR14 e PCR20, conforme os resultados descritos na Seção 6.4.2.1.

Portanto, os resultados obtidos com o novo método não são tão influenciados pela área da imagem sobre a qual é obtida a solução final dos parâmetros de calibração, mas sim pela solução inicial desses parâmetros, onde a fase dos parâmetros é pouco afetada tanto pela solução inicial quanto pela estimação em áreas de baixo retorno, com exceção do parâmetro k .

6.6 Comparação dos resultados obtidos com os métodos de calibração polarimétrica estudados

A partir dos resultados obtidos para os dois métodos de calibração polarimétrica avaliados neste trabalho, foi possível desenvolver uma análise comparativa entre eles, abordando os seguintes aspectos: tempo de processamento, parâmetros estimados e

respostas polarimétricas calculadas. Para simplificar a denominação no restante deste trabalho, o método de correção do *cross-talk* proposto por Qegan (1994), e modificado em Kimura et al. (2004), e o novo método *multi-look* serão denotados por método 1 e método 2, respectivamente.

6.6.1 Tempo de processamento

Considerando-se que os métodos 1 e 2 são baseados em dois processos distintos, um direto e outro iterativo, respectivamente, para solução do sistema de equações não-lineares contendo os parâmetros de calibração, é importante quantificar o aumento no tempo de processamento do segundo método em relação ao primeiro. Para tal, foram medidos, para cada um dos 25 conjuntos de imagens PolSAR supracitados, os tempos despendidos em 3 fases de processamento do método *multi-look*, a saber: 1ª fase - estimação da solução inicial dos parâmetros do *cross-talk*, que equivale ao tempo de processamento do método 1; 2ª fase - estimação inicial dos parâmetros k e Y ; e 3ª fase - estimação final dos parâmetros α , u , v , w , z , k e Y . Os tempos de processamento medidos para essas três fases estão consolidados no gráfico apresentado na Figura 6.44, onde cada refletor no eixo das abscissas representa um dos 25 conjuntos de imagens.

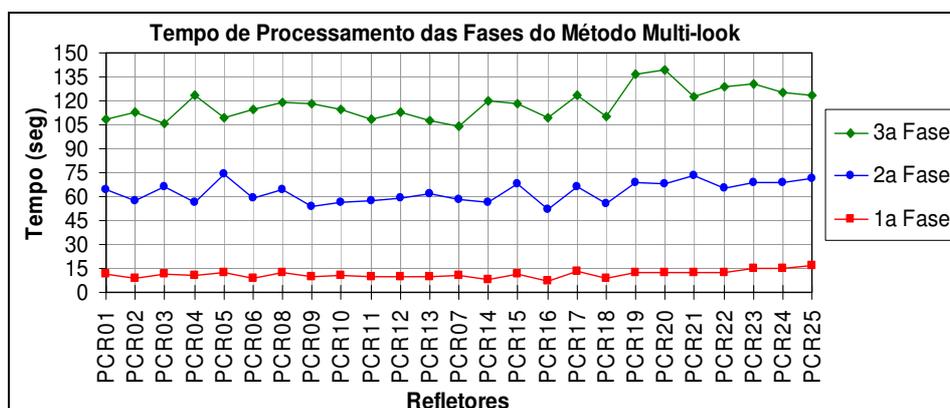


Figura 6.44 – Tempo de processamento para as fases de estimação dos parâmetros de calibração pelo método 2.

De posse dos valores constantes do gráfico da Figura 6.44, foram calculados os tempos médios iguais a 11,12 seg, 62,75 seg e 117,90 seg, que correspondem, respectivamente, à 1ª, 2ª e 3ª fase de processamento do método 2. Com base nesses resultados, pode-se

concluir que o método 1 é 10,6 vezes mais rápido que o método 2, quando são comparados os tempos de processamento necessários para estimação dos parâmetros de calibração. Entretanto, considerando que os valores obtidos na 1ª e na 2ª fase do método 2 são uma boa estimativa para os parâmetros α , u , v , w , z , k e Y , conforme demonstrado na Seção 6.5.5, pode-se afirmar que o método 1 é 5,6 vezes mais rápido que o método 2, quando são comparados os referidos tempos de processamento.

Tendo em vista a pequena diferença existente entre os parâmetros do *cross-talk* estimados pelos métodos 1 e 2, de acordo com os valores de amplitude e de fase apresentados na Tabela 6.12 e na Tabela 6.18, e o elevado tempo de processamento medido para o método 2, em relação ao método 1, vislumbrou-se a possibilidade de testar um método híbrido, que agregasse a estimação dos parâmetros do *cross-talk* pelo método 1 e a estimação inicial do *channel imbalance* correspondente à 2ª fase do método 2, conforme descrito a seguir.

6.6.2 Método de calibração polarimétrica *multi-look* híbrido

Para testar a viabilidade do uso dessa nova abordagem de calibração *multi-look*, que ainda depende das imagens MLC, foram comparados os resultados de calibração obtidos, para cada refletor, pelas duas abordagens *multi-look*, sendo que esta última será denominada de método 3. Com base nos valores dos parâmetros de calibração obtidos pelos métodos 3 e 2 para cada refletor, que correspondem, respectivamente, às soluções inicial e final apresentadas na Figura 6.40 e Figura 6.41, foram obtidas as respectivas matrizes de espalhamento corrigidas por esses métodos. Na Figura 6.45 são apresentados os valores do EMQ entre as respostas polarimétricas de referência e as calibradas por esses métodos.

É importante destacar que os valores de amplitude do parâmetro k foram extraídos de uma função de ajuste polinomial do 1º grau, que foi estimada com os respectivos valores iniciais (Figura 6.41a), enquanto que a fase desse parâmetro foi obtida do respectivo valor médio inicial (Figura 6.41b). Na Tabela 6.19 estão descritos os valores de média e de desvio-padrão das amplitudes e das fases desse parâmetro, para cada faixa imageada, obtidos pelo método 3.

Tabela 6.19 – Valores de média e de desvio-padrão do parâmetro k (*channel imbalance*) obtidos, para cada faixa imageada, pelo método 3 de calibração.

Faixa	Amplitude		Fase
1	$0,99 \pm 0,003$	$-0,09 \pm 0,02$ dB	$11,18^\circ \pm 5,88^\circ$
2	$0,98 \pm 0,003$	$-0,18 \pm 0,03$ dB	$16,93^\circ \pm 2,94^\circ$
3	$0,99 \pm 0,005$	$-0,06 \pm 0,04$ dB	$13,53^\circ \pm 12,23^\circ$
1, 2 e 3	$0,99 \pm 0,006$	$-0,11 \pm 0,06$ dB	$12,21^\circ \pm 6,91^\circ$

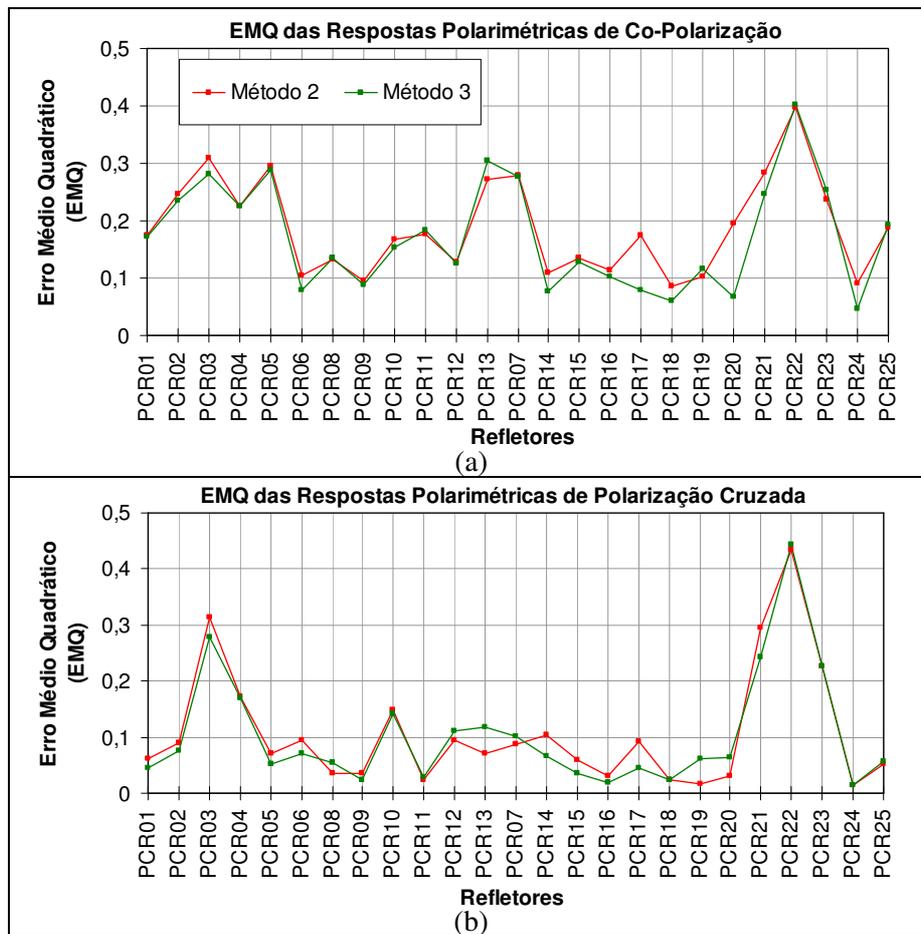


Figura 6.45 – Valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de (a) co-polarização e de (b) polarização cruzada de referência e calibradas pelos métodos 2 e 3, para os 25 refletor.

A partir da comparação entre os valores do EMQ obtidos para os métodos 2 e 3, de acordo com os resultados apresentados nos gráficos da Figura 6.45, conclui-se que:

- a) A utilização do método 3 produziu uma redução desses valores em 60% (15 refletores) e em 68% (17 refletores) das respostas polarimétricas de polarização cruzada e de co-polarização dos refletores, respectivamente;
- b) Os percentuais médios de redução desses valores obtidos pelo método 3 foram de 18,42% e de 21,50% para as respostas polarimétricas de co-polarização e de polarização cruzada, respectivamente;
- c) As prováveis causas que podem explicar essa melhora nos resultados de calibração obtidos pelo método 3, em relação ao método 2, se referem às variações dos parâmetros de calibração do *cross-talk* para cada *look*, descritas na Seção 6.5.4, o que pode ter induzido à subestimação dos valores da amplitude do parâmetro k , conforme pode ser observado na Figura 6.41a.

Portanto, com base nas conclusões supracitados, o método 3 foi empregado na fase de comparação entre os resultados de calibração obtidos com o método 1, com e sem a correção do *channel imbalance* por intermédio do uso da informação polarimétrica dos refletores de canto, conforme descrito a seguir.

6.6.3 Análise do *channel imbalance*

Considerando-se que os métodos 1 e 3 se baseiam no mesmo processo de estimação dos parâmetros do *cross-talk*, somente foram comparados os valores de amplitude e de fase relativa da razão HH/VV corrigidos por esses métodos, de acordo com os resultados apresentados na Figura 6.46. A partir desses valores para cada refletor, corrigidos pelo método 1, apenas com a correção do *cross-talk*, e pelo método 3, foram calculados os respectivos valores de média e de desvio-padrão para cada faixa imageada, cujos resultados obtidos estão descritos na Tabela 6.20.

Da análise dos gráficos e dos valores apresentados, respectivamente, na Figura 6.46 e na Tabela 6.20, conclui-se que:

- a) O desbalanceamento médio de amplitude, corrigido pelo método 3, foi reduzido de 1,04 dB para 0,84 dB (~19%), em comparação com o método 1, ficando mais

próximo do limite de referência de $\pm 0,4$ dB, enquanto que para a fase relativa, houve uma redução de $25,05^\circ$ para $9,95^\circ$ (~60%), ficando dentro do limite de referência de $\pm 10^\circ$;

- b) Para a Faixa 2, o desbalanceamento médio obtido pela correção do método 3 para 7 refletores, excluindo-se o PCR07, foi reduzido de $0,89$ dB $\angle 46,82^\circ$ para $0,36$ dB $\angle 6,75^\circ$, em comparação com o método 1, ficando dentro dos limites de referência para os valores da amplitude e da fase relativa;
- c) Para 10 dos 25 refletores (PCR06, PCR09 PCR14, PCR15, PCR16, PCR17, PCR18, PCR19, PCR20 e PCR24), o desbalanceamento médio obtido pela correção do método 3 foi reduzido de $0,96$ dB $\angle 41,15^\circ$ para $0,37$ dB $\angle 6,53^\circ$, ficando também dentro dos referidos limites de referência.

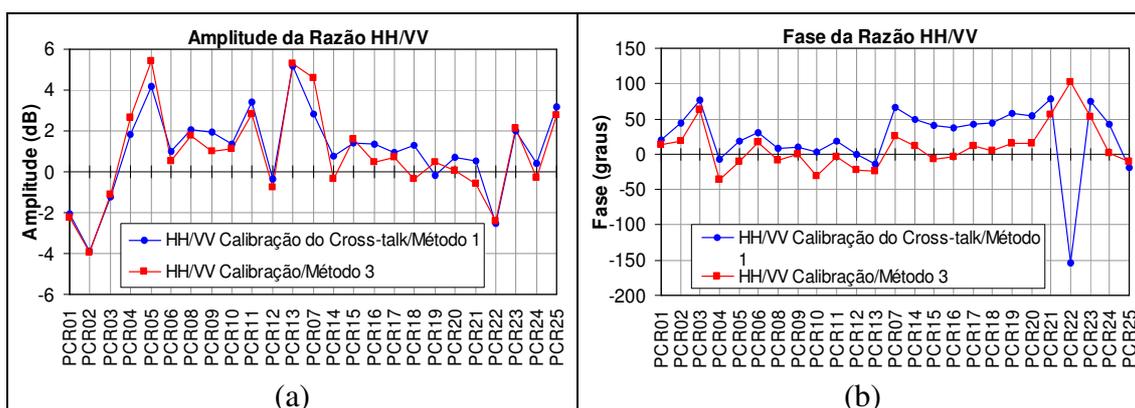


Figura 6.46 – Valores da (a) amplitude e da (b) fase relativa da razão HH/VV de cada refletor, corrigidos pelos métodos 1 e 3.

Tabela 6.20 – Valores de média e de desvio-padrão da amplitude e da fase relativa da razão HH/VV, corrigidos pelos métodos 1 e 3.

Faixa	Método 1 (correção do <i>cross-talk</i>)		Método 3	
	Amplitude Relativa (HH/VV)	Fase Relativa (HH/VV)	Amplitude Relativa (HH/VV)	Fase Relativa (HH/VV)
1	$1,10 \pm 2,623$	$17,53^\circ \pm 27,11^\circ$	$1,04 \pm 2,81$	$-2,00^\circ \pm 27,39^\circ$
2	$1,14 \pm 0,862$	$49,24^\circ \pm 9,73^\circ$	$0,89 \pm 1,62$	$8,99^\circ \pm 10,59^\circ$
3	$0,72 \pm 2,151$	$4,41^\circ \pm 96,81^\circ$	$0,31 \pm 2,10$	$40,18^\circ \pm 45,64^\circ$
1, 2 e 3	$1,04 \pm 2,042$	$25,05^\circ \pm 46,67^\circ$	$0,84 \pm 2,04$	$9,95^\circ \pm 31,46^\circ$

Portanto, evidencia-se a maior redução do desbalanceamento entre os canais polarimétricos fornecido pelo método 3, em relação ao método 1, principalmente para a fase relativa. Essa redução é mais acentuada para a Faixa 2, em comparação com as demais, devido à menor variância dos valores do *channel imbalance* dos refletores dessa faixa. A diminuição desse desbalanceamento também é observada pela comparação das respostas polarimétricas calibradas por esses métodos, conforme descrito a seguir.

6.6.4 Análise da resposta polarimétrica

A partir dos valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas de referência e calibradas pelo método 1, com e sem o uso da informação do *channel imbalance* dos refletores, e pelo método 3, foram obtidos os gráficos apresentados na Figura 6.47.

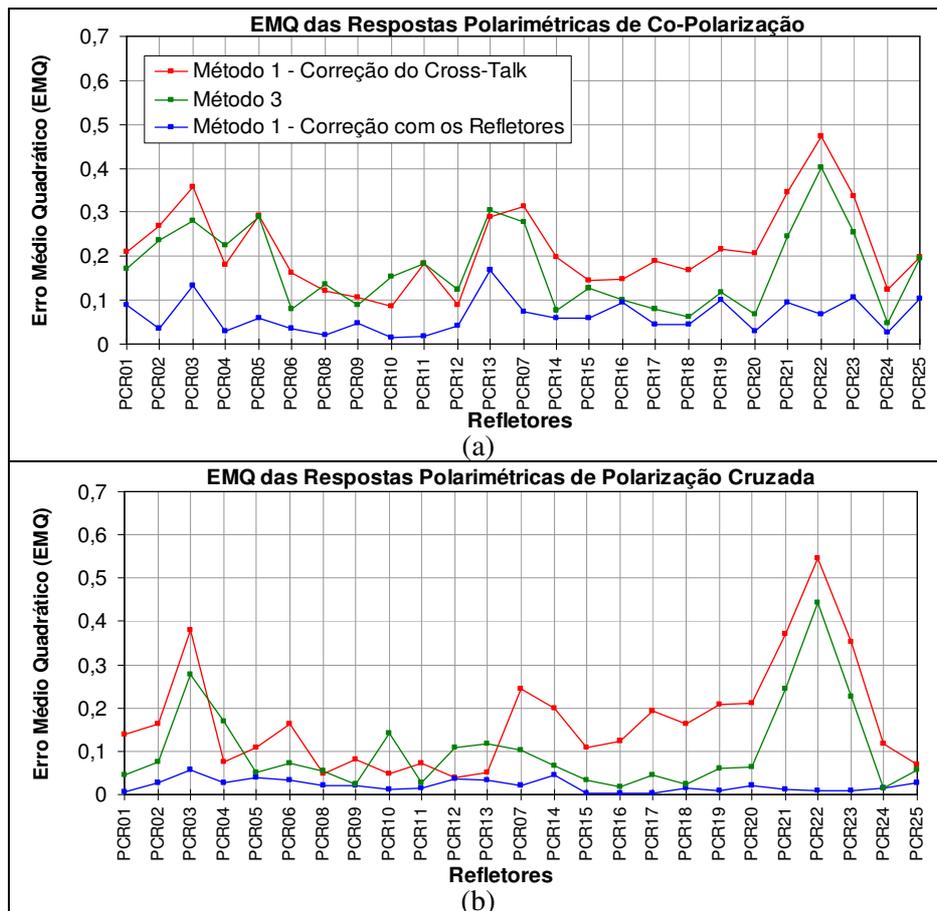


Figura 6.47 – Valores do EMQ calculados entre as respostas polarimétricas normalizadas de (a) co-polarização e de (b) polarização cruzada de referência e corrigidas pelos métodos 1 e 3.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 6.47, com relação aos valores do EMQ das respostas polarimétricas calibradas pelos métodos 1 e 3, conclui-se que:

- a) A utilização do método 3 produziu uma redução desses valores, em relação ao método 1 apenas com a correção do *cross-talk*, em 80% (20 refletores) das respostas polarimétricas de polarização cruzada e de co-polarização dos refletores. Considerando-se apenas as Faixas 2 e 3, essa redução ocorreu para todos os 13 refletores presentes nessas faixas;
- b) Os percentuais médios de redução desses valores obtidos pelo método 3, em relação ao método 1 apenas com a correção do *cross-talk*, foram de 30,14% e 58,22% para as respostas polarimétricas de co-polarização e de polarização cruzada, respectivamente;
- c) Para os 10 refletores descritos na letra “c” da seção anterior, os respectivos valores do EMQ de co-polarização e de polarização cruzada calibradas pelo método 3, ficaram bem próximos dos valores obtidos pelo método 1 com a informação do *channel imbalance* dos refletores.

A comparação entre as respostas polarimétricas calibradas de cinco refletores, pelos métodos 1 e 3, pode ser observada na Figura 6.48 e Figura 6.49. Para os refletores PCR04 e PCR10, o método 3 forneceu os maiores percentuais de aumento do valor do EMQ, em relação ao método 1 apenas com a correção do *cross-talk*. No caso dos refletores PCR16, PCR18 e PCR24, o método 3 forneceu os valores do EMQ mais próximos aos valores obtidos pelo método 1 com o uso da informação do *channel imbalance* dos refletores.

Pelo exposto, pode-se concluir que o método *multi-look* produziu melhores resultados de calibração que o método tradicional, sem o uso dos refletores, demonstrando assim a segunda hipótese deste trabalho, onde foi possível empregar somente as imagens PolSAR para a calibração automática do *cross-talk* e do *channel imbalance*, como sendo uma alternativa viável, em relação aos métodos de calibração polarimétrica tradicionais, no caso da inexistência de alvos artificiais conhecidos na cena imageada.

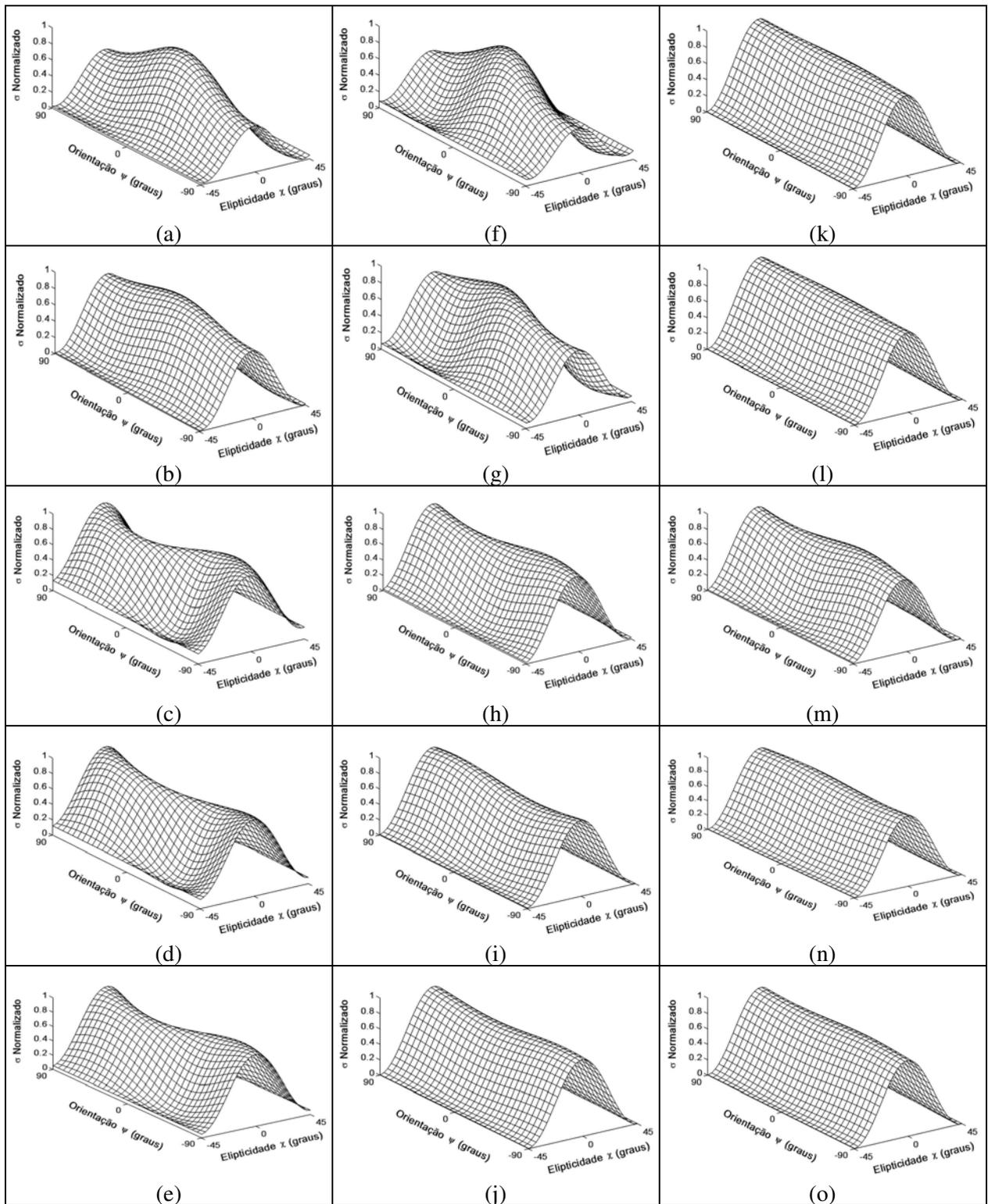


Figura 6.48 – Respostas polarimétricas de co-polarização corrigidas (a),(b),(c),(d),(e) do *cross-talk* pelo método 1, (f),(g),(h),(i),(j) pelo método 3 e (k),(l),(m),(n),(o) pela informação do *channel imbalance* dos refletores PCR04, PCR10, PCR16, PCR18 e PCR24.

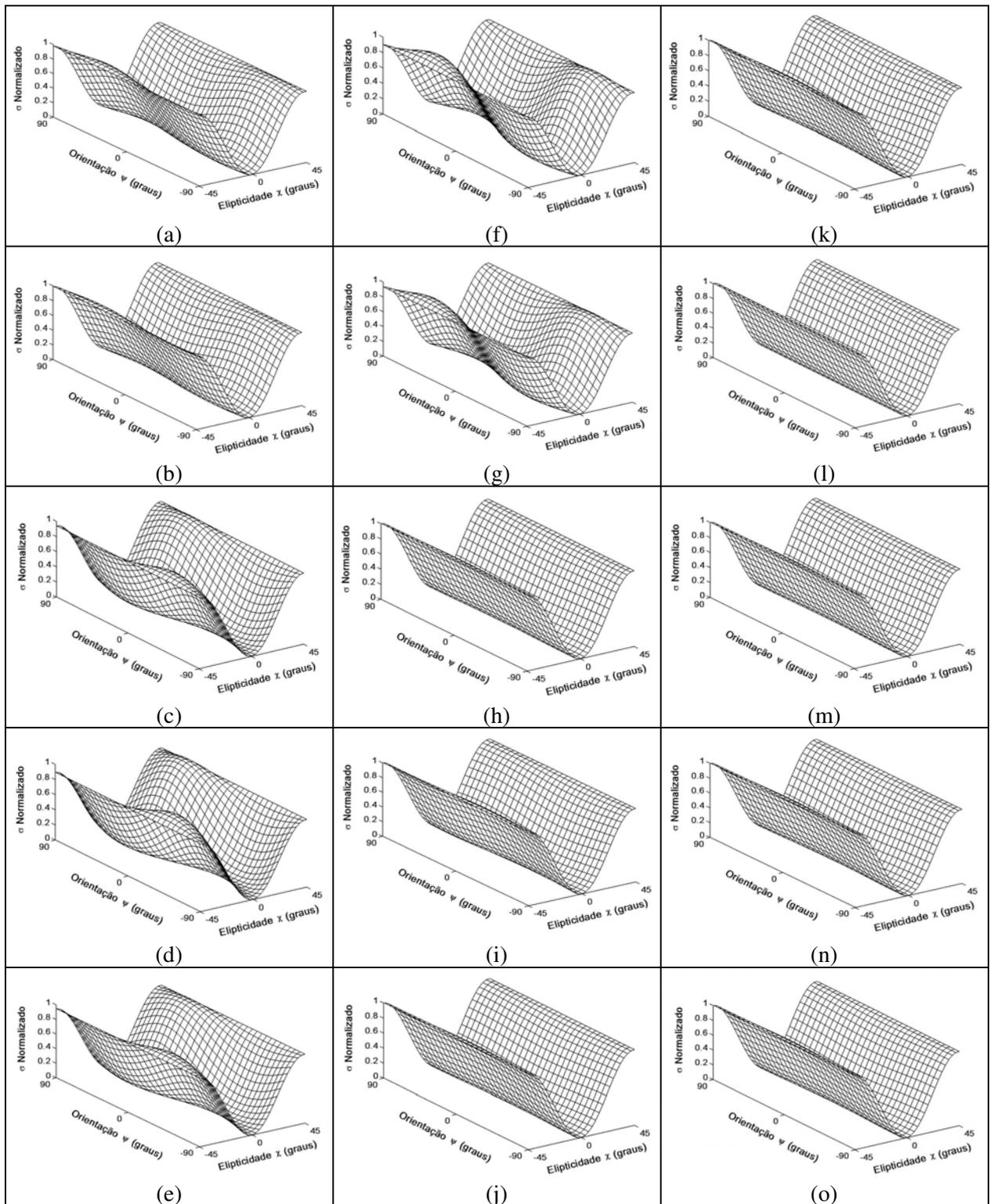


Figura 6.49 – Respostas polarimétricas de polarização cruzadas corrigidas (a),(b),(c),(d),(e) do *cross-talk* pelo método 1, (f),(g),(h),(i),(j) pelo método 3 e (k),(l),(m),(n),(o) pela informação do *channel imbalance* dos refletores PCR04, PCR10, PCR16, PCR18 e PCR24.

6.7 Avaliação da influência do processo de calibração polarimétrica na decomposição da entropia/ângulo α

Conforme descrito na Seção 4.13, os poucos estudos desenvolvidos para avaliar a influência do processo de calibração polarimétrica sobre as imagens obtidas por métodos de decomposição de alvos, com vista à caracterização e discriminação precisa da informação polarimétrica proveniente dos alvos terrestres, motivaram o estudo preliminar descrito a seguir. Para tal, foi realizada uma avaliação comparativa da influência dos resultados de calibração obtidos pelos métodos 1 e 3 sobre as imagens da entropia e do ângulo α .

Inicialmente, foram selecionados os blocos Az08_Rg02 da Faixa 1 e Az11_Rg02 da Faixa 3, que apresentam nas respectivas imagens, diferentes alvos naturais e artificiais, permitindo assim, a seleção de amostras para uma adequada caracterização de vários mecanismos de espalhamento representados pelas oito zonas válidas do plano $(H_s, \bar{\alpha})$, conforme a teoria descrita na Seção 2.5.3. Na Figura 6.50a e Figura 6.50b, são apresentadas as composições coloridas (R-HH,G-HV,B-VV) correspondentes à esses blocos selecionados para o desenvolvimento da avaliação em questão, cuja diversidade de alvos existentes pode ser notada em ambas as cenas. Na imagem da Faixa 1, ocorre o predomínio de áreas de floresta primária e diferentes estágios de antropização, enquanto que na imagem da Faixa 3, observa-se a presença de alvos artificiais, que correspondem à tanques metálicos para armazenamento de combustível, e de áreas de reflorestamento e de cultivo.

Em seguida, as referidas imagens PolSAR foram corrigidas das distorções polarimétricas provenientes do sistema SAR, por intermédio dos seguintes processos: 1) remoção do *cross-talk* (método 1); 2) remoção do *cross-talk* (método 1) com simetrização por mínimos quadrados (Equação 6.20); 3) remoção do *cross-talk* e do *channel imbalance* com a simetrização anterior (método 1); 4) remoção do *cross-talk* e do *channel imbalance* com a simetrização anterior (método 3); e 5) apenas a simetrização por média aritmética. De posse das imagens originais e corrigidas, e empregando-se um filtro de dimensões radiais e azimutais de 2×20 e 2×10 *pixels*, para as imagens da Faixa 1 e da Faixa 3, respectivamente, foram obtidas as respectivas

imagens da entropia, ângulo α e anisotropia, por intermédio da ferramenta computacional para a decomposição e a visualização no Plano $(H_S, \bar{\alpha})$ descrita na Seção B.6.3.

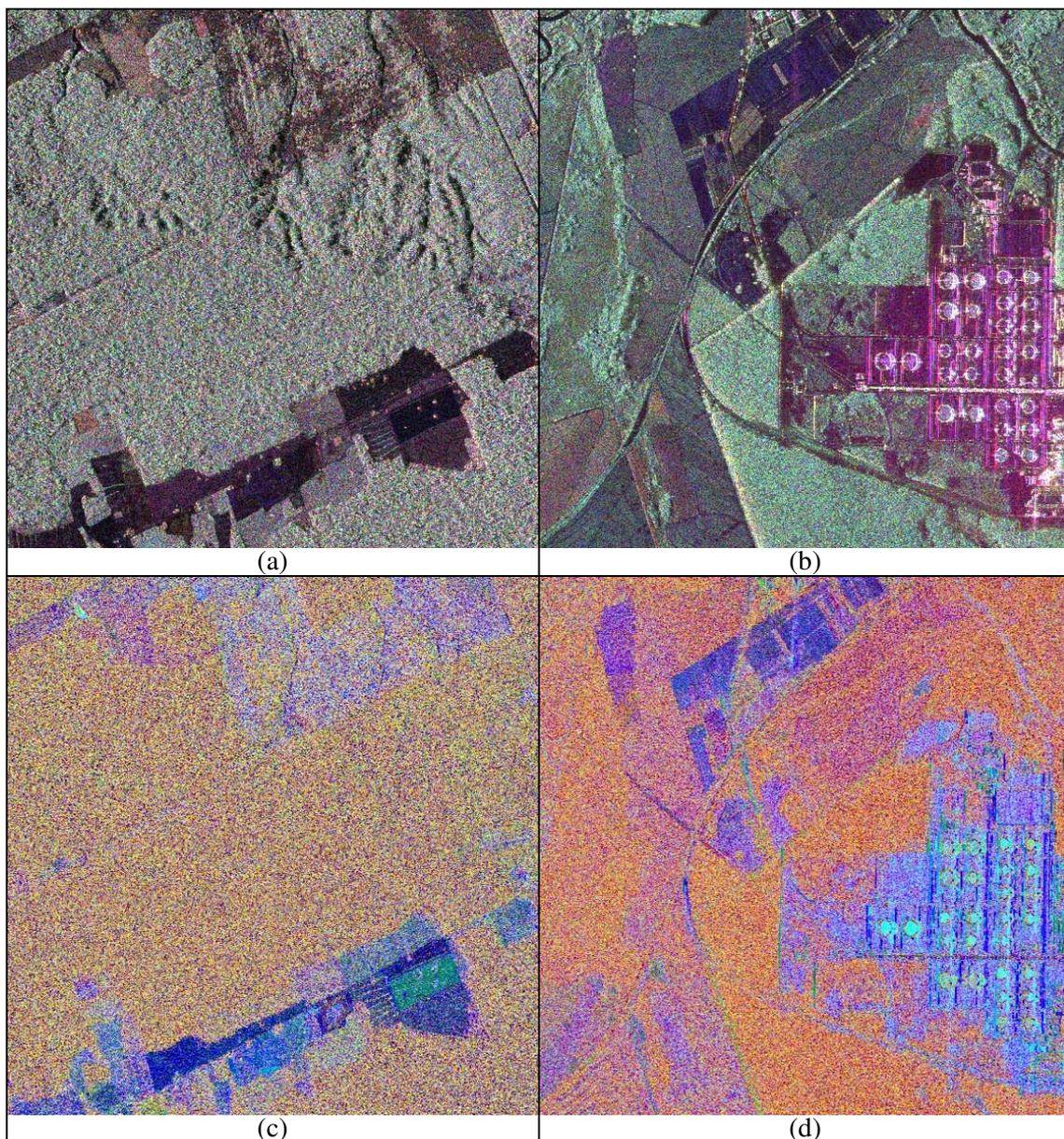


Figura 6.50 – Composições coloridas (a),(b) R-HH,G-HV,B-VV e (c),(d) R- $H_S, G-\bar{\alpha}, B-A_p$, correspondentes aos blocos Az08_Rg02 da Faixa 1 e Az11_Rg02 da Faixa 3.

Na Figura 6.50c e Figura 6.50d, são apresentadas as composições coloridas ($R-H_s, G-\bar{\alpha}, B-A_p$) correspondentes às decomposição obtidas das imagens calibradas pelo terceiro processo supracitado, para os blocos Az08_Rg02 da Faixa 1 e Az11_Rg02 da Faixa 3, respectivamente, com a finalidade de exemplificar os diferentes mecanismos de espalhamento presentes nas imagens decompostas.

Com base na representação da dispersão no plano ($H_s, \bar{\alpha}$), de todos os *pixels* das imagens decompostas apresentadas nas Figura 6.50c e Figura 6.50d, foram extraídas amostras bem agrupadas de nove classes de interesse, que representam, predominantemente, os alvos descritos na Tabela 6.21, de modo a garantir a representação do maior número possível de mecanismo de espalhamento associadas às zonas válidas do referido plano. Além disso, considerando que as imagens decompostas apresentavam uma adequada correção das distorções polarimétricas e os agrupamentos de cada classe possuíam uma forma bem definida, foi possível avaliar a influência dos diferentes processos de correção empregados, em relação ao deslocamento dos centros de gravidade e da dispersão dos *pixels* dentro dos respectivos agrupamentos.

Tabela 6.21 – Descrição dos alvos selecionados na Faixa 1 e 3, para avaliação da influência da calibração polarimétrica, e localização no Plano ($H_s, \bar{\alpha}$).

Nr	Cor	Descrição dos Alvos Selecionados	Bloco	Faixa	No Plano ($H_s, \bar{\alpha}$)
1		Área de reflorestamento com a espécie <i>Araucária</i>	Az11_Rg02	3	Zona 1
2		Área 1 de Floresta Primária na região da FLONA	Az08_Rg02	1	Zona 2/5
3		Interação terreno/tanques de combustível	Az11_Rg02	3	Zona 4
4		Área 2 de Floresta Primária na região da FLONA	Az08_Rg02	1	Zona 5/6
5		Área 2 de solo exposto com maior rugosidade	Az08_Rg02	1	Zona 6/9
6		Interação cobertura/paredes internas de tanques metálicos com diferentes níveis de combustível	Az11_Rg02	3	Zona 7
7		Tubulações metálicas ao nível do solo	Az11_Rg02	3	Zona 9
8		Área 1 de solo exposto bastante plana	Az08_Rg02	1	Zona 9

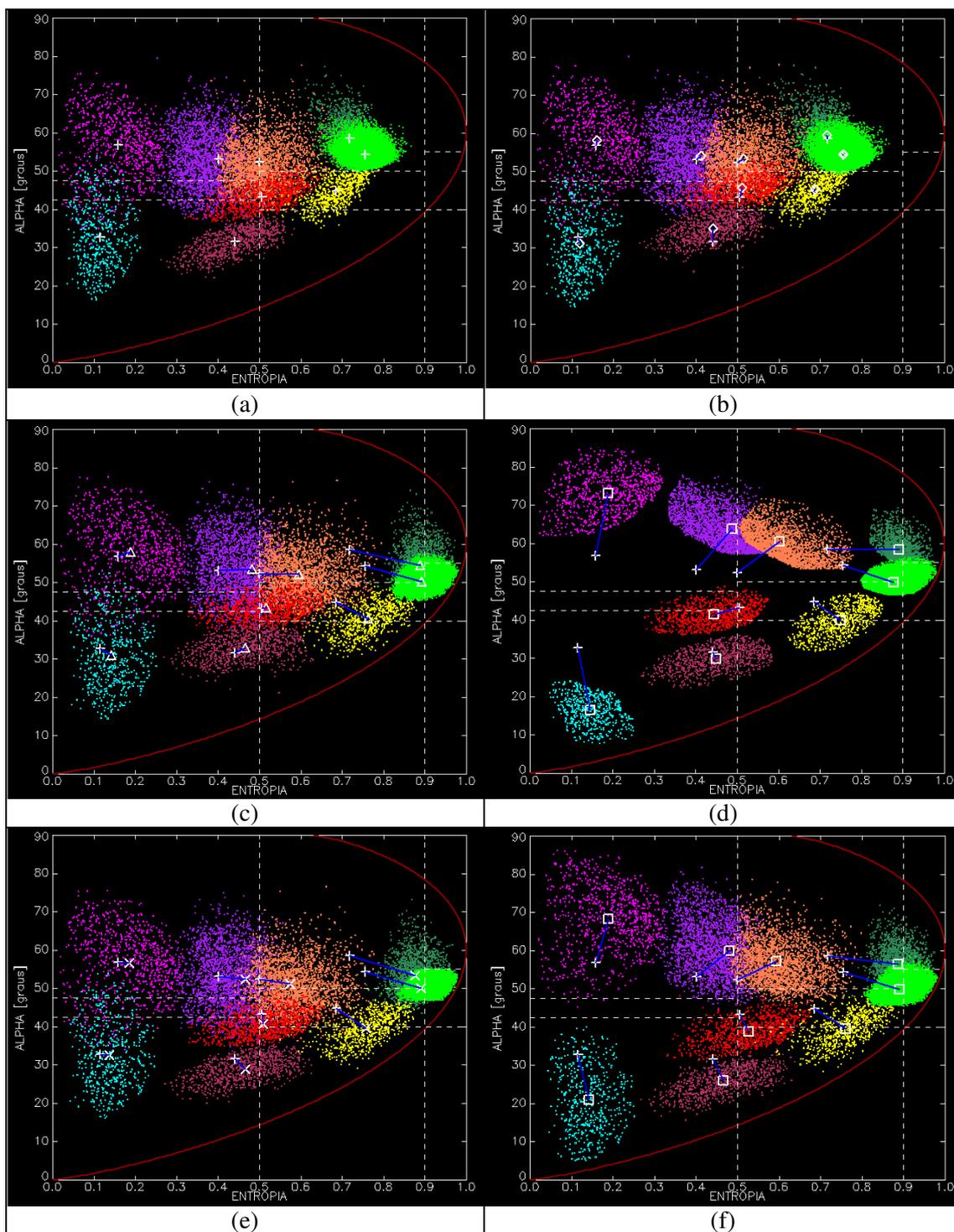


Figura 6.51 – Representação das 9 classes no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, com base nas imagens (a) original e corrigidas (b) do *cross-talk* (método 1), (b) do *cross-talk* com simetrização por MMQ (método 1), (d) do *cross-talk/channel imbalance* com simetrização por MMQ (método 1), (e) pela simetrização média e (f) do *cross-talk/channel imbalance* com simetrização por MMQ (método 3).

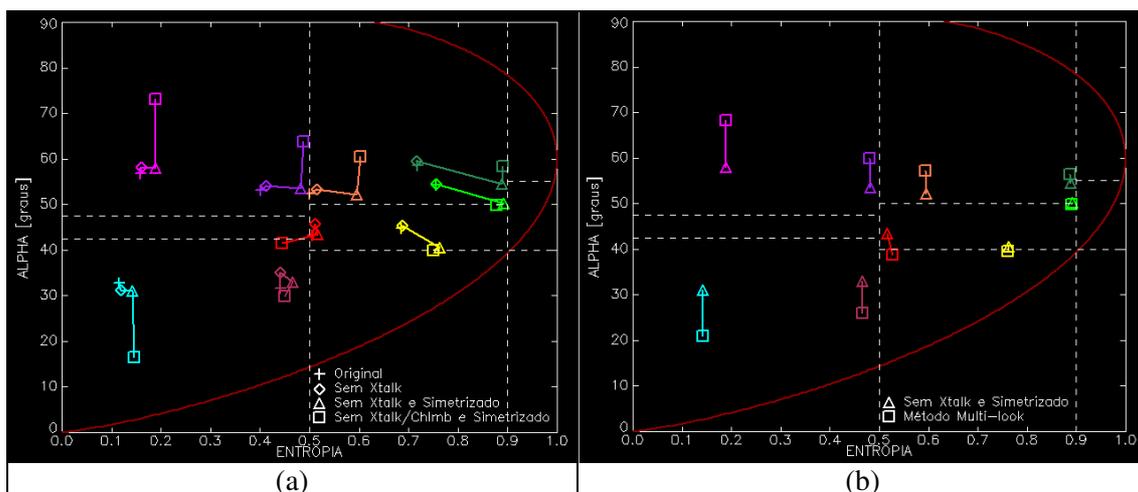


Figura 6.52 – Representação dos deslocamentos dos centros das 9 classes no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, com base nas imagens corrigidas do *cross-talk/channel imbalance* com simetriação por MMQ pelo (a) método 1 e (b) método 3.

Uma vez seleccionadas as amostras de cada classe de interesse, procedeu-se a representação dos respectivos valores no plano $(H_s, \bar{\alpha})$, empregando-se para tal, as imagens obtidas dos cinco processos de correção supracitados, cujos resultados obtidos são apresentados nos gráficos constantes da Figura 6.51. Para facilitar a visualização da influência de cada processo de correção radiométrica empregado, foram representadas nesses gráficos a dispersão dos *pixels* e a localização dos centros de cada classe, antes (Figura 6.51a) e depois da correção (Figura 6.51b,c,d,e,f). Os deslocamentos sofridos pelos referidos centros, considerando-se a correção do *cross-talk*, *channel imbalance* e da simetriação pelos métodos 1 e 3 de calibração polarimétrica, podem ser observados na Figura 6.52a e Figura 6.52b, respectivamente.

Da análise dos resultados apresentados na Figura 6.51 e Figura 6.52, considerando-se a influência de diferentes processos de correção das distorções polarimétricas provenientes do sistema sensor SAR R99B sobre as imagens da entropia e do ângulo α , pode-se concluir que:

- a) A correção do *cross-talk* (Figura 6.51b) pouco alterou os centros e os agrupamentos das classes, em função do nível baixo do *cross-talk* estimado na Seção 6.4.4, menor que -30 dB, o que impossibilitou a confirmação das

conclusões apresentadas em Kimura et al. (2004), onde é descrito que uma elevação do nível da distorção do *cross-talk* irá ocasionar um aumento do valor da entropia, e que a decomposição da entropia e do ângulo α , é menos sensível à correção do *cross-talk*;

- b) A correção do *cross-talk* com simetriação por mínimos quadrados provocou um aumento significativo da entropia para as classes de número 1, 2, 3, 4 e 7, e extremamente pequeno para do ângulo α para todas as classes, conforme os deslocamentos de cada centro de classe representados na Figura 6.51c pela cor azul;
- c) A correção do *cross-talk* e do *channel imbalance* com simetriação por mínimos quadrados (método 1) provocou uma variação significativa do ângulo α para as classes de número 3, 6, 7 e 8, e desprezível na entropia, conforme os deslocamentos de cada centro de classe representados na Figura 6.52a. Esses resultados confirmam as conclusões apresentadas em Kimura et al. (2004), onde é descrito que o ângulo α é mais sensível à calibração dos canais co-polarizados, quando existe um nível baixo do *cross-talk*;
- d) A correção do *cross-talk* e do *channel imbalance* com simetriação por mínimos quadrados (método 3) também provocou uma variação do ângulo α para as classes de número 3, 6, 7 e 8, e desprezível na entropia, conforme os deslocamentos de cada centro de classe representados na Figura 6.52b. Porém, não foi possível obter um adequado agrupamento dos pixels das classes avaliadas, conforme os resultados apresentados Figura 6.51f;
- e) Os resultados descritos no item “d” ratificam a afirmação do item “c”, com relação à sensibilidade do ângulo α , pois as imagens corrigidas do *channel imbalance* pelo método 3, mesmo com um valor do parâmetro k menor que aquele estimado com o uso da informação polarimétrica do refletor, produziu um deslocamento dos centros de classe próximo aos obtidos com as imagens calibradas com o uso dos refletores;

- f) A adequada minimização das distorções do *cross-talk* e do *channel imbalance* (método 1) contribui para o deslocamento dos centros de classes no sentido das zonas do Plano $(H_S, \bar{\alpha})$ que caracterizam corretamente os mecanismos de espalhamento presentes nos alvos naturais e artificiais, conforme ocorreu para as classes avaliadas;
- g) De acordo com os dados apresentados na Figura 6.51c e Figura 6.51e, foram obtidos resultados muito próximos para a influência da calibração polarimétrica sobre as imagens decompostas da entropia e do ângulo α , com base nos dois processos de simetrização empregados. Esse resultado esperado é explicado pela simplificação do processo de ponderação das componentes O_{hv} e O_{vh} , que depende apenas do parâmetro α (Equação 5.21), por uma simples média aritmética dessas componentes, em razão dos valores estimados da amplitude e da fase desse parâmetro (Tabela 6.12) muito próximos de 1 e 0° , respectivamente. Portanto, com base no valor estimado para o parâmetro $\alpha \approx 1 \angle 0^\circ$, o processo de simetrização para as imagens PolSAR do sensor SAR R99B avaliadas neste trabalho, pode ser realizado por uma simples média aritmética das referidas componentes.

Os resultados descritos acima sugerem que, mesmo com níveis baixos do *cross-talk* e do *channel imbalance*, conforme os valores obtidos neste trabalho para o sistema sensor SAR R99B, é necessário a aplicação do processo de calibração polarimétrica, principalmente para a correção do *channel imbalance*. Caso contrário, os resultados de classificação de imagens PolSAR, que são baseados na decomposição da entropia e ângulo α , poderão ser afetados pela caracterização incorreta dos mecanismos de espalhamento no Plano $(H_S, \bar{\alpha})$, o que implicará em um agrupamento de diferentes classes de interesse que representam esses mecanismos.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho apresentou-se um novo método automático de calibração polarimétrica baseado no uso isolado de imagens PolSAR e desenvolveu-se um conjunto de ferramentas computacionais para a correção das diversas fontes de distorções radiométricas que afetam essas imagens, independente do sensor e da plataforma de imageamento SAR.

A seguir são apresentadas as principais conclusões referentes às ferramentas computacionais e aos resultados apresentados no Apêndice B e no Capítulo 6, respectivamente, bem como as sugestões para futuras pesquisas que podem ser desenvolvidas com a finalidade de aprofundar alguns estudos realizados neste trabalho.

7.1 Conclusões

Com base nas ferramentas computacionais para calibração radiométrica de imagens PolSAR multi-sensor e multi-plataforma apresentadas no Apêndice B e nos resultados obtidos com essas ferramentas descritos no Capítulo 6, que atendem aos objetivos específicos (1) e (2) definidos na Seção 1.3, conclui-se que:

- a) Essas ferramentas permitem a minimização dos erros radiométricos de amplitude e de fase presentes nessas imagens, empregando-se diferentes algoritmos computacionais baseados em modelos consagrados para representar matematicamente todas as fontes de distorção conhecidas, sejam elas oriundas do sensor SAR, do meio ou da cena imageada. Além disso, essas ferramentas abrangentes são baseadas em interfaces gráficas amigáveis, integradas em um único ambiente de processamento digital de imagens SAR;
- b) A ferramenta computacional para calibração em lote (*batch*) atende a qualquer nível de usuário, por intermédio de processos semi-automáticos executados em série, dependendo de uma mínima interação do usuário. Além disso, integra todas as fases de calibração de dados PolSAR pós-processados, de modo totalmente transparente ao usuário. O conceito da ferramenta em questão demonstra a primeira hipótese deste trabalho, onde foi possível propor e

desenvolver uma metodologia geral de calibração radiométrica multi-sensor e multi-plataforma integrada em um único ambiente de processamento SAR, que se adapte a qualquer conjunto de imagens PolSAR e de dados auxiliares disponíveis, e que seja amigável a qualquer usuário, especializado ou não na área de calibração SAR.

Com base nos resultados obtidos para as imagens PolSAR do sensor SAR R99B, na banda L, apresentados no Capítulo 6, que atendem aos objetivos específicos de (3) a (7) definidos na Seção 1.3, conclui-se que:

- a) A comprovada qualidade radiométrica dessas imagens permite a extração de informações referentes a diversos alvos terrestres, o que foi evidenciado com as composições coloridas apresentadas neste trabalho, especialmente para áreas urbanas, que apresentam uma grande diversidade de alvos naturais e artificiais. Esse potencial de extração de informações abre uma grande perspectiva de aplicações dessas imagens, especialmente na classificação digital de imagens por intermédio do uso de diversos métodos de classificação disponíveis. Entretanto, recomenda-se para futuras missões com o sensor SAR R99B, com a geometria de imageamento da Faixa 1, empregar ângulos de incidência compreendidos entre $46,47^\circ$ e $70,34^\circ$, para garantir uma melhor qualidade radiométrica das imagens;
- b) A qualidade geométrica dessas imagens foi avaliada por intermédio do uso da posição de pico da resposta impulsiva de 25 refletores de canto triédricos instalados nas duas áreas de estudo. Com relação à geometria interna, foram obtidos, inicialmente, valores médios estimados para as resoluções espaciais radiais iguais a 7,84 m e 3,91 m, correspondentes às bandas de frequência radial de 25 MHz e 50 MHz, respectivamente, e azimutal igual a 1,55 m, que estão próximos dos valores ideais esperados de 7,08 m, 3,54 m e 1,12 m, respectivamente; em seguida, foi demonstrada a boa qualidade do registro entre as componentes polarimétricas HH e VV, fato esse comprovado pelo valor do

EMQ não ter ultrapassado $\frac{1}{2}$ *pixel*. Com relação ao erro de posicionamento global, foi obtido um valor médio igual a 73,44 m, que se aproxima muito do erro esférico teórico de posicionamento igual a 76 m, sendo que os erros locais obtidos para cada refletor indicam que essas imagens, georreferenciadas apenas com parâmetros da plataforma, são compatíveis com a planimetria de documentos cartográficos em escalas igual ou menores que 1:250.000, considerando o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) planimétrico de documentos cartográficos classificado como padrão *Classe A*;

- c) Realizou-se uma caracterização detalhada e inédita, no cenário nacional, das propriedades geométricas e radiométricas das imagens PolSAR do sensor SAR R99B, caracterizando principalmente os níveis de distorção de desbalanceamento e contaminação entre os canais polarimétricos do referido sensor. Essa caracterização dos níveis de distorção impostos pelo sistema sensor SAR R99B servirão de referência para futuras avaliações a cerca da qualidade polarimétrica das imagens PolSAR obtidas por esse sistema. Além disso, a partir da quantificação das distorções de recepção e de transmissão do sistema sensor SAR R99B foi possível obter a resposta polarimétrica de alvos de interesse, o que pode ser utilizada em outras aplicações que envolvam a necessidade de calibração polarimétrica;
- d) Foi realizada uma análise detalhada dos resultados obtidos com o método de calibração polarimétrica proposto por Quegan (1994), e modificado por Kimura et al. (2004), conforme os resultados apresentados na Seção 6.3.2.1, e foram identificados erros de estimação na amplitude e na fase dos parâmetros do *cross-talk*. As discrepâncias encontradas na estimação destes parâmetros foram causadas pela utilização de alvos de baixo retorno, na região do *near range*, devido a baixa relação sinal/ruído presente nesta região da imagem da Faixa 1;
- e) Para as referidas imagens PolSAR, com exceção das áreas de baixo retorno, verificou a existência de uma razoável estabilidade ao longo das direções radial e azimutal na estimação dos parâmetros do *cross-talk* pelo método tradicional,

para diferentes faixas imageadas, com diferentes resoluções espaciais e geometrias de imageamento. Esta estabilidade se torna mais visível quando alvos homogêneos são empregados para tal finalidade. A distorção do *cross-talk* apresentou valores médios referentes aos termos das matrizes de recepção e de transmissão iguais a -34,03 dB e -34,49 dB, respectivamente, valores esses menores que o limite de referência de -30 dB;

- f) A suposição de reciprocidade das matrizes de distorção desse sensor, ou seja, $[R] = cte[T]^T$, pode ser considerada, pois a razão média entre as amplitudes dos termos do *cross-talk* r_{pq} e t_{qp} ($p \neq q$) e do *channel imbalance* r_{jj} e t_{jj} , para as três faixas imageadas, foram iguais a 0,46 dB e -0,08 dB, respectivamente;
- g) Após a correção do *channel imbalance* pelo método tradicional, considerando-se o valor médio para 24 refletores de canto triédricos instalados nas duas áreas de estudo, verificou-se a existência de um pequeno grau de desbalanceamento entre os canais polarimétricos do sistema sensor SAR R99B, além da independência dos valores estimados para a amplitude e a fase do parâmetro k , em função da variação do ângulo de incidência. A distorção do *channel imbalance* apresentou valores médios de amplitude referentes aos termos das matrizes de recepção e de transmissão iguais a $0,66 \text{ dB} \angle 18,43^\circ$ e $0,74 \text{ dB} \angle 15,95^\circ$, respectivamente, valores esses muito próximos, em módulo, dos limites de referência de 0,4 dB e 10° para a amplitude e fase relativa, respectivamente;
- h) Em relação à implementação computacional do método de calibração polarimétrica *multi-look*, duas abordagens foram investigadas: uma mais geral, que emprega métodos numéricos para solução de sistemas não-lineares, cujas observações são extraídas das imagens MLC e as incógnitas são os parâmetros de calibração α , u , v , w , z , k e Y ; a outra, baseada na estimação dos parâmetros do *cross-talk* pelo método modificado de Quegan (1994), proposto em Kimura et al. (2004), e na estimação do *channel imbalance* baseada em métodos numéricos para solução de sistemas não-lineares, cujas observações são extraídas das imagens MLC. A segunda abordagem produziu melhores resultados em um

tempo de processamento menor, porém foi 5,6 vezes mais demorado que o método tradicional;

- i) Os valores médios do *channel imbalance* calculados pelo método tradicional, sem o uso dos refletores de canto, e pelo novo método foram iguais a 1,04 dB \angle 25,05° e 0,84 dB \angle 9,95°, respectivamente, sendo que este valor se aproximou do limite de referência de 0,4 dB \angle 10° para a calibração polarimétrica. Para a Faixa 2, o desbalanceamento médio obtido pela correção do método 3 para 7 refletores, excluindo-se o PCR07, foi reduzido de 0,89 dB \angle 46,82° para 0,36 dB \angle 6,75°, em comparação com o método 1, ficando abaixo do limite de referência. Além disso, considerando-se 10 dos 25 refletores disponíveis, o desbalanceamento médio obtido pela correção do método 3 foi reduzido de 0,96 dB \angle 41,15° para 0,37 dB \angle 6,53°, ficando também abaixo do limite de referência;
- j) Os resultados do desbalanceamento entre os canais polarimétricos obtidos para 10 dos 25 refletores foram também confirmados por intermédio da resposta polarimétrica calibrada pelo novo método de calibração, onde os respectivos valores do EMQ ficaram muito próximos dos obtidos pelo método tradicional com o uso da informação do desbalanceamento entre os canais HH e VV desses refletores. Portanto, com base nesses resultados, foi demonstrada a segunda hipótese deste trabalho, onde foi possível somente empregando as imagens PolSAR, realizar a calibração automática do *cross-talk* e do *channel imbalance*, como sendo uma alternativa viável, em relação aos métodos de calibração polarimétrica tradicionais, no caso da inexistência de alvos artificiais conhecidos na cena imageada;
- k) O novo método de calibração *multi-look* tem a vantagem de realizar a estimação conjunta do *cross-talk* e do *channel imbalance* a partir dos próprios dados SAR, ao contrário dos métodos tradicionais que dependem do uso de alvos artificiais ou do conhecimento de alvos naturais existentes na cena imageada para a correção do *channel imbalance*. Além disso, o método em questão pode ser

incorporado ao processo de síntese de imagens SAR, de modo a fornecer para o usuário imagens com diferentes níveis de processamento e com uma razoável minimização das distorções causadas pelo sistema SAR polarimétrico e da própria rotação de *Faraday*;

- l) A correção do *cross-talk* pouco alterou os centros de classes representadas no Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, em função do nível baixo do *cross-talk* menor que -30 dB, enquanto que a correção do *cross-talk* com simetrização provocou um aumento significativo da entropia para determinadas classes de interesse, e extremamente pequeno para o ângulo α para todas as classes de interesse. A correção do *cross-talk* e do *channel imbalance* com simetrização, independente do método de calibração empregado, provocou uma variação significativa do ângulo α para determinadas classes e desprezível para a entropia, indicando que o ângulo α é mais sensível a calibração dos canais co-polarizados, quando existe um nível baixo do *cross-talk*;
- m) A adequada minimização das distorções do *cross-talk* e do *channel imbalance* contribuiu para o agrupamento dos *pixels* e o deslocamento dos centros das classes investigadas, na direção das zonas do Plano $(H_s, \bar{\alpha})$ que caracterizam corretamente os mecanismos de espalhamento presentes nos alvos naturais e artificiais, conforme ocorreu para as classes avaliadas;

7.2 Sugestões

Com a finalidade de aprimorar as ferramentas implementadas e dar seqüência as pesquisas voltadas para a calibração de imagens PolSAR, algumas sugestões para trabalhos futuros são descritas a seguir, que abrem a perspectiva para implantação de uma nova linha de pesquisa na área da OBT, voltada para a quantificação e avaliação da influência da calibração de imagens PolSAR em diferentes aplicações.

Com relação ao novo método de calibração polarimétrica desenvolvido, sugerem-se os seguintes estudos e aperfeiçoamentos:

- a) Investigar o emprego de outros métodos de solução de sistema de equações não-lineares, de modo a reduzir o tempo de processamento e evitar a influência da solução inicial e a obtenção de mínimos locais na solução final;
- b) Incorporar um procedimento automático para eliminação de áreas com baixa relação sinal/ruído presentes nas imagens SAR, para que sejam evitados os erros de estimação da solução inicial e final que ocorrem nessas áreas;
- c) Avaliar os resultados de calibração com imagens PolSAR oriundas do sensor OrbiSAR-2, na banda P, que possuiu uma melhor correção da compensação de movimento da aeronave em relação ao sensor SAR R99B, com a finalidade de validação do método em questão com outras bandas de radar. Essa avaliação com outros sensores é importante, pois a variação do nível do *cross-talk* para valores maiores que os obtidos para o sensor R99B neste trabalho podem influenciar na estimação dos parâmetros do *cross-talk* para as imagens MLC, e a suposição de invariância, para cada *look*, das matrizes de distorções $[R]$ e $[T]$ do sensor SAR pode não ser válida.

Com relação ao conjunto de ferramentas computacionais implementadas, sugerem-se os seguintes desenvolvimentos e/ou estudos:

- a) Finalizar a ferramenta computacional para calibração em lote, que no atual estágio de desenvolvimento pode ser empregada como uma referência para os usuários, no sentido de informar quais os métodos e a ordem que devem ser aplicados, dependendo dos dados de entrada e de saída;
- b) Completar o conjunto de ferramentas desenvolvidas por intermédio da implementação da correção do erro de estimativa da área do espalhador, induzido pela topografia da região de imageamento, conforme a teoria descrita em Van Zyl et al. (1993) e Ulander (1996), que têm por base a extração da declividade a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e na técnica de interferometria SAR, respectivamente, ou ainda em Luckman (1998a, b);

- c) Implementar a visualização do espaço tridimensional representado pelas imagens decompostas $(H_s, \bar{\alpha}, A_p)$, conforme os resultados apresentados em Pottier e Lee (1999), com a finalidade de projeção do Plano $(H_s, \bar{\alpha})$, para determinados intervalos de valores da A_p , facilitando assim a extração de informações e apresentação gráfica de resultados;
- d) Desenvolver os seguintes estudos: caracterização da matriz de espalhamento ideal de alvos de interesse, por meio da estimativa do coeficiente de retroespalhamento que compões esses alvos, como por exemplo, o retorno do tipo *double-bounce* em prédios ou em tanques de combustível disponíveis na imagem da região de Campinas; caracterização da resposta polarimétrica de alvos pontuais e distribuídos, com a finalidade de desenvolvimento de um banco de dados de respostas polarimétricas;
- e) Avaliar os resultados de calibração polarimétrica com outros sensores: RADARSAT-2, ALOS e OrbiSAR;
- f) Avaliar a Rotação de *Faraday* para dados do sensor/satélite PALSAR/ALOS;
- g) Desenvolver metodologias de calibração que possam ser aplicadas no projeto MAPSAR.

Com relação à perspectiva de desenvolvimento de novas pesquisas voltadas para a avaliação da influência de diferentes processos de calibração sobre a informação polarimétrica dos alvos terrestres, sugerem-se os seguintes estudos:

- a) Para os futuros trabalhos de campo destinados à coleta de dados para calibração polarimétrica de sistemas PolSAR, poderá ser previsto a utilização de refletores de canto diédricos rotacionados de 45° , com vistas à utilização da informação polarimétrica conhecida das componentes HV e VH. Desta forma, com pelo menos 2 refletores triédricos e 2 refletores diédricos rotacionados de 45° é possível resolver o sistema de equações representado pelo modelo de distorção

linear do sistema SAR, para obtenção dos termos r_{pq} e t_{pq} , onde $p, q = \{h, v\}$, das matrizes de distorção de recepção $[R]$ e de transmissão $[T]$;

- b) Avaliar a influência da topografia em imagens PolSAR, conjugados com o Modelos Digitais do Terreno em áreas de florestas, obtidas com imagens da banda P, e em áreas sem vegetação, com outras bandas de radar;
- c) Avaliar o impacto da calibração polarimétrica sobre os resultados obtidos por meio das técnicas de otimização da coerência interferométrica (PAPATHANASSIOU, 1999; COLIN et al., 2003; MURA, 2005), que fornecem uma fase interferométrica menos ruidosa para geração de modelos numéricos de elevação mais precisos, empregando-se as imagens PolInSAR adquiridas para a Faixa 2 da área de estudo 1;
- d) Simular ou empregar outros sistemas sensores SAR com amplitude maior do *cross-talk* para verificar a influência na classificação e na comparação dos métodos de calibração, além da influência no valor do coeficiente de retroespalhamento dos alvos;
- e) Avaliar a influência dos processos de calibração de amplitude e polarimétrica na obtenção do coeficiente de retroespalhamento e na resposta polarimétrica, respectivamente, para alvos pontuais, diferentes de refletores de canto triédricos, e distribuídos;
- f) Avaliar a influência dos processos de calibração polarimétrica, da topografia e da rotação de *Faraday*, sobre a classificação de imagens PolSAR complexas, empregando-se algoritmos de classificação supervisionada baseados em um modelo estatístico para os dados, conforme desenvolvido em Correia (1998), e algoritmos híbridos que utilizam classificadores não-supervisionada baseados nos mecanismos de espalhamento dos alvos e em modelos estatísticos, conforme desenvolvido em Pottier e Lee (2000).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M; STEGUN, I. **Handbook of mathematical functions**: with formulas, graphs, and mathematical tables. New York: Dover, 1972. 1046 p.
- AINSWORTH, T.L.; LEE, J.S. A new method for a posteriori polarimetric SAR calibration. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2001, Sidney, Australia. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001, v. 1, p. 420-422.
- AINSWORTH, T.L.; FERRO-FAMIL, F.; LEE, J.S. Orientation angle preserving a posteriori polarimetric SAR calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 4, p. 994-1003, April 2006.
- ALBERGA, V. **Comparison of polarimetric methods in image classification and SAR interferometry applications**. 2003. 171 p. Doctoral Thesis - Technical University of Chemnitz, 2003.
- ANDRADE, N. S. O; SANTA ROSA, A. N. C. Características técnicas do sensor SAR multipolarimétrico aerotransportado brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 7027-7034. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/10.24.00.15/doc/7027-7034.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2009.
- BERLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (BUT). **Radar Tools (RAT)**. 2008. Disponível em: <<http://www.cv.tu-berlin.de/rat/index.php>> . Acesso em: 13 jan. 2008.
- BICKEL, S. H.; BATES, R. H. T. Effects of magneto-ionic propagation on the polarization scattering matrix. **Proceedings IRE**, v. 53, p. 1089–1091, 1965.
- BOERNER, W. M.; MORISAKI, J. J. Basics of SAR polarimetry. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, 5., 2004, Ulm, Germany. **Proceedings...** Ulm: DLR, 2004. CD-ROM.
- BORGEAUD, M.; SHIN, R. T; KONG, J. A. Theoretical models for polarimetric radar clutter. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, v. 1, n. 1, p. 67-86, January 1987.
- BROWN, R. J.; BRISCO, B.; AHERN, F. J.; BJERKELUND, C.; MANORE, M.; PULTZ, T. J.; SINGHROY, V. SAR application calibration requirements. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 193-203, 1993.

CAMERON, W. L.; LEUNG, L. K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition. In: INTERNATIONAL RADAR CONFERENCE, 1990, Arlington, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 1990, p. 549-557.

CLOUDE, S. R. Uniqueness of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry. In: BOERNER, W. M. *et al.* (Ed.). **Direct and inverse methods in radar polarimetry.** Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 267-298.

CLOUDE, S. R.; PAPATHANASSIOU, K. P. Polarimetric SAR Interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. X, p. 1551–1565, September 1998.

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

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

COLIN, E.; TITIN-SCHNAIDER, C.; TABBARA, W., Investigation on different interferometric coherence optimization methods. In: POLINSAR 2003, Frascati, Italy. **Proceedings...** Frascati: ESA, 2003. Disponível em <<http://earth.esa.int/workshops/polinsar2003/participants/colin75/polinsar03.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR). **Decreto nº 89.817 -** Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. 1984. Disponível em <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>>. Acesso em: 23 Fev 09.

CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas.** 1998. 275p. (INPE-7178-TDI/679). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1998.

CUMMING, I. G.; WONG, F. H. **Digital processing of synthetic aperture radar data:** algorithms and implementation. Norwood: Artech House, 2005. 625 p.

DeGROOT, M. H. **Probability and statistics.** Menlo Park: Addison–Wesley, 1975. 607p.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Basic ENVISAT SAR Tools**: user manual. 2006. 174 p. Disponível em: <ftp://ftp.esrin.esa.it/pub/astbx_ftp/best_sum_v405.zip>. Acesso em: 13 jan. 2008.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **PolSARPro**: The Polarimetric SAR Data Processing and Educational Tool. 2008. Disponível em: <http://earth.esa.int/polsarpro/>. Acesso em: 13 jan. 2008.

FERNANDES, D. **Formação de imagens de abertura sintética e modelos da “speckle”-textura**. 1993. 192 p. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, 1993.

FERRO-FAMIL, L.; POTTIER, E.; LEE, J. S. Unsupervised classification of multifrequency and fully polarimetric SAR images based on the H/A/Alpha-Wishart classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 11, p. 2332–2342, November 2001.

FREEMAN, A.; SHEN, Y.; WERNER, C.L. Polarimetric SAR calibration experiment using active radar calibrators. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 224-240, March 1990.

FREEMAN, A.; VAN ZYL, J. J.; KLEIN, J. D.; ZEBKER, H. A.; SHEN, Y. Calibration of Stokes and scattering matrix format polarimetric SAR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 531-539, May 1992.

FREEMAN, A. SAR calibration: an overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 30, n. 6, p. 1107-1121, November 1992.

FREEMAN, A.; ALVES, M.; CHAPMAN, B.; CRUZ, J.; KIM, Y.; SHAFFER, S.; SUN, J.; TURNER, E.; SARABANDI, K. SIR-C data quality and calibration results. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 4, p. 848-857, July 1995.

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

FREEMAN, A. Calibration of linearly polarimetric SAR data subject to faraday rotation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 8, p. 1617-1624, August 2004.

FREEMAN, A.; SAATCHI, S. S. On the detection of faraday rotation in linearly polarized L-band SAR backscatter signatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 8, p. 1607-1616, August 2004.

FUJITA, M.; MASUDA, T.; FUJINO, Y.; SATAKE, M. Polarimetric calibration of the SIR-C C-band channel using active radar calibrators and polarization selective dihedrals. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 6, p. 1872-1878, June 1998.

FUJITA, M. Polarimetric calibration of space SAR data subject to faraday rotation -a three-target approach. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2005, Seoul, South Korea. **Proceedings...** New York: IEEE, 2005, v. 8, p. 5497-5500.

FUJITA, M.; MURAKAMI, C. Polarimetric radar calibration method using polarization-preserving and polarization-selective reflectors. **IEICE Transactions on Communication**, v. E88-B, n. 8, August 2005.

GAMMA REMOTE SENSING (GAMMA). **Gamma SAR Software**. 2005. 4 p. Disponível em: <http://www.gamma-rs.ch/uploads/media/gamma_soft_08.pdf>. Acesso: 13 jan. 2008.

GOLDSTEIN, R. M.; ZEBKER, H.; WERNER, C. L., Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. **Radio Science**, v. 23, n. 4, p. 713-720, August 1988.

GRADSHTEYN, I. S.; RYZHIK, I. M. **Table of integrals, series, and products**. New York: Academic Press, 1980. 1160 p.

GRAY, A. L.; VACHON, P. W.; LIVINGSTONE, C. E.; LUKOWSKI, T. I. Synthetic aperture radar calibration using reference reflectors., **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 3, p. 374-382, May 1990.

HAWKINS, R. K. Determination of antenna elevation pattern for airborne SAR using the rough target approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 896-905, September 1990.

HELLMANN, M. **SAR Polarimetry tutorial**. Berlin: University of Technology, 2001. 109 p. Disponível em: <<http://www.fpk.tu-berlin.de/~anderl/epsilon/polarimetrytutorial.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2005.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles & applications of imaging radar**. 3. ed. v. 2. New York: John-Wiley and Sons, Inc, 1998. 896 p.

HUYNEN, J.R. Measurement of the target scattering matrix. **Proceedings of the IEEE**, v. 53, n. 8, p. 936-946, 1965.

IEEE. IEEE standard definitions of terms for antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. AP-31, n. 6, p. 1-26, 1983.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Ferramentas de calibração de imagens SAR polarimétricas**. 2009. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser410/laboratorio.php>>. Acesso em: 22 jun. 2009.

ITT. **ENVI reference guide**. 2006. 564 p. Disponível em: <<http://www.itvis.com/envi/docs/pdf/refguide.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

JENNINGS, A., MCKEOWN, J. **Matrix Computation**. 2. ed. John-Wiley and Sons, Inc., 1992. 444 p.

JENSEN, H.; GRAHAM L. C.; PORCELLO L. J.; LEITH E. N. Side-Looking Airborne Radar, **Scientific American**, v. 237, p. 84-95, 1977.

KASISCHKE, E. S.; FOWLER, G. A statistical approach for determining radiometric precisions and accuracies in the calibration of synthetic aperture radar imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 416-427, July 1989.

KIMURA, H.; MIZUNO, T.; PAPATHANASSIOU, K. P.; HAJNSEK, I. Improvement of polarimetric SAR calibration based on the Quegan Algorithm. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004, Alaska, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004, v. 1, p. 184-187.

KLEIN, D; FREEMAN, A. Quadpolarisation SAR calibration using target reciprocity, **Journal of Electromagnetic Waves Applications**, v. 5, p. 735-751, 1991.

KLEIN, J.D. Calibration of complex polarimetric SAR imagery using backscatter correlations. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 28, n. 1, p. 183-194, January 1992.

KOSTINSKI, A.B.; BOERNER, W. M. On the foundations of radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n 12, p. 1395-1404, December 1986.

KROGAGER, E. A New Decomposition of the radar target scattering matrix. **Electronic Letter**, v. 26, n. 18, p. 1525-1527, August 1990.

KROGAGER, E.; CZYŻ, Z. H. Properties of the sphere, diplane, helix decomposition. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RADAR POLARIMETRY (JIPR'95), 3., 1995, Nantes, France. **Proceedings...** Nantes: IRESTE, University of Nantes, 1995, p. 106-114.

LEE, J. S.; GRUNES, M. R.; DE GRANDI, G. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2363–2373, September 1999b.

LEE, J. S.; GRUNES, M.R.; AINSWORTH, T.L.; LI-JEN DU; SCHULER, D.L.; CLOUDE, S.R. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 5, p. 2249–2258, September 1999a.

LEE, J. S.; SCHULER, D. L.; AINSWORTH, T. L. Polarimetric sar data compensation for terrain azimuth slope variation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, n. 5, p. 2153-2163, September 2000.

LEE, J. S.; SCHULER, D. L.; AINSWORTH, T. L.; KROGAGER, E.; KASILINGAM, D.; BOERNER, W. M. On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 1, p. 30-41, January 2002.

LEE, J. S; GRUNES, M.R.; POTTIER, E.; FERRO-FAMIL, L. Unsupervised terrain classification preserving polarimetric scattering characteristics. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 4, p. 722-731, April 2004.

LEMOINE, G. G. On polarimetric signatures. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1992, Houston. **Proceedings...** New York: IEEE, 1992, v.2, p.913–915.

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. **Quart. Appl. Math.**, v. 2, n. 2, p. 164-168, 1944.

LUCKMAN, A. J. Correction of SAR imagery for variation in pixel scattering area caused by topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6, p. 344-350, January 1998a.

LUCKMAN, A. J. The effects of topography on mechanisms of radar backscatter from coniferous forest and upland pasture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1830-1834, September 1998b.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **J. Soc. Indust. Appl. Math.**, v. 11, n. 2, p. 431-441, June 1963.

MEADOWS, P.J. *et al.* SAR product control software. In: CEOS WORKING GROUP ON CALIBRATION / VALIDATION SAR WORKSHOP, 2002, London. **Proceedings...** London: ESA, 2003. Disponível em: <http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/ceos_calval_sar/2_3_meadows.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2008.

MOREIRA, A. An improved multi-look technique to produce SAR imagery. In: INTERNATIONAL RADAR CONFERENCE, 1990, Arlington, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 1990, p. 57-63.

MURA, J.C. **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR**. 2000. 160 p. (INPE-8209-TDI/764). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2000.

MURA, J.C.; BINS, L.S.; GAMA F.F.; FREITAS, C.C.; SANTOS, J.R.; DUTRA, L.V. Identification of the Tropical Forest in Brazilian Amazon based on the DEM difference from P e X bands interferometric data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2001, Sidney, Australia. **Proceedings...** New York: IEEE, 2001, v. 2, p. 789-791.

MURA, J. C. Otimização da coerência de imagens SAR interferométricas e polarimétricas na banda P em áreas de floresta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005, p. 4163-4169. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.21.18/doc/4163.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

MURA, J. C.; CORREIA, A. H.; HONDA, P. Calibração preliminar dos dados SAR polarimétricos em banda L do sensor R99B do CENSIPAM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4951-4958. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.23.37/doc/4951-4958.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2007.

NETLIB. **Minpack**. 2007. Disponível em: <<http://www.netlib.org/minpack/>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

NGHIEM, S. V.; YUEH, S. H.; KWOK, R.; LI, F. K. Symmetry properties in polarimetric remote sensing. **Radio Science**, v. 27, p. 693–711, Sep.-October 1992.

PAPATHANASSIOU, K. P. **Polarimetric SAR interferometry**. 1999. 149 p. Doctoral Thesis - Technical University of Graz, 1999.

PCI GEOMATICS. **Radar**. 2005. 2 p. Disponível em: <<http://www.pcigeomatics.com/pdfs/Radar.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

PCI GEOMATICS. **SAR Polarimetry Workstation**. 2006. 4 p. Disponível em: <http://www.pcigeomatics.com/pdfs/SAR_Polarimetry_Workstation.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2008.

PELLIZZERI, T. M. Classification of polarimetric SAR images of suburban areas using joint annealed segmentation and "H/A/alpha" polarimetric decomposition. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 1-2, p. 55-70, June 2003.

PORCELLO, L. J. *et al.* Speckle reduction in synthetic aperture radars. **International Optical Society American**, v. 66, n. 11, p. 1305-1311, 1976.

POTTIER, E. Unsupervised classification scheme and topography derivation of PolSAR data based on the H/A/α polarimetric decomposition theorem. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RADAR POLARIMETRY, 4., 1998, Nantes. **Proceedings...** Nantes: IRESTE, University of Nantes, 1998, p. 535-548.

POTTIER, E.; SCHULER, D. L.; LEE, J. S.; AINSWORTH, T. L. Estimation of the terrain surface azimuthal/range slopes using polarimetric decomposition of POLSAR data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1999, Lincoln, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 1999, p. 2212–2214.

POTTIER, E., LEE, J.S. Unsupervised classification scheme of POLSAR images based on the complex Wishart distribution and the H/A/alpha—Polarimetric decomposition theorem. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, 3., 2000, Munich, Germany. **Proceedings...** Munich: DLR, 2000. CD-ROM.

PRESS, W.H.; FLANNERY, B.P.; TEULOSKY, S.A.; VETTERLING, W.T. Numerical recipes in **Numerical Recipes in FORTRAN 77: The art of scientific computing**. 2. ed. Cambridge University Press, 1992. 992 p.

QUEGAN, S. A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data – theory and observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 1, p. 89-99, January 1994.

REIGBER, A.; HELLWICH, O. RAT (Radar Tools): a free SAR image analysis software package. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR, 5., 2004, Ulm, Germany. **Proceedings...** Ulm: DLR, 2004, p. 997-1000.

ROMBACH, M. The newest multipolarizate dual band sensor OrbiSAR-1 InSAR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 21., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBC, 2003. Disponível em: < http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/202-SR23.pdf >. Acesso em: 10 abr. 2007.

RUCK, G. T.; BARRICK; D. E.; STUART, W. D.; KRICHBAUM, C. K. **Radar Cross Section Handbook**. v. 1 e 2. New York: Plenum, 1970. 949 p.

SÁNCHEZ, J. M. L. **Analysis and estimation of biophysical Parameters of vegetation by radar polarimetry**. 1999. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Politécnica de Valência, 1999.

SANT'ANNA, S. J. S.; LACAVA, J. C. S.; FERNANDES, D. Análise do efeito da rotação do plano de polarização em imagens SAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 7433-7440. Disponível em: <<http://martedpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.17.09/doc/7433-7440.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2009.

SANTOS, J. R. *et al.* Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 482–493, 2003.

SARMAP. **SARscape**: technical description in a nutshell. 2007. 30 p. Disponível em: <http://www.sarmap.ch/SARscape_technical.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2008.

SCHAFFER, R. W.; OPPENHEIM, A. V. **Digital signal processing**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. 585 p.

SCHRODER, R ; PULS, J. ; HAJNSEK, I ; JOCHIN, F ; NEFF, T. ; KONO, J ; PARADELLA W. R. ; SILVA, M. M. Q ; VALERIANO, D. M. ; COSTA, M. P. F. MAPSAR: A Small L-Band SAR Mission for Land Observation. **Acta Astronautica**, v. 56, n. 2004, p. 35-43, 2005.

SCHULER, D. L.; LEE, J. S.; DE GRANDI, G. Measurement of Topography Using Polarimetric SAR Images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 5, p. 1266-1277, September 1996.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO URBANO E MEIO AMBIENTE (SEPLAMA). **Campinas**: marcos geodésicos. 2001. Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/seplan/geodesico/portmarcgeod.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

SHIMADA, M.; TADONO, T.; UMEHARA, T. Calibration of PI-SAR (L-band). In: CEOS WORKING GROUP ON CALIBRATION / VALIDATION SAR WORKSHOP, 2002, London, England. **Proceedings...** London: ESA SP-526, 2003. Disponível em: <http://earth.esa.int/pub/esa_doc/ceos_calval_sar/4_1_shimada.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2007.

SHIMADA, M.; TADONO, T.; WATANABE, M. Determination of polarimetric calibration parameters of L band SAR using uniform forest data. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004, Alaska, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004, v. 1, p. 699-702.

SHIMADA, M.; ROSENQVIST, A.; WATANABE, M.; TADONO, T. The polarimetric and interferometric potential of ALOS PALSAR. In: POLINSAR 2005, Frascati, Italy. **Proceedings...** Frascati: ESA, 2005. Disponível em: <http://earth.esa.int/workshops/polinsar2005/participants/213/paper_Polarimetric_paper_S271587.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2007.

SILVA, L. C. Método robusto para a Calibração de Câmeras em Estereofotogrametria. 2003. 117 p. Tese – (Doutorado em Engenharia Elétrica) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

SOKKIA. **Stratus**. 2007. Disponível em: <<http://www.sokkia.com/Products/Detail/attachment.axd?id=209>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

THOMPSON, A. R.; MORAN, J. M.; SWENSON, G. W. **Interferometry and synthesis in radio astronomy**. 2. ed. New York: Wiley, 2001. 715 p.

TOUZI, R.; RANEY, K. On the use of complex SAR data for calibration. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 1992, Houston, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 1992, v. 2, p. 1155-1157.

TOUZI, R.; LIVINGSTONE, C. E.; LAFONTAINE, J. R. C.; LUKOWSKI, T. I. Consideration of antenna gain and phase patterns for calibration of polarimetric SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 6, p. 1132-1145, November 1993.

TOUZI, R.; LOPES, A. Statistics of the Stokes parameters and of the complex coherence parameters in one-look and multilook speckle field. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 519–532, March 1996.

TOUZI, R.; LOPES, A.; BRUNIQUÉL, J.; VACHON, W. Coherence estimation for SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 1, p. 135-148, January 1999.

TOUZI, R.; BOERNER, W.M. ; LEE, J. S.; LUENEBURG, E. A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 380–407, 2004.

TOUZI, R.; CHARBONNEAU, F. J. PWS: a friendly and effective tool for polarimetric image analysis. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 566–571, 2004.

TOUZI, R.; SHIMADA, M. On the use of symmetric scatterers for calibration and validation of PALSAR polarimetric modes. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2004, Alaska, USA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2004, v. 3, p. 1835-1837.

ULABY, F. T.; MOORE, R. K.; FUNG, A. K. **Microwave remote sensing: active and passive**. v. 3. Norwood: Artech House: 1986. 1097 p.

ULABY, F. T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech House, 1990. 364 p.

ULANDER, L. M. H. Radiometric slope correction of synthetic-aperture radar images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 5, p. 1115-1122, September 1996.

UNAL, C. M. H., NIEMEIJER, R. J. ; VAN SINTTRUYEN, J. S.; LIGTHART, L. P. Calibration of a polarimetric radar using a rotatable dihedral corner reflector. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, n. 4, p. 837-845, July 1994.

VAN DER SANDEN, J. J.; ROSS, S. G. **Applications potential of RADARSAT-2: a preview**. Ottawa, Canada: CCRS, 2001. 117 p. Disponível em: <<ftp://pubftp:pubftp@ftp.nrcan.gc.ca/files/1m1200kndrv738tw23sy.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2007.

VAN DER SANDEN, J. J.; THOMAS, S. J. **Applications Potential of RADARSAT-2: Supplement One**. Ottawa, Canada: CCRS, 2004. 115 p. Disponível em: <http://www.radarsat2.info/sartrek/2005/jun/RSAT2_APPS_2004_PDF_Final.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2008.

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

VAN ZYL, J. J.; PAPAS, C. H.; ELACHI, C. On the optimum polarizations of incoherently reflected waves. **IEEE Transactions on Antennas Propagation**, v. AP-35, p. 818-825, 1987b.

VAN ZYL, J. J. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 3, p. 337–348, May 1990.

VAN ZYL, J. J.; BURNETTE, C. F.; ZEBKER, H. A.; FREEMAN, A.; HOLT, J. **POLCAL User's Manual**. Pasadena, EUA: JPL, 1990.

VAN ZYL, J. J.; CHAPMAN, B. D; DUBOIS, P.; SHI, J. Effect of topography on SAR calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 5, p. 1036-1043, September 1993.

VAN ZYL, J.J.; KIM, Y. The use of polarimetric and interferometric SAR data in floodplain mapping. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2003, Toulouse, France. **Proceedings...** New York: IEEE, 1993, v. 1, p. 443-445.

VEXCEL. **CALPRO™ SAR Calibration Workstation**. 2008. Disponível em: <<http://www.vexcel.com/software/calpro/features.asp>>. Acesso em: 13 jan. 2008.

WERNER, D. R. **High resolution radar**. 2. ed. Norwood: Artech House, 1994. 593 p.

WIKIPEDIA. **Faraday effect**. 2007a. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/faraday_effect>. Acesso em: 10 abr. 2007.

WIKIPEDIA. **Kronecker product**. 2007b. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/kronecker_product>. Acesso em: 10 abr. 2007.

YANASSE, C. C. F., SANT'ANNA, S. J. S., FRERY, A. C., RENNO', C. D., SOARES, J. V., LUCKMAN, A. J. Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C L and C data. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 2, p. 180–190, 1997.

YUEH, S. H.; KONG., J. A; BARNES, R. M.; SHIN, R. T. Calibration of polarimetric radars using in-scene reflectors. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, v. 4, n. 1, p. 27-48, 1990.

YUEH, S. H.; KONG, J. A; SHIN, R. T. External calibration of polarimetric radars using point and distributed targets. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, v. 6, n. 7, p. 921-941, 1992.

YUEH, S. H.; R. KWOK, AND S. V. NGHIEM, Polarimetric scattering and emission properties of targets with reflection symmetry. **Radio Science**, v. 29, n. 6, p. 1409–1420, November 1994.

ZEBKER, H.A.; LOU, Y. Phase calibration of imaging radar polarimeter Stokes matrices. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 2, p. 246–252, March 1990.

APÊNDICE A - DEFINIÇÕES

A.1 Produto de Kronecker

O produto de *Kronecker*, denotado por \otimes , é uma operação entre duas matrizes de tamanhos arbitrários que resulta em uma matriz bloco, não devendo ser confundido com uma multiplicação usual de matrizes. O produto de *Kronecker* entre duas matrizes $[A]_{m \times n}$ e $[B]_{p \times q}$ produz uma matriz bloco de dimensões $mp \times nq$ dada por (WIKIPEDIA, 2007b):

$$[A] \otimes [B] = \begin{bmatrix} a_{11}[B] & \cdots & a_{1n}[B] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}[B] & \cdots & a_{mn}[B] \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

ou, mais explicitamente, obtém-se:

$$[A] \otimes [B] = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{11}b_{12} & \cdots & a_{11}b_{1q} & \cdots \cdots & a_{1n}b_{11} & a_{1n}b_{12} & \cdots & a_{1n}b_{1q} \\ a_{11}b_{21} & a_{11}b_{22} & \cdots & a_{11}b_{2q} & \cdots \cdots & a_{1n}b_{21} & a_{1n}b_{22} & \cdots & a_{1n}b_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{11}b_{p1} & a_{11}b_{p2} & \cdots & a_{11}b_{pq} & \cdots \cdots & a_{1n}b_{p1} & a_{1n}b_{p2} & \cdots & a_{1n}b_{pq} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}b_{11} & a_{m1}b_{12} & \cdots & a_{m1}b_{1q} & \cdots \cdots & a_{mn}b_{11} & a_{mn}b_{12} & \cdots & a_{mn}b_{1q} \\ a_{m1}b_{21} & a_{m1}b_{22} & \cdots & a_{m1}b_{2q} & \cdots \cdots & a_{mn}b_{21} & a_{mn}b_{22} & \cdots & a_{mn}b_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}b_{p1} & a_{m1}b_{p2} & \cdots & a_{m1}b_{pq} & \cdots \cdots & a_{mn}b_{p1} & a_{mn}b_{p2} & \cdots & a_{mn}b_{pq} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

O produto de *Kronecker* pode ser empregado na obtenção de representações convenientes de algumas equações matriciais, como é o caso da vetorização de matrizes. Considere a equação matricial $[C] = [A][X][B]$, que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\text{Vec}([C]) = ([B]^T \otimes [A]) \text{Vec}([X]) \quad (\text{A.3})$$

onde $Vec(\cdot)$ é uma transformação linear denominada de *vetorização*, na qual converte uma matriz em um vetor, concatenando as colunas, uma após a outra, onde a vetorização da matriz $[C]_{m \times n}$ é representada por:

$$Vec([C]_{m \times n}) = [c_{11} \cdots c_{m1} \ c_{12} \cdots c_{m2} \ \cdots \ c_{1n} \cdots c_{mn}]^T \quad (\text{A.4})$$

A.2 Momento amostral

O *momento* de ordem r ($r \in \mathfrak{R}$) de uma variável aleatória X , se existe, é definido por (DeGROOT, 1975):

$$E(X^r) = \int_{\mathfrak{R}} x^r f(x) dx \quad (\text{A.5})$$

onde a *esperança* de uma variável aleatória X será denotada por $E(X)$ (momento de 1ª ordem) e a *variância* de uma variável aleatória X será denotada por $Var(X) = E(X^2) - E(X)^2$.

Seja $\mathbf{x} = [x_1 \ \dots \ x_N]^T$ um vetor de amostras, onde $N > 1$. O *momento amostral de 1ª ordem* ou *média amostral* de uma variável aleatória X será denotado por:

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (\text{A.6})$$

A.3 Coeficiente de correlação complexa

O coeficiente de correlação complexa entre dois sinais com média zero $z_1 \in C$ e $z_2 \in C$, é definido para processos estacionários pela seguinte equação (TOUZI et al., 1999):

$$\rho = \frac{E(z_1 z_2^*)}{\sqrt{E(|z_1|^2) E(|z_2|^2)}} = D \exp(i\varphi) \quad (\text{A.7})$$

onde D é o grau de coerência e φ é a diferença de fase.

Sobre a suposição que os processos envolvidos na Equação A.7 são também ergódigos¹⁶ (em média), o coeficiente de correlação complexa amostral $\hat{\rho}_L$ é freqüentemente usado como uma estimativa de ρ , com base na seguinte expressão (TOUZI et al., 1999):

$$\hat{\rho}_L = \frac{\sum_{j=1}^L z_{1j} z_{2j}^*}{\sqrt{\sum_{j=1}^L |z_{1j}|^2} \sqrt{\sum_{j=1}^L |z_{2j}|^2}} = \hat{D} \exp(i\hat{\phi}) \quad (\text{A.8})$$

onde L é o número de amostras independentes integradas, e \hat{D} e $\hat{\phi}$ representam, respectivamente, as estimativa da coerência D e da fase ϕ . No decorrer do trabalho, o coeficiente de correlação e a respectiva estimativa serão denotados por ρ e $\hat{\rho}$.

Outra maneira de se obter o grau de coerência D é por meio do coeficiente de correlação R entre dois canais em intensidade $I_1 = |z_1|^2$ e $I_2 = |z_2|^2$, onde $z_1 \in C$ e $z_2 \in C$ são dois sinais com média zero, empregando-se a seguinte expressão (TOUZI et al., 1999):

$$D^2 = R = \frac{E[I_1 I_2] - E[I_1] E[I_2]}{\sqrt{E[I_1^2] - E[I_1]^2} \sqrt{E[I_2^2] - E[I_2]^2}} \quad (\text{A.9})$$

A relação entre a estimativa \hat{R} do coeficiente de correlação em intensidade e o grau de coerência amostral \hat{D} é denotada pela seguinte expressão (TOUZI et al., 1999):

$$\hat{D}^2 = \hat{R} = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{\sqrt{\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2} \sqrt{\langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2}} \quad (\text{A.10})$$

onde $\langle I \rangle$ representa o momento amostral de 1ª ordem da variável aleatória I (Seção A.2), empregando-se L amostras independentes integradas.

¹⁶ Um processo aleatório é dito ergódico se a média no tempo é equivalente à média nas realizações. Em termos qualitativos isto significa que as amostras temporais de uma única realização do processo contêm toda a variação estatística do processo.

A.4 Função gamma de Euler

Definida para cada $\nu > -1$, é dada por (DeGROOT, 1975):

$$\Gamma(\nu + 1) = \int_{\mathbb{R}_+} t^\nu \exp(-t) dt \quad (\text{A.11})$$

A.5 Função hipergeométrica gaussiana

Definida para $(a, b, c) \in \mathfrak{R}$ e $z \in \mathbb{C}$, a função hipergeométrica Gaussiana é dada por (GRADSHTEYN e RYZHIK, 1980):

$${}_2F_1(a, b; c; z) \equiv F(a, b; c; z) = 1 + \frac{ab}{c \cdot 1!} z + \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1) \cdot 2!} z^2 + \frac{a(a+1)(a+2)b(b+1)(b+2)}{c(c+1)(c+2) \cdot 3!} z^3 + \dots \quad (\text{A.12})$$

Esta série converge se $|z| < 1$. A função ${}_2F_1(a, b; c; z)$ é uma das soluções linearmente independentes da seguinte equação diferencial (ABRAMOWITZ e STEGUN, 1972):

$$z(1-z) \frac{d^2 u}{dz^2} + [c - (a+b+1)z] \frac{du}{dz} - abu = 0 \quad (\text{A.13})$$

O algoritmo empregado no cálculo da função ${}_2F_1(a, b; c; z)$, descrito em Press et al. (1992), é baseado em métodos numéricos para cálculo de equações diferenciais, de modo que a Equação A.13 é o principal elemento desse cálculo. Porém, para valores de z muito próximos de um, o cálculo da função pode apresentar problemas numéricos. Desta forma, foi utilizada a transformação correspondente à Equação A.14 (GRADSHTEYN e RYZHIK, 1980), para contornar este problema.

$${}_2F_1(a, b; c; z) = (1-z)^{-a} {}_2F_1\left(a, c-b; c; \frac{z}{z-1}\right) \quad (\text{A.14})$$

APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CALIBRAÇÃO DE IMAGENS POLSAR

B.1 Instalação no aplicativo ENVI

Inicialmente, a rotina *rct_envi42.sav* e os arquivos **.pdf* e *rct_envi42.men* (disponíveis para a versão 4.2 do ENVI), que estão disponíveis para *download* na página eletrônica da Divisão de Processamento de Imagens/INPE (INPE, 2009), deverão ser colocados no subdiretório *save_add*, que está contido no diretório onde está instalado o ENVI. Em seguida da inicialização do ENVI, deverá ser selecionada a subopção **Preferences**, contida na opção principal **File** do ENVI, que ativa a interface correspondente à Figura B.1a. Na aba **User Defined Files** (Figura B.1a.), deve ser acionada a subopção **ENVI Menu File**, para seleção do arquivo *rct_envi42.men*, e na aba **Default Directories** (Figura B.1b), deve ser acionada a subopção **Save_Add Directory**, para seleção do mesmo diretório *save_add* descrito anteriormente.

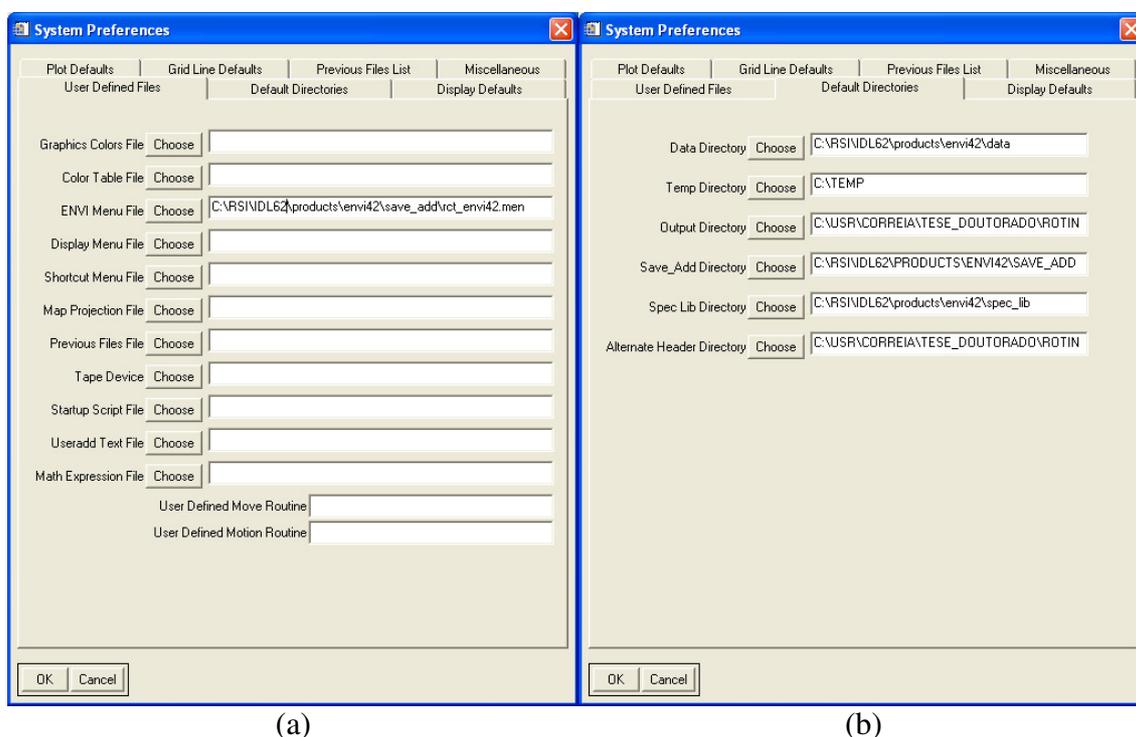


Figura B.1 – Interfaces para seleção do diretório que contém o (a) menu do ENVI e as (b) ferramentas implementadas.

Essa nova configuração será salva e somente passará a ser válida após o fechamento e nova inicialização do ENVI, cujas ferramentas desenvolvidas (*Calibration*, *Inspect Target*, *Entropy/Alpha/Anisotropy* e *SPSAR Blocks Pos-Processing*) estarão disponíveis na subopção *Polarimetric Tools*, contida na opção principal *Radar* do ENVI, conforme apresentado na Figura B.2.

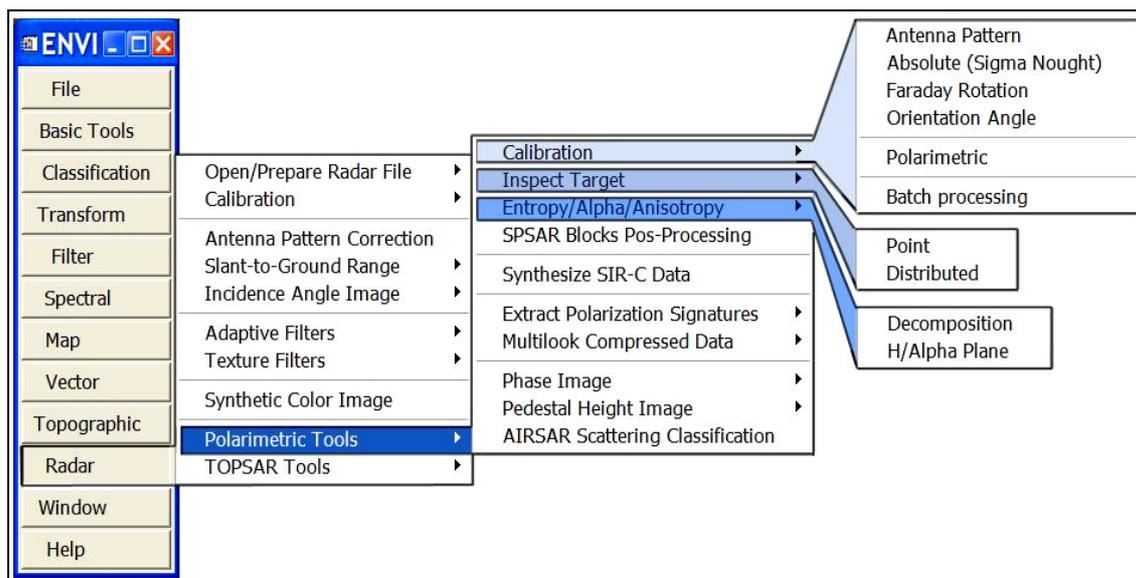


Figura B.2 – Barra de ferramentas do ENVI contendo as opções para seleção das ferramentas computacionais desenvolvidas.

B.2 Funcionalidades gerais

Antes de iniciar a descrição detalhada das ferramentas desenvolvidas, faz-se necessário descrever as funcionalidades gerais que estão disponíveis nas *GUI* que serão apresentadas no decorrer deste capítulo. Para fins de notação, todas as opções disponíveis nas ferramentas desenvolvidas são denotadas em **negrito e itálico**, assim como os termos em inglês que forem empregados. De um modo geral as *GUI* desenvolvidas possuem as seguintes opções:

- a) ***Select PolSAR Image***: botão para seleção de arquivo no formato *Meta File* do ENVI, contendo três (HH, HV e VV) ou quatro (HH, HV, VH e VV) componentes PolSAR SLC, para utilização das ferramentas de calibração da orientação de polarização, rotação de *Faraday* e polarimétrica, decomposição da

entropia/ângulo α e análise de alvos pontuais e distribuídos. Caso não exista nenhuma referência no nome dos arquivos, em relação a cada componente, será ativada a *GUI* correspondente à Figura B.3 para associação de cada componente com o respectivo arquivo;

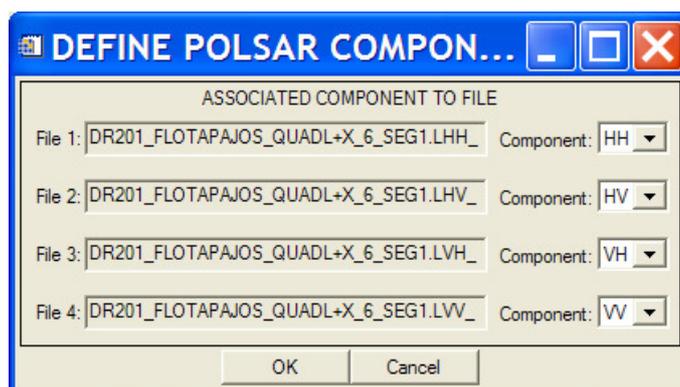
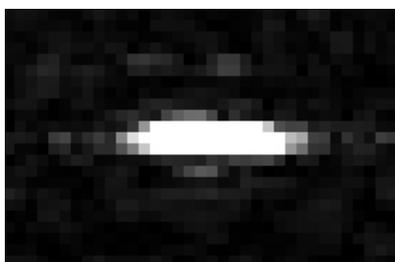


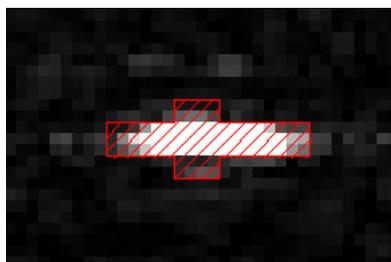
Figura B.3 – Interfaces para associação dos arquivos de entrada com as respectivas componentes polarimétricas.

- b) **Select Image File:** botão para seleção de arquivos de qualquer formato suportado pelo ENVI (*Meta ou Standard File* e formatos genéricos), contendo as imagens em amplitude, para as ferramentas de correção do padrão da antena e calibração absoluta, imagens entropia/ângulo α /anisotropia, para a ferramenta de visualização do plano entropia/ângulo α , ou imagens em amplitude, intensidade ou SLC para a ferramenta de calibração SAR em lote;
- c) **Select Point ROI File:** botão para seleção do arquivo de *ROI (Region-Of-Interest* = amostras de interesse, com extensão **.roi*) contendo o retorno de um ou mais alvos pontuais de referência. É importante que o arquivo de *ROI* selecionado contenha a maior parte da energia dos lóbulos secundários do alvo pontual, conforme o exemplo apresentado na Figura B.4;
- d) **Select ROI File:** botão para seleção do arquivo de *ROI* contendo as regiões de interesse do tipo polígono, para um ou mais alvos distribuídos na imagem;

- e) **Plot**: botão tipo lista para seleção do tipo de dado que será desenhado na janela disponível, cujas opções irão depender da ferramenta selecionada;



(a)



(b)

Figura B.4 – Exemplo da (a) resposta de um alvo pontual de referência e (b) seleção da respectiva amostra de treinamento (*ROI*).

- f) **Color Table**: opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.5 para seleção de uma tabela de cores que será aplicada na visualização bi/tridimensional disponível em determinadas ferramentas desenvolvidas;

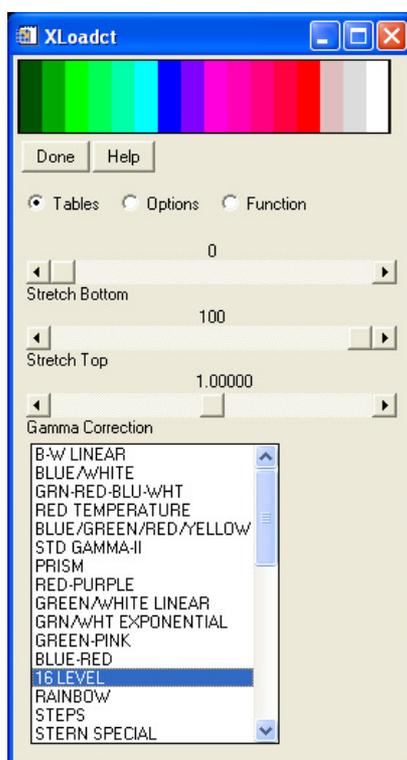


Figura B.5 – Interface para seleção da tabela de cores de interesse.

- g) **Edit/Save Plot**: botão que aciona a *GUI* correspondente à Figura B.6a para edição e exportação, para um arquivo de saída, do gráfico disponível na ferramenta em uso;

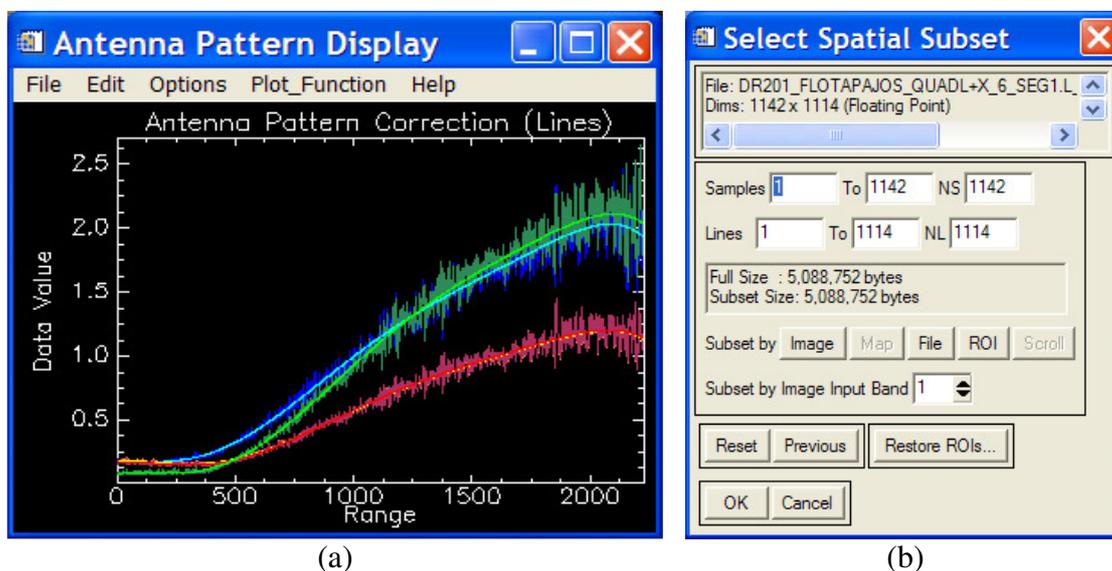


Figura B.6 – Interfaces para (a) edição e exportação dos gráficos disponíveis e (b) seleção da porção da imagem de entrada que será processada.

- h) **Save All Plot**: botão que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.7b para seleção do diretório e prefixo do nome das figuras de saída;
- i) **Apply Correction/Calibration**: botão tipo exclusivo para seleção do arquivo no qual será aplicado a correção ou calibração em uso, contendo as seguintes opções (Figura B.9a e d):
- **Input File**: opção para aplicar a correção ou calibração na imagem SAR de entrada;
 - **New File**: opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.8a para seleção de uma imagem, diferente dos dados de entrada, que será corrigida ou calibrada.
- j) **Spatial Subset**: botão que aciona a *GUI* correspondente à Figura B.6b para seleção da porção da imagem de saída que será processada, onde, por intermédio

do botão **Image** será aberta uma interface para seleção do retângulo envolvente que conterá a porção da imagem de interesse;

k) **Output File to**: botão tipo exclusivo com duas opções:

- **Disk**: opção de processamento para arquivo, onde o nome do arquivo de saída, armazenado no mesmo diretório de entrada, será composto pelo nome do arquivo de entrada mais um sufixo de acordo com a ferramenta em uso, com a extensão *.img*. No caso em que o número de bandas seja maior que um, além dos arquivos individuais de cada componente, será criado o respectivo arquivo no formato *Meta File* do ENVI, com o mesmo nome do arquivo de saída, com a extensão *.met*;
- **Memory**: opção de processamento para memória.

l) **Ok**: botão para iniciar o processamento das operações indicadas para execução em arquivo ou em memória;

m) **Cancel**: botão para cancelar as operações indicadas para execução em arquivo ou em memória, além de fechar a interface;

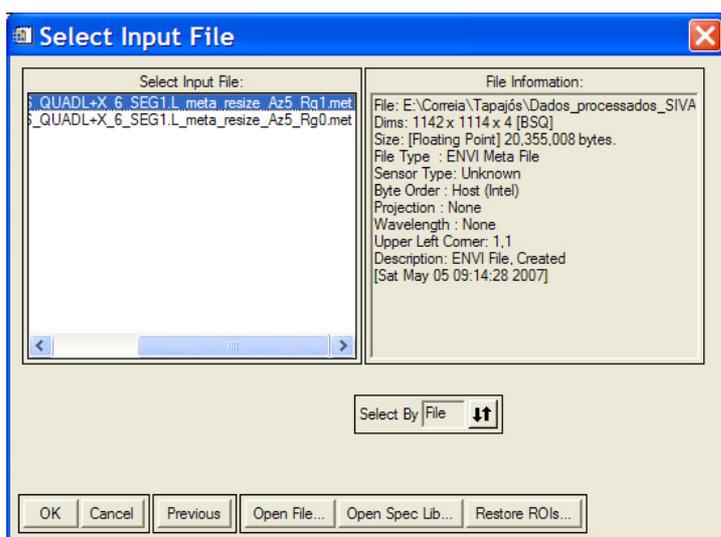
n) **Report**: botão que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.7b para seleção do diretório e do nome do arquivo de saída contendo o relatório dos resultados correspondentes a ferramenta utilizada, como por exemplo, no caso do padrão de correção da antena que apresenta os coeficientes do polinômio de ajuste para cada banda de entrada, além do valor do parâmetro R^2 ajustado da regressão polinomial (arquivo de saída com a extensão *.pac*);

o) **Help**: botão para ativar a visualização do arquivo PDF que contém as instruções para utilização da ferramenta em uso.

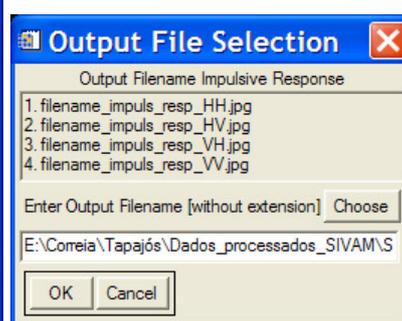
p) **Info**: botão que ativa uma *GUI* contendo as informações da ferramenta computacional em uso (versão, data do desenvolvimento, programador, e-mail de contato, etc.);

Como todas as ferramentas desenvolvidas são baseadas na seleção de uma imagem a ser calibrada ou a ser empregada para análise de dados, são descritas a seguir as interfaces que compõe a entrada de dados no formato do ENVI. No caso de imagens que não estejam no formato do ENVI, o usuário deverá selecionar a subopção **Open External File**, contida na opção principal **File** do ENVI, para abrir a imagem de interesse e, em seguida, salvá-la no formato do ENVI, por intermédio da subopção **Save File As** → **ENVI Standard / ENVI Meta**, contida na opção principal **File** do ENVI.

A seleção das imagens de interesse é baseada na ativação da **GUI** correspondente à Figura B.7a, onde, por meio do botão **Open File**, é ativada a **GUI** correspondente à Figura B.8a para seleção de uma imagem. A imagem selecionada é incluída no lado esquerdo da Figura B.7a, no campo **Select Input File**, ao mesmo tempo em que aparece no lado direito, no campo **File Information**, as informações contidas no arquivo de *header* (no formato do ENVI, com extensão *.hdr) dessa imagem. Em seguida, deve-se clicar sobre a imagem escolhida, no campo **Select Input File**, iluminando-a, e com o botão **OK**, confirmar a sua escolha. Este procedimento deve ser repetido para todas as imagens de entrada, de modo que a quantidade e o tipo de imagens dependerão da ferramenta computacional selecionada.



(a)



(b)

Figura B.7 – Interfaces para (a) seleção da imagem de entrada e (b) exportação dos gráficos ou relatórios disponíveis.

Caso uma imagem selecionada não possua o arquivo com extensão **.hdr*, ou não seja de nenhum formato suportado pelo ENVI, será ativada a *GUI* correspondente à Figura B.8b, para que o usuário entre com os dados da imagem (linha, coluna, tipo de dado, etc.) e, com isso, o seu respectivo arquivo **.hdr* possa ser criado, permitindo assim, que a imagem de entrada possa ser visualizada no ENVI.

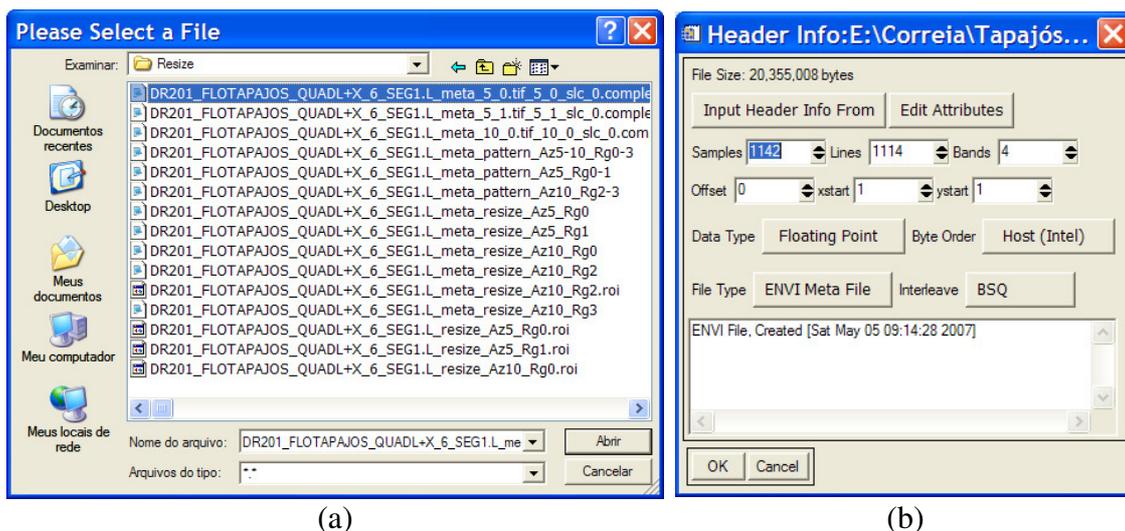


Figura B.8 – Interfaces para (a) seleção do arquivo de entrada e (b) criação do *header* da imagem, quando necessário.

Além da seleção da imagem de entrada, várias ferramentas implementadas dependem da seleção do arquivo de *ROI*, que deve ser criado antes da execução de cada uma das opções implementadas, através da subopção *Region Of Interest* → *ROI Tool* pertencente à opção principal *Basic Tools* do ENVI.

B.3 Ferramentas de calibração de amplitude

B.3.1 Correção do padrão da antena

De acordo com a teoria descrita na Seção 3.5.1, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para correção do padrão de irradiação da antena SAR, com base na seleção de regiões de interesse que representam alvos homogêneos existentes nas imagens SAR. O desenvolvimento da ferramenta em questão foi motivado pelos seguintes fatores:

- a) Incerteza no conhecimento teórico do padrão de irradiação das antenas do sensor SAR R99B, o que inviabiliza a correção das respectivas imagens PolSAR;
- b) Ausência no aplicativo ENVI de uma ferramenta que realize, adequadamente, a correção do padrão da antena, que é processada no aplicativo em questão, computando-se o fator de correção para cada posição radial (variação do ângulo de incidência), com base na amplitude média ao longo da direção azimutal, independente da existência de alvos homogêneos;
- c) Restrição de acesso ao aplicativo SARCON/ESA (não distribuído), que possui a correção do padrão da antena com base em alvos homogêneos.

Na Figura B.9a é apresentada a interface principal da ferramenta de correção do padrão da antena SAR, que é ativada por intermédio da subopção ***Polarimetric Tools*** → ***Calibration*** → ***Antenna Pattern***, contida na opção principal ***File*** do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

- a) ***Amplitude Data***: botão tipo exclusivo para seleção da imagem em amplitude a ser utilizada na estimação da correção do padrão da antena, composta por duas opções:
 - ***Generic Image***: opção que ativa os botões ***Select Image File*** e ***Select ROI File*** (Figura B.9a) para seleção de uma imagem de qualquer formato suportado pelo ENVI e o respectivo arquivo de ***ROI*** contendo amostras de interesse, que caracterizem a variação da amplitude de um alvo homogêneo distribuído, preferencialmente, ao longo de toda a direção radial de imageamento;
 - ***SPSAR Blocks***: opção que permite a seleção de um arquivo do tipo ***Meta File***, que é composto por imagens e respectivos arquivos de ***ROI***, correspondentes a vários blocos processados pelo aplicativo ***SPSAR***. Para criar esse tipo de arquivo, deve-se acionar o botão ***Create Meta Blocks*** (Figura B.9b) que ativa a ***GUI*** correspondente à Figura B.9c, onde, por

intermédio dos botões *Select Block #* e *Select ROI #* podem ser selecionados, respectivamente, as imagens e os arquivos de *ROI* que farão parte do *Meta Blocks File*. Uma vez criado o *Meta Blocks File* basta acionar o botão *Select Meta Blocks* para ativar a *GUI* correspondente à Figura B.9a para selecionar o respectivo arquivo.



Figura B.9 – Interfaces para correção do padrão da antena: (a) principal, (b) seleção do arquivo *Meta Blocks*, (c) criação do arquivo *Meta Blocks*, e (d) seleção dos blocos de saída.

- b) *Select Band*: botões tipo não-exclusivos para mostrar na janela *Antenna Pattern Display* o padrão de correção da antena correspondente à banda/componente polarimétrica selecionada;

- c) **Plot**: botão tipo lista para selecionar o tipo de dado que será desenhado na janela *Antenna Pattern Display*, que pode ser o padrão de correção estimado (*Average*), o padrão de correção ajustado (*Fit*), ou ambos (*Average+Fit*);
- d) **Range Direction**: botão tipo exclusivo para selecionar a direção radial de imageamento, que pode ser na direção das colunas (*Samples*) ou linhas (*Lines*) da imagem de entrada;
- e) **Polynomial Fit Order**: botão tipo lista para selecionar o grau da função polinomial que será ajustado para cada banda/componente polarimétrica, por meio da técnica de mínimos quadrados, ao padrão de correção da antena estimado com base nas amostras de entrada;
- f) **Correction Method**: botão tipo exclusivo para selecionar o método de correção do padrão da antena que será aplicado à imagem de entrada, que pode ser o multiplicativo (*Multiplicative*) ou aditivo (*Additive*);
- g) **R² Adjusted**: lista contendo os valores do parâmetro R² ajustado da regressão polinomial de cada banda/componente polarimétrica;
- h) **Apply Correction**: botão tipo exclusivo para seleção do arquivo no qual será aplicado a correção do padrão da antena ajustado pela função polinomial, contendo, além das opções *Input File* e *New File*, as seguintes opções (Figura B.9d):
- **New Block**: opção somente disponível quando o botão *SPSAR Blocks* tenha sido acionado (Figura B.9d), que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.9a para seleção de um bloco *SPSAR*, diferente dos dados de entrada, que será corrigido pelo padrão de correção da antena estimado. O programa testará, antes de iniciar o processo de correção, se a posição radial do bloco a ser corrigido encontra-se dentro do intervalo radial dos dados de entrada;

- **Directory**: opção somente disponível quando o botão **SPSAR Blocks** tenha sido acionado (Figura B.9d), que permite a correção do padrão da antena de todas as componentes polarimétricas correspondentes aos blocos armazenados em um determinado diretório. Antes do início do processo de correção, o programa irá testar se os blocos disponíveis no diretório selecionado estão compreendidos no intervalo radial estimado, e se as respectivas componentes polarimétricas, que devem estar em arquivos separados, correspondem às componentes de entrada.
- i) **Output File to**: para as opções **Disk** e **Memory**, os nomes dos arquivos de saída conterão o sufixo “.antenna_corr.img” e o prefixo “Antenna_corr”, respectivamente.

B.3.2 Calibração absoluta

De acordo com a teoria descrita na Seção 3.2, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para calibração absoluta de imagens SAR, com base no valor da seção cruzada de alvos pontuais de referência disponíveis na região imageada. O desenvolvimento da ferramenta em questão foi motivado pelas seguintes limitações do aplicativo ENVI para se obter o coeficiente de retroespalhamento de imagens SAR:

- a) Permite apenas o processamento para imagens oriundas dos sensores SAR a bordo dos satélites ERS, RADARSAT e ALOS-PALSAR;
- b) Não permite a utilização de alvos pontuais de referência disponíveis na região imageada para execução da calibração absoluta, que é obtida no aplicativo em questão, empregando-se uma função polinomial de calibração, fornecida pelo fabricante do sensor SAR, que relaciona o nível de cinza da imagem com o respectivo coeficiente de retroespalhamento.

Na Figura B.10a é apresentada a interface principal da ferramenta de calibração absoluta desenvolvida, que é ativada por intermédio da subopção **Polarimetric Tools** →

Calibration → *Absolute*, contida na opção principal *File* do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

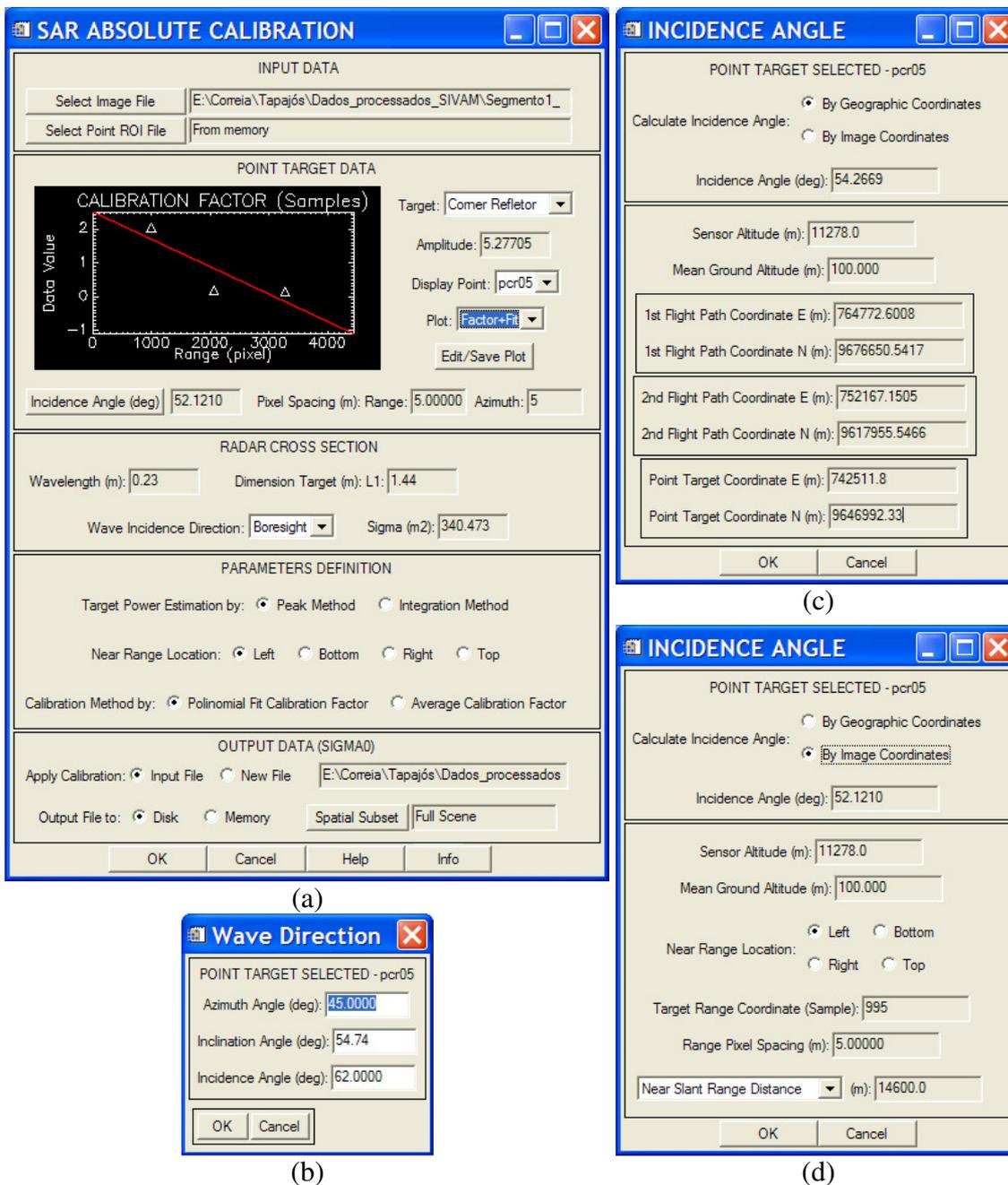


Figura B.10 – Interfaces para calibração absoluta: (a) principal, (b) entrada dos ângulos de orientação do alvo pontual em relação à onda incidente, cálculo do ângulo de incidência para os alvos pontuais com base em (c) coordenadas geográficas conhecidas ou (d) coordenadas de imagem.

- a) **Target**: botão tipo lista para seleção do tipo de alvo pontual de referência para cada ponto contido no arquivo de *ROI* selecionado, onde cada ponto pode ser representado por um alvo diferente (*Corner reflector*, *Dihedral reflector*, *Arbitrary Dihedral*);
- b) **Amplitude**: campo texto não-editável que apresenta o valor da amplitude do ponto selecionado;
- c) **Display Point**: botão tipo lista somente disponível para seleção do ponto de interesse, quando dois ou mais pontos forem selecionados pelo usuário na seleção do arquivo de *ROI*;
- d) **Incidence Angle (deg)**: botão que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.10c para calcular o ângulo de incidência no ponto selecionado, contendo as seguintes opções:
- **By Geographic Coordinates**: botão que ativa os campos da Figura B.10c para entrada das coordenadas planas *UTM* da trajetória do sensor (*1st* e *2nd Flight Path Coordinate*) e do alvo pontual (*Point Target Coordinate*);
 - **By Image Coordinates**: botão que ativa os campos da Figura B.10d para entrada da posição radial do alvo pontual (*Target Range Coordinate*), que depende das coordenadas de imagem do pico de amplitude do alvo pontual e da posição do *Near Range* (*Near Range Location*), em relação à imagem de entrada; além disso, deve-se entrar com o valor da distância do *Near Range* (*Near Slant* ou *Ground Range Distance*) em relação ao sensor e o espaçamento entre os *pixels* na direção radial (*Range Pixel Spacing*);
 - **Sensor Altitude (m)**: campo texto editável para entrada da altitude do sensor SAR;
 - **Mean Ground Altitude (m)**: campo texto editável para entrada da altitude média do terreno.

- e) ***Pixel Spacing (m)***: campo texto editável para entrada do espaçamento entre os *pixels* na direção azimutal e radial, que é transportado para o cálculo do ângulo de incidência;
- f) ***Wavelength (m)***: campo texto editável para entrada do comprimento de onda;
- g) ***Dimension Target (m)***: campo texto editável para entrada das dimensões do alvo pontual, que poderá ter uma ou duas dimensões;
- h) ***Wave Incidence Direction***: botão tipo lista para definição da orientação do alvo pontual em relação à onda incidente (Seção 2.4.2), onde, a seleção da direção ***Arbitrary*** ativa a *GUI* da Figura B.10b para entrada dos ângulos de orientação;
- i) ***Sigma (m2)***: campo texto não-editável para visualização do valor da seção cruzada radar, que é calculado pelo programa;
- j) ***Target Power Estimation***: botão tipo exclusivo para seleção do método de estimação da amplitude do alvo pontual, que pode ser pelo pico de potência (***Peak Method***) ou pela potência integrada (***Integration Method***);
- k) ***Calibration Method by***: botão tipo exclusivo, ativado apenas quando dois ou mais alvos pontuais estiverem disponíveis, para seleção do método de calibração absoluta que será aplicada a imagem de saída selecionada, que pode ser pelo fator de calibração ajustado (***Polynomial Fit Calibration Factor***) ou pelo fator médio de calibração (***Average Calibration Factor***);
- l) ***Output File to***: para as opções ***Disk*** e ***Memory***, os nomes dos arquivos de saída conterão o sufixo “.*sigma0.img*” e o prefixo “*Sigma0*”, respectivamente.

B.3.3 Calibração da rotação de Faraday

Com base na teoria descrita na Seção 3.5.2 e motivado pela inexistência no aplicativo ENVI e nos demais aplicativos pesquisados, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para calibração da rotação de *Faraday*. É importante destacar que, a

imagem PolSAR SLC de entrada deve conter as quatro componentes polarimétricas e estar isenta de quaisquer outras distorções, de modo que, o resultado de saída será uma imagem PolSAR SLC simetrizada e corrigida da rotação de *Faraday*.

Na Figura B.11 é apresentada a interface da ferramenta de calibração de imagens PolSAR SLC devido à rotação de *Faraday*, que é ativada por intermédio da subopção ***Polarimetric Tools*** → ***Calibration*** → ***Faraday Rotation***, contida na opção principal ***File*** do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

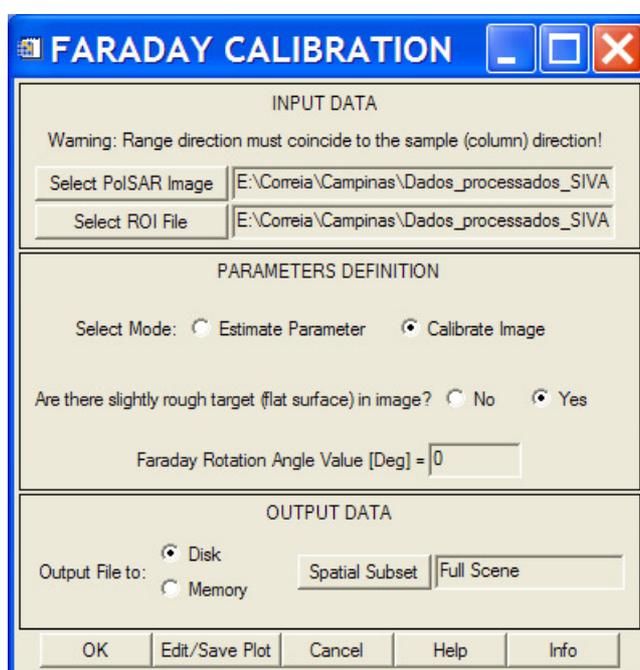


Figura B.11 – Interface para calibração da rotação de *Faraday*.

- a) ***Select Mode***: botão tipo exclusivo para seleção da opção de processamento, que pode ser apenas a estimação do ângulo (***Estimate Parameter***) ou a calibração da imagem SLC de entrada (***Calibrate Image***) devido à rotação de *Faraday*;
- b) ***Are there slightly rough target (flat surface) in image?***: botão tipo exclusivo para ativar (***Yes***) ou desativar (***No***) a opção de seleção das amostras de interesse (***Select ROI File***) de alvos existentes na imagem, que possam ser considerados planos e com rugosidade extremamente suave (ex: corpos d'água e superfície

bem suaves em baixas frequências), com vistas ao teste do erro de estimação do ângulo devido a rotação de *Faraday*;

- c) ***Faraday Rotation Angle Value [Deg]***: campo texto não-editável ou editável para, respectivamente, apresentação do valor do ângulo devido à rotação de *Faraday* estimado, quando a opção ***Estimate Parameter*** for acionada, ou para inserção, pelo usuário, do ângulo em questão que será aplicado na correção da imagem de entrada, quando a opção ***Calibrate Image*** for acionada;
- d) ***Output File to:*** para as opções ***Disk*** e ***Memory***, os nomes dos arquivos de saída conterão o sufixo “.faraday_corr.img” e o prefixo “Faraday_corr”, respectivamente.
- e) ***Edit/Save Plot:*** opção que permite a visualização e edição do histograma do ângulo devido à rotação de *Faraday*, estimado para toda a imagem PolSAR.

B.3.4 Calibração da orientação de polarização

Com base na teoria descrita na Seção 3.5.3.2 e motivado pela inexistência no aplicativo ENVI e nos demais aplicativos pesquisados, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para calibração da orientação de polarização induzida pela declividade do terreno. É importante destacar que, a imagem PolSAR SLC de entrada deve conter as três componentes polarimétricas simetrizadas e estar isenta de quaisquer outras distorções, de modo que, o resultado de saída será uma imagem PolSAR SLC corrigida da rotação da orientação de polarização devido a declividade do terreno.

Na Figura B.12 é apresentada a interface da ferramenta de calibração de imagens PolSAR SLC devido à rotação da orientação de polarização, que é ativada por intermédio da subopção ***Polarimetric Tools*** → ***Calibration*** → ***Orientation Angle***, contida na opção principal ***File*** do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

- a) ***Select Image Mask:*** botão para seleção de arquivo correspondente à uma máscara binária para a imagem de entrada, contendo valores iguais a 1 e 0, que indicam, respectivamente, os *pixels* da imagem PolSAR que devem e não devem

ser corrigidos da rotação do ângulo de orientação de polarização. Esta opção é importante para garantir apenas a correção do retorno de alvos mais sensíveis à declividade, dependendo da frequência do radar. A máscara de entrada pode ser obtida por diferentes técnicas (classificação digital, segmentação, definição de *ROI*, etc.), sendo que o aplicativo ENVI dispõe de uma ferramenta para geração de máscaras, por intermédio da subopção **Basic Tools** → **Masking** → **Build Mask**, contida na opção principal **File**;

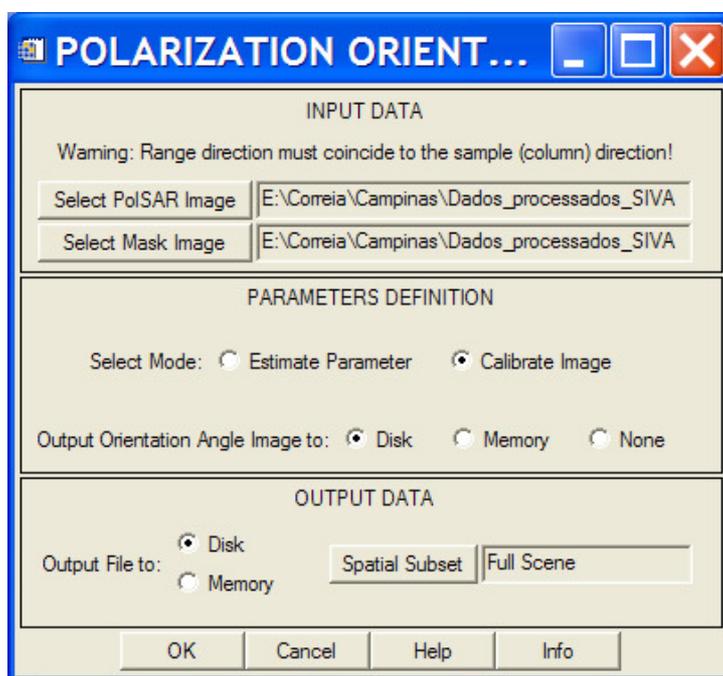


Figura B.12 – Interface para calibração da orientação de polarização.

- b) **Select Mode**: botão tipo exclusivo para seleção da opção de processamento, que pode ser apenas a obtenção da imagem correspondente à rotação do ângulo de orientação de polarização (**Estimate Parameter**) ou a calibração da imagem SLC de entrada (**Calibrate Image**) devido à rotação em questão;
- c) **Output Orientation Angle Image to**: botão tipo exclusivo para salvar a imagem correspondente à rotação da orientação de polarização devido a declividade do terreno, onde, para as opções **Disk** e **Memory**, os nomes dos arquivos de saída

conterão o sufixo “.orien_angle.img” e o prefixo “*Orien_angle*”, respectivamente;

- d) **Output File to:** para as opções *Disk* e *Memory*, os nomes dos arquivos de saída conterão o sufixo “.orien_corr.img” e o prefixo “*Orien_corr*”, respectivamente.

B.4 Ferramenta de calibração polarimétrica

De acordo com a teoria descrita na Seção 3.4, foi desenvolvida uma ferramenta computacional, que foi o ponto central desta fase do trabalho, para calibração polarimétrica de dados SLC oriundos de qualquer sistema PolSAR. O desenvolvimento da ferramenta em questão foi motivado pelos seguintes fatores:

- a) Ausência no aplicativo ENVI de uma ferramenta que execute a calibração polarimétrica, o que é indispensável no processo de calibração de dados PolSAR;
- b) Limitações funcionais do aplicativo RAT, que possui uma ferramenta de calibração polarimétrica baseada apenas no método de Quegan (1994), além de não dispor de funcionalidades de visualização gráfica de resultados, geração de relatórios e flexibilidade de execução de diferentes modos de calibração;
- c) Integração do método de Quegan (1994) à um ambiente de interfaces gráficas com várias funcionalidades, agregando-se os respectivos aperfeiçoamentos propostos por Kimura (2004) e pequenas melhorias metodológicas, que permitem a realização de diferentes modos de calibração, adaptados aos dados de entrada e as necessidades do usuário.

Na Figura B.13 é apresentada a interface principal da ferramenta de calibração polarimétrica de dados PolSAR SLC, que é ativada por intermédio da subopção ***Polarimetric Tools*** → ***Calibration*** → ***Polarimetric***, contida na opção principal ***File*** do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são descritas a seguir.

É importante destacar que, para a estimação adequada dos parâmetros de calibração polarimétrica, a direção radial de aquisição dos dados SAR deve coincidir com a direção das colunas da imagem SLC de entrada, conforme o aviso (*Warning*) existente na parte superior da *GUI* correspondente à Figura B.13.

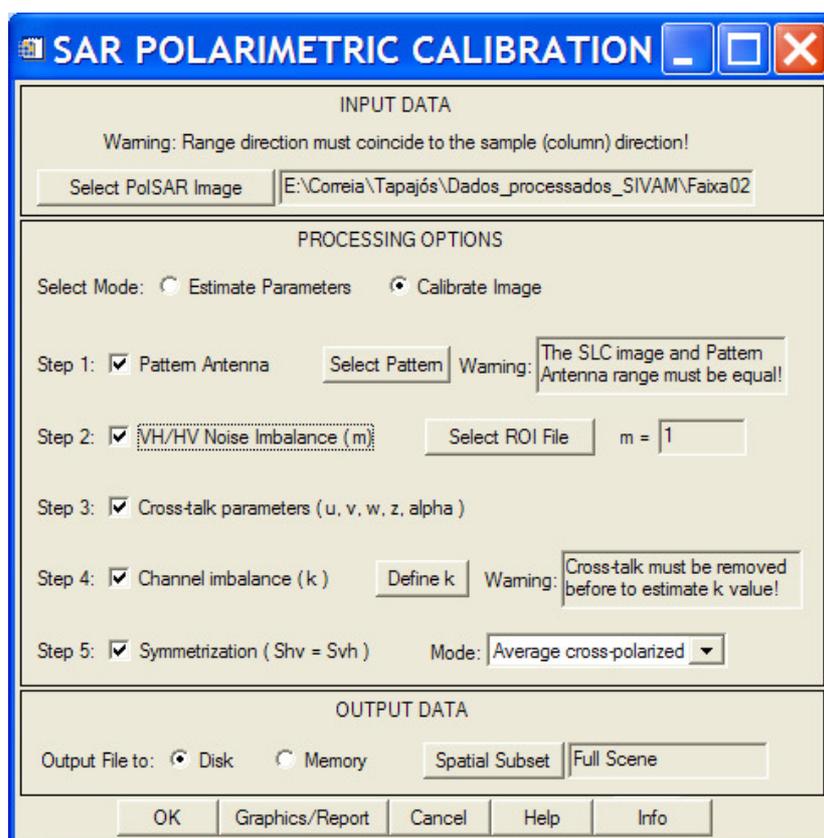


Figura B.13 – Interface para definição das fases da calibração polarimétrica e simetrização que serão aplicadas aos dados PolSAR.

- a) **Select Mode**: botão tipo exclusivo para seleção da opção de processamento, que pode ser apenas a estimação dos parâmetros de calibração polarimétricos selecionados (**Estimate Parameters**) ou a calibração da imagem SLC de entrada, por intermédio dos parâmetros estimados (**Calibrate Image**). A opção **Estimate Parameters** permite ao usuário a análise dos gráficos, sem a necessidade de calibração da imagem, além da vantagem de poder mudar o fator de calibração do *channel imbalance* e aplicar depois da calibração, com os parâmetros já

calculados. Além disso, se existem alvos de referência na imagem, é interessante utilizar a opção *Estimate Parameters*, e verificar a resposta polarimétrica antes da calibração, alterando-se o fator do *channel imbalance*.

- b) **Step 1: Antenna Pattern**: botão tipo não-exclusivo que habilita o botão *Select Pattern*, que permite a seleção de um arquivo no formato **.pac*, que contém os coeficientes do polinômio referente ao padrão de correção da antena estimado previamente (Seção B.3.1), para correção da imagem SLC de entrada que ainda não tenha sido corrigido por esse padrão. É importante destacar que, o programa apresenta um aviso (*Warning*) para o usuário que, o padrão de entrada deve ter sido estimado sobre a mesma faixa radial de ângulos de visada da imagem de entrada;
- c) **Step 2: VH/HV Noise Imbalance (m)**: botão tipo não-exclusivo que habilita o botão *Select ROI File*, que permite a seleção de um arquivo no formato **.roi*, que contém regiões de interesse extraídas de um mesmo alvo homogêneo com baixo retroespalhamento, para estimação do parâmetro m (Seção 3.4.2). Além disso, o usuário tem a opção de entrar com o valor do parâmetro m , por intermédio de um campo texto editável ($m =$), com a vantagem que, esse parâmetro pode ter sido estimado em outra imagem, caso não existam, na imagem de entrada, alvos com as mesmas características mencionadas anteriormente;
- d) **Step 3: Cross-talk parameters (u, v, w, z, alpha)**: botão tipo não-exclusivo para estimação dos parâmetros do *cross-talk* descritos na Seção 3.4.1. Deve-se destacar que, a ativação das opções **Step 2** ou **Step 5** (subopção *Least Square Solution*), sempre que a opção *Calibrate Image* estiver selecionada, implicará na ativação automática e bloqueio da seleção do **Step 3**, pois a utilização do parâmetro m e a simetriação por mínimos quadrados somente têm significado quando conjugados com a estimação dos parâmetros do *cross-talk* (Seção 3.4.1);
- e) **Step 4: Channel Imbalance (k)**: botão tipo não-exclusivo que habilita o botão *Define k*, que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.14a para definição do

parâmetro do *channel imbalance* de recepção (Seção 3.4.1). É importante destacar que, sempre que o usuário selecione a opção **Step 4** e não a opção **Step 3**, o programa apresenta um aviso (*Warning*) que, a imagem de entrada já deve ter sido corrigido do *cross-talk*. As opções disponíveis para definição do *channel imbalance*, que serão apresentados na janela *INPUT DATA* da Figura B.14, são ativadas pelos seguintes botões tipo exclusivos:

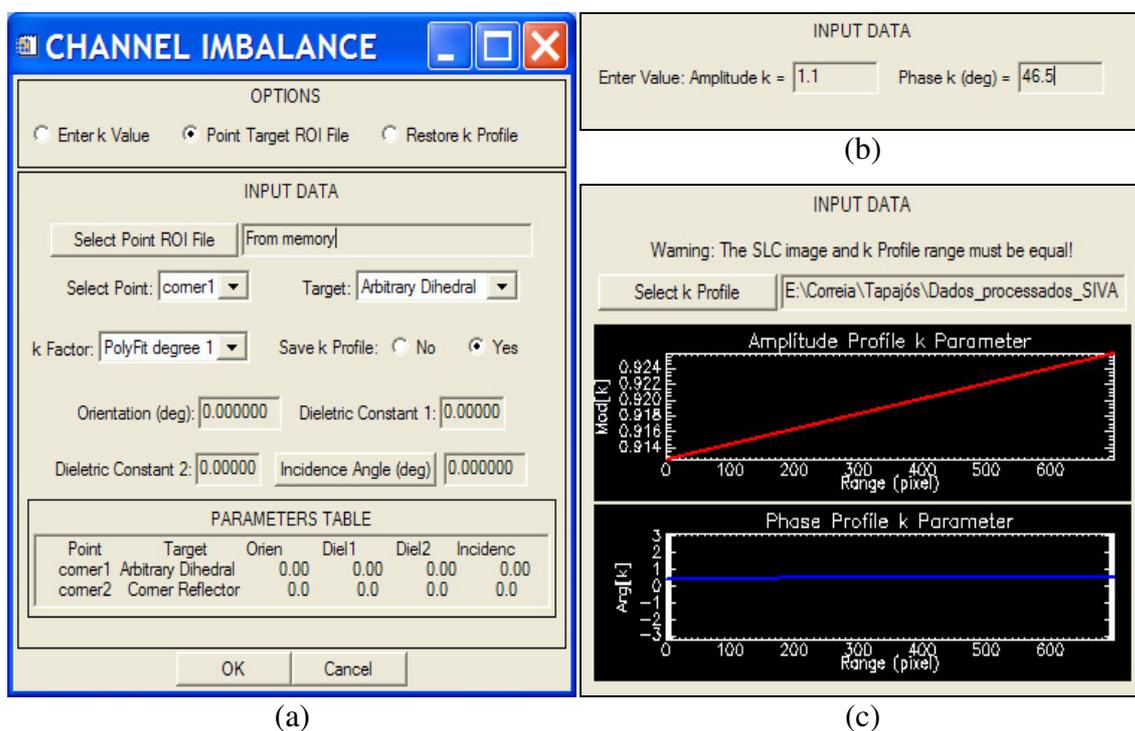


Figura B.14 – Interface para definição do *channel imbalance* com 3 opções: (a) seleção de um arquivo de ROI contendo alvos pontuais (**Point Target ROI File**), (b) inserção de um valor conhecido (**Enter k Value**), e (c) restauração de um arquivo contendo valores do parâmetro *k* estimados na direção radial (**Restore k Profile**).

- **Enter k Value**: opção que ativa os campos texto editáveis **Enter Value: Amplitude k** e **Phase k (deg)** (Figura B.14b) para entrada, respectivamente, da amplitude e fase do parâmetro *k*, com a vantagem que, esse parâmetro pode ter sido estimado em outra imagem, caso não existam alvos de referência na imagem de entrada (ex: refletor de canto). Quando a opção

Report for selecionada (Figura B.15), o arquivo gerado conterá o(s) valor(es) estimado(s) do *channel imbalance* para os alvos selecionados pelo arquivo de ROI;

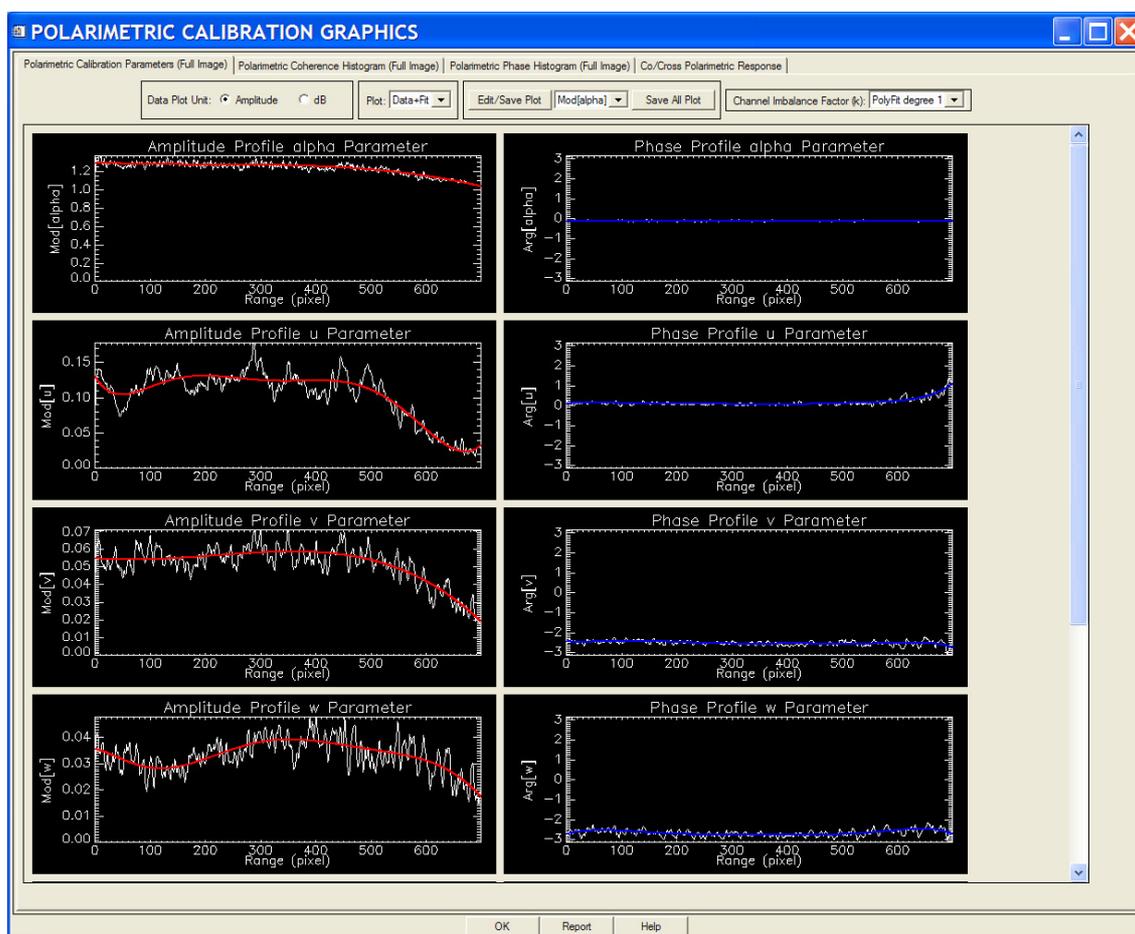


Figura B.15 – Interface para visualização dos gráficos dos parâmetros de calibração estimados, histogramas da correlação complexa e resposta polarimétrica de alvo pontuais, antes e depois da calibração.

- **Point Target ROI File**: opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.14a para seleção, por intermédio do botão **Select Point ROI File**, do arquivo *.roi que contém os polígonos envolventes de cada alvo pontual de referência, que devem ser criados conforme descrito na Seção 0 e que são utilizados para estimação do parâmetro k , cujos respectivos nomes estão listados no campo **Select Point**. Cada ponto deve ser associado a um alvo

de referência (opção *Target*), que possui uma matriz de espalhamento conhecida e que é definida por intermédio das opções *Orientation (deg)*, *Dielectric Constant 1 e 2*, e *Incidence Angle* (botão que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.10c), em função do alvo selecionado. A partir da janela *PARAMETERS TABLE*, o usuário tem a possibilidade de verificar se os dados de cada alvo foram informados corretamente. Quando o arquivo de pontos de referência possuir dois ou mais alvos, o programa ativa a opção *k Factor*, que permite ao usuário selecionar o método de estimação do perfil radial do parâmetro *k*, que pode ser pela média ou por ajustamento de mínimos quadrados. Esta segunda opção ativa o botão tipo exclusivo *Save k profile*, que permite ao usuário definir que o perfil radial do parâmetro *k* seja salvo em arquivo, cujo nome de saída é composto pelo nome da imagem de entrada com a extensão **.cip*, com a vantagem deste perfil poder ser aplicado em outra imagem, conforme descrito a seguir;

- *Restore k Profile*: opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.14c para seleção, por intermédio do botão *Select k Profile*, de um arquivo **.cip* que foi estimado em outra imagem que possua a mesma faixa radial de ângulos de visada da imagem de entrada, conforme o aviso apresentado para o usuário (*Warning*). É importante destacar que esta opção e a anterior permitem incorporar ao método de calibração do *channel imbalance*, as variações do parâmetro *k*, tanto em fase quanto em amplitude, ao longo da direção radial. Esse procedimento confere a ferramenta de calibração em questão, uma vantagem em relação ao aplicativo *RAT*, que permite a estimação do parâmetro *k*, e posterior aplicação para toda a imagem, com base em um único ponto de referência, mesmo que outros pontos estejam disponíveis na imagem, e que podem não ser adequados por acarretar em resultados de calibração imprecisos.

- f) *Step 5: Symmetrization (Shv = Svh)*: botão tipo não-exclusivo que habilita o botão tipo lista *Mode*, para definição do tipo de simetriação (*Least Square Solution* e *Average Cross-polarized*) a ser executada, sendo disponível apenas

quando a imagem PolSAR de entrada contiver quatro componentes. A solução ***Least Square Solution*** somente estará disponível quando o ***Step 3*** for selecionado. Caso tenha sido selecionado uma imagem simetrizada (com 3 bandas), automaticamente, o programa interpreta que somente a correção do *channel imbalance* pode ser aplicada;

- g) ***Output File to:*** para as opções ***Disk*** e ***Memory***, os nomes dos arquivos de saída conterão os seguintes sufixos e prefixos, que podem ser agregados, dependendo das opções selecionadas: *cross-talk*: “*xtalk*”; *channel imbalance*: “*imb*”; e *simetrização*: “*symm*”;
- h) ***Graphics/Report:*** botão que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.15 para geração de relatórios (opção ***Report***) e visualização dos seguintes gráficos:
 - ***Polarimetric Calibration Parameters (Full Image):*** contém os parâmetros de calibração estimados (em branco) e ajustados (em vermelho/amplitude e em azul/fase) para a toda a imagem, independente do tamanho (***Spatial Subset***) da imagem de saída, e de acordo com os ***Step*** selecionados pelo usuário na interface da Figura B.13;
 - ***Polarimetric Coherence/Phase histogram (Full Image or Subset Image):*** apresenta os histogramas da correlação complexa (coerência e fase) polarimétrica, em função do tamanho da imagem de saída, antes e depois da execução das fases da calibração polarimétrica selecionadas pelo usuário;
 - ***Co/Cross Polarimetric Response:*** apresenta a resposta e análise polarimétrica de alvos de referência, quando disponíveis na imagem de entrada, antes e depois da calibração polarimétrica, conforme apresentado na Figura B.16.

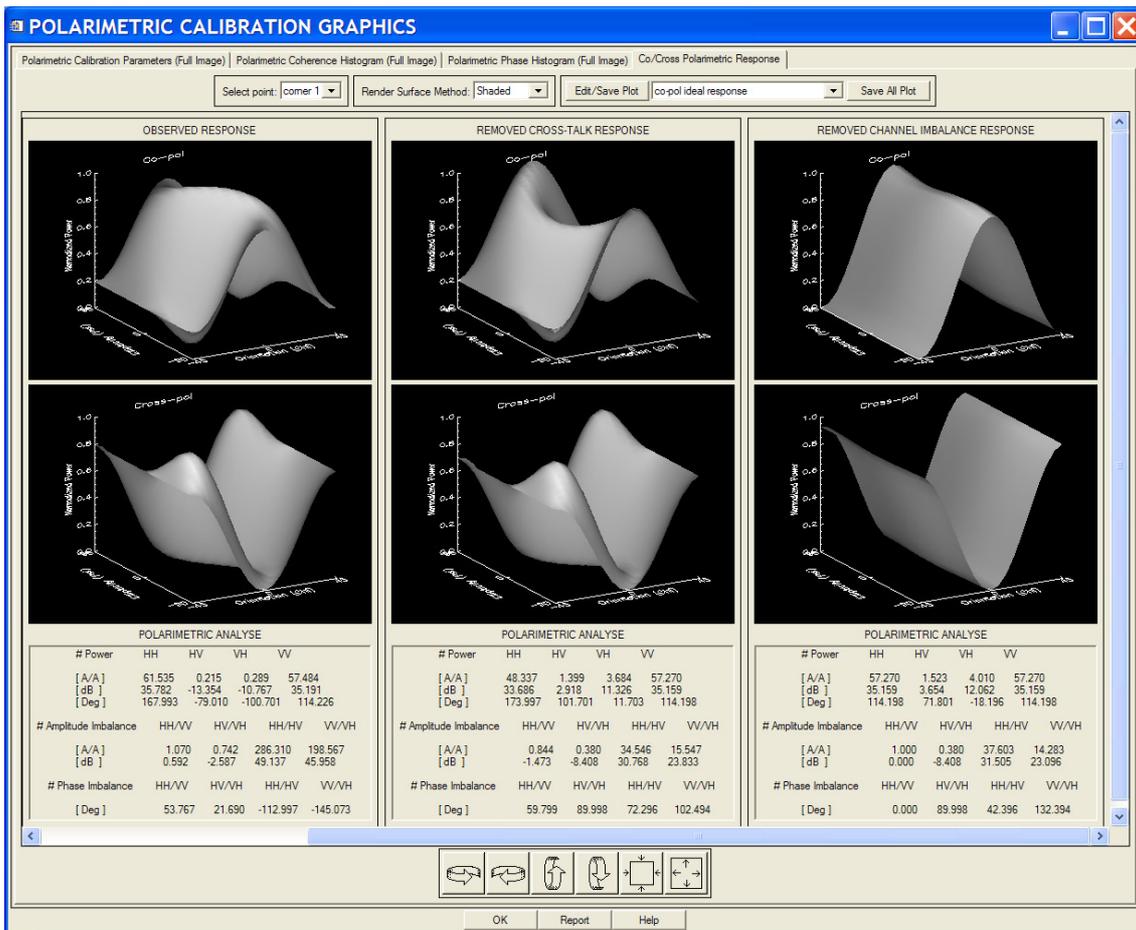


Figura B.16 – Interface para visualização da resposta e análise polarimétrica, antes e depois do processo de calibração, para alvos pontuais de referência existentes nas imagens PolSAR.

B.5 Ferramenta de calibração em lote (Batch)

Com o objetivo de consolidar todos os processos de calibração descritos anteriormente, foi iniciado o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, não disponível nos outros aplicativos pesquisados, que permitirá ao usuário realizar o processamento em lote (*batch*) ou em série dos processos de calibração SAR mais adequados ao conjunto de dados de entrada.

A definição dos processos de calibração em lote a serem aplicados aos dados SAR e auxiliares depende das seguintes variáveis:

- a) Dados do sensor SAR/plataforma;

- b) Dados do meio de propagação;
- c) Topografia da cena imageada;
- d) Existência de alvos conhecidos na cena imageada;
- e) Formato dos dados SAR de entrada (intensidade, PolSAR, SLC, etc.);
- f) Formato dos dados SAR de saída (PolSAR simetrizado, σ^0 , etc.).

A combinação das variáveis supracitadas conduz a diversas possibilidades de processamento em lote que podem ser aplicadas aos dados SAR, e que requerem, por parte do usuário, um conhecimento mais aprofundado na área de calibração SAR, visando à definição dos processos mais adequados. A grande vantagem da ferramenta em questão é que, os processos de calibração mais adequados aos dados SAR são definidos de modo semi-automático, a partir de um conjunto de dados baseados nas aludidas variáveis, e que são previamente fornecidos pelo usuário por intermédio de uma interface gráfica principal descrita a seguir.

Na Figura B.17 é apresentada a interface principal da ferramenta de calibração em lote, que é ativada por intermédio da subopção *Polarimetric Tools* → *Calibration* → *Batch processing*, contida na opção principal *File* do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são as seguintes:

- a) **Type**: botão tipo lista para seleção do formato da imagem de entrada para dados não complexos (*Intensity* ou *Amplitude*);
- b) **Scene Information**: conjunto de quatro opções do tipo botão exclusivo (*No* ou *Yes*) para definição dos dados auxiliares disponíveis para a cena imageada, que permitirão a ativação de um determinado processo de calibração, a saber:
 - *Is one image range darker than other?*: opção que informa ao sistema se existe a necessidade de correção do padrão da antena, em função da variação de brilho existente na direção radial da imagem SAR;

- *Are there data from reference target?*: opção que informa ao sistema se as fases da calibração do *channel imbalance* e absoluta podem ser ativadas, devido a existência de alvos de referência (ex: refletores de canto) na cena imageada;
- *Are there slightly rough target (flat surface)?*: opção que informa ao sistema se a estimação do parâmetro *m* e a validação do ângulo estimado para a rotação de *Faraday* podem ser executadas, devido a existência de alvos distribuídos na cena imageada ligeiramente rugosos e planos;
- *Is a Digital Elevation Model available?*: opção prevista, porém não implementada, para correção do ângulo de incidência que será aplicado na calibração absoluta, com base em um modelo digital de elevação da cena imageada.

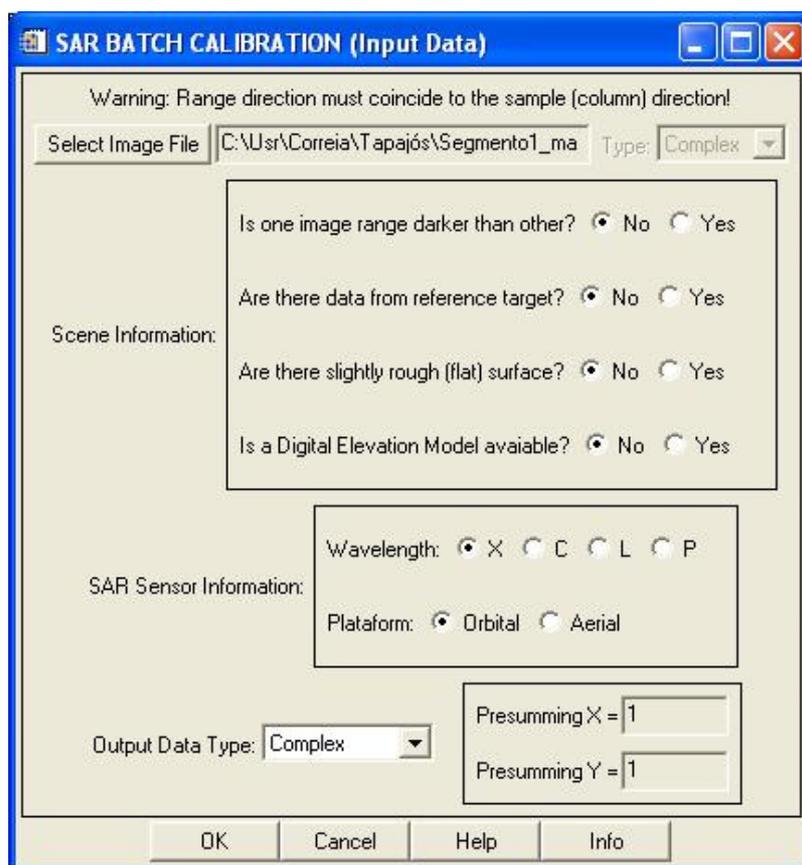


Figura B.17 – Interface principal para entrada dos dados da calibração em lote.

- c) **Sensor Information:** conjunto de duas opções do tipo botão exclusivo para definição do comprimento de onda (*Wavelength*) do sinal emitido pelo radar e do nível de imageamento da plataforma (*Plataform*), que conjugados, informarão ao sistema se a calibração da rotação de *Faraday* deve ser ativada;
- d) **Output Data Type:** botão do tipo lista que permite ao usuário selecionar o formato dos dados SAR de saída (*Amplitude, Intensity, Complex, Sigma Nought, Entropy/Alpha*);
- e) **Presumming X/Y:** campo texto editável que permite ao usuário definir os valores na direção X e Y, que correspondem às dimensões da janela de filtragem *multi-look* dos dados de saída.

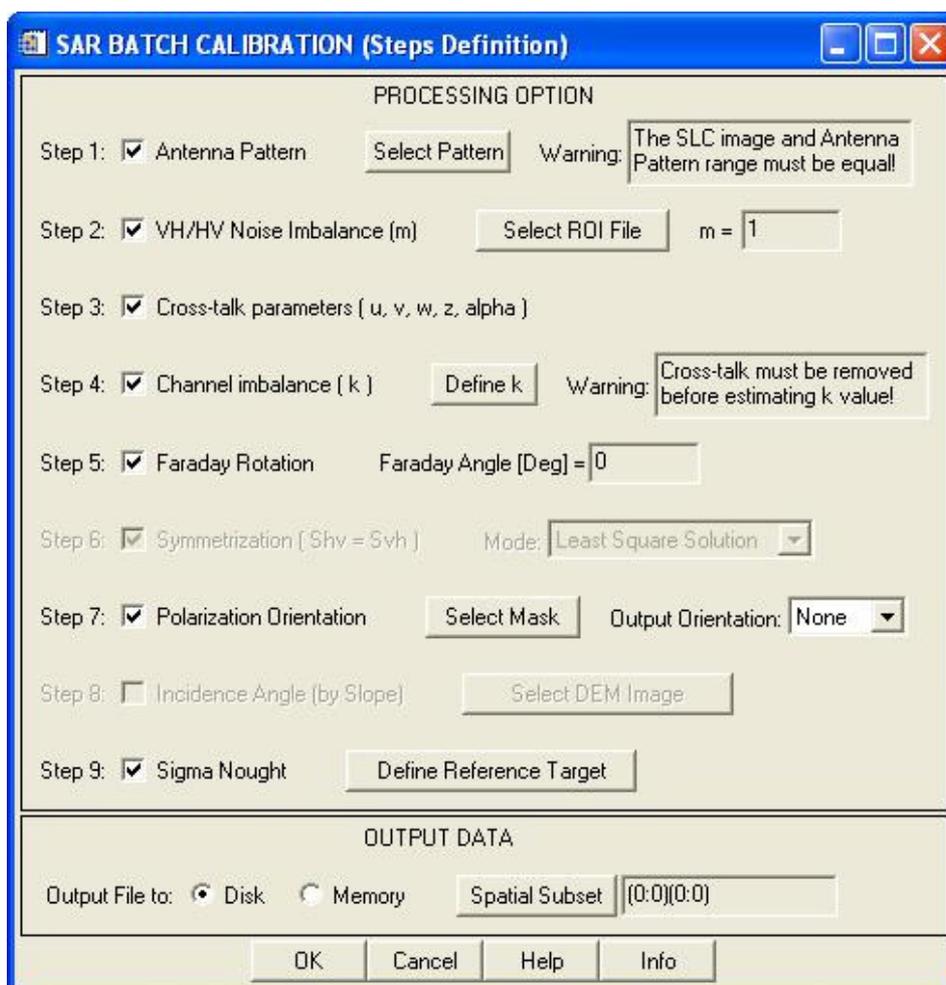


Figura B.18 – Interface para seleção dos métodos de calibração em lote.

Uma vez definidos os dados de entrada, é ativada a *GUI* correspondente à Figura B.18, que apresentará apenas os processos (*Step*) que se aplicam aos dados de entrada informados pelo usuário, com a opção de ativar ou não os processos apresentados. As opções existentes na interface da Figura B.18 são baseadas nas funcionalidades das ferramentas computacionais para calibração SAR descritas anteriormente, sendo que, a única alteração é a opção *Define Reference Target*, que ativará uma interface gráfica que agrega as informações disponíveis na Figura B.14a e Figura B.10, para caracterização dos alvos de referência.

B.6 Ferramentas auxiliares

B.6.1 Processamento de blocos SPSAR

O aplicativo SPSAR (Seção 4.7) foi desenvolvido para realizar o processamento das imagens SAR, provenientes dos dados brutos do sensor SAR R99B, em blocos com tamanho definido pelo usuário, com um controle do máximo tamanho que pode ser processado, devido a limitações de memória do computador. Em consequência, a faixa de imageamento é dividida em quatro blocos de imagens SAR (denominados de blocos SPSAR), ao longo da direção radial (Figura 4.4), o que acarreta a necessidade de realização do mosaico dos blocos em questão, para obtenção de uma única imagem contendo toda a faixa imageada.

Considerando-se a necessidade de repetição de algumas tarefas computacionais para manipulação dos blocos processados, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para executar, principalmente, o mosaico dos blocos em questão, além de outras operações de pós-processamento, tais como, reamostragem de imagens, geração de arquivos no formato *Meta File* do ENVI, rotação e conversão para amplitude.

Na Figura B.19a é apresentada a interface da ferramenta de processamento de blocos SPSAR SLC, que é ativada por intermédio da subopção *Polarimetric Tools* → *SPSAR Blocks Pos-Processing*, contida na opção principal *File* do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

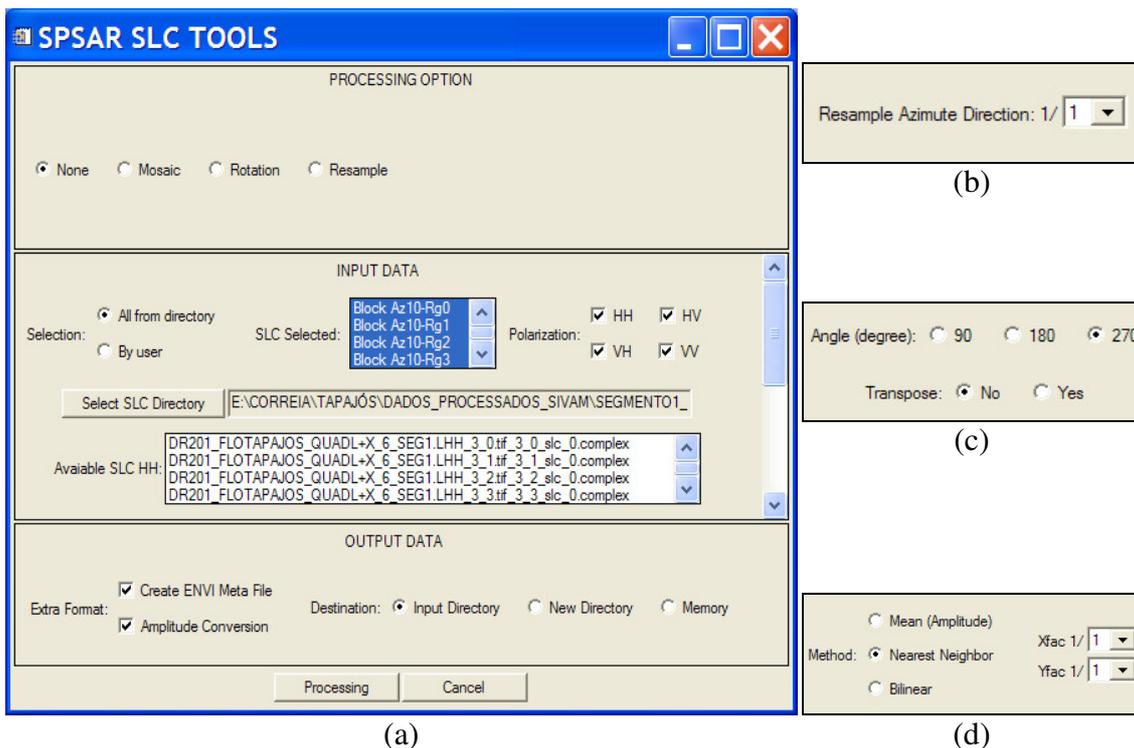


Figura B.19 – Interfaces para pós-processamento dos blocos SPSAR: (a) principal, (b) seleção do fator de reamostragem azimutal do mosaico, (c) seleção dos parâmetros de rotação da imagem, e (d) seleção do método e fator de reamostragem da imagem nas direções X e Y.

- a) **Processing Options:** botão tipo exclusivo para seleção do tipo de processamento que será aplicado aos blocos SPSAR selecionados, composta por quatro opções:
- **None:** opção que permite ao usuário obter as imagens em amplitude (**Amplitude Conversion**) dos blocos SLC de entrada, e/ou os arquivos **Meta File (Create ENVI Meta File)** contendo as componentes polarimétricas de cada bloco selecionado;
 - **Mosaic:** botão que ativa a opção **Resample Azimute Direction** (Figura B.19b) para que o usuário selecione o fator de reamostragem a ser aplicado na direção azimutal dos blocos SPSAR que comporão o mosaico de saída;

- **Rotation**: botão que ativa as opções *Angle (degree)* e *Transpose* (Figura B.19c) para que o usuário selecione os parâmetros de rotação que serão aplicados nos blocos SPSAR selecionados;
 - **Resample**: botão que ativa as opções *Method* e *Xfac/Yfac* (Figura B.19d) para que o usuário selecione o método e os fatores de reamostragem nas direções X e Y que serão aplicados nos blocos SPSAR selecionados.
- b) **Selection**: opção composta por dois botões tipo exclusivos: *All from directory*, que indica para o sistema, bloqueando o acesso a opção *SLC Selected*, que todos os blocos SPSAR armazenados no diretório de entrada (*Select SLC Directory*) serão utilizados no pós-processamento selecionado pelo usuário; e *By user*, que permite ao usuário selecionar na opção *SLC Selected* quais os blocos que serão processados;
- c) **SLC Selected**: opção do tipo lista, que permite ao usuário selecionar, quando a opção *By user* estiver ativa, os blocos SPSAR que serão processados;
- d) **Polarization**: botões tipo não-exclusivos para seleção das componentes polarimétricas, correspondentes aos blocos SPSAR selecionados, que serão processadas;
- e) **Select SLC Directory**: botão para seleção do diretório que contém os blocos SPSAR a serem processados, de modo que, após a seleção do diretório, o sistema identifica pela nomenclatura definida pelo aplicativo SPSAR, quais são os blocos SLC que estão contidos naquele diretório, e apresenta a respectiva lista na opção *SLC Selected*, e o respectivo nome do arquivo na opção *Available SLC HH, HV, VH e VV*. É importante que no diretório selecionado existam apenas blocos SPSAR SLC, de modo a evitar erros de identificação dos blocos;
- f) **Extra Format**: opção composta pelos botões não-exclusivos *Amplitude Conversion* e *Create ENVI Meta File*, que devem ser ativados, pelo menos um deles, quando a opção *None* estiver ativa, ou, podem ser ativados para qualquer

outra opção de pós-processamento, onde, a ativação da opção *Amplitude Conversion* indica para o sistema que a imagem de saída será no formato em amplitude, ao invés do formato SLC, além da geração do arquivo *Meta File*, quando ativado;

B.6.2 Análise de alvos pontuais e distribuídos

Com base na teoria descrita na Seção 2.4 foram desenvolvidas duas ferramentas computacionais para análise da informação polarimétrica de alvos pontuais e distribuídos, com as seguintes funcionalidades:

- a) **Alvos pontuais:** tem por finalidade a caracterização da informação polarimétrica de espalhadores do tipo *odd-bounce*, representados pelos refletores de canto triédricos, e *double-bounce*, representados pelo alvos diédricos (refletores de canto, arbitrários e desconhecidos), por intermédio da apresentação de relatórios da informação polarimétrica e visualização dos seguintes gráficos: amplitude da resposta impulsiva das componentes PolSAR, visualização do perfil radial e azimutal da amplitude e fase da resposta impulsiva, no ponto de máximo de uma das componentes PolSAR, e resposta polarimétrica observada e ideal, quando conhecida, do alvo de interesse; e
- b) **Alvos distribuídos:** tem por finalidade a caracterização da informação polarimétrica média de um conjunto de espalhadores distribuídos espacialmente na imagem SAR, por intermédio da apresentação de relatórios da informação polarimétrica e visualização dos seguintes gráficos: amplitude da resposta impulsiva das componentes PolSAR e resposta polarimétrica observada do alvo de interesse.

O desenvolvimento da ferramenta em questão foi motivado pelos seguintes fatores:

- a) Limitação da ferramenta de análise da resposta polarimétrica disponível no aplicativo ENVI, que permita, apenas, a utilização de dados PolSAR oriundos de imagens dos sensores AIRSAR e SIR-C; e

b) Necessidade de aperfeiçoar a ferramenta de análise de alvos disponível no aplicativo RAT, principalmente na interatividade de manipulação e visualização dos gráficos, seleção de diferentes alvos pontuais, onde apenas refletores de canto triédricos podem ser selecionados, geração de relatórios técnicos, edição e opção de exportação de gráficos, e restauração de respostas polarimétricas por intermédio de arquivos do tipo *ROI*; além disso, o aplicativo RAT não dispõe de uma ferramenta de análise de alvos distribuídos.

Na Figura B.20 é apresentada a interface para análise de alvos pontuais, que é ativada por intermédio da subopção *Polarimetric Tools* → *Inspect Target* → *Point*, contida na opção principal *File* do ENVI. Por intermédio da mesma subopção, pode-se ativar a interface para análise de alvos distribuídos (*Inspect Target* → *Distributed*), que é semelhante a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, cujas funcionalidades comuns as duas ferramentas de análise de alvos estão sublinhadas a seguir:

a) *Input/Polarimetric Analysis*: opção que ativa *GUI* correspondente à Figura B.20, contendo as seguintes opções:

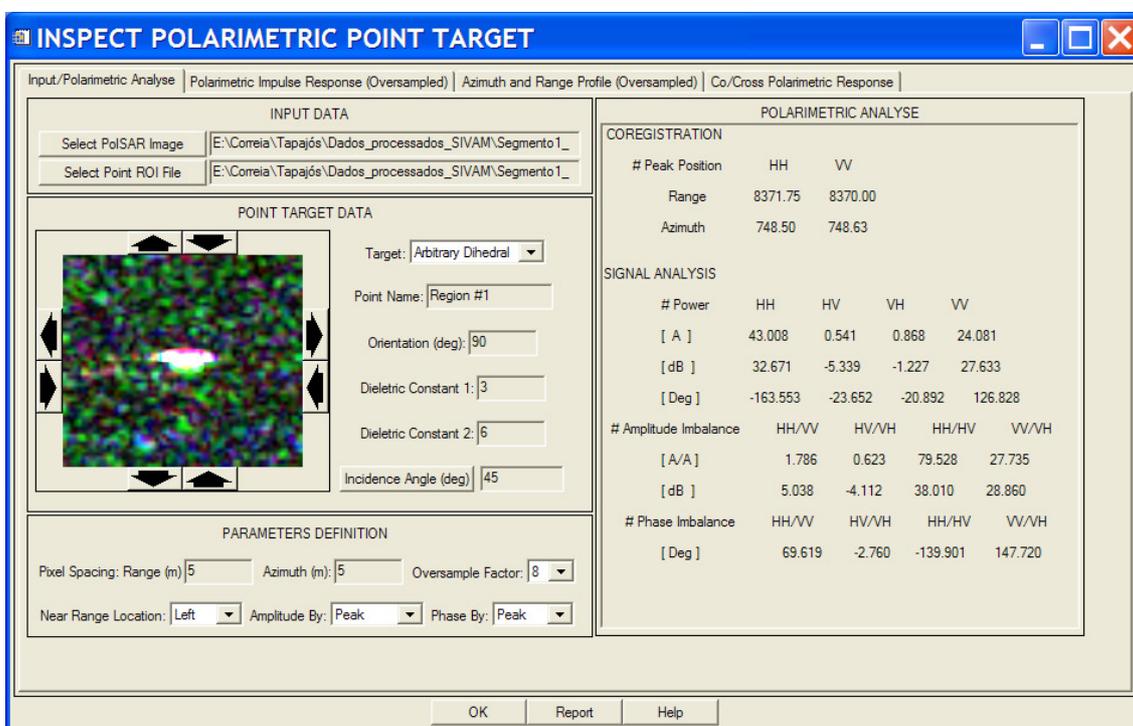


Figura B.20 – Interface para análise dos dados polarimétricos de alvos de interesse.

- **Select (or Point) ROI File / Target / Orientation / Incidence Angle (deg) / Near Range Location / Pixel Spacing (m)**: descrito na Seção B.2;
 - ***Dielectric Constant***: campo texto editável para entrada da constante dielétrica quando o alvo pontual seja do tipo *Bragg* ou *Arbitrary Diehdral*;
 - ***Amplitude/Phase By***: botão tipo lista para definição do método de estimação da amplitude/fase do alvo pontual;
 - ***Oversample Factor***: botão tipo lista para definição do fator de interpolação da imagem do alvo pontual;
 - **Polarimetric Analysis**: campo texto não-editável contendo informações de registro e de desequilíbrio entre os canais polarimétricos do alvo;
- b) **Polarimetric Impulsive Response (Oversampled)**: opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.21, contendo as seguintes opções:

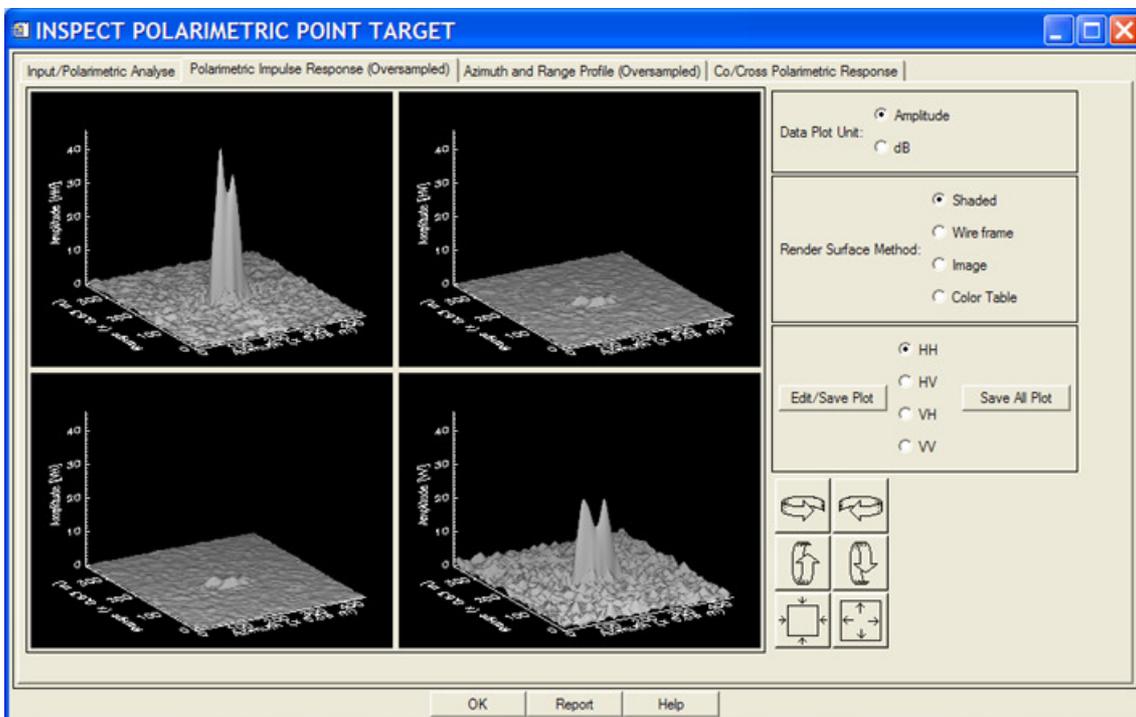


Figura B.21 – Interface para análise da resposta impulsiva de alvos de interesse.

- **Data Plot Unit:** botão tipo exclusivo para seleção da unidade (*amplitude* ou *dB*) de representação da resposta impulsiva;
- **Render Surface Method:** botão tipo exclusivo para seleção do método de representação da superfície de revestimento da resposta impulsiva;
- **HH / HV / VH / VV:** botão tipo exclusivo para seleção da componente polarimétrica, correspondente ao gráfico da resposta impulsiva, que se deseja editar, por intermédio da opção **Edit/Save Plot**;
- : botões para rotação no eixo Z, rotação do plano XY, e ampliação ou redução dos gráficos tridimensionais;

c) **Azimuth and Range Profile (Oversampled):** opção que ativa a *GUI* correspondente à Figura B.22, contendo as seguintes opções:

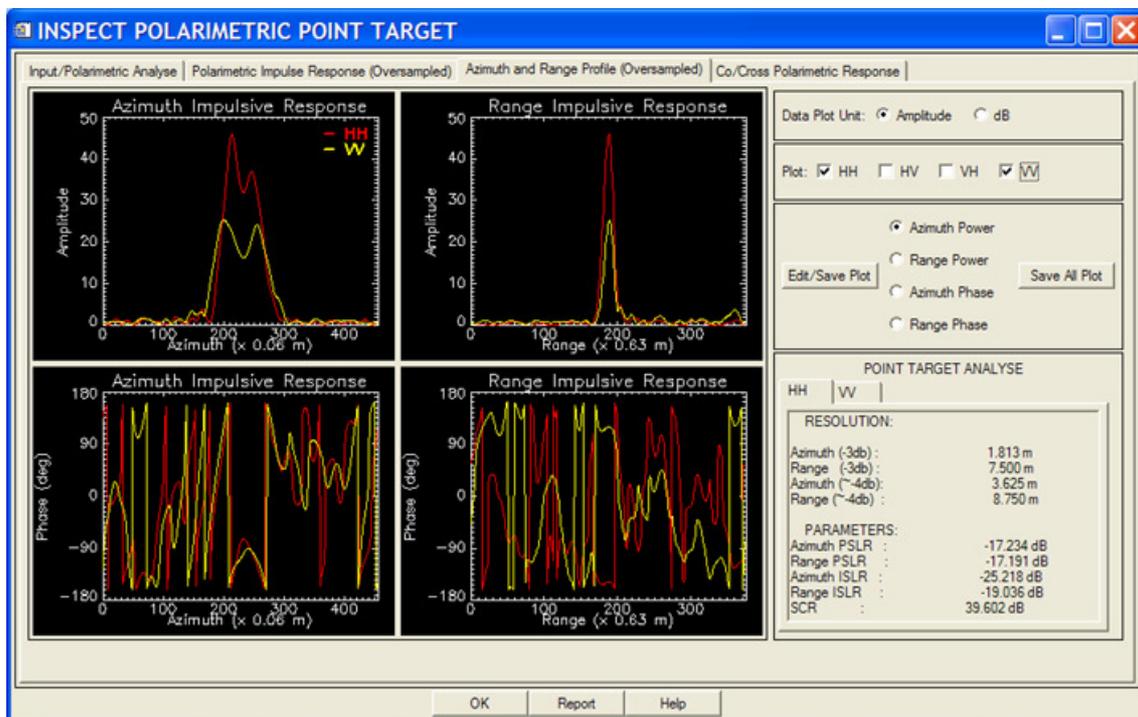


Figura B.22 – Interface para análise do perfil da resposta impulsiva (amplitude e fase) de alvos pontuais de interesse.

- **Plot**: botão tipo não-exclusivo para desenhar os perfis radiais e azimutais (amplitude e fase) das componentes polarimétricas selecionadas,
 - **Point Target Analysis**: campo texto não-editável contendo informações de resolução, PSLR, ISLR, e SCR para os canais polarimétricos, em função do alvo pontual selecionado. Os valores de PSLR e ISLR dependem do tamanho da janela selecionada para visualização do alvo pontual.
- d) **Co/Cross Polarimetric Response**: opção que ativa *GUI* correspondente à Figura B.23, contendo opções semelhantes àsquelas descritas no item b.

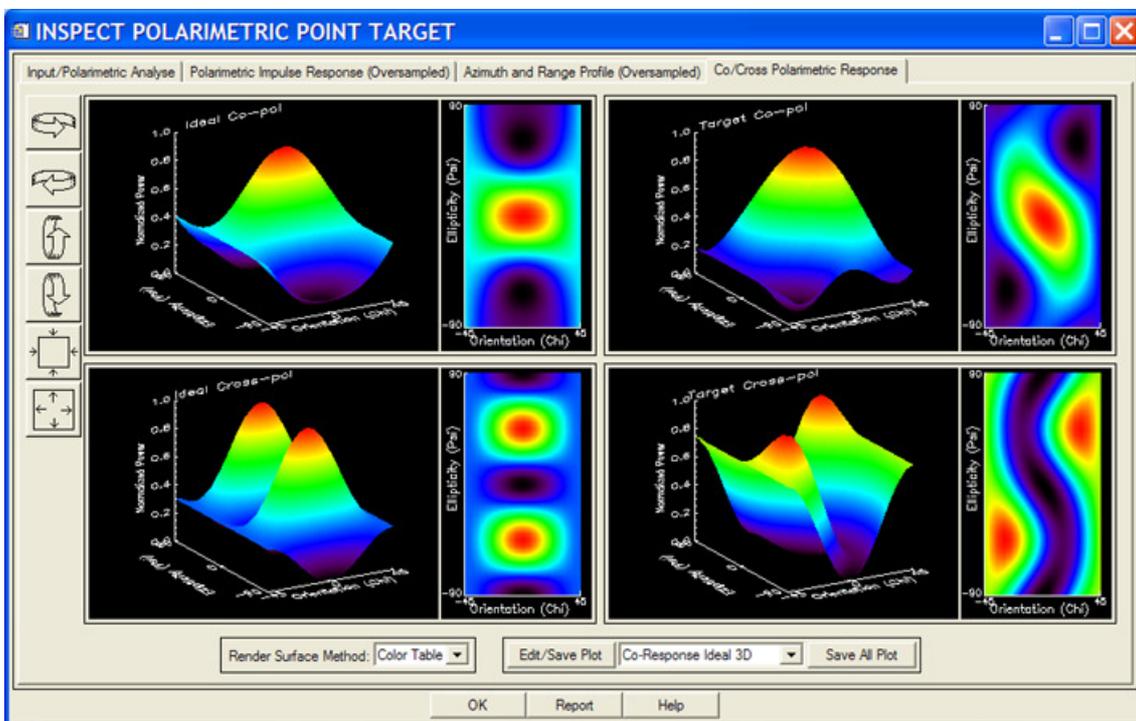


Figura B.23 – Interface para análise da resposta polarimétrica de alvos de interesse.

B.6.3 Decomposição da entropia/ângulo α /anisotropia

Com base na teoria descrita na Seção 2.5 e motivado pela inexistência no aplicativo ENVI, foram desenvolvidas duas ferramentas computacionais para decomposição das imagens Entropia/Ângulo α /Anisotropia e visualização de dados no Plano Entropia/Ângulo α . É importante destacar que, a ferramenta de visualização do referido

plano incorpora funcionalidades, tais como o uso da informação da anisotropia e seleção de amostras de interesse para visualização dos valores de entropia e ângulo α , que não estão presente nos aplicativos pesquisados, com é o caso do PWS.

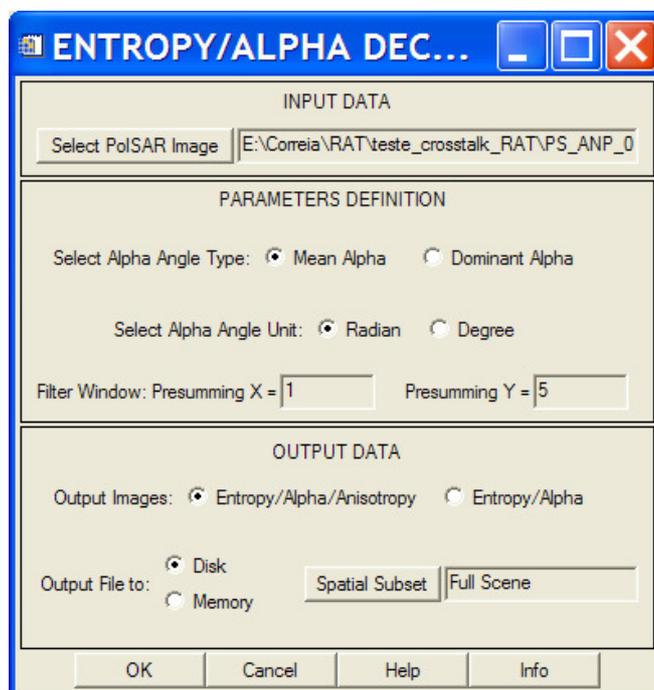


Figura B.24 – Interface para decomposição da imagem PolSAR nas componentes Entropia, Ângulo α e Anisotropia.

Na Figura B.24 é apresentada a interface principal da ferramenta de decomposição da imagem PolSAR SLC nas componentes da Entropia, Ângulo α e Anisotropia, que é ativada por intermédio da subopção *Polarimetric Tools* → *Entropy/Alpha/Anisotropy* → *H/Alpha Decomposition*, contida na opção principal *File* do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

- a) *Select Alpha Angle Type*: botão tipo exclusivo para seleção do modo de decomposição da imagem ângulo alpha, que pode ser pelo valor médio (*Mean Alpha*), conforme a Equação 2.38, ou pelo valor dominante (*Dominant Alpha*), que corresponde ao autovetor do maior autovalor;
- b) *Select Alpha Angle Unit*: botão tipo exclusivo para seleção da unidade de saída da imagem ângulo α , que pode ser em radiano (*Radian*) ou em grau (*Degree*);

- c) **Filter Window**: opção composta por dois campos texto editáveis para definição das dimensões da janela de filtragem da imagem PolSAR na direção X (*Presumming X*) e na direção Y (*Presumming Y*), que serão utilizadas para obtenção da imagem coerência, passo anterior a decomposição em questão;
- d) **Output Images**: botão tipo exclusivo para seleção do formato das imagens de saída (*Entropy/Alpha/Anisotropy* ou *Entropy/Alpha*).
- e) **Output File to**: para as opções *Disk* e *Memory*, os nomes dos arquivos de saída conterão o sufixo e prefixo “*alpha*”, “*entropy*” e “*anisotropy*”, respectivamente.

Na Figura B.25 é apresentada a interface principal da ferramenta de visualização do Plano Entropia/ângulo Alpha, que é ativada por intermédio da subopção *Polarimetric Tools* → *Entropy/Alpha/Anisotropy* → *H/Alpha Plane*, contida na opção principal *File* do ENVI, cujas funcionalidades disponíveis são:

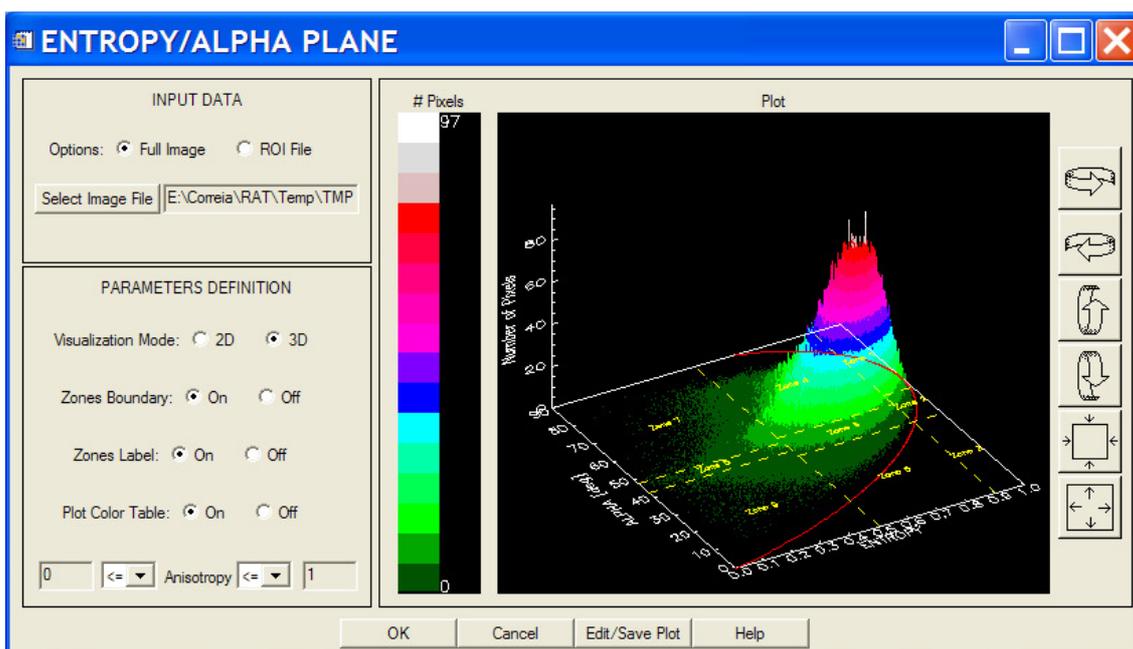


Figura B.25 – Interface para visualização da distribuição dos *pixels* da imagem SAR no Plano Entropia/Ângulo α .

- a) **Options**: botão tipo exclusivo composto por duas opções:

- **Full Image**: opção que ativa a visualização do histograma bidimensional dos valores de entropia e ângulo α , de todos os *pixels* das respectivas imagens de entrada selecionadas pelo botão **Select Images File**, sendo que a opção **Anisotropy** somente será ativada se a respectiva imagem estiver contida no arquivo de entrada;
 - **ROI File**: opção que ativa os botões **Select ROI File**, os não-exclusivos da opção **Class**, e **Off Class/On Class** (Figura B.26) para seleção, respectivamente, do arquivo de **ROI**, das classes de interesse, e ativação/desativação das classes que serão visualizadas no plano da Entropia/Ângulo α ;
- f) **Visualization Mode**: botão tipo exclusivo para seleção do modo de visualização bidimensional (**2D**) ou tridimensional (**3D**) do Plano da Entropia/Ângulo α , sendo que esta funcionalidade somente está disponível para a opção **Full Image**. A visualização 3D representa o histograma bidimensional dos valores de entropia e ângulo α (Figura B.25);
- g) **Zone Boundary**: botão tipo exclusivo para ativar (**On**) ou desativar (**Off**) a visualização das fronteiras de cada uma das nove zonas existentes no aludido plano, conforme a teoria descrita na Seção 2.5.3;
- h) **Zone Label**: botão tipo exclusivo para ativar (**On**) ou desativar (**Off**) a visualização dos nomes das aludidas fronteiras descritas no item anterior;
- i) **Plot Color Table**: botão tipo exclusivo para ativar (**On**) ou desativar (**Off**) a seleção de uma tabela de cores (Figura B.5), para visualização da estratificação da densidade do histograma bidimensional da entropia e ângulo α , sendo que esta funcionalidade somente está disponível para a opção **Full Image**;
- j) **Anisotropy**: opção composta por dois campos tipo texto editável e dois botões tipo lista para definição, respectivamente, dos valores limites e dos operadores relacionais que definem o intervalo da anisotropia de onde serão extraídos os

respectivos valores de entropia e ângulo α que serão visualizados. Em seguida, selecione o botão **OK** para executar a visualização do intervalo da anisotropia de interesse.

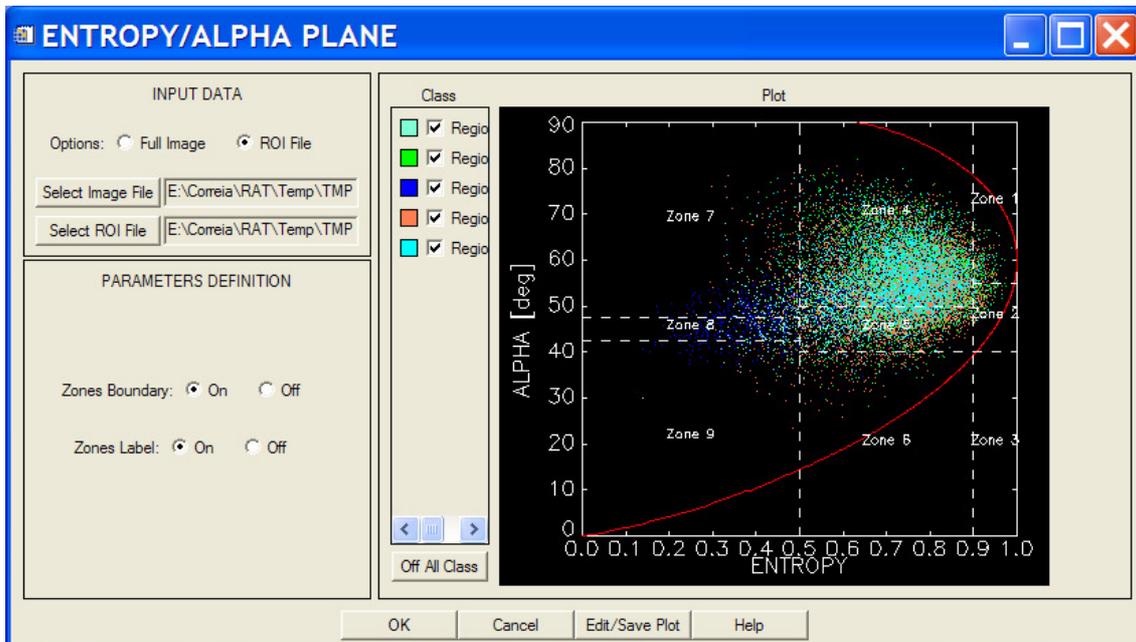


Figura B.26 – Interface para visualização da distribuição dos *pixels* das amostras de interesse (ROI) no Plano Entropia/Ângulo α .