



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15433-TDI/1419

## SIMULAÇÃO DE RESPOSTA DE ESTRUTURAS SIMPLIFICADAS DE VEGETAÇÃO AO RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA INTERFEROMÉTRICO

Fabiano Costa de Almeida

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas e Luciano Vieira Dutra, aprovada em  
3 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/09.02.19.53>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

**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](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO:****Presidente:**

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

**Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

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

Dr<sup>a</sup> 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-15433-TDI/1419

**SIMULAÇÃO DE RESPOSTA DE ESTRUTURAS  
SIMPLIFICADAS DE VEGETAÇÃO AO RADAR DE  
ABERTURA SINTÉTICA INTERFEROMÉTRICO**

Fabiano Costa de Almeida

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelos Drs. Corina da Costa Freitas e Luciano Vieira Dutra, aprovada em  
3 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/09.02.19.53>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

A64s Almeida, Fabiano Costa.

Simulação de resposta de estruturas simplificadas de vegetação ao radar de abertura sintética interferométrico / Fabiano Costa de Almeida. – São José dos Campos: INPE, 2008.

102p. ; (INPE-15433-TDI/1419)

Dissertação (Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

1. Radar de abertura sintética (SAR). 2. Simulação de dados. 3. Interferometria. 4. Vegetação. I.Título.

CDU 528.8.044.2

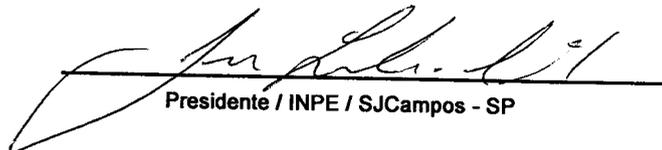
---

Copyright © 2008 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, microfílmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

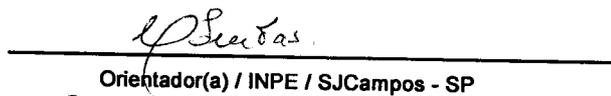
Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

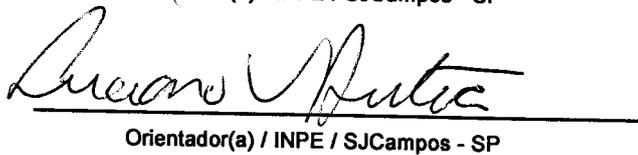
Dr. José Cláudio Mura

  
Presidente / INPE / SJCampos - SP

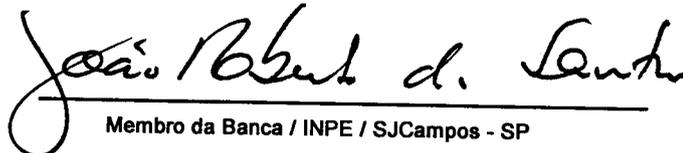
Dra. Corina da Costa Freitas

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. João Roberto dos Santos

  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Robert Treuhaft

  
Convidado(a) / JPL/NASA / Pasadena - CA

Aluno (a): Fabiano Costa de Almeida

São José dos Campos, 03 de outubro de 2008



*“A ciência não é uma perseguição desalmada da informação objetiva. É uma atividade humana criativa em que seus gênios atuam mais como artistas do que como processadores de informação”*

*Stephen Jay Gould*



*À Viviane e Miguel Ângelo,  
esposa e filho amados, dedico.*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço às pessoas e instituições que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, em especial:

À Dra. Corina da Costa Freitas e ao Dr. Luciano Vieira Dutra, pela orientação desta pesquisa, pela confiança depositada neste aprendiz e, principalmente, pelo estímulo ao pensamento criativo.

Ao Dr José Cláudio Mura, ao Dr Waldir Renato Paradella, ao Dr Fábio Furlan Gama, ao Sidnei João Siqueira Sant'Anna e ao Antônio Henrique Correia pelo apoio prestado em vários momentos, esclarecendo dúvidas sobre o sistema SAR e solucionando problemas específicos de programação.

Ao Dr João Roberto dos Santos e ao Dr Yosio Edemir Shimabukuro, pelos esclarecimentos e informações repassadas sobre assuntos relacionados à vegetação.

Ao Dr Robert Treuhaft, pela proposição desta pesquisa e suporte técnico em diversas ocasiões.

Ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e à Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro, pela oportunidade de realizar o mestrado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Ao Dr Oscar Ricardo Vergara, pela orientação acadêmica por parte do Programa de Pós-Graduação do Instituto Militar de Engenharia.

Ao INPE, pelos meios colocados à disposição dos alunos para o aprendizado.

Aos colegas de classe dos cursos de doutorado e de mestrado em sensoriamento remoto do INPE, pelas horas compartilhadas e dúvidas retiradas nos vários debates.

À Maria Etelvina Renó Dias Arbex, pelo sorriso sincero sempre presente em seu rosto para todos que a procuram na secretaria do curso.

À minha família, pelo incentivo em todos os momentos desta pesquisa.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é simular respostas de modelos simplificados de estruturas de vegetação ao radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR). A amplitude e a fase de cada pixel das imagens complexas simuladas são obtidas pela consideração do retroespalhamento de difusores elementares isotrópicos. Estes difusores são ponderados por uma composição das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimute com abertura de 3 dB. As configurações do sistema sensor virtual bem como os parâmetros da cena podem ser ajustados livremente. A hipótese formulada aponta que utilizar modelos físicos para distribuir espalhadores elementares configura uma solução adequada para simular o resultado do sensoriamento remoto SAR de áreas de vegetação. A fim de validar tal hipótese, dois experimentos foram conduzidos para distintas regiões do Brasil: uma cultura agrícola no município de Barreiras/BA e um trecho de floresta tropical primária na Floresta Nacional do Tapajós, Estado do Pará. Um protótipo de simulador SAR foi desenvolvido em linguagem de programação IDL e é composto por três módulos. O primeiro módulo distribui uniformemente os espalhadores em blocos subdivididos em camadas. Outro módulo é responsável por gerar imagens complexas para um sensor virtual aerotransportado operado em modo interferométrico de uma passagem. Calcular o interferograma e a imagem de coerência correspondentes é a tarefa do último módulo.



# **INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR RESPONSE SIMULATION OF SIMPLIFIED VEGETATION STRUCTURES**

## **ABSTRACT**

This work is aimed at simulating SAR response of simplified 3-D vegetation structure models. The magnitude and phase of each pixel in the simulated complex images are computed from direct volume backscatter responses of isotropically scattering elements weighted by a 3 dB aperture point spread function composition in range and azimuth directions. The virtual sensor system configurations as well as scene parameters can be freely adjusted. The hypothesis formulated indicates that using physical models to distribute scattering elements set an appropriate configuration for simulating SAR remote sensing of a vegetation area. To validate this hypothesis, two experiments were performed in different test regions in Brazil: an agricultural crop located at Barreiras/BA and a primary tropical rainforest located at Tapajós National Forest, Pará State. A SAR simulator prototype was developed in IDL programming language and is provided by three modules. The first module uniformly distributes scattering elements in layered blocks. Another one generates complex images for a virtual airborne sensor operated in a single-pass interferometric mode. The last module calculates the interferogram and the coherence image.



## SUMÁRIO

Pág.

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE TABELAS

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1 Objetivos .....	24
1.2 Contribuições da pesquisa .....	25
1.3 Provas de conceito: experimentos BARREIRAS e TAPAJÓS .....	25
1.4 Organização da Dissertação .....	26
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>29</b>
2.1 Fundamentos do radar de abertura sintética .....	29
2.1.1 Princípio dos radares imageadores .....	29
2.1.2 Geometrias de aquisição e de distorções das imagens SAR .....	30
2.1.3 Antena efetiva e resoluções espaciais .....	33
2.1.4 Características das imagens SAR .....	36
2.2 Fatores que influenciam no retroespalhamento de microondas .....	38
2.2.1 Grau de rugosidade da superfície .....	38
2.2.2 Ângulo de incidência local .....	39
2.2.3 Características do meio .....	40
2.3 Modelagem estatística das imagens SAR .....	41
2.4 Modelos de simulação de respostas da vegetação a microondas .....	43
2.5 Princípios de Interferometria SAR (InSAR) .....	45
2.6 Método da bisseção para solução de equações transcendentess .....	50
<b>3. UM PROTÓTIPO PARA SIMULAÇÃO DE RESPOSTA DE ESTRUTURAS SIMPLIFICADAS DE VEGETAÇÃO AO SAR INTERFEROMÉTRICO</b> .....	<b>53</b>
3.1 Módulo de construção da estrutura de vegetação .....	55
3.2 Módulo de geração das imagens complexas .....	57
3.3 Módulo de cálculo dos produtos interferométricos .....	63
3.4 Modelo matemático para as respostas dos difusores elementares .....	64
<b>4. PROVAS DE CONCEITO: EXPERIMENTOS BARREIRAS E TAPAJÓS</b> ..	<b>69</b>
4.1 Experimento Barreiras .....	69
4.1.1 Caracterização da região de teste .....	69
4.1.2 Materiais e métodos .....	70
4.1.3 Resultados e discussões .....	77
4.2 Experimento Tapajós .....	81
4.2.1 Caracterização da região de teste .....	81
4.2.2 Materiais e métodos .....	82
4.2.3 Resultados e discussões .....	89

<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Geometria de aquisição das imagens SAR. ....	31
2.2 – Exemplos de configurações geométricas que causam encurtamento, sombreamento e inversão nas imagens SAR. ....	32
2.3 – Conversão de imagem em alcance inclinado para alcance no solo. ....	32
2.4 – Síntese da antena SAR. ....	33
2.5 – Diagramas de irradiação da antena SAR (polar e retangular). ....	35
2.6 – Influência da quantidade de elementos irradiadores na largura do lóbulo principal da antena. ....	35
2.7 – Contribuições em amplitude e fase de cada difusor ao sinal SAR retroespalhado. ....	36
2.8 – Efeito do ruído speckle nas imagens SAR. ....	37
2.9 – Efeito do decaimento do sinal ao longo da direção de alcance. ....	37
2.10 – Ângulo de incidência local. ....	39
2.11 – Mecanismos de espalhamento em áreas de vegetação. ....	41
2.12 – Geometria InSAR. ....	46
2.13 – Padrões de franjas do interferograma. ....	48
2.14 – Ilustração de imagem de coerência. ....	49
3.1 – Visão geral dos principais módulos do protótipo. ....	55
3.2 – Exemplo de estrutura de vegetação. ....	55
3.3 – Efeito da alteração do valor do coeficiente da função sinc. ....	58
3.4 – Ponderação da amplitude pela sinc para um ponto P. ....	59
3.5 – Composição das funções sinc nas direções de alcance e azimute. ....	60
3.6 – Exemplo de configuração para o ângulo de incidência local. ....	61
3.7 – Determinação da distância percorrida pela onda eletromagnética até alcançar um ponto P no interior da estrutura de vegetação. ....	64
3.8 – Influência do coeficiente de atenuação na amplitude do sinal. ....	65
4.1 – Localização da região de teste (experimento Barreiras). ....	69
4.2 – Campos de algodão da região de teste (experimento Barreiras). ....	70
4.3 – Aeronave Embraer RJ-145 (R-99B) do SIVAM. ....	71
4.4 – a) Localização das antenas SAR no R99-B. b) Antena da Banda L. ....	71
4.5 – Imagens SAR R-99: a) composição em alcance inclinado ( $L_{VV}$ (R), $L_{HV}$ (G), $L_{HH}$ (B)). b) identificação das culturas na mesma composição em alcance no terreno. ....	72
4.6 – Fluxograma da metodologia empregada no experimento Barreiras. ....	76
4.7 – Produtos simulados (Banda L) do experimento Barreiras: a) modelo 3D de vegetação. b) imagem amplitude antena principal. c) imagem amplitude antena secundária. d) interferograma. e) imagem de coerência. ....	77
4.8 – Funções de autocorrelação (ACF) para os dados em intensidade (experimento Barreiras). ....	79
4.9 – Ajuste de distribuições $\Gamma^{1/2}$ para os dados em amplitude (experimento Barreiras): a) imagem simulada. b) $L_{VV}$ . c) $L_{HV}$ . d) $L_{HH}$ . ....	80

4.10 – Localização da região de teste (experimento Tapajós). .....	81
4.11 – MDT da região de teste (experimento Tapajós). .....	82
4.12 – Razão altura da copa/altura total (Tabela 4.5) – FLONA do Tapajós....	84
4.13 – Setor extraído do MDT para a construção do modelo de vegetação (experimento Tapajós). .....	85
4.14 – Fluxograma da metodologia empregada no experimento Tapajós.....	88
4.15 – Produtos simulados (Banda X) do experimento Tapajós: a) imagem amplitude antena principal. b) imagem amplitude antena secundária. c) imagem de coerência. d) interferograma. e) MDT da região de teste (extrato). .....	89
4.16 – Ajuste da distribuição $\Gamma^{1/2}$ para os dados em amplitude da imagem simulada (experimento Tapajós). .....	91
4.17 – Exemplo de arranjo modificado de distribuição de espalhadores.....	92
4.18 – Configuração da floresta tropical primária simulada.....	93
4.19 – Imagem em amplitude simulada da estrutura de vegetação alternativa.	93
4.20 – Tentativas de ajustes de funções aos dados simulados em amplitude com a estrutura de vegetação adaptada: a) $\Gamma^{1/2}$ e b) $G_A^0$ . .....	94

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 – Principais bandas utilizadas pelos sistemas SAR. ....	39
2.2 – Distribuições estatísticas para imagens SAR em amplitude.....	42
3.1 – Parâmetros para a construção das estruturas de vegetação. ....	56
3.2 – Parâmetros da geometria de aquisição, do sensor e do processamento dos dados.....	62
3.3 – Parâmetros da geometria de aquisição, do sensor e do processamento dos dados.....	64
4.1 – Parâmetros para a estrutura de vegetação (experimento Barreiras).....	73
4.2 – Parâmetros para a geração das imagens complexas (experimento Barreiras).....	74
4.3 – Parâmetros para o cálculo dos produtos interferométricos (experimento Barreiras).....	76
4.4 – Estatísticas dos testes $\chi^2$ para os dados em amplitude.....	80
4.5 – Classes para altura total de 398 árvores da FLONA do Tapajós. ....	84
4.6 – Parâmetros para a estrutura de vegetação (experimento Tapajós). ....	85
4.7 – Parâmetros para a geração das imagens complexas (experimento Tapajós). ....	87
4.8 – Parâmetros para o cálculo dos produtos interferométricos (experimento Tapajós). ....	88



## 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do ambiente onde está inserido é uma das necessidades do ser humano e, com o passar do tempo, as exigências para a satisfação desta necessidade se tornam maiores. Cartas e mapas são representações fundamentais do registro das coordenadas plani-altimétricas dos alvos terrestres, mas os avanços das técnicas de sensoriamento remoto permitem extrapolar a simples apreensão da informação posicional. Permitem também a extração de atributos quantitativos e qualitativos destes alvos.

Os sistemas sensores que operam na faixa de microondas cumprem importante papel na obtenção destes subsídios adicionais. Especialmente os radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*), para os quais técnicas de polarimetria SAR (PolSAR), interferometria SAR (InSAR) e a combinação destas (Pol-InSAR), proposta por Cloude e Papathanassiou (1998), foram desenvolvidas a fim de se obter determinadas informações sobre alvos terrestres como forma, orientação, natureza física, distribuição volumétrica etc.

Segundo Treuhaft et al. (2006), é crescente o interesse no monitoramento global de uma destas informações: a estrutura vertical de ambientes de vegetação. Dentre outras aplicações, os dados das alturas destes arranjos servem de indicadores para a quantidade de biomassa e para a susceptibilidade a incêndios. Estes mesmos autores indicam a tecnologia InSAR para a caracterização global ou regional de tais estruturas.

Com o intuito de estudar o comportamento de diversos sistemas SAR, de prever resultados de sensoriamento remoto ou mesmo de desenvolver novos equipamentos, diversos autores construíram algoritmos baseados em modelos matemáticos capazes de fornecer produtos simulados de radar de abertura sintética (FRANCESCHETTI et al., 1998; MARLIANI et al., 2002; MURA et al.,

2007; SALVADOR et al., 2004; SARABANDI e LIN, (1997, 2000); ULABY et al., 1990; VAREKAMP e HOEKMAN, 2002; WILLIAMS, 2006). Estes produtos se aproximam em maior ou menor grau da realidade dependendo da consideração de determinados parâmetros de entrada, dos modelos matemáticos adotados e da própria especificação dos produtos resultantes.

Em seus trabalhos, Treuhaft et al. (1996), Treuhaft et al. (2002), Treuhaft et al. (2003, 2004) e Treuhaft et al. (2006) buscam caracterizar analiticamente o perfil tridimensional da densidade de vegetação através de modelos físicos de distribuição de espalhadores elementares ao sinal do radar de abertura sintética interferométrico. Nestes modelos, um espalhador é considerado um componente da vegetação que envia o sinal transmitido pelo equipamento radar de volta ao receptor. Suas contribuições em amplitude e fase são somadas vetorialmente com as contribuições dos demais espalhadores para formar cada elemento das imagens SAR complexas.

Sob hipóteses simplificadoras, estes autores deduzem equações analíticas que permitem calcular a coerência complexa para pontos dispersos ao longo da direção de alcance, que é um valor médio para um número infinito de espalhadores. Para isso, consideram determinada geometria de aquisição, perfis simplificados de distribuição de espalhadores (camadas) e certo ângulo de incidência local. Entretanto, há casos em que o tratamento analítico para os modelos físicos de distribuição de espalhadores é restritivo e uma abordagem por simulação para tal problema viabiliza situações mais próximas da realidade.

Ao dispersar espalhadores elementares no espaço tridimensional e, a partir desta etapa, simular suas respostas ao radar de abertura sintética, os seguintes benefícios adicionais podem ser obtidos em relação à abordagem analítica:

- Para perfis de mesma configuração, há uma variabilidade natural devido à dispersão aleatória de um número finito de pontos na simulação. Tal fato não ocorre quando a configuração é definida analiticamente, pois sempre é seguida determinada formulação;
- Na abordagem analítica, o produto disponível se restringe à coerência complexa, enquanto a simulação disponibiliza também par de imagens interferométricas perfeitamente registradas, que podem ser utilizadas em teste de algoritmos, em testes de propriedades estatísticas etc.;
- Um modelo digital do terreno (MDT) e estruturas sofisticadas de dispersão de espalhadores podem ser considerados mais facilmente na abordagem por simulação, estreitando suas configurações às características reais da cena. Assim, diferentes conformações de copas, troncos; galhos e demais elementos constituintes das diferentes espécies de vegetação podem ser reunidos em um mesmo ambiente virtual para uma simulação; e
- O efeito da função de espalhamento pontual do sistema sensor na correlação espacial entre elementos constituintes das imagens SAR é flexibilizado pela simulação, que permite a definição de quais difusores presentes em células de resolução vizinhas ajudarão a formar a resposta ao radar.

Neste contexto, o presente trabalho parte da seguinte **hipótese**: utilizar arranjos simplificados de distribuição espacial de difusores elementares configura uma solução adequada à simulação de resposta de regiões de vegetação ao SAR operado em modo interferométrico a partir de aeronaves. Esta simulação gera imagens complexas (*single look complex* – SLC) e

produtos interferométricos resultantes condizentes com aqueles obtidos por um sistema sensor real.

## 1.1 Objetivos

Esta dissertação tem como **objetivo geral** desenvolver uma metodologia que permita simular respostas de estruturas simplificadas de vegetação ao SAR interferométrico aerotransportado.

Para atingir o objetivo geral, este trabalho tem como **objetivos específicos** conceber metodologias que viabilizem:

- (a) dispor espacialmente os espalhadores elementares do sinal SAR segundo os parâmetros físicos da estrutura tridimensional da vegetação e do relevo;
- (b) gerar imagens SAR complexas considerando-se a configuração geométrica do sistema sensor aerotransportado no momento da aquisição e a modelagem matemática das contribuições em amplitude e fase de cada espalhador;
- (c) calcular as imagens resultantes do sistema sensor aerotransportado em modo interferométrico (imagem de coerência e interferograma); e
- (d) avaliar a simulação através da distribuição e análise estatísticas das imagens produzidas, comparando-as com as imagens e produtos interferométricos obtidos por processamento de dados SAR provenientes de sensoriamento remoto do terreno.

## **1.2 Contribuições da pesquisa**

Este trabalho se insere na linha de pesquisa *Processamento e Análise de Imagens de Radar*, do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Espera-se que esta dissertação colabore na geração de pares de imagens interferométricas perfeitamente registradas a partir da simulação das respostas de difusores elementares representativos de vegetação a um sensor SAR aerotransportado. Pretende-se também que tal simulação possa contribuir na consideração de estruturas de vegetação e de superfície do terreno mais próximas da realidade do que aquelas proporcionadas pela abordagem analítica para a obtenção da coerência complexa.

Outrossim, pretende-se que os produtos simulados do presente estudo cooperem como insumos em procedimentos para testes de diferentes algoritmos de processamento de imagens de radar como, por exemplo, para verificação da eficiência de filtros, para investigação das propriedades estatísticas das imagens SAR e outras aplicações. Para isso, é desenvolvido um protótipo composto por módulos que distribuem os espalhadores elementares no espaço tridimensional, geram as imagens complexas e, a partir destas, os produtos interferométricos (imagem de coerência e interferograma).

## **1.3 Provas de conceito: experimentos BARREIRAS e TAPAJÓS**

A fim de verificar a validade da hipótese do trabalho, imagens adquiridas por sensores de radar de abertura sintética reais serviram de comparação com aquelas geradas por simulação em dois experimentos: BARREIRAS e TAPAJÓS.

No experimento BARREIRAS foram utilizadas imagens SLC provenientes do sensor SAR-R99, embarcado em uma das aeronaves EMB-145 pertencentes

ao Sistema de Vigilância da Amazônia – SIVAM. Estas imagens são da banda L (1,28 GHz) nas polarizações HH, HV e VV, adquiridas em abril de 2005, na região agrícola localizada no município de Barreiras/BA. Esta região foi selecionada por apresentar relevo plano e pivôs de cultura de algodão, com características de grande homogeneidade e mínima exposição do solo entre as linhas de plantio (SILVA, 2007).

Para o experimento TAPAJÓS foi utilizado um modelo digital do terreno (MDT), oriundo do processamento dos dados da banda P (415 MHz), provenientes do sensor aerotransportado da empresa alemã *AeroSensing RadarSystem GmbH*, sobre a região da Floresta Nacional do Tapajós, no Estado do Pará, em setembro de 2000. Esta região foi escolhida por apresentar relevo ondulado, recoberto por floresta primária com dados biofísicos de árvores inventariadas por Santos et al. (2003) e por Narvaes et al. (2007) em um trecho da área de teste.

Os produtos foram gerados em um protótipo de simulador desenvolvido em linguagem de programação IDL (*Interactive Data Language*). A facilidade de transformação das variáveis IDL em imagens do programa ENVI (*Environment for Visualizing Images*) para análises de resultados e a existência de funções já implementadas em sua biblioteca para o processamento de dados vetoriais e matriciais foram motivos pelos quais se optou por esta linguagem de programação.

#### **1.4 Organização da Dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco seções.

A segunda seção traz a fundamentação teórica, com os conceitos e teorias que apóiam o trabalho.

Na terceira seção é apresentado um protótipo para a simulação das respostas de estruturas simplificadas de vegetação.

As experiências realizadas para validar a simulação, juntamente com a discussão dos resultados, encontram-se na quarta seção.

Por fim, a quinta e última seção traz as conclusões, limitações do modelo proposto e sugestões para trabalhos futuros.



## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Fundamentos do radar de abertura sintética

#### 2.1.1 Princípio dos radares imageadores

Uma onda eletromagnética é composta pelos campos elétrico e magnético que são capazes de se propagar no espaço transportando energia. Como os campos são ortogonais entre si e à direção de propagação, utiliza-se o campo elétrico para a caracterização da onda.

As formulações de Maxwell para as ondas eletromagnéticas tratam da propagação destas ondas em um meio considerando-se certas constantes físicas. Quando as correntes e cargas de uma fonte eletromagnética são osciladores harmônicos, tais formulações assumem a forma clássica da [Equação 2.1](#), adaptada de Raney (1998), tomando-se o campo elétrico como referência sem perda da generalização, pois este serve de indução ao campo magnético e vice-versa.

$$E_H(r, t) = E_{0H} e^{-\sigma r} \cos(\omega_0 t - \rho r + \Phi_H) \quad (2.1)$$

onde  $E_H(r, t)$  é a componente horizontal do campo elétrico que viaja na direção  $r$  em função do tempo  $t$ ;  $\sigma$  e  $\rho$  são constantes de atenuação da amplitude e da fase da onda, respectivamente;  $\omega_0$  é a frequência da onda e  $\Phi_H$  é a fase de referência do sistema.

No final do século XIX, o físico alemão Heinrich Hertz conduziu experimentos que comprovavam que objetos metálicos e não-metálicos podiam refletir a radiação eletromagnética emitida na faixa de rádio-freqüência. Valendo-se deste princípio, equipamentos RADAR, do termo em inglês *RADio Detection And Ranging* (detecção e telemetria por ondas de rádio), foram

estrategicamente utilizados durante a Segunda Guerra Mundial para a localização de navios e aeronaves.

Este princípio é utilizado por sistemas sensores modernos para a geração de imagens e outros produtos derivados, como modelos digitais de elevação (MDE), a partir do processamento do sinal retroespalhado por alvos atingidos pela radiação eletromagnética emitida na faixa de microondas. Tais sistemas são denominados genericamente de radares imageadores.

Dentro da classe dos radares imageadores, existem os radares de abertura real (*Real Aperture Radar – RAR*) e radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar – SAR*). Um sistema RAR utiliza o aumento das dimensões físicas da antena para estreitar o feixe do sinal microondas emitido e, deste modo, obter melhores resoluções espaciais na direção de voo para a construção da imagem. Já um sistema SAR usa um sofisticado processamento de sinais para sintetizar uma antena maior do que seu tamanho físico real para a mesma finalidade (MURA, 2000).

### **2.1.2 Geometrias de aquisição e de distorções das imagens SAR**

A geometria de visada lateral deve ser utilizada pelos sistemas SAR porque, se a antena transmissora do sistema fosse apontada para nadir, alvos à direita e à esquerda da plataforma afastados igualmente em relação ao sensor não seriam distinguidos, pois seus sinais refletidos retornariam à antena receptora juntos.

A direção da linha de voo ou longitudinal é chamada de azimute e a direção ortogonal ou transversal é denominada alcance. A região mais próxima da plataforma na qual inicialmente a frente de onda incide é chamada alcance próximo e a região mais afastada é denominada alcance distante. Estes dois extremos limitam a faixa de imageamento.

O alcance inclinado de um ponto é a distância deste ao sensor. Já o alcance no terreno é seu afastamento à projeção da plataforma no solo. O ângulo medido a partir do nadir até um ponto considerado é o ângulo de visada e a grandeza angular formada pela direção perpendicular à superfície terrestre e o feixe da onda portadora é denominado ângulo de incidência.

A [Figura 2.1](#) ilustra a geometria de aquisição dos dados SAR.

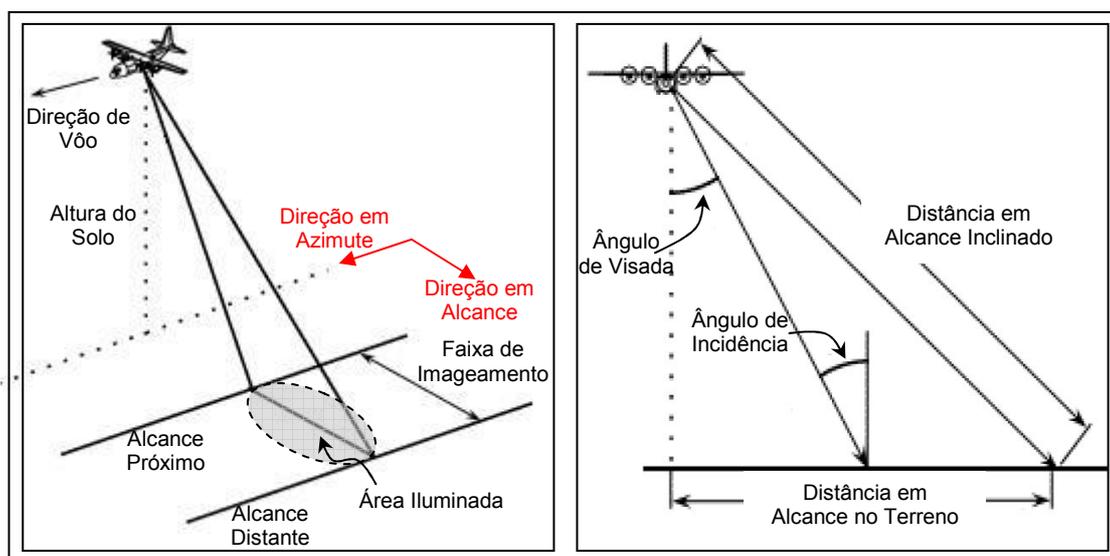


Figura 2.1 – Geometria de aquisição das imagens SAR.

Fonte: adaptada de CCRS (2007).

A geometria de visada lateral favorece o realce das feições do terreno, mas proporciona também distorções indesejáveis, como o encurtamento de rampa, a inversão e o sombreamento.

A inversão ocorre quando o eco da base de um alvo inclinado é receptado pela antena do radar posteriormente ao eco do topo e este alvo aparecerá na imagem enviesado em direção ao sensor (CAMPBELL, 1996). Mesmo quando a inclinação não é tão pronunciada quanto no caso anterior e o eco da base é receptado antes do eco oriundo do topo, a distância registrada na imagem é

menor do que aquela observada no terreno. Esta distorção é denominada de encurtamento de rampa. O sombreamento ocorre quando uma determinada porção do terreno não é atingida pela radiação emitida pelo sensor.

Exemplos de configurações geométricas de aquisição e do relevo que causam as distorções apresentadas no parágrafo anterior são ilustradas na [Figura 2.2](#).

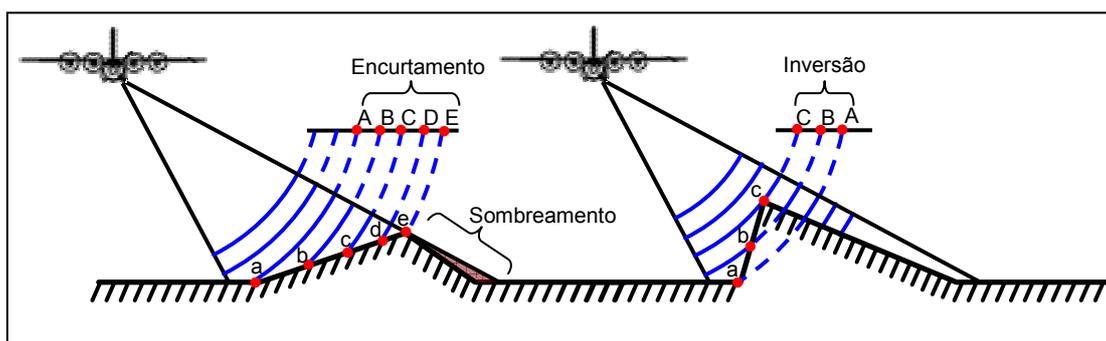


Figura 2.2 – Exemplos de configurações geométricas que causam encurtamento, sombreamento e inversão nas imagens SAR.

Existe ainda a distorção geométrica inerente ao processo de aquisição das imagens, que é baseado na linha de visada e não na distância do solo. A conversão da imagem inclinada para a imagem real (distância no terreno) devolve aos alvos seu formato original, mas também altera a distribuição estatística de seus dados (IEAv, 2002) – [Figura 2.3](#).

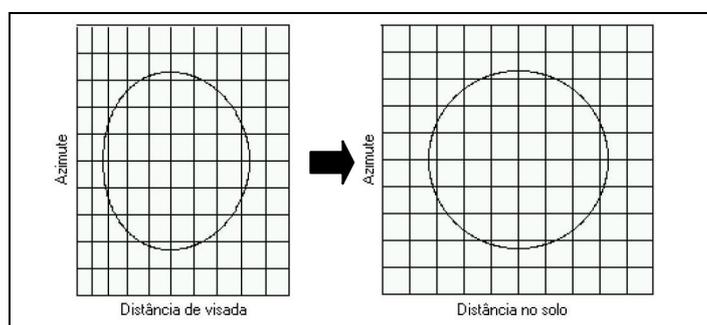


Figura 2.3 – Conversão de imagem em alcance inclinado para alcance no solo.

Fonte: adaptada de IEAv (2002).

### 2.1.3 Antena efetiva e resoluções espaciais

O comprimento efetivo da antena SAR (ou antena sintética) é calculado pela multiplicação do módulo do vetor velocidade da plataforma ( $V$ ) por um intervalo de tempo ( $t_0 - t_1$ ) – [Figura 2.4](#). Cada elemento da cena permanece por maior ou menor tempo no campo de visada dependendo de seu afastamento do sensor. Quanto mais distante um alvo estiver, maior será o período de tempo para a captura de dados que serão utilizados no processamento para a melhoria da resolução espacial na direção de azimute. Os cálculos para a determinação desta resolução consideram a variação de frequência do sinal provocada pelo deslocamento da plataforma – efeito Doppler ([MURA, 2000](#)).

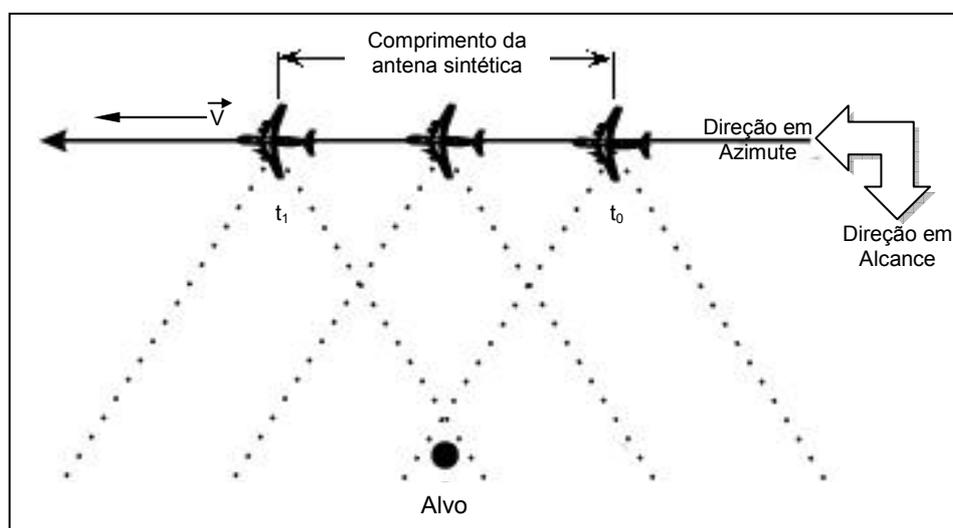


Figura 2.4 – Síntese da antena SAR.

Fonte: adaptada de [CCRS \(2007\)](#).

Teoricamente, a resolução espacial azimutal de um sistema SAR pode chegar à metade do tamanho físico da antena, independentemente se o sensor for aerotransportado ou orbital. Na prática, outros fatores degradam tal resolução, como, por exemplo, a razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* – SNR) ([ARONOFF, 2005](#)).

A resolução espacial de um sistema SAR na direção de alcance é função da largura de banda dos pulsos transmitidos (ELACHI, 1987). Estes pulsos, denominados de *chirp*, são modulações lineares em frequência da onda portadora (WEHNER, 1987) e são emitidos em intervalos regulares pelo sensor. Quanto maior a largura de banda, melhor a resolução espacial na direção em alcance.

Cabe ressaltar que a resolução espacial do sistema não é necessariamente igual ao espaçamento entre pixels de uma imagem SAR, pois aquela é a capacidade que o sistema tem de distinguir dois alvos adjacentes no terreno (espaço contínuo) e este é resultado da reamostragem dos dados em um espaço discreto bidimensional (imagem).

A resolução espacial do sistema SAR depende das funções de espalhamento de um alvo pontual nas direções alcance e azimute. Franceschetti e Lanari (1999) representam esta função como uma *sinc* (Equação 2.2) com abertura de 3 dB, que corresponde à largura angular do lóbulo principal da potência irradiada por uma antena SAR definida pelos pontos de meia potência – Figura 2.5.

$$\text{sinc}(x) = \frac{\text{sen}(kx)}{kx} \quad | \quad k \in \mathfrak{R}^* \quad (2.2)$$

A largura do lóbulo principal é definida pela configuração da antena. Se esta for composta por diversos elementos irradiadores formando uma rede linear de antenas e quanto maior a quantidade destes elementos, mais estreito será o lóbulo principal e, conseqüentemente, melhor será a resolução espacial (IEAv, 2002) – Figura 2.6.

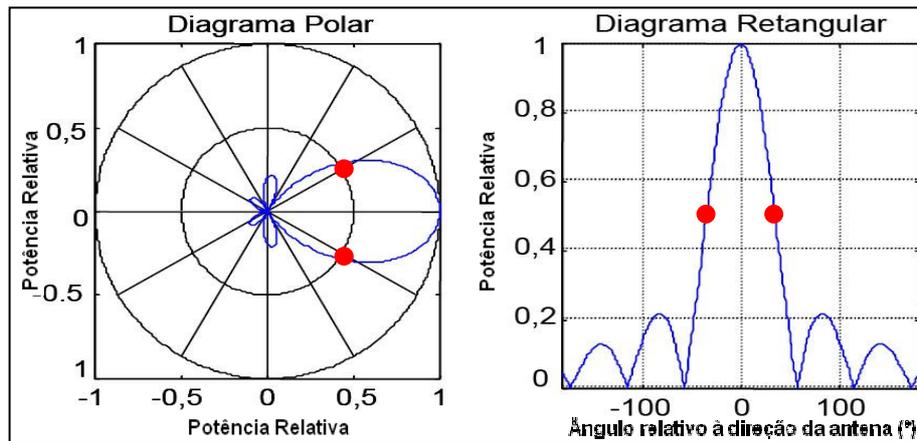


Figura 2.5 – Diagramas de irradiação da antena SAR (polar e retangular).

Fonte: adaptada de IEAv (2002).

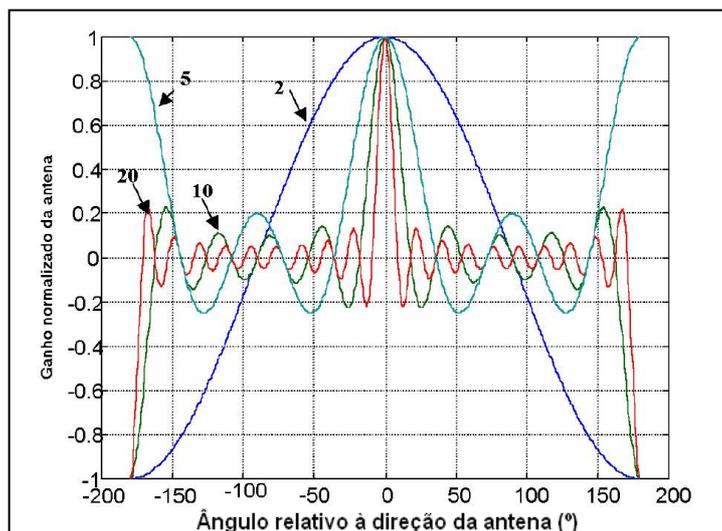


Figura 2.6 – Influência da quantidade de elementos irradiadores na largura do lóbulo principal da antena.

Fonte: IEAv (2002).

A resolução espacial do sistema SAR depende também do tipo de filtro utilizado no processamento do sinal. Existem diversos filtros que são utilizados para controlar a influência dos lóbulos secundários e que buscam manter a melhor resolução do sistema. Os mais utilizados são os filtros de Kaiser, de Hanning e de Hamming (CUMMING e WONG, 2005)

#### 2.1.4 Características das imagens SAR

Segundo Mura (2000), a imagem SAR representa o mapa de densidade de refletividade complexa. Para formar a imagem é necessário utilizar a função de resposta a alvo pontual inversa que, a partir da convolução com o sinal recebido, fornece a imagem complexa do mapa de densidade de refletividade do solo.

A informação associada a cada pixel é relacionada à energia retroespalhada por uma determinada célula de resolução no terreno. Como existem diversos espalhadores dispersos aleatoriamente em uma área iluminada por uma fonte de ondas eletromagnéticas coerentes em certo instante, a magnitude do sinal espalhado é dada pela soma vetorial das respostas de todos os difusores iluminados pelo feixe incidente (ULABY e DOBSON, 1989) – Figura 2.7.

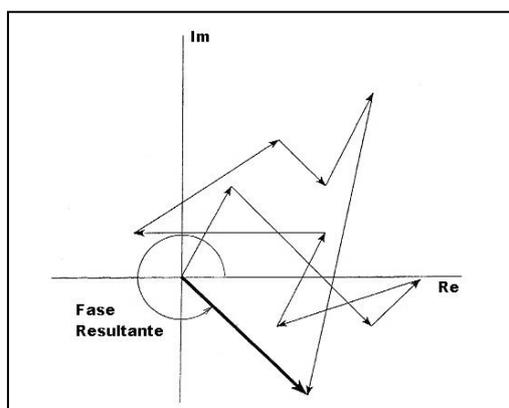


Figura 2.7 – Contribuições em amplitude e fase de cada difusor ao sinal SAR retroespalhado.

Fonte: adaptada de Raney (1998).

Mesmo em alvos homogêneos, a aleatoriedade da dispersão dos espalhadores provoca um efeito de cintilação do sinal pela variabilidade em sua amplitude denominado de ruído *speckle*. Esse tipo de ruído surge devido ao fenômeno de interferência construtiva e destrutiva entre a radiação incidente e a refletida pelos diversos espalhadores da cena (LEWIS e HENDERSON, 1998).

O ruído *speckle* deixa um aspecto de “sal e pimenta” nas imagens SAR e prejudica sua interpretação (JENSEN, 2000) – Figura 2.8. Ele não pode ser eliminado, pois é intrínseco ao sistema imageador. Por isso, vários métodos foram desenvolvidos para reduzir seu efeito. Os principais são os que se utilizam de processamento de múltiplas visadas (*multi-look*) e filtragem espacial.



Figura 2.8 – Efeito do ruído *speckle* nas imagens SAR.

Fonte: CCRS (2007).

Outro efeito observado nas imagens SAR é a variação da intensidade do sinal retroespalhado ao longo da direção em alcance (Figura 2.9). Este decaimento ocorre em virtude da perda gradual de energia do sinal que retorna ao radar conforme o aumento da distância de um ponto considerado ao sensor em tal direção. Este efeito pode ser atenuado pelo processo denominado de correção do padrão da antena.



Figura 2.9 – Efeito do decaimento do sinal ao longo da direção de alcance.

Fonte: adaptada de CCRS (2007).

## 2.2 Fatores que influenciam no retroespalhamento de microondas

Diversos fatores influenciam na intensidade do sinal de microondas retroespalhado como o grau de rugosidade da superfície, o ângulo de incidência local e as características do meio (RANEY, 1998). Eles serão comentados nos subitens a seguir, sendo o último deles relacionado ao ambiente de vegetação, foco deste trabalho.

### 2.2.1 Grau de rugosidade da superfície

Quanto mais rugosa uma superfície, menos energia do sinal incidente é perdida na direção oposta ao radar (direção da reflexão especular). Existem diversos critérios para a classificação do grau de rugosidade. O critério de Rayleigh é apresentado na [Equação 2.3](#).

$$\delta_h \underset{\text{(liso)}}{<} \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta_i} \leq \delta_h \underset{\text{(rugoso)}}{} \quad (2.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente,  $\delta_h$  é a variação média da altura da superfície,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $\theta_i$  é o ângulo de incidência.

Como a rugosidade é função do comprimento de onda, a escolha da frequência do sistema SAR é fundamental ainda na fase de planejamento das aquisições das imagens. Aronoff (2005) apresenta as bandas X, C, L e P como as mais utilizadas em sistemas de radar de abertura sintética. Estas bandas são definidas através de faixas de frequências das portadoras ([Tabela 2.1](#)).

Tabela 2.1 – Principais bandas utilizadas pelos sistemas SAR.

	Bandas			
	X	C	L	P
Frequência (f) [MHz]	12.500 - 8.000	8.000 - 4.000	2.000 - 1.000	1.000 - 300
Comprimento de onda ( $\lambda$ ) [cm]	2,4 - 3,75	3,75 - 7,5	15 - 30	30 - 100

Fonte: adaptada de Lillesand e Kiefer (2000).

### 2.2.2 Ângulo de incidência local

Considerando-se o relevo do terreno em qualquer ponto dentro da imagem, o ângulo de incidência  $\theta_i$  só é válido para imageamento de superfícies planas. Assim, deve ser avaliado o ângulo de incidência local ( $\theta_{LOC}$ ), que é aquele formado entre a iluminação do radar e a linha perpendicular ao terreno com inclinação  $\eta_{LOC}$  (Figura 2.10).

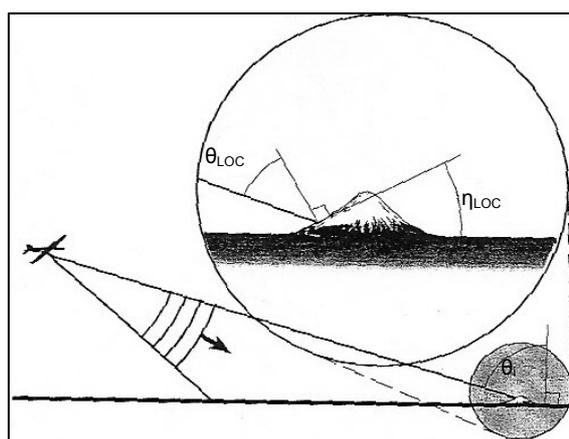


Figura 2.10 – Ângulo de incidência local.

Fonte: adaptada de Raney (1998).

Quanto menor o ângulo de incidência local, maior a amplitude do sinal de retorno, pois esta configuração favorece a devolução de grande parte da energia incidente ao sensor.

### **2.2.3 Características do meio**

A constante dielétrica complexa do meio governa a magnitude do espalhamento e a atenuação da radiação de microondas, determinando a proporção da radiação incidente que é absorvida, transmitida e espalhada.

A umidade influencia diretamente no valor da constante dielétrica. Em geral, alto teor de umidade implica em constante dielétrica alta, menor penetração da radiação de microondas no meio, menor atenuação da radiação e potencialmente maior retroespalhamento (LEWIS e HENDERSON, 1998).

Para áreas de vegetação, Dobson et al. (1995) destacam que, além do teor de umidade, a constante dielétrica é influenciada também pela temperatura, pela salinidade interna, pela densidade, pela superfície específica e pelo conteúdo químico das folhas.

Quando a radiação incidente consegue penetrar em um meio de vegetação, ocorre o espalhamento volumétrico. Neste tipo de espalhamento, diversos elementos que constituem a estrutura interna do dossel contribuem para o retroespalhamento. Porém, a influência dos difusores internos do dossel não decorre exclusivamente da variabilidade da constante dielétrica. Outras características do alvo (estrutura da vegetação) e do radar (comprimento de onda, polarização e ângulo de incidência) podem aumentar ou diminuir a intensidade do sinal que retorna ao sensor.

De forma geral, o aumento do comprimento de onda aumenta a capacidade de penetração da radiação eletromagnética no dossel. Se os componentes da

vegetação são relativamente menores que o comprimento de onda, a influência destes na interação é reduzida. Polarizações cruzadas (HV e VH) são predominantes no espalhamento volumétrico, enquanto as polarizações paralelas são dominadas pela interação direta com os alvos com predominância vertical ou horizontal (ULABY et al., 1982; BRISCO e BROWN, 1998).

Na Figura 2.11 são apresentados diversos mecanismos de espalhamento que podem ocorrer em áreas de vegetação.

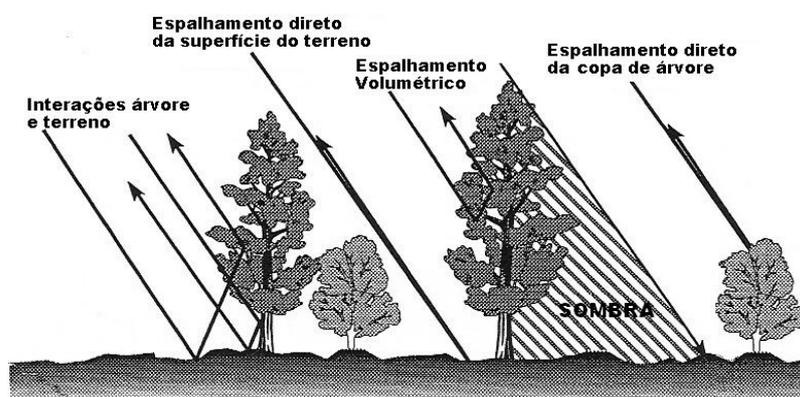


Figura 2.11 – Mecanismos de espalhamento em áreas de vegetação.

Fonte: adaptada de Raney (1998).

### 2.3 Modelagem estatística das imagens SAR

Diversos autores (FREITAS et al., 2004; FRERY et al., 1997; GOODMAN, 1986; ULABY e DOBSON, 1989) assumem o modelo multiplicativo de duas variáveis aleatórias (V.A.) independentes para explicar o comportamento estatístico dos dados SAR (Equação 2.4): X, relativa à textura da área imageada (*backscatter*) e Y, ao *speckle*. Assim:

$$Z = X.Y \quad (2.4)$$

onde  $Z$  é a variável aleatória correspondente aos dados SAR observados (retorno).

Goodman (1986) destaca certas condições para que se possa atribuir uma Distribuição Normal com média nula e mesma variância ( $N(0, \sigma^2)$ ) às partes real e imaginária do *speckle* complexo (*single look*). Já o *speckle multilook* pode ser modelado por uma Distribuição Gamma ( $\Gamma(n, n)$ ) para os dados em intensidade e Distribuição Raiz Quadrada da Gamma ( $\Gamma^{1/2}(n, n)$ ) para dados em amplitude, sendo  $n$  o número equivalente de *looks* (FRERY et al., 1997).

Ainda para casos *multilook*, Frery et al. (1997) modelam dados em amplitude para regiões homogêneas, heterogêneas e extremamente heterogêneas com as seguintes distribuições: Constante ( $C(\beta)$ ), Raiz Gamma ( $\Gamma^{1/2}(n, n)$ ) e Inversa da Raiz da Gamma ( $\Gamma^{-1/2}(\alpha, \gamma)$ ), respectivamente. Na Tabela 2.2 são apresentadas as distribuições resultantes da aplicação do modelo multiplicativo para dados em amplitude.

Tabela 2.2 – Distribuições estatísticas para imagens SAR em amplitude.

Regiões	Textura	<i>Speckle</i>	Retorno
	$X_A$	$Y_A$	$Z_A = X_A \cdot Y_A$
Homogêneas	$C(\beta)$	$\Gamma^{1/2}(n, n)$	$\Gamma^{1/2}(n, n/\beta)$
Heterogêneas	$\Gamma^{1/2}(\alpha, \lambda)$		$K_A(\alpha, \lambda, n)$
Extremamente Heterogêneas	$\Gamma^{-1/2}(\alpha, \gamma)$		$G_A^0(\alpha, \gamma, n)$

Fonte: adaptada de Frery et al. (1997).

Os parâmetros das funções mencionadas e as respectivas fórmulas são detalhados em Frery et al. (1997). A extensão para a estatística multivariada

(dados SAR polarimétricos) e formulações podem ser encontradas em Freitas et al. (2004).

Yanasse (1991) ressalta a importância da função de autocorrelação (*AutoCorrelation Function* – ACF) das imagens SAR para a discriminação entre diferentes tipos de uso da terra e para a redução do *speckle*. Além disso, é destacada a utilização da ACF na estimativa da função de espalhamento pontual do sistema, pois seus valores dependem apenas dos parâmetros do sensor.

Outra aplicação da ACF é na estimativa do número equivalente de *looks*. Correia (1998) utiliza a função de autocorrelação para determinar a vizinhança a partir da qual os pixels de uma imagem SAR em amplitude baseada em regiões homogêneas podem ser considerados independentes.

São identificadas funções distintas para os valores das ACF em dados complexos e de intensidade de acordo com o padrão da antena adotado (uniforme ou gaussiano) e se ocorre ou não problemas no movimento da plataforma no momento da aquisição dos dados. Especialmente para regiões homogêneas extensas em situação ideal de imageamento – padrão uniforme da antena e ausência de problemas no movimento da plataforma, Yanasse (1991) apresenta uma função  $(\text{sinc})^2$  para os dados SAR em intensidade.

As definições, formulações e parâmetros das ACF para cada resultante das combinações das particularidades mencionadas no parágrafo anterior podem ser encontrados em Yanasse (1991).

## **2.4 Modelos de simulação de respostas da vegetação a microondas**

Nesta subseção são apresentados alguns modelos de simulação que buscam prever o resultado do sensoriamento remoto de áreas de vegetação pelo radar.

Attema e Ulaby (1978) modelam a vegetação como uma nuvem de gotículas de água dispersas em camadas que oferecem resistência à penetração da radiação emitida pelo sensor radar, mensurada por um coeficiente de extinção. Considerando-se as contribuições para o retroespalhamento provenientes do volume da vegetação e do solo, estes autores utilizam dados coletados de culturas agrícolas para validar seus experimentos.

Ulaby et al. (1990) apresentam o *Michigan Microwave Canopy Scattering Model* (MIMICS). Entre dados geométricos e constantes dielétricas, este modelo requer mais de vinte parâmetros de entrada para a construção de uma estrutura florestal simulada. O topo de cada árvore é considerado um esferóide, enquanto os troncos e ramos são cilíndricos. Para as folhas, são adotados formatos de discos.

Sarabandi e Lin (2000) utilizam a teoria dos fractais para modelar estruturas de vegetação do tipo decíduas e coníferas e simular suas respostas ao SAR interferométrico com o intuito de estimar parâmetros físicos do alvo. A validação é realizada com dados provenientes do JPL TOPSAR (sensor aerotransportado que opera em banda C – 5.3 GHz).

Varekamp e Hoekman (2002) modelam a vegetação como uma nuvem de espalhadores isotrópicos uniformemente distribuídos. Os citados autores promovem uma extensão do trabalho de Attema e Ulaby (1978) e apresentam as formulações para o cálculo das amplitudes e fases do sinal retroespalhado para cada uma das duas antenas receptoras do sensor simulado que opera em modo interferométrico. Dados das imagens de coerência são utilizados para comparar os resultados para as bandas X e C.

A caracterização do perfil tridimensional da densidade de vegetação através de modelos físicos de distribuição de espalhadores elementares ao sinal do radar de abertura sintética interferométrico é o alvo dos estudos de Treuhaft et al.

(1996), Treuhaft et al. (2002), Treuhaft et al. (2003, 2004) e Treuhaft et al. (2006). Nestes modelos físicos, um espalhador é considerado um componente da vegetação que devolve ao equipamento radar parte do sinal transmitido por este. As contribuições em amplitude e fase de cada elemento difusor são somadas vetorialmente com as contribuições dos demais espalhadores para formar as imagens SAR complexas.

Williams (2006) apresenta o PolSARproSim, um programa que gera imagens SAR simuladas a partir de modelos de vegetação formados por cilindros, elipsóides e cones. São consideradas as contribuições do espalhamento direto pelo solo, do espalhamento volumétrico e da atenuação do sinal ao longo da trajetória na vegetação. Neste trabalho, o autor explicita todas as formulações utilizadas desde a formação da estrutura de vegetação até a geração das imagens SAR.

## **2.5 Princípios de Interferometria SAR (InSAR)**

A interferência é um fenômeno resultante da sobreposição dos efeitos de duas ou mais ondas mecânicas ou eletromagnéticas. Para a medição da interferência (interferometria) são necessárias duas grandezas: a amplitude e a fase de cada onda. Diz-se que a interferência é construtiva quando as ondas possuem fases concordantes e que a interferência é destrutiva quando estão em oposição de fase.

No início de sua operacionalização, a interferometria SAR era voltada principalmente ao mapeamento topográfico, visto que possibilita a determinação da altura dos alvos. Entretanto, suas aplicações se expandiram para monitoramento de deformações do terreno, deslizamentos de terra, detecção de mudanças, reconstrução tridimensional, classificação de uso e cobertura da terra e biomassa (CORREIA, 2005).

A técnica InSAR utiliza um par de imagens complexas (informações de amplitude e fase de cada pixel sob a representação de número complexo) da mesma cena adquiridas por duas antenas SAR separadas por uma distância adequada: a linha de base (LILLESAND e KIEFER, 2000).

A linha de base pode ser obtida por meio de duas passagens do radar ou por uma única passagem com as duas antenas do sensor instaladas e operando conjuntamente na plataforma de imageamento. Para fins de mapeamento, esta última configuração é preferível (PLAUT et al., 1999).

Na [Figura 2.12](#) é apresentada a geometria básica para o sistema de interferometria SAR. A antena  $A_1$  está a uma altura  $H$  do solo e separada da antena  $A_2$  pela linha de base  $B$ , de inclinação  $\alpha$ . Nota-se que o ponto genérico  $P$ , de elevação  $z$ , apresenta ângulo de visada  $\beta$  e afastamento  $r$  em relação à antena  $A_1$ .

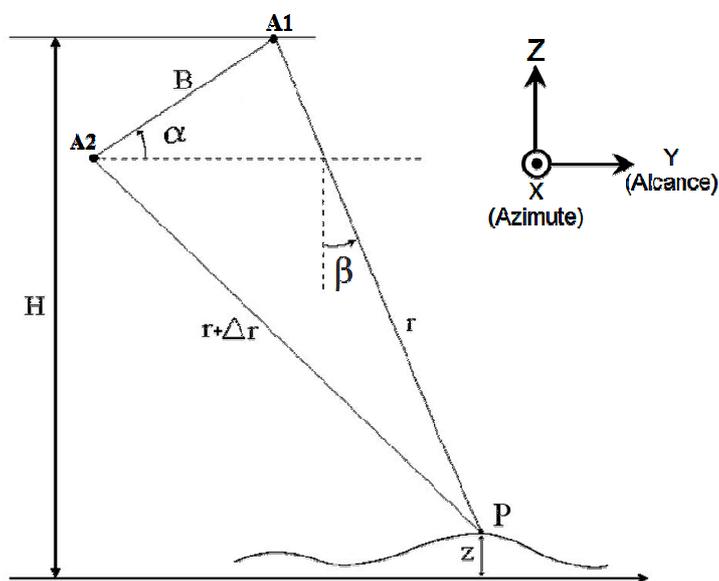


Figura 2.12 – Geometria InSAR.

Fonte: adaptada de Mura (2000).

A diferença de distância  $\Delta r$  causa uma diferença  $\Delta\Phi$  na fase segundo a [Equação 2.5](#):

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi \cdot \Delta r}{\lambda} \quad (2.5)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal transmitido.

A variação  $\Delta\Phi$  na fase depende do comprimento da linha de base e Mura (2000) afirma que sensibilidade do sinal diferença de fase é muito pequena para ser detectada para uma linha de base muito curta. Ao contrário, se a linha de base for muito longa, a fase torna-se ruidosa.

O mesmo autor ainda apresenta a relação que pode ser extraída pela Lei dos Co-senos aplicada ao triângulo  $A_1$ ,  $A_2$  e P ([Equação 2.6](#)) e a elevação do ponto P em função de  $r$  e  $\beta$  ([Equação 2.7](#)).

$$r = \frac{B^2 - \Delta r^2}{2(\Delta r + B \cdot \text{sen}(\alpha - \beta))} \quad (2.6)$$

$$z(r, \theta) = H - r \cdot \cos\beta \quad (2.7)$$

Somente após um rigoroso registro das duas imagens SAR complexas originais é que se pode gerar a imagem interferométrica. A precisão do registro deve ser menor que 0,1 da dimensão linear do pixel (HELLWICH, 1999). Cada pixel da imagem interferométrica é obtido pela multiplicação da imagem complexa ( $S_1$ ) gravada pela antena  $A_1$  com a imagem complexa conjugada ( $S_2^*$ ) gravada pela antena  $A_2$ .

A imagem interferométrica, por conseguinte, carrega a informação da diferença de fase em seu argumento e a imagem correspondente a essa diferença (interferograma) é obtida através da [Equação 2.8](#).

$$\text{Interferograma} = \text{argumento} (S_1 \cdot S_2^*) \quad (2.8)$$

Onde  $S_1$  é a imagem complexa gravada pela antena principal e  $S_2^*$  é a imagem complexa conjugada gravada pela antena secundária.

O caráter cíclico da fase (módulo de  $2\pi$ ) gera padrões de franjas dobradas na imagem de fase interferométrica, denominada também de interferograma – [Figura 2.13](#). Os ruídos presentes nesta imagem são ocasionados principalmente pelo ruído *speckle*, ruído térmico do sistema, descorrelação espacial, processo de registro, descorrelação temporal (no caso de duas passagens), processamento SAR e amostragem (MURA, [2000](#)).

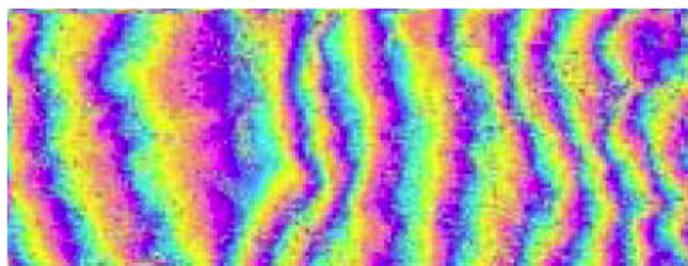


Figura 2.13 – Padrões de franjas do interferograma.

Fonte: Nievinski e Souza ([2005](#)).

Um importante produto da interferometria é a imagem de coerência ([Figura 2.14](#)). A coerência é o módulo do coeficiente de correlação complexa ( $\gamma_c$ ), que é definido pela [Equação 2.9](#) (TOUZI et al., [1999](#)):

$$\gamma_c = \frac{E(S_1 S_2^*)}{\sqrt{E(|S_1|^2) \cdot E(|S_2|^2)}} \quad (2.9)$$

onde  $E(x)$  é o valor esperado de  $x$ .

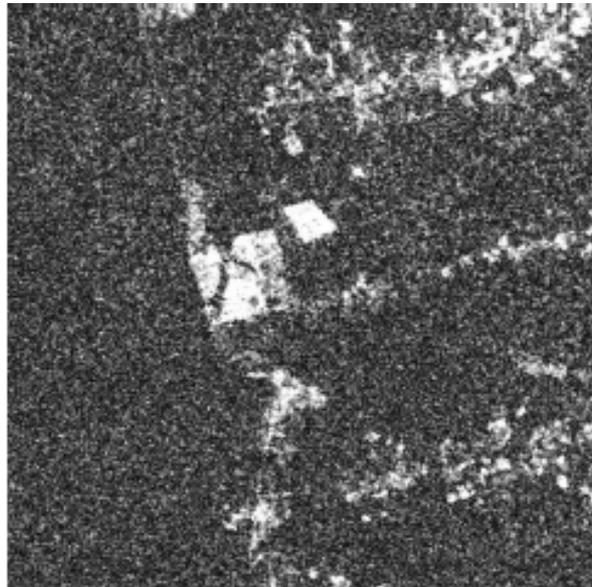


Figura 2.14 – Ilustração de imagem de coerência.

Fonte: Gaboardi (2002).

Na prática, o coeficiente de correlação complexa pode ser estimado pela Equação 2.10 (QUARZEDDINE, 2002).

$$\hat{Y}_c = \frac{\langle S_1 S_2^* \rangle}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} \quad 0 \leq |\hat{Y}_c| \leq 1 \quad (2.10)$$

onde  $\langle \dots \rangle$  indica um operador de média espacial.

Segundo Touzi et al. (1999), a imagem de coerência pode ser utilizada para a verificação da qualidade do interferograma, classificação de alvos, a medição da relação sinal/ruído de um dado sistema, entre outras finalidades. Gaboardi (2002) utiliza este tipo de imagem para a classificação do uso da terra em área de floresta.

## 2.6 Método da bisseção para solução de equações transcendentais

Seja  $f(x) = 0$  uma equação transcendente, ou seja, uma equação que não envolve apenas operações algébricas em termos de  $x$ , mas também funções que podem ser substituídas por uma série infinita desta variável (funções exponencial, trigonométricas etc.). Define-se raiz da equação transcendente  $f(x) = 0$ , o valor de  $x$  que torna  $f(x)$  nula.

Dieguez (1992) e Spiegel (1992) apresentam diversas técnicas numéricas para solução de equações algébricas e transcendentais, como os métodos da bisseção, de Newton-Raphson, da iteração linear etc.

Dos métodos que utilizam um intervalo onde está contida a raiz que se deseja calcular, Dieguez (1992) afirma que o método da bisseção é o mais simples, seguro e de convergência garantida dentro dos limites deste intervalo. Tal método pode ser computacionalmente assim resumido (SPIEGEL, 1992):

- Determinar os limites  $[a,b]$  do intervalo de procura da raiz, sendo  $a < b$ , em que  $f(x)$  muda de sinal, ou seja,  $f(a).f(b) < 0$ ;
- Se  $f(x)$  é contínua em  $[a,b]$  e este intervalo foi corretamente determinado, existe um valor  $x_1$ , tal que  $a < x_1 < b$ , para o qual  $f(x_1) = 0$ ;
- Calcula-se  $m$ , ponto médio do intervalo  $[a,b]$ , ou seja,  $m = (a + b)/2$ ;
- Calcula-se  $f(a).f(m)$  e, se  $f(a).f(m) < 0$ , então  $b = m$ . Caso contrário,  $a = m$ ;
- Repete-se o processo até que seja atingida uma precisão pré-definida, ou, se não existir raiz no intervalo  $[a,b]$  por erro na

determinação deste intervalo, seja alcançado um critério de parada (número máximo de repetições, tempo de processamento, acionamento de uma determinada tecla etc.).



### **3. UM PROTÓTIPO PARA SIMULAÇÃO DE RESPOSTA DE ESTRUTURAS SIMPLIFICADAS DE VEGETAÇÃO AO SAR INTERFEROMÉTRICO**

Nesta seção é apresentado um protótipo de simulador SAR que tem por objetivo gerar imagens complexas (*single look complex* – SLC) a partir de um modelo matemático para a resposta de difusores elementares distribuídos espacialmente em estruturas simplificadas de vegetação. As imagens SLC são geradas por duas antenas de um SAR virtual operado em modo interferométrico de uma passagem a partir de uma plataforma aerotransportada.

As seguintes particularidades são adotadas para a simulação:

- A estrutura de vegetação é formada pela dispersão de espalhadores elementares em coordenadas X, Y, Z locais, seguindo uma distribuição uniforme nas três dimensões do espaço e dispostos em três blocos contíguos formados por três camadas cada um;
- Nenhum dos difusores domina os demais em termos de retroespalhamento e não há múltiplas interações complexas entre eles;
- Admitem-se as condições de isotropia, de conservação de energia e de padrão da antena uniforme;
- Somente o mecanismo de espalhamento volumétrico dos difusores é considerado;
- A atenuação do sinal é função da banda radar escolhida e independe da densidade de espalhadores nas camadas dos blocos. Em geral, embora a extinção do sinal seja maior quanto mais densa

é a distribuição dos espalhadores antes deste alcançar determinada porção interna da estrutura, tal fato não é considerado no presente estudo. Assim, o coeficiente correspondente a tal atenuação é constante e determinado pela frequência da portadora (Bandas X, L ou P);

- A existência ou a ausência de partes de blocos à vanguarda de uma determinada camada (presente em um bloco adjacente mais afastado da plataforma) não influi nas respostas em amplitude e fase dos espalhadores localizados nesta camada considerada;
- Durante o vôo simulado, não há problemas dos ângulos de atitude da aeronave, que segue sempre a direção de azimute (eixo X) com altitude constante;
- A curvatura da Terra e geometrias que causam o sombreamento não são consideradas;
- Admite-se a função *sinc* com abertura de 3 dB para o espalhamento de um alvo pontual nas direções alcance e azimute, sem influência de filtros para atenuação dos lóbulos secundários (Hamming, Kaiser etc.); e
- Admite-se a equivalência entre resolução espacial e espaçamento de pixel.

O protótipo, desenvolvido em linguagem e programação IDL, possui três módulos principais: construção da estrutura de vegetação, geração das imagens complexas e cálculo dos produtos interferométricos (interferograma e imagem de coerência). Estes módulos encontram-se ilustrados na [Figura 3.1](#) e são apresentados nas subseções seguintes.

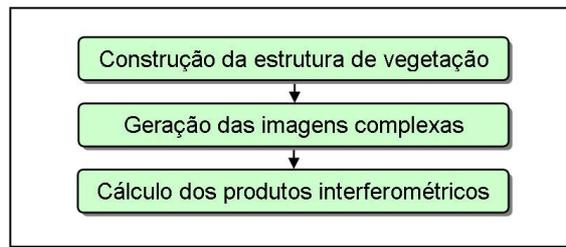


Figura 3.1 – Visão geral dos principais módulos do protótipo.

### 3.1 Módulo de construção da estrutura de vegetação

A distribuição dos espalhadores elementares parte do pressuposto de que o corpo da vegetação é formado por três blocos adjacentes dispostos sobre relevo plano. A altura da vegetação simulada para um determinado bloco ( $H_n$  |  $n = 1,2,3$ ) pode variar independentemente das outras partições.

A [Figura 3.2](#) ilustra que cada bloco é formado por três camadas internas de mesma extensão na direção de azimute, mas de dimensões variáveis na direção de alcance e de espessuras definidas pelos patamares superior e inferior. Estes patamares são mensurados por uma porcentagem da altura do bloco a que pertence a camada considerada e os elementos difusores são uniformemente distribuídos no interior desta com densidade (difusores/ $m^3$ ) definida pelo usuário.

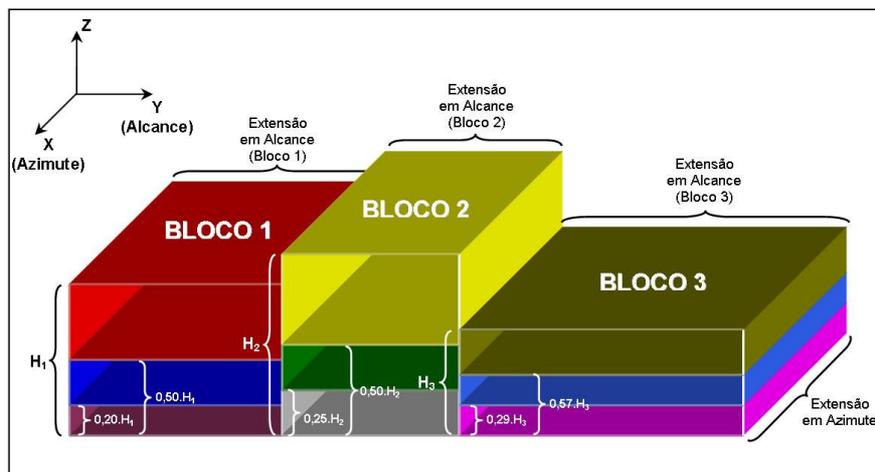


Figura 3.2 – Exemplo de estrutura de vegetação.

A flexibilidade na definição dos parâmetros anteriormente descritos além de proporcionar partições com dimensões distintas, também viabiliza a opção de conservação da densidade ou da quantidade de espalhadores por camada.

Na [Tabela 3.1](#) é apresentado o resumo dos parâmetros que devem ser fixados para a construção das estruturas de vegetação.

Tabela 3.1 – Parâmetros para a construção das estruturas de vegetação.

<b>Parâmetro</b>	<b>Observação</b>
Extensão em azimute	[m]
Extensão em alcance dos blocos 1, 2 e 3	[m]
Altura dos blocos 1, 2 e 3	[m]
Patamar inferior dos blocos 1, 2 e 3	[%]
Patamar superior dos blocos 1, 2 e 3	[%]
Densidade da camada inferior dos blocos 1, 2 e 3	[espalhadores/m <sup>3</sup> ]
Densidade da camada intermediária dos blocos 1, 2 e 3	[espalhadores/m <sup>3</sup> ]
Densidade da camada superior dos blocos 1, 2 e 3	[espalhadores/m <sup>3</sup> ]

O produto disponibilizado por este módulo é um arquivo binário contendo os seguintes dados que serão utilizados na etapa de geração das imagens complexas:

- quantidade total de espalhadores;
- extensão em azimute;
- extensão em alcance e altura de cada bloco; e
- lista das coordenadas X, Y, Z locais de todos os difusores elementares dos três blocos gerados pelo algoritmo.

### 3.2 Módulo de geração das imagens complexas

A finalidade do módulo de geração das imagens complexas é disponibilizar imagens SLC oriundas de um sensor SAR virtual aerotransportado que “imageia” a estrutura de vegetação construída no módulo anterior. Considera-se que este sensor possui duas antenas e é operado em modo interferométrico de uma passagem.

É necessário que o usuário forneça alguns parâmetros básicos relacionados ao sistema imageador para, de acordo com o modelo matemático proposto (apresentado na subseção 3.4 deste trabalho), calcular as contribuições em amplitude e fase de cada difusor da estrutura de vegetação e formar a imagem complexa.

A geometria de aquisição segue a configuração apresentada na [Figura 2.12](#). A antena  $A_1$  é definida como principal (*master*) e a antena  $A_2$ , como secundária (*slave*). A altura da plataforma em relação ao solo e o ângulo de visada em alcance próximo são suficientes para posicionar a antena principal em relação ao primeiro bloco da estrutura de vegetação, estabelecendo-se suas coordenadas no mesmo sistema local utilizado na distribuição dos espalhadores elementares. Na seqüência, a antena secundária é disposta com uma inclinação em relação à horizontal e distanciada de  $A_1$  por uma linha de base.

Os parâmetros inerentes ao sensor são a banda radar de referência, o comprimento de onda da portadora, a fase inicial do sistema e as resoluções em alcance e azimute. A nomeação da banda radar está relacionada ao coeficiente de extinção do sinal presente na formulação do modelo matemático para a ponderação da amplitude do sinal retroespalhado por cada difusor. Os dois parâmetros seguintes, aliados à geometria de aquisição, são importantes para a definição das contribuições na fase do sinal resultante.

Especificamente para as resoluções em alcance e azimute, optou-se por determiná-las como dados diretos de entrada para o protótipo, por serem parâmetros mais facilmente disponíveis do que aqueles relacionados à construção das antenas SAR e à modulação linear em frequência da portadora (*chirp*). A partir destas resoluções, a estrutura de vegetação é subdividida em células com dimensões em alcance e azimute utilizadas no espaçamento de pixels das imagens SLC, nas respectivas direções.

As resoluções em alcance e azimute também são empregadas na determinação dos respectivos coeficientes  $K_x$  e  $K_y$  das funções *sinc* (Equação 2.2) com abertura de 3 dB para o espalhamento de um alvo pontual nestas direções. Estas funções têm por finalidade provocar a correlação espacial de pixels vizinhos pela ponderação da amplitude do sinal retroespalhado por cada difusor elementar na formação do dado complexo de uma célula central definida por uma janela de influência da função *sinc*.

O coeficiente  $K$  altera o formato da função estabelecida para o espalhamento de um alvo pontual neste trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.3 para duas dimensões.

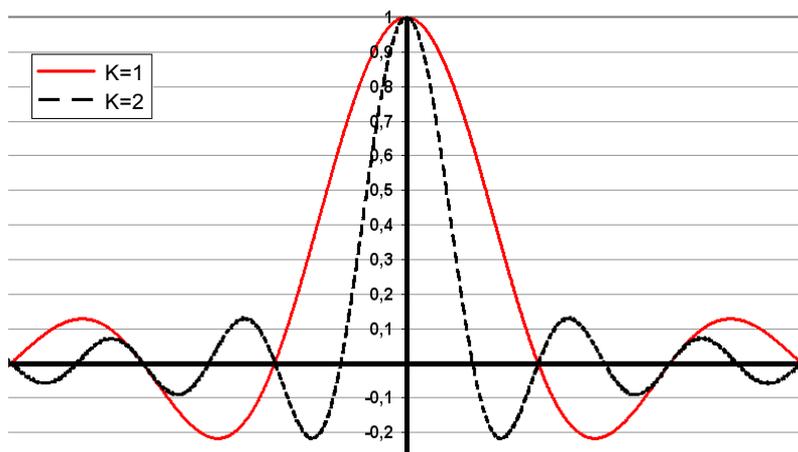


Figura 3.3 – Efeito da alteração do valor do coeficiente da função *sinc*.

Como a abertura de 3 dB corresponde à largura angular do lóbulo principal da potência irradiada por uma antena SAR definida pelos pontos de meia potência, as amplitudes dos espalhadores das bordas da célula de resolução devem ser ponderados por um fator  $(\frac{1}{2})^{0,5} \approx 0,7071$ . O valor máximo é o unitário, reservado aos espalhadores posicionados no eixo da célula central.

Na [Figura 3.4](#) é apresentado um exemplo para a determinação do valor de ponderação da *sinc* para um ponto P, situado a uma distância d deste eixo na direção em alcance.

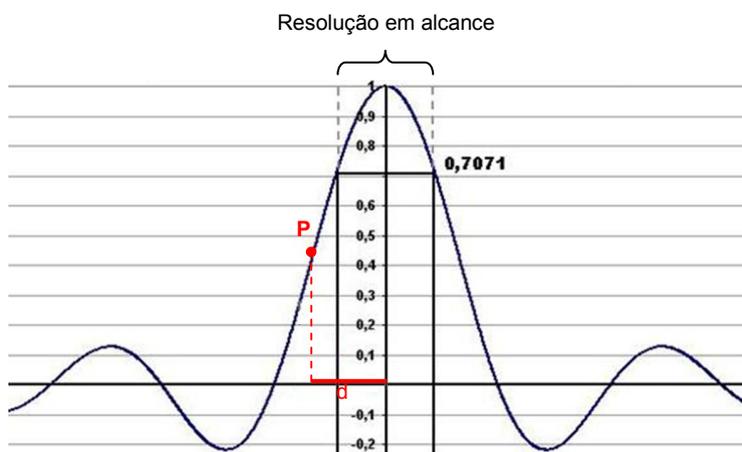


Figura 3.4 – Ponderação da amplitude pela *sinc* para um ponto P.

A fim de manter a contribuição correta para a fase resultante, é somado  $\pi$  à fase do difusor ponderado por um valor negativo da função.

Denominando-se a resolução em azimuth como  $\Delta x$ , o coeficiente  $K_x$  correspondente pode ser calculado pela [Equação 3.1](#).

$$\frac{\text{sen}(K_x \cdot \frac{\Delta x}{2})}{K_x \cdot \frac{\Delta x}{2}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \quad (3.1)$$

Dado que  $\Delta x$  é uma constante, desenvolvendo-se a [Equação 3.1](#) até a forma  $f(K_x) = 0$ , chega-se à [Equação 3.2](#), que é uma equação transcendente.

$$f(K_x) = \text{sen}\left(K_x \cdot \frac{\Delta x}{2}\right) - \frac{\sqrt{2}}{4} K_x \cdot \Delta x = 0 \quad (3.2)$$

Analogamente, para a determinação do coeficiente  $K_y$ , tem-se a [Equação 3.3](#).

$$f(K_y) = \text{sen}\left(K_y \cdot \frac{\Delta y}{2}\right) - \frac{\sqrt{2}}{4} K_y \cdot \Delta y = 0 \quad (3.3)$$

Através do método da bissecção, são determinados os valores de  $K_x$  e  $K_y$  após a definição da tolerância e do número máximo de iterações (critério de parada). Em seguida, é calculada a composição tridimensional das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimuth pela multiplicação das respectivas *sinc*. A [Figura 3.5](#) ilustra o aspecto da função 3D resultante.

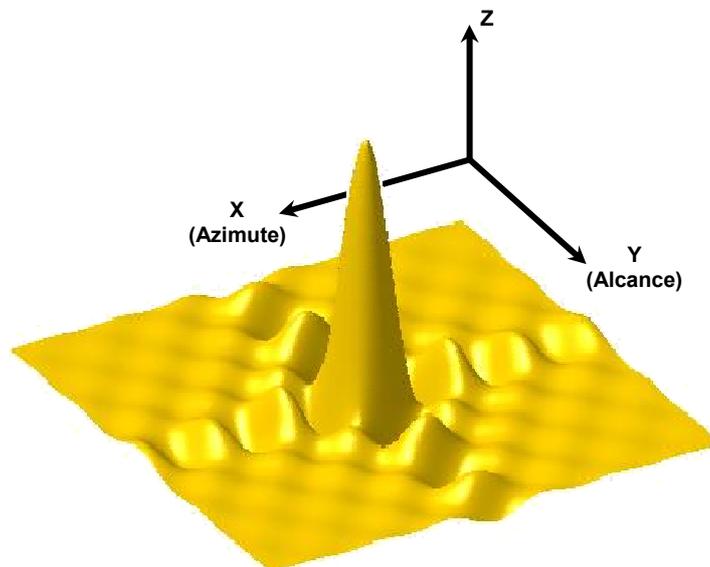


Figura 3.5 – Composição das funções *sinc* nas direções de alcance e azimuth.

O protótipo permite que os espalhadores elementares, inicialmente dispostos em uma superfície plana, sejam adaptados sobre um modelo digital do terreno (MDT), com as mesmas resoluções em alcance e azimuth definidas para as imagens complexas. Esta operação é efetuada somando-se o valor de cada célula de resolução do MDT às cotas de todos os pontos presentes nas células equivalentes da estrutura de vegetação.

O ângulo de incidência local ( $\theta_{LOC}$ ) para cada espalhador presente em uma célula de resolução é calculado pela [Equação 3.4](#), que considera o ângulo de incidência (visada) para o difusor P ( $\theta_i = \beta_i$ ), a inclinação ( $\eta_{LOC}$ ) determinada no MDT pela diferença de altitudes das células a vanguarda ( $h_{vanguarda}$ ) e retaguarda ( $h_{retaguarda}$ ) adjacentes e a resolução espacial na direção de alcance ( $\Delta y$ ) ([Figura 3.6](#))

$$\theta_{loc} = \theta_i - \arctg\left(\frac{h_{vanguarda} - h_{retaguarda}}{2\Delta y}\right) \quad (3.4)$$

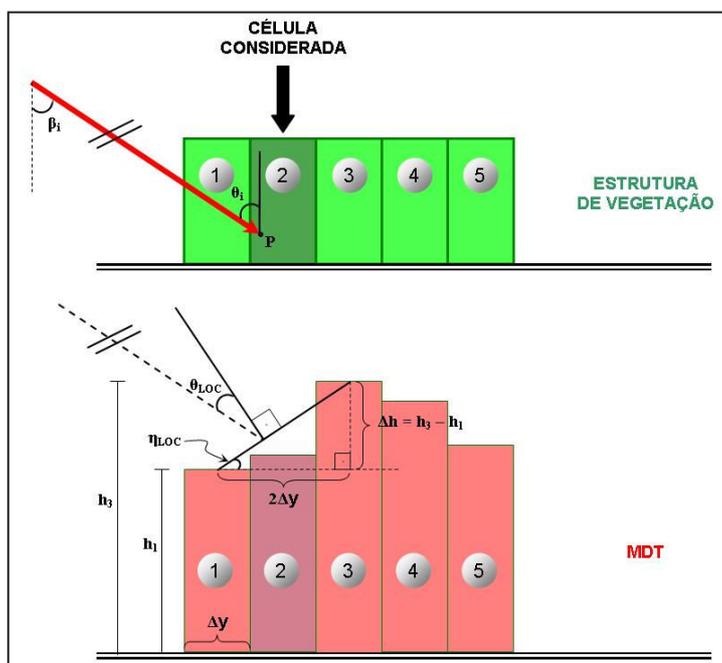


Figura 3.6 – Exemplo de configuração para o ângulo de incidência local.

Após a adaptação do MDT ao modelo de vegetação, a composição tridimensional das *sinc* em alcance e azimute – devidamente delimitada por uma janela de influência ( $n \times n$ ), onde  $n$  é um número ímpar maior ou igual a 1 – é programada para percorrer a estrutura de vegetação desde o alcance próximo até o alcance distante, deslocando-se por todas as células de resolução, até que toda a “área de imageamento” seja coberta.

No momento em que a composição das funções de espalhamento pontual nas direções de alcance e azimute se coloca sobre uma região delimitada pela janela de influência, as contribuições em amplitude e fase de todos os espalhadores sob sua região de ação são somadas para formar o pixel complexo correspondente à célula de resolução central.

Na [Tabela 3.2](#) é apresentado o resumo dos parâmetros da geometria de aquisição, do sensor e do processamento dos dados.

Tabela 3.2 – Parâmetros da geometria de aquisição, do sensor e do processamento dos dados.

Parâmetro		Observação
Geometria de aquisição	Ângulo de visada inicial (alcance próximo)	[°]
	Inclinação entre as antenas	[°]
	Altitude da plataforma (antena $A_1$ )	[m]
	Linha de base	[m]
Sensor	Banda radar	X, L ou P
	Comprimento de onda	[cm]
	Fase inicial do sistema	[°]
	Resolução em azimute	[m]
	Resolução em alcance	[m]
Processamento	Janela de influência composição <i>sinc</i> 3D	$n \times n$
	Modelo digital do terreno	arquivo

### 3.3 Módulo de cálculo dos produtos interferométricos

A finalidade deste módulo é disponibilizar o interferograma e a imagem de coerência a partir dos dados de amplitude e fase das imagens complexas geradas na etapa anterior.

Como o valor complexo de cada pixel das imagens simuladas das antenas 1 e 2 é calculado simultaneamente para a mesma célula de resolução do “terreno”, sob condições controladas da plataforma virtual, as imagens SLC são perfeitamente registradas. Tal circunstância permite a aplicação direta das fórmulas apresentadas na [Equação 2.8](#) e na [Equação 2.10](#), para se obter o interferograma e a imagem de coerência, respectivamente.

As dimensões de um filtro  $f_x \times f_y$  – onde  $f_x$  corresponde à direção de azimute e  $f_y$ , à de alcance – devem ser especificadas para que o operador de média espacial da [Equação 2.10](#) possa ser viabilizado. Este mesmo filtro é aplicado no interferograma bruto para gerar o interferograma suavizado.

A fim de utilizar as ferramentas de análise de um programa de processamento de imagens de uso corrente, optou-se por incluir neste módulo um algoritmo para salvar todos os dados gerados pelo protótipo (imagens complexas, dados em amplitude e em intensidade, coerência e interferogramas bruto e filtrado) no formato proprietário do ENVI (*Environment for Visualizing Images*).

O usuário deve especificar um prenome (sem extensão) que acompanhará a denominação dos arquivos completados por sufixos identificadores do tipo da imagem. O programa gera automaticamente o cabeçalho (*header*) e grava as imagens respectivas.

Na [Tabela 3.3](#) são apresentados os últimos parâmetros que o usuário deve fornecer ao protótipo de simulador para a geração dos produtos finais.

Tabela 3.3 – Parâmetros da geometria de aquisição, do sensor e do processamento dos dados.

Parâmetro	Observação
Dimensão do filtro do operador de média espacial (azimute)	$f_x$
Dimensão do filtro do operador de média espacial (alcance)	$f_y$
Prenome dos arquivos	sem extensão

### 3.4 Modelo matemático para as respostas dos difusores elementares

O modelo matemático proposto para as contribuições em amplitude e fase da cada difusor elementar ao sinal retroespalhado é apresentado nesta subseção. Este modelo é uma adaptação dos conceitos apresentados por Attema e Ulaby (1978), Treuhaft et al. (1996) e Varekamp e Hoekman (2002).

Baseado no termo exponencial da Equação 2.1, considera-se que cada difusor contribui em maior ou menor grau para o módulo do sinal complexo de retorno em função da distância percorrida pela da onda eletromagnética no interior da estrutura de vegetação até alcançá-lo (Figura 3.7) e também pelo valor do coeficiente de atenuação adotado.

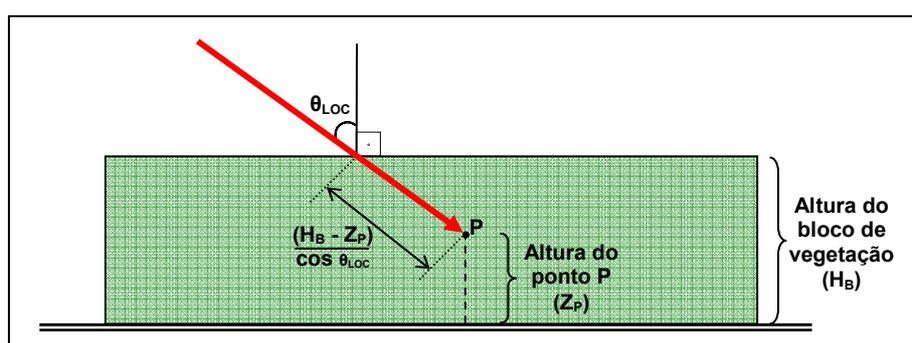


Figura 3.7 – Determinação da distância percorrida pela onda eletromagnética até alcançar um ponto P no interior da estrutura de vegetação.

O aumento do comprimento de onda aumenta a capacidade de penetração da radiação eletromagnética no dossel. Quanto maior o comprimento de onda da portadora, menor deverá ser o valor do coeficiente de atenuação  $\sigma$  para que difusores mais internos à estrutura possam influenciar com maior peso na amplitude do sinal retroespalhado. Em conseqüência, os valores 0,01, 0,02 e 0,1 foram adotados para estes coeficientes das bandas P, L e X, respectivamente.

Ratifica-se que, neste trabalho, o coeficiente de extinção não depende da densidade de espalhadores presentes nas camadas das estruturas simplificadas de vegetação. Seu valor é constante e depende apenas da banda radar em que o sensor virtual opera.

Para ilustrar a influência do coeficiente de atenuação, o gráfico da [Figura 3.8](#) apresenta a contribuição de um difusor para a formação da amplitude do sinal resultante, em termos de porcentagem. Esta contribuição é apresentada em função da distância percorrida pela onda eletromagnética no interior da estrutura de vegetação até alcançar o espalhador e também em função da banda escolhida.

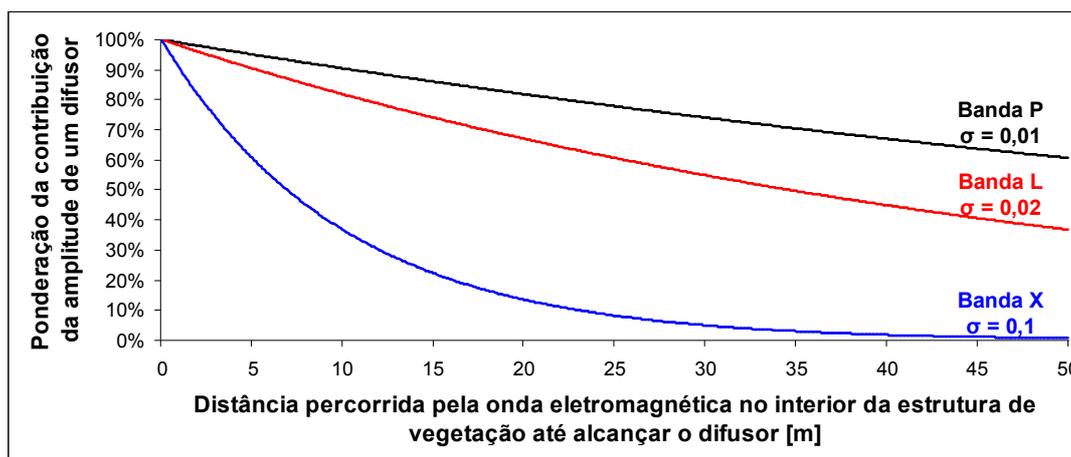


Figura 3.8 – Influência do coeficiente de atenuação na amplitude do sinal.

Realizando as devidas substituições de variáveis na fase da onda, expressa na [Equação 2.1](#), e reunindo as ponderações para a amplitude do sinal retroespalhado por cada difusor explicitados nesta e na subseção 3.2, chega-se à formulação adotada para o cálculo da resposta do i-ésimo espalhador ( $C_i$ ) presente na estrutura de vegetação – [Equação 3.5](#).

$$C_i = \left( \frac{\text{sen}(k_x \cdot d_{xi})}{k_x \cdot d_{xi}} \cdot \frac{\text{sen}(k_y \cdot d_{yi})}{k_y \cdot d_{yi}} \right) \cdot \exp \left[ - \left( \frac{\sigma \cdot (H_{ni} - Z_i)}{\cos \theta_{LOCi}} \right) \right] \cdot \exp \left[ j \cdot \left( \frac{4 \cdot \pi \cdot r_i}{\lambda} + \Phi_0 \right) \right] \quad (3.5)$$

onde:

- $k_x$  e  $k_y$  são os coeficientes das funções de espalhamento para alvo pontual (*sinc*) nas direções de azimuth e alcance, respectivamente;
- $d_{xi}$  e  $d_{yi}$  são as distâncias do i-ésimo espalhador ao eixo central da composição das funções de espalhamento para alvo pontual (*sinc*) nas direções de azimuth e alcance, respectivamente;
- $\sigma$  é o coeficiente de atenuação do sinal
- $H_{ni}$  é a altura do bloco a que pertence o i-ésimo espalhador;
- $Z_i$  é a altura do i-ésimo espalhador;
- $\theta_{LOCi}$  é o ângulo de incidência local para o i-ésimo espalhador;
- $j = \sqrt{-1}$ ;
- $r_i$  é a distância do i-ésimo espalhador até a antena considerada;
- $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente; e

- $\Phi_0$  é a fase inicial do sistema.

No caso de ser escolhida uma janela de influência das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimute de dimensão 1 x 1 (células de resolução independentes), o modelo matemático para o cálculo da resposta do i-ésimo espalhador ( $C_i$ ) assume a formulação da [Equação 3.6](#), em que a composição das funções *sinc* é substituída pelo termo  $1/N$ , onde  $N$  é o número de espalhadores da célula de resolução considerada.

$$C_i = \left(\frac{1}{N}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\sigma \cdot (H_n - z_i)}{\cos\theta_{\text{LOC}_i}}\right)\right] \cdot \exp\left[j \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_i}{\lambda} + \Phi_0\right)\right] \quad (3.6)$$

As Equações [3.5](#) e [3.6](#) englobam a amplitude e a fase do i-ésimo espalhador expressa na notação de Euler para números complexos ( $C_i = A_i \cdot e^{j\Phi_i}$ ). A totalização, que é uma soma vetorial, efetuada para formar cada pixel das imagens complexas, conforme o deslocamento da composição das funções de espalhamento para alvos pontuais nas direções de alcance e azimute, é dada pelo somatório da [Equação 3.7](#).

$$A \cdot e^{j\Phi}_{\text{imagem SLC (pixel)}} = \sum_{i=1}^N C_i = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{j\Phi_i} \quad (3.7)$$

onde  $N$  é a quantidade de espalhadores que contribuem efetivamente para a formação do sinal complexo do pixel correspondente à célula de resolução central da referida janela.



## 4. PROVAS DE CONCEITO: EXPERIMENTOS BARREIRAS E TAPAJÓS

Nesta seção, a validade da hipótese de trabalho é verificada pelos experimentos Barreiras e Tapajós. Eles são assim denominados por serem os produtos das simulações baseados em dados reais destas regiões dos Estados da Bahia e do Pará, respectivamente.

Cabe ressaltar que, embora o protótipo permita a definição de três camadas distintas por bloco para análise de diferentes configurações, nestes experimentos essa potencialidade não foi completamente explorada. Nos testes, a definição de parâmetros idênticos para camadas distintas implica, na prática, a junção destas partições.

### 4.1 Experimento Barreiras

#### 4.1.1 Caracterização da região de teste

A região de teste deste experimento está localizada no oeste do Estado da Bahia, em área agrícola do município de Barreiras entre as longitudes W  $45^{\circ} 40'$  e  $45^{\circ} 55'$  e latitudes S  $11^{\circ} 40'$  e  $11^{\circ} 55'$ . (Figura 4.1).

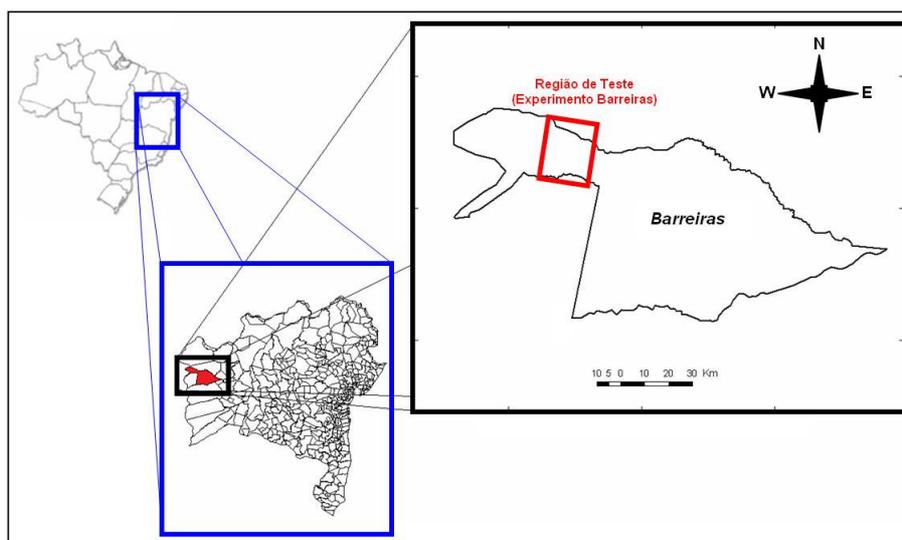


Figura 4.1 – Localização da região de teste (experimento Barreiras).

Segundo Silva (2007), em abril de 2005, essa região de relevo plano apresentava pivôs de cultura de algodão no início da fase de florescimento, com altura entre 1,5-1,7 m. Tal cultura encontrava-se com o máximo de biomassa e cobertura foliar, caracterizando grande homogeneidade e mínima exposição do solo entre as linhas de plantio (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Campos de algodão da região de teste (experimento Barreiras).

Fonte: Silva (2007).

As peculiaridades mencionadas anteriormente motivaram a escolha dessa área, pois, devido ao grau de desenvolvimento da cultura de algodão e grande cobertura do solo, espera-se que o retroespalhamento seja influenciado principalmente pela interação da radiação de microondas com a vegetação e pouco influenciada pelas propriedades do solo.

#### 4.1.2 Materiais e métodos

Segundo Defesanet (2003), o Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM) possui três aeronaves Embraer RJ-145, denominadas de R99-B, com sensores SAR embarcados e que estão sob a responsabilidade do 6º Grupo de Aviação, baseado em Anápolis, Estado de Goiás (Figura 4.3).

Estes sensores são capazes de operar com a banda L (HH, HV, VH, VV) e banda X (HH) ao mesmo tempo. Duas antenas da banda X podem operar juntas em modo interferométrico enquanto duas antenas da banda L, uma de

cada lado da aeronave, podem adquirir imagens à direita ou à esquerda da direção de voo (Figura 4.4).



Figura 4.3 – Aeronave Embraer RJ-145 (R-99B) do SIVAM.

Fonte: adaptada de Defesanet (2003),



Figura 4.4 – a) Localização das antenas SAR no R99-B. b) Antena da Banda L.

Fonte: adaptada de Costa et al. (2007).

Para este experimento, três imagens SLC da banda L (1,28 GHz) nas polarizações HH, HV e VV oriundas do sensor SAR R-99 serviram de base para a comparação com os produtos gerados pelo protótipo de simulador desenvolvido neste trabalho, através de análises estatísticas dos dados em amplitude e em intensidade.

As três imagens foram obtidas em 05 de abril de 2005, durante a campanha de simulação de aquisição de dados para o Projeto MAPSAR (MURA et al., 2007), em sobrevôo de um trecho da região de teste – área agrícola ilustrada na [Figura 4.5](#). Todas possuem pixel de 2,5 e 1,0 m de resolução espacial no terreno nas direções de alcance e azimute, respectivamente. Os ângulos de visada variam de 61° a 71°.

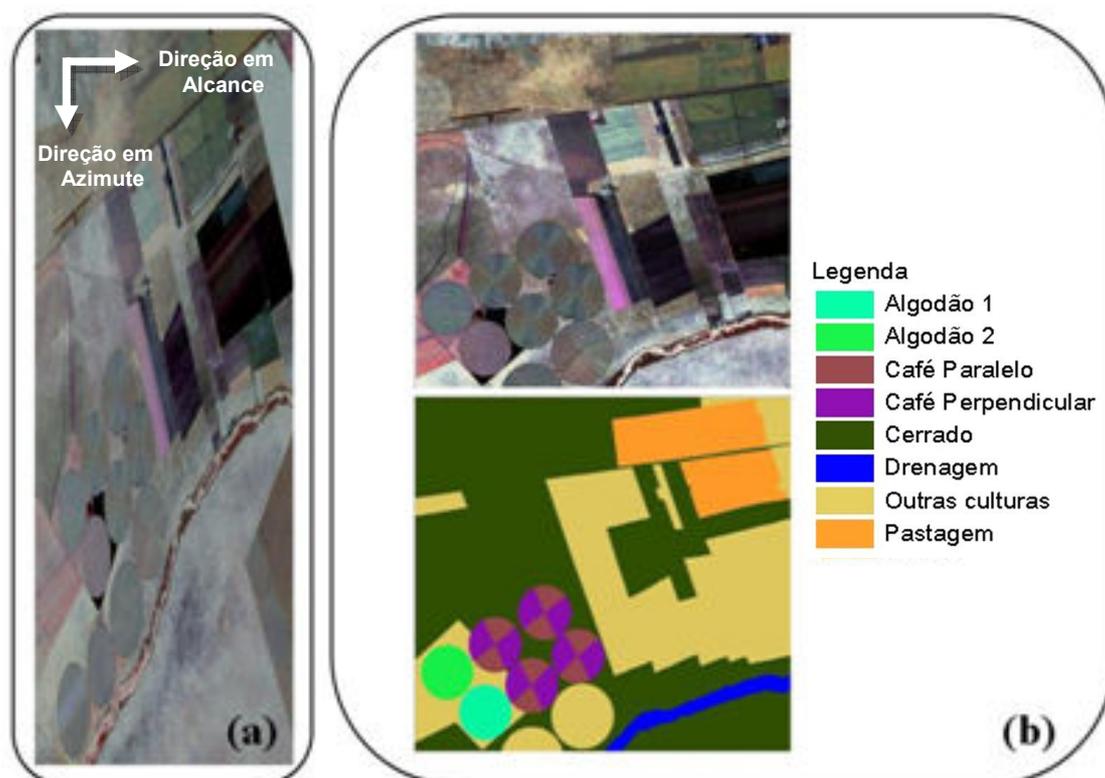


Figura 4.5 – Imagens SAR R-99: a) composição em alcance inclinado ( $L_{VV}$  (R),  $L_{HV}$  (G),  $L_{HH}$  (B)). b) identificação das culturas na mesma composição em alcance no terreno.

Fonte: adaptada de Silva (2007).

O procedimento inicial do experimento Barreiras foi a seleção nas imagens SLC em alcance inclinado de um setor de 50 x 50 pixels da região central do pivô definido como “Algodão 1”. Esse procedimento buscou garantir a distinção da amostra como uma cultura de algodão com as mesmas características

citadas por Silva (2007). Efetuou-se a seleção nas imagens em alcance inclinado para preservar suas estatísticas originais.

Os difusores elementares foram distribuídos espacialmente, utilizando-se o módulo de construção da estrutura de vegetação com os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros para a estrutura de vegetação (experimento Barreiras).

Parâmetro	Valor
Extensão em azimute	50 m
Soma das extensões em alcance dos blocos 1, 2 e 3	125 m
Altura dos blocos 1, 2 e 3	1,6 m
Patamar inferior dos blocos 1, 2 e 3	25%
Patamar superior dos blocos 1, 2 e 3	50%
Densidade de todas as camadas dos blocos 1, 2 e 3	30 esp./m <sup>3</sup>

As extensões em alcance e azimute são resultantes da multiplicação da quantidade de pixels da amostra extraída do setor “Algodão 1” (50 pixels) pela resolução espacial no terreno nas respectivas direções. Os valores arbitrados para as extensões em alcance dos blocos 1, 2 e 3 foram, nesta ordem, 30, 40 e 55 m. Entretanto, poderiam ter sido escolhidos outros valores, desde que as parcelas somassem 125 m.

Os patamares inferiores e superiores também foram arbitrados para os blocos, pois todas as camadas da estrutura foram preenchidas com a mesma densidade de espalhadores (30 espalhadores/m<sup>3</sup>), devido às características físicas da própria cultura de algodão (Figura 4.2). O valor aqui determinado para a densidade permite que cada célula de resolução da estrutura projetada possua cerca de 120 espalhadores elementares em seu interior, pois, segundo Goodman (1986), a quantidade de difusores em cada célula de resolução deve

ser superior a 30 para que se possa atribuir uma Distribuição Normal com média nula e mesma variância ( $N(0, \sigma^2)$ ) às partes real e imaginária do *speckle* complexo (*single look*).

Por não existir distinção no estágio de desenvolvimento das plantas na cultura considerada, a altura de cada bloco seguiu a média das alturas dos campos de algodão verificadas no local, na época de aquisição das imagens pelo sensor SAR R-99 (1,6 m).

Os pixels complexos foram obtidos seguindo-se o modelo matemático para a resposta de um espalhador elementar proposto neste trabalho. As imagens SLC das antenas principal e secundária foram calculadas no módulo de geração das imagens complexas, com os parâmetros apresentados na [Tabela 4.2](#).

Tabela 4.2 – Parâmetros para a geração das imagens complexas (experimento Barreiras).

Parâmetro		Valor
Geometria de aquisição	Ângulo de visada inicial (alcance próximo)	62,3341°
	Inclinação entre as antenas	15°
	Altitude da plataforma (antena A <sub>1</sub> )	11277,6 m
	Linha de base	120 m
Sensor	Banda radar	L
	Comprimento de onda	23,4375 cm
	Fase inicial do sistema	0°
	Resolução em azimute	1 m
	Resolução em alcance	2,5 m
Processamento	Janela de influência composição <i>sinc</i> 3D	9 x 9
	Modelo digital do terreno	plano

O ângulo de visada inicial foi obtido por cálculo trigonométrico para a primeira coluna de pixels das imagens referentes ao setor de teste. Os valores da altitude da plataforma, do comprimento de onda e das resoluções em alcance e azimute são os que efetivamente foram utilizados na aquisição e geração dos dados destinados ao Projeto MAPSAR. Entretanto, como o protótipo foi desenvolvido para aerolevanteamento em modo de interferometria de uma passagem, foram arbitrados os valores para a inclinação entre as antenas e a linha de base, a fim de se obter o interferograma e a imagem de coerência, pois o sensor SAR R-99 não foi operado em modo interferométrico naquela ocasião.

A janela de influência da composição das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimute foi definida com tamanho 9 x 9 porque, com tal dimensão, o peso máximo de um espalhador presente nas células de borda não ultrapassa 10%. Considerou-se este valor como limite aceitável para a definição da região de ação das funções de espalhamento pontual. Tal limite se aplica pois, quanto maior o tamanho da janela, na tentativa de alcançar pesos máximos nas células de borda cada vez menos influentes, maior o esforço computacional para integrar as contribuições de todos os espalhadores sob a ação das funções.

A fase inicial do sistema foi definida com valor nulo, assim como as cotas do MDT, pois o terreno correspondente à cultura de algodão do setor de teste apresentava-se praticamente plano no momento da aquisição das imagens pelo sensor SAR R-99.

O interferograma e a imagem de coerência foram gerados no módulo de cálculo interferométrico com os parâmetros apresentados na [Tabela 4.3](#).

Tabela 4.3 – Parâmetros para o cálculo dos produtos interferométricos (experimento Barreiras).

Parâmetro	Valor
Dimensão do filtro do operador de média espacial (azimute)	3
Dimensão do filtro do operador de média espacial (alcance)	3
Prenome dos arquivos	Barreiras

Após a definição das dimensões do operador de média espacial (filtro 3 x 3), todos os produtos simulados foram disponibilizados no formato proprietário do ENVI, com o prenome “Barreiras”, para comparação com as imagens oriundas do sensor SAR R-99 e análise dos resultados dos dados em amplitude e em intensidade através das funções de autocorrelação (ACF) e distribuições estatísticas.

O resumo do fluxo de ações da metodologia do experimento Barreiras é ilustrado na [Figura 4.6](#).

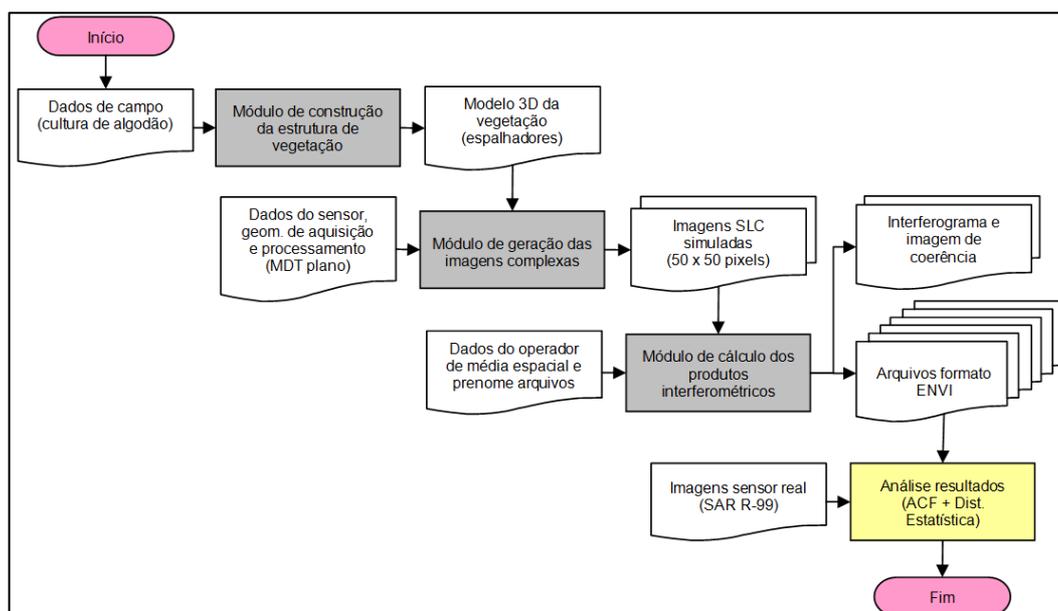


Figura 4.6 – Fluxograma da metodologia empregada no experimento Barreiras.

### 4.1.3 Resultados e discussões

Os principais produtos simulados gerados pelo protótipo segundo o fluxograma da [Figura 4.6](#) (modelo tridimensional de distribuição de espalhadores, os dados em amplitude das imagens provenientes das duas antenas virtuais, o interferograma e a imagem de coerência) são apresentados na [Figura 4.7](#).

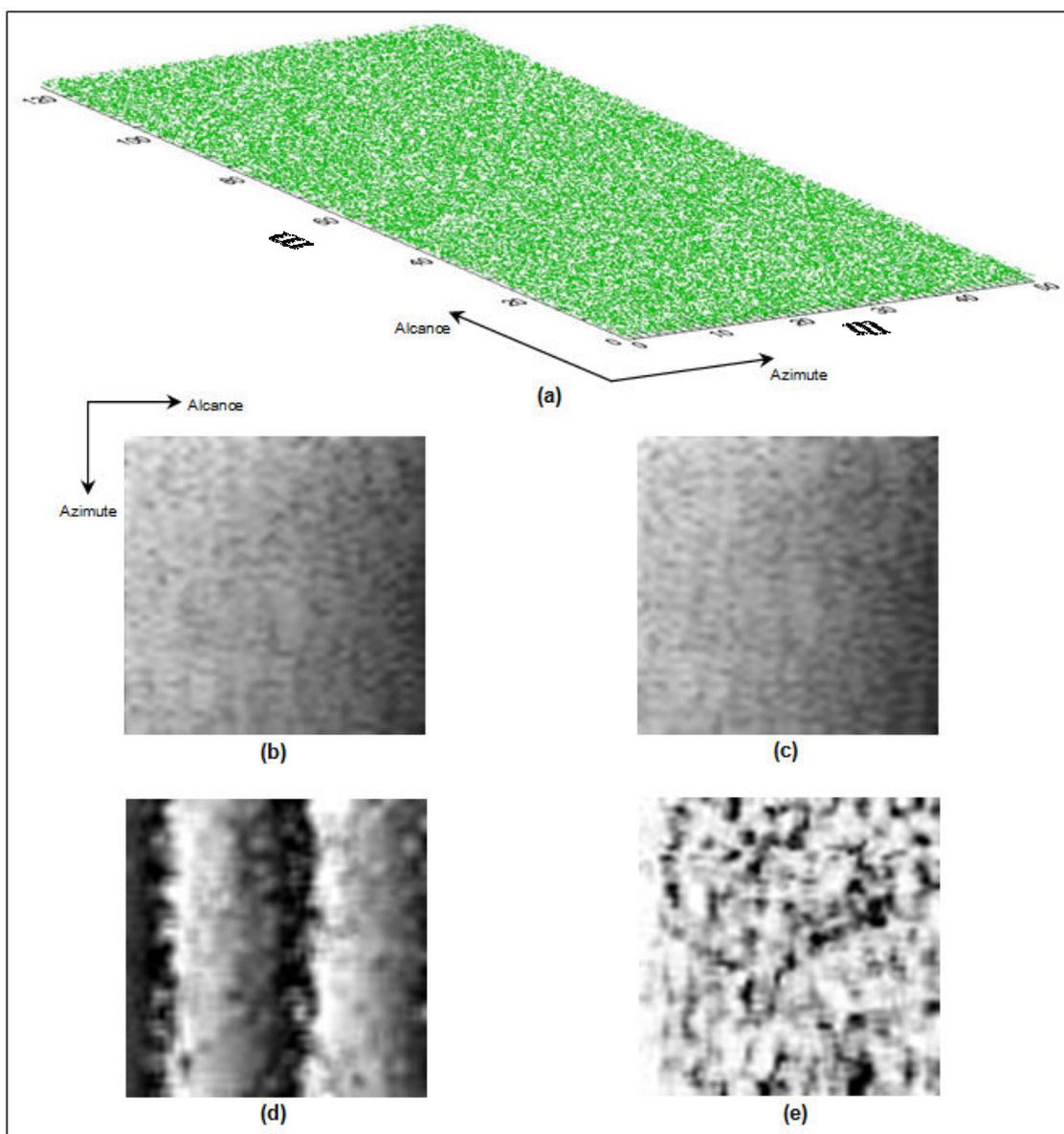


Figura 4.7 – Produtos simulados (Banda L) do experimento Barreiras: a) modelo 3D de vegetação. b) imagem amplitude antena principal. c) imagem amplitude antena secundária. d) interferograma. e) imagem de coerência.

O modelo de vegetação apresenta-se preenchido pelos difusores elementares que foram uniformemente distribuídos dentro dos limites estabelecidos para o teste (50 m x 125 m x 1,6 m).

As imagens em amplitude das duas antenas virtuais apresentam as características do ruído *speckle* e redução gradativa do brilho dos pixels na direção em alcance de acordo com o previsto no modelo matemático, que reduz o módulo do sinal retroespalhado pelos difusores com ângulos de visada maiores. Tal transição gradual na imagem assemelha-se também com o efeito de decaimento do sinal retroespalhado na direção de alcance.

Quanto aos produtos interferométricos, o interferograma exhibe um padrão de franjas paralelas, coerente com a proposta de relevo plano para o modelo de vegetação. A imagem de coerência exhibe a variação no módulo da correlação complexa causada pela aleatoriedade das distribuições dos espalhadores elementares. A média e o desvio-padrão verificados nesta imagem são 0,950478 e 0,038663, respectivamente.

A fim de verificar a compatibilidade entre os valores obtidos para a imagem de coerência simulada com aqueles preconizados pela abordagem analítica, foi aferida a média para um perfil deste produto interferométrico na extensão em alcance correspondente ao ângulo de incidência de 63° (primeiro valor angular inteiro após o ângulo de incidência inicial adotado para o experimento Barreiras). O valor de 0,991 para a coerência média deste perfil da imagem simulada é 8 milésimos menor do que aquele indicado pela formulação analítica (0,998).

Foram reunidas em um mesmo gráfico – [Figura 4.8](#) – as curvas referentes aos valores de autocorrelação (ACF) na direção de azimute para os dados em intensidade da imagem simulada e para as imagens provenientes do sensor real SAR R-99 ( $L_{HH}$ ,  $L_{HV}$  e  $L_{VV}$ ).

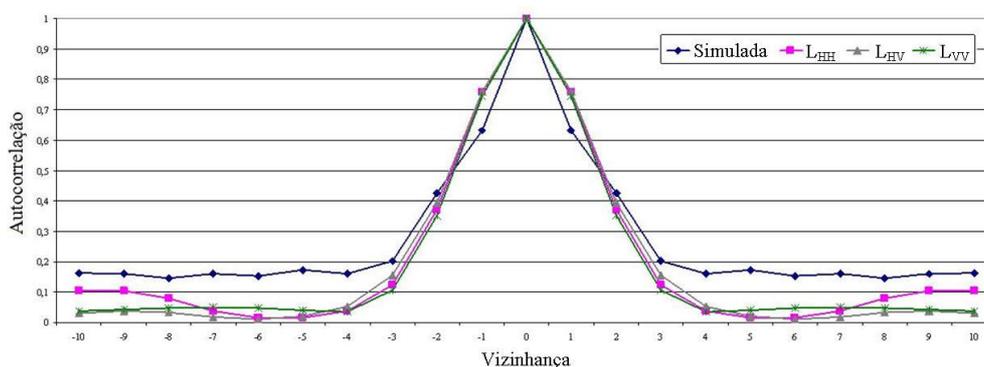


Figura 4.8 – Funções de autocorrelação (ACF) para os dados em intensidade (experimento Barreiras).

As curvas ACF se comportam de maneira semelhante: autocorrelação máxima na vizinhança 0 (correlação com pixel com ele próprio) decaindo os valores com o aumento da vizinhança, seguindo padrão de uma função  $\text{sinc}^2$ . Seus formatos indicam que pode ser adotado o padrão regular de antena para o sensor simulado.

A curva de autocorrelação para a imagem simulada não se ajusta perfeitamente sobre as demais, principalmente para vizinhança maior ou igual a 4. Tal fato pode ser atribuído ao processo de simulação, que não contempla todos os fatores que afetam a síntese das imagens SAR em favor da simplicidade da modelagem matemática.

Quatro distribuições estatísticas do tipo Raiz Quadrada da Gamma ( $\Gamma^{1/2}$ ) foram ajustadas aos dados em amplitude da imagem simulada, oriunda da antena principal, e das imagens provenientes do sensor real SAR R-99 ( $L_{VV}$ ,  $L_{HV}$  e  $L_{VH}$ ) – [Figura 4.9](#).

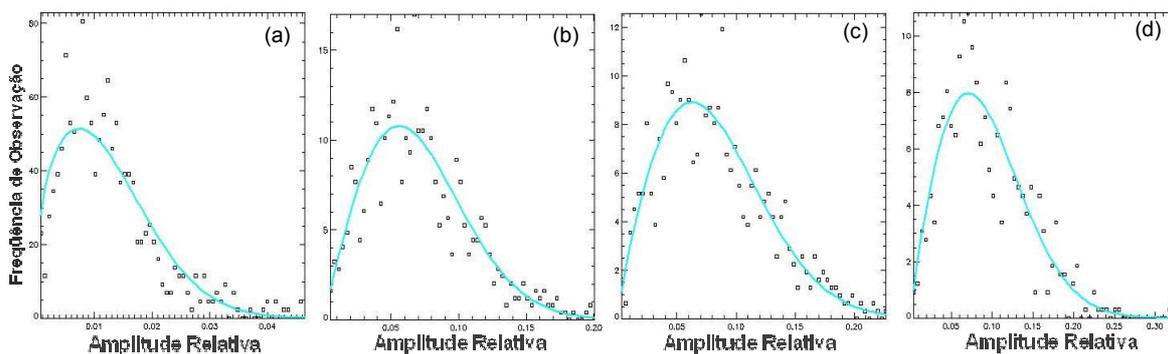


Figura 4.9 – Ajuste de distribuições  $\Gamma^{1/2}$  para os dados em amplitude (experimento Barreiras): a) imagem simulada. b)  $L_{VV}$ . c)  $L_{HV}$ . d)  $L_{HH}$ .

Analisando-se os gráficos anteriores, é possível visualizar os ajustes das distribuições  $\Gamma^{1/2}$  aos dados em amplitude de cada uma das imagens consideradas, mas com a presença de *outliers* (pontos demasiadamente afastados da curva). A fim de comprovar os ajustes de tais funções, testes  $\chi^2$  foram conduzidos para ratificar a homogeneidade das imagens em amplitude. Admitindo-se o nível de significância de 1%, pode-se afirmar que os dados em amplitude das imagens consideradas correspondem a regiões homogêneas. As principais estatísticas dos testes  $\chi^2$  para os dados em amplitude de todas as imagens são apresentadas na [Tabela 4.4](#).

Tabela 4.4 – Estatísticas dos testes  $\chi^2$  para os dados em amplitude

	Imagens			
	Simulada	$L_{VV}$	$L_{HV}$	$L_{HH}$
<b>Média</b>	0,0123	0,0703	0,0817	0,0921
<b>Variância</b>	$6,4935 \times 10^{-5}$	0,0014	0,0020	0,0025
<b>P-valor</b>	0,0287	0,1159	0,5818	0,0411
<b>Nível de significância</b>	0,01			
<b>Resultado</b>	Região homogênea ( $Z_A \sim \Gamma^{1/2}$ )			

O brilho e o contraste da imagem simulada, caracterizados respectivamente pela média e pela variância, se mostram inferiores aos das imagens oriundas do sensor SAR R-99. Esta diferença procede, pois as ponderações da atenuação do sinal pelo meio de propagação e da composição das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimute são efetuadas sobre um valor unitário. Atenua-se esta diferença pela inclusão de um fator multiplicativo na formulação das respostas individuais dos espalhadores ou na própria imagem em amplitude gerada para cada caso de simulação.

## 4.2 Experimento Tapajós

### 4.2.1 Caracterização da região de teste

A região de teste deste experimento está localizada no oeste do Estado do Pará, dentro da área da Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós, entre as longitudes W  $54^{\circ} 53'$  e  $55^{\circ} 06'$  e latitudes S  $03^{\circ} 03'$  e  $03^{\circ} 12'$ . (Figura 4.10).

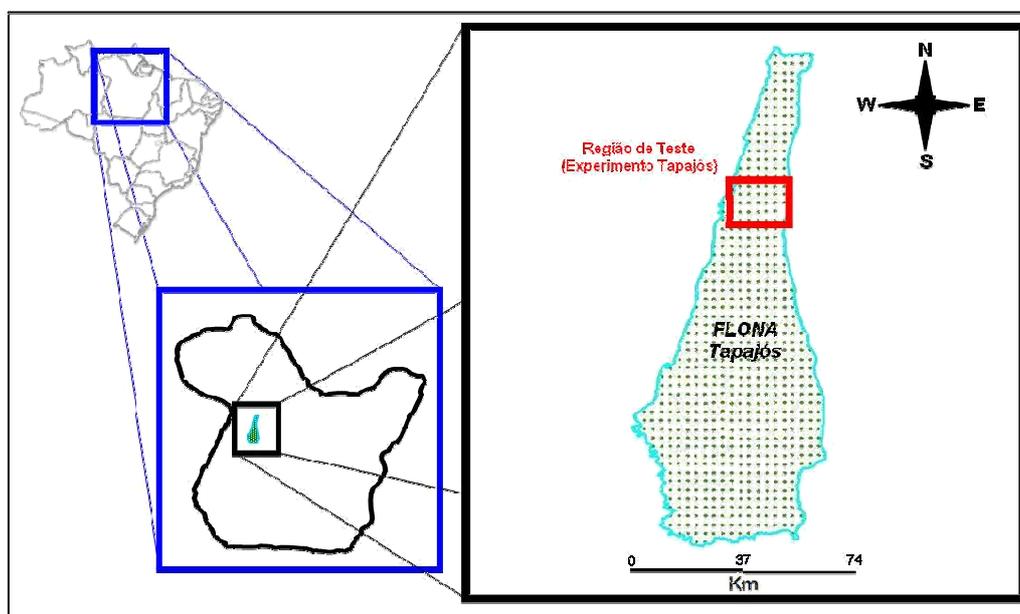


Figura 4.10 – Localização da região de teste (experimento Tapajós).

A FLONA do Tapajós é uma unidade de conservação federal criada no início da década de 70 e abrange área aproximada de 544 mil hectares (COHENCA, 2007). Santos et al. (2004) relatam que o relevo desta região é ondulado e recoberto por floresta tropical.

Os motivos que embasam a escolha dessa área de teste são as características do relevo e da vegetação que, agregadas à existência de dados biofísicos de árvores inventariadas por Santos et al. (2003) em um trecho de 5.000 m<sup>2</sup> da região, constituem condições favoráveis para a construção do modelo de vegetação e para a verificação da sensibilidade dos produtos simulados às variações do terreno.

#### 4.2.2 Materiais e métodos

Em setembro de 2000, a região de teste foi imageada pelo sensor SAR aerotransportado da empresa alemã *AeroSensing RadarSystem GmbH*. Operado em modo interferométrico, este sensor adquiriu dados na banda P (415 MHz) que permitiram a construção do modelo digital do terreno (MDT) daquela área – [Figura 4.11](#).

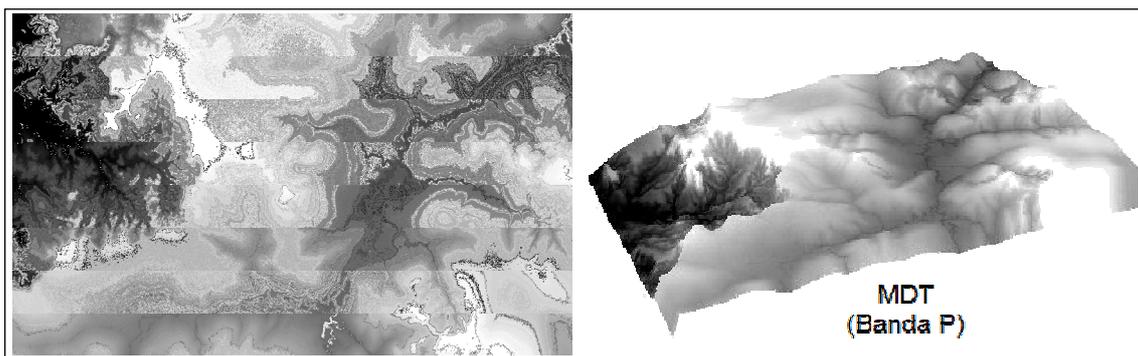


Figura 4.11 – MDT da região de teste (experimento Tapajós).

O referido MDT possui pixel de 2,5 m de resolução espacial e é utilizado neste experimento para a verificação da sensibilidade dos produtos simulados (dados em amplitude e interferograma) às variações do terreno.

Dados biofísicos de 404 árvores coletados por Santos et al. (2003) em uma área de 10 m x 500 m de um trecho de floresta tropical primária da FLONA do Tapajós servem para a construção do modelo de vegetação. Para cada árvore têm-se as medidas do diâmetro à altura do peito (DAP), da altura total e dos afastamentos longitudinal e transversal em relação a uma linha reta de 500 m de comprimento. Deste inventário foram excluídas as árvores mortas, queimadas, com alturas abaixo de 5 m ou que apresentavam DAP menores que 5 cm. Restaram desta seleção, 398 indivíduos. A média e o desvio-padrão das alturas das árvores selecionadas são 13,5 m e 5,7 m, respectivamente.

Para a determinação do patamar superior do modelo de vegetação, também servem de insumos para este experimento dados de outro conjunto de árvores inventariadas por Narvaes et al. (2007) pertencentes à FLONA do Tapajós caracterizadas como floresta tropical primária. Este conjunto é formado por 408 indivíduos com informações sobre DAP, altura comercial e altura da copa. A soma destes dois últimos parâmetros é a altura total da árvore. Deste inventário foram excluídas 10 árvores que apresentavam altura de copa nula. Os 398 indivíduos restantes foram separados em classes por altura total para caracterizar, em média, quanto a altura da copa compõe a altura total de uma árvore em cada classe – [Tabela 4.5](#) e [Figura 4.12](#).

Tabela 4.5 – Classes para altura total de 398 árvores da FLONA do Tapajós.

Classe	Altura Total	Nr indivíduos	Altura da copa/Altura total(%)
<b>a</b>	[5 10]	87	39,31%
<b>b</b>	]10 15]	194	38,08%
<b>c</b>	]15 20]	81	33,80%
<b>d</b>	]20 25]	18	34,93%
<b>e</b>	]25 30]	13	29,24%
<b>f</b>	]30 35]	2	22,58%
<b>g</b>	]35 40]	3	27,41%
<b>Total</b>		<b>398</b>	

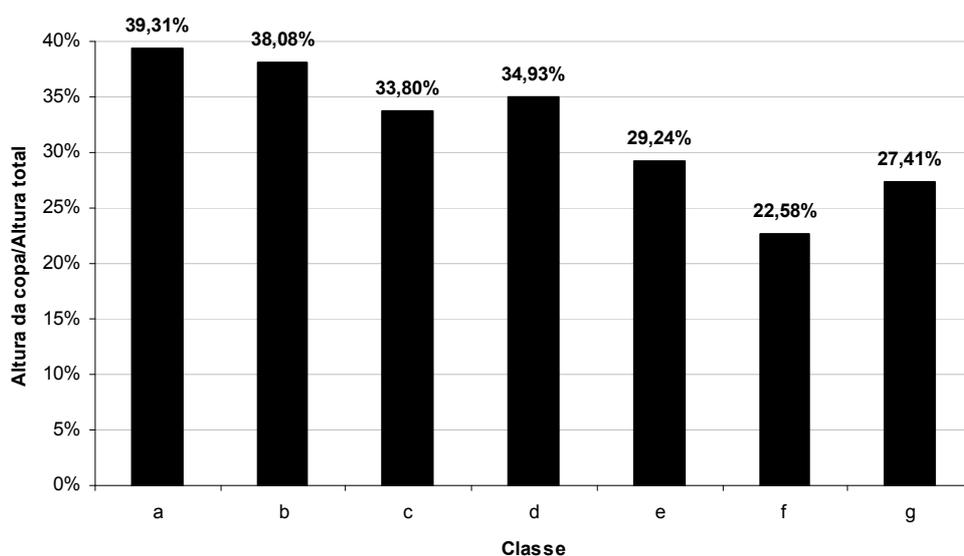


Figura 4.12 – Razão altura da copa/altura total (Tabela 4.5) – FLONA do Tapajós.

Pela análise da Tabela 4.5 e Figura 4.12, percebe-se que as classes de árvores com alturas maiores do que 30 metros possuem relação altura da copa/altura total cerca de 10 pontos percentuais menores do que classes de árvores de menor porte no inventário preparado por Narvaes et al. (2007).

A fim de restringir a área de construção do modelo de vegetação, um setor de 100 x 100 pixels (250 m x 250 m) foi extraído do MDT (Figura 4.13). Esta área

apresenta altitudes que variam de 87,9 m a 112,4 m e está situada nas proximidades da região das árvores inventariadas por Santos et al. (2003).

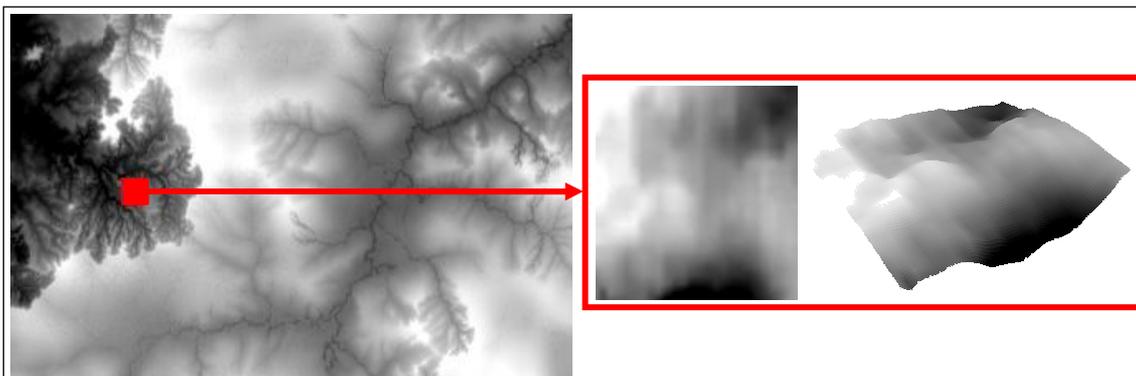


Figura 4.13 – Setor extraído do MDT para a construção do modelo de vegetação (experimento Tapajós).

Os difusores elementares foram então distribuídos espacialmente utilizando-se o módulo de construção da estrutura de vegetação com os parâmetros de entrada apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Parâmetros para a estrutura de vegetação (experimento Tapajós).

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Extensão em azimute	250 m
Soma das extensões em alcance dos blocos 1, 2 e 3	250 m
Altura dos blocos 1, 2 e 3	20 m
Patamar inferior dos blocos 1, 2 e 3	1%
Patamar superior dos blocos 1, 2 e 3	66,2%
Densidade da camada superior dos blocos 1, 2 e 3	4 esp./m <sup>3</sup>
Densidade da camada intermediária dos blocos 1, 2 e 3	2 esp./m <sup>3</sup>
Densidade da camada inferior dos blocos 1, 2 e 3	2 esp./m <sup>3</sup>

As extensões em alcance e azimute são resultantes da multiplicação da quantidade de pixels da amostra extraída do MDT pela resolução espacial no terreno. Os valores arbitrados para as extensões em alcance dos blocos 1, 2 e 3 foram, nesta ordem, 100, 80 e 70 m. Entretanto, poderiam ter sido escolhidos outros valores, desde que as parcelas somassem 250 m.

A altura dos blocos foi estabelecida em 20 m, pois, de acordo com a [Tabela 4.5](#), cerca de 91% das árvores possuem altura igual ou menor a este valor. Em consequência, o patamar superior foi definido em 66,2% da altura dos blocos porque, conforme indicado na [Figura 4.12](#), a região de copa para as árvores da região de teste corresponde a 33,8% da altura total. Já o patamar inferior foi arbitrado em 1% da altura dos blocos para que fossem caracterizadas duas camadas distintas no modelo de vegetação: o topo, mais denso (4 espalhadores por metro cúbico) e a base, menos densa (2 espalhadores por metro cúbico).

Os valores aqui determinados para as densidades permitem que cada célula de resolução da estrutura projetada possua aproximadamente 377 espalhadores elementares em seu interior, atendendo, deste modo, a restrição feita por Goodman (1986) para a quantidade mínima de difusores em uma célula de resolução para que se possa atribuir uma Distribuição Normal com média nula e mesma variância ( $N(0, \sigma^2)$ ) às partes real e imaginária do *speckle* complexo (*single look*).

Os pixels complexos foram obtidos seguindo-se o modelo matemático para a resposta de um espalhador elementar proposto neste trabalho. As imagens SLC das antenas principal e secundária foram calculadas no módulo de geração das imagens complexas com os parâmetros apresentados na [Tabela 4.7](#).

Tabela 4.7 – Parâmetros para a geração das imagens complexas (experimento Tapajós).

Parâmetro		Valor
Geometria de aquisição	Ângulo de visada inicial (alcance próximo)	30°
	Inclinação entre as antenas	15°
	Altitude da plataforma (antena A <sub>1</sub> )	3.000 m
	Linha de base	2 m
Sensor	Banda radar	X
	Comprimento de onda	3 cm
	Fase inicial do sistema	0°
	Resolução em azimute	2,5 m
	Resolução em alcance	2,5 m
Processamento	Janela de influência composição <i>sinc</i> 3D	9 x 9
	Modelo digital do terreno	ondulado

Os valores da altitude da plataforma e das resoluções em alcance e azimute são os que efetivamente foram utilizados pela empresa *AeroSensing RadarSystem GmbH* na geração do MDT da banda P. Optou-se pela banda X (comprimento de onda igual a 3 cm) neste experimento pelo baixo poder de penetração no dossel, visando facilitar a identificação da sensibilidade do modelo matemático às variações das alturas dos blocos simulados. Os demais parâmetros referentes à geometria de aquisição e ao sensor foram arbitrados com o intuito de viabilizar o aerolevanteamento virtual em modo interferométrico.

Quanto aos parâmetros de processamento, a janela de influência da composição das funções de espalhamento para alvo pontual nas direções de alcance e azimute foi definida com tamanho 9 x 9 pelos mesmos motivos apresentados no experimento Barreiras. O modelo digital do terreno considerado nesta simulação é o correspondente ao setor extraído do MDT da região de teste (Figura 4.13).

O interferograma e a imagem de coerência foram gerados no módulo de cálculo interferométrico com os parâmetros apresentados na [Tabela 4.8](#).

Tabela 4.8 – Parâmetros para o cálculo dos produtos interferométricos (experimento Tapajós).

Parâmetro	Observação
Dimensão do filtro do operador de média espacial (azimute)	3
Dimensão do filtro do operador de média espacial (alcance)	3
Prenome dos arquivos	Tapajós

Após a definição das dimensões do operador de média espacial (filtro 3 x 3), todos os produtos simulados foram disponibilizados no formato proprietário do ENVI com o prenome “Tapajós” para a verificação dos resultados.

O resumo gráfico da metodologia deste experimento é ilustrado na [Figura 4.14](#).

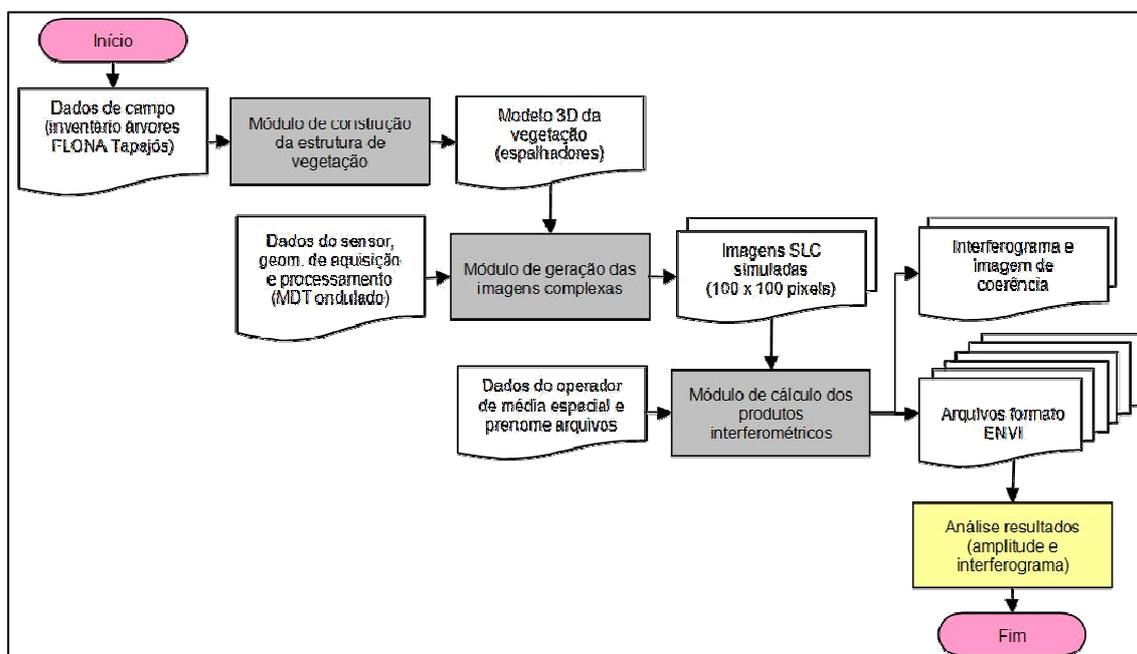


Figura 4.14 – Fluxograma da metodologia empregada no experimento Tapajós.

### 4.2.3 Resultados e discussões

As imagens em amplitude geradas pelo protótipo de simulador SAR para as antenas principal e secundária e também os produtos interferométricos resultantes são apresentados na [Figura 4.15](#). A fim de facilitar a análise dos resultados, a representação do MDT da região de teste (extrato) é replicada na mesma ilustração.

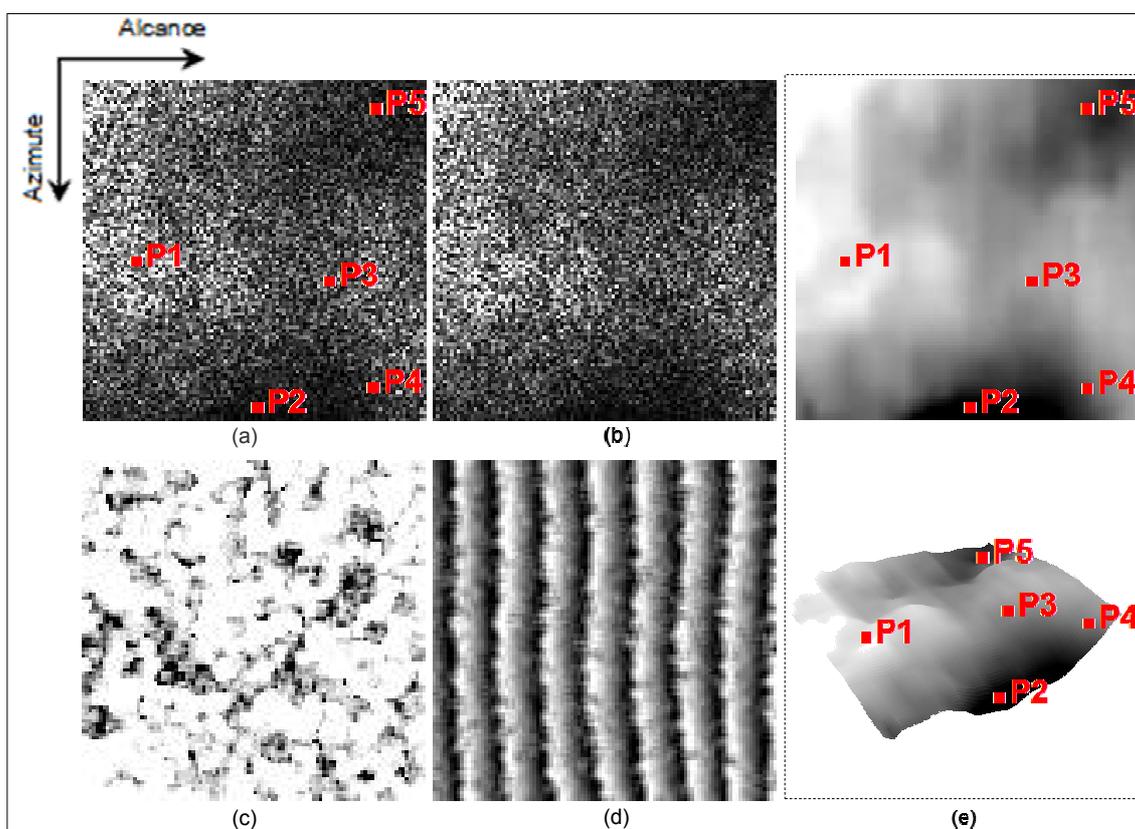


Figura 4.15 – Produtos simulados (Banda X) do experimento Tapajós: a) imagem amplitude antena principal. b) imagem amplitude antena secundária. c) imagem de coerência. d) interferograma. e) MDT da região de teste (extrato).

Quanto aos produtos interferométricos, o interferograma exhibe um padrão de franjas não-paralelas, com curvaturas provocadas pelas elevações e depressões do terreno, ratificando a sensibilidade dos produtos simulados às

variações do terreno. A imagem de coerência exibe a variação no módulo da correlação complexa causada pela aleatoriedade das distribuições dos espalhadores elementares. A média e o desvio-padrão verificados nesta imagem de coerência são 0,981724 e 0,029351, respectivamente.

Como o experimento Tapajós foi efetuado com a Banda X e o experimento Barreiras foi efetuado com a Banda L, espalhadores mais profundos influíram mais na aleatoriedade do sinal retroespalhado neste último, que possui coeficiente de extinção reduzido à metade, se comparado com o coeficiente de extinção de Tapajós. Em consequência, o valor médio para o módulo da correlação complexa de Tapajós superou o mesmo parâmetro do experimento Barreiras, mesmo que a estrutura de vegetação tenha sido de menor porte.

As imagens em amplitude das duas antenas virtuais apresentam as características do ruído *speckle*. Nelas se destacam porções em que os módulos dos sinais retroespalhados pelos difusores da simulação são maiores do que em outras partes das imagens (trechos com nível de cinza mais baixo). Esta diferença, entretanto, não é aleatória. Ela obedece à configuração do terreno representado pelo MDT que serviu de base para o experimento.

Mesmo com uma redução gradual no brilho da imagem na direção de alcance (efeito do decaimento do sinal nesta direção modelado matematicamente), as vertentes frontais das elevações apresentam amplitude do sinal retroespalhado maior do que as vertentes dorsais. Por isso, a região do ponto P1 assinalado nas ilustrações da [Figura 4.15](#) apresenta uma resposta simulada mais intensa do que a região de P3 e de P4, pois, embora estes dois últimos pontos também estejam em vertentes frontais, a amplitude do sinal de microondas que retornou ao sensor virtual foi reduzida gradualmente ao longo da direção de alcance.

Analogamente, por estarem em vertentes dorsais, as regiões dos pontos P2 e P5 são as mais escuras das imagens em amplitude. Todavia, P2 apresenta

intensidade do sinal retroespalhado menor do que P5, mesmo se situando mais próximo ao sensor virtual. Este fato evidencia, assim como nos imageamentos SAR reais, uma maior importância da configuração do terreno na determinação da amplitude do sinal que retorna ao sensor.

Ratifica-se a importância do ângulo de incidência inicial neste contexto da análise da diminuição gradual do brilho da imagem de modo conjunto com a movimentação do terreno simulado. Ângulos de incidência maiores favorecem a diminuição do sinal retroespalhado, ainda mais atenuados para os trechos de vertentes dorsais, podendo chegar à formação de sombras. Entretanto, com os valores adotados na presente simulação para a altitude da plataforma, para o ângulo de incidência inicial e para a variabilidade do modelo digital do terreno, tal situação limite não é contemplada.

No que se refere à homogeneidade, as imagens em amplitude simuladas apresentam características de regiões homogêneas, comprovadas pelo ajuste de uma distribuição estatística do tipo Raiz Quadrada da Gamma ( $\Gamma^{1/2}$ ) aos dados da imagem oriunda da antena principal (Figura 4.16) e pelo teste  $\chi^2$ , admitindo-se o nível de significância de 1% (P-valor = 0,18249597). Contudo, tal grau de homogeneidade não é característico de regiões de florestas tropicais, devido às variações naturais das alturas das árvores.

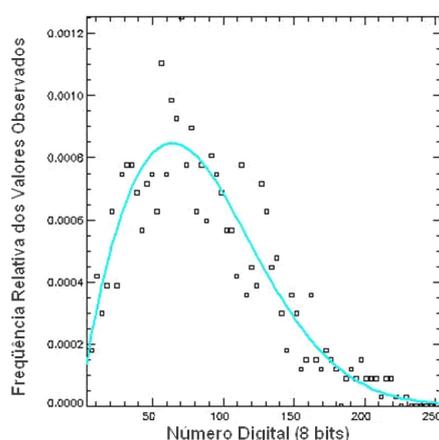


Figura 4.16 – Ajuste da distribuição  $\Gamma^{1/2}$  para os dados em amplitude da imagem simulada (experimento Tapajós).

Diante da descaracterização do grau de homogeneidade esperada para a região de teste, foi efetuada uma adaptação nos dois primeiros módulos do protótipo de simulador SAR deste trabalho, a fim de permitir a geração de uma imagem em amplitude a partir da simulação das respostas de estruturas mais similares às árvores encontradas em uma floresta tropical primária.

Assim, um novo arranjo de distribuição de espalhadores foi implementado valendo-se dos dados biofísicos inventariados por Santos et al. (2003). Admite-se para este novo modelo que cada árvore é formada por espalhadores dispersos de forma cilíndrica e esférica para o tronco e a copa, respectivamente (Figura 4.17).

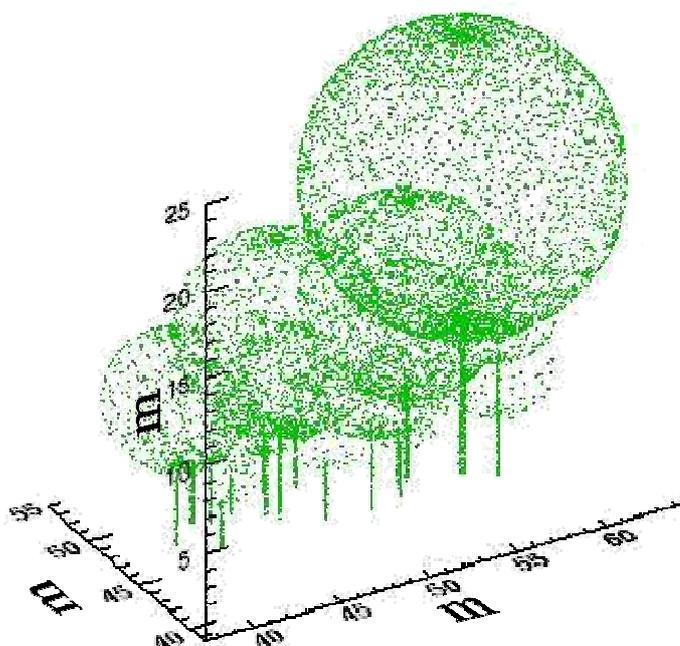


Figura 4.17 – Exemplo de arranjo modificado de distribuição de espalhadores.

Para a construção de um modelo de floresta tropical primária, cada árvore inventariada foi clonada e todas foram distribuídas uniformemente nas direções de alcance e azimute em um espaço de mesma área da região de teste. Embora a densidade de árvores por área no modelo simulado fosse aproximadamente 6 vezes menor do que aquela constatada no terreno,

considerou-se suficiente a quantidade de 778 árvores em 62.500 m<sup>2</sup> para teste, por ser complementar aos objetivos desta dissertação.

Na [Figura 4.18](#) é ilustrada a configuração resultante dos procedimentos do parágrafo anterior.

Após a aplicação do módulo de geração das imagens complexas modificado com os mesmos parâmetros da [Tabela 4.7](#), foi disponibilizada a imagem em amplitude ilustrada na [Figura 4.19](#).

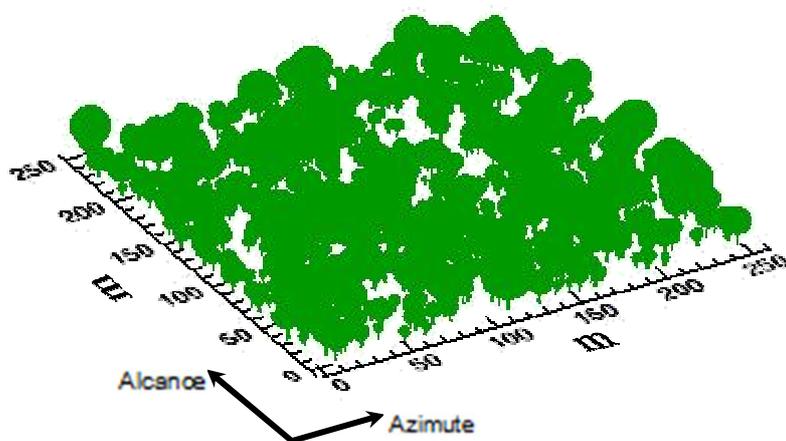


Figura 4.18 – Configuração da floresta tropical primária simulada.

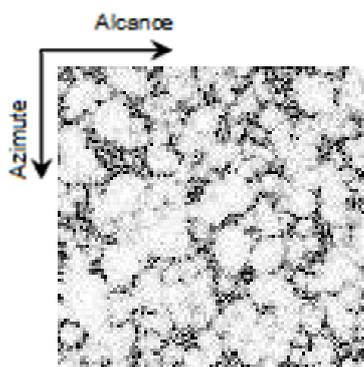


Figura 4.19 – Imagem em amplitude simulada da estrutura de vegetação alternativa.

Verifica-se a alteração na informação da textura da imagem em amplitude proveniente do modelo de estrutura de vegetação adaptado. A nova imagem

simulada em amplitude não apresenta características de regiões homogêneas, conforme evidências apresentadas na [Figura 4.20](#), onde são ilustradas as tentativas de ajustes das funções  $\Gamma^{1/2}$  e  $G_A^0$ . Esta se ajusta melhor aos dados do que a primeira.

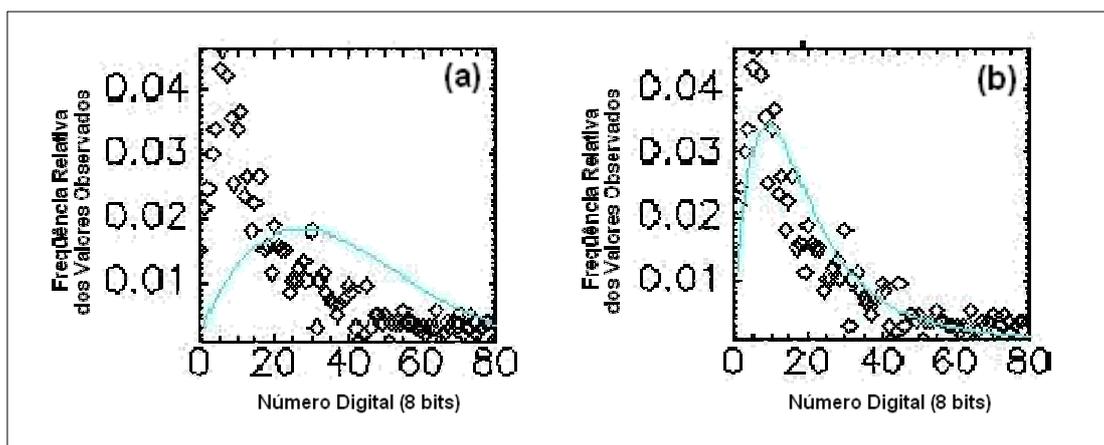


Figura 4.20 – Tentativas de ajustes de funções aos dados simulados em amplitude com a estrutura de vegetação adaptada: a)  $\Gamma^{1/2}$  e b)  $G_A^0$ .

Quanto aos efeitos da flutuação na amplitude do sinal devido à movimentação do terreno, estes não são nítidos como na imagem equivalente oriunda do modelo de vegetação por camadas. Este fato se deve ao acompanhamento da movimentação do terreno pela estrutura em blocos, cujas diferenças de altitude entre uma célula de resolução e outra se deve unicamente ao desnível do MDT.

Para o modelo adaptado, tais diferenças são provocadas pela movimentação do terreno e pela variabilidade das alturas das árvores que o constituem. Assim, árvores de grande porte podem compensar depressões, principalmente para sensores SAR que utilizam radiação com comprimentos de onda menores (baixa penetração no dossel), caso deste teste complementar

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia que permita simular respostas de estruturas simplificadas de vegetação ao SAR interferométrico aerotransportado. A principal contribuição desta dissertação é a disponibilização de um protótipo de simulador SAR para testes de modelos de caracterização da vegetação e para a geração de dados controlados que sirvam de insumos para testes de outros sistemas de processamento SAR.

O protótipo traz a flexibilidade necessária para incorporar novas rotinas de programação IDL em virtude de sua arquitetura modular. Os três módulos que o compõem utilizam dados inseridos pelo usuário e produtos gerados em etapas anteriores para disponibilizar um conjunto de arquivos no formato do programa de processamento de imagens ENVI, prontos para a análise dos resultados.

Os resultados indicam que o objetivo proposto foi atingido. É possível gerar dados complexos e produtos interferométricos derivados similares àqueles provenientes de sensores reais.

No que se refere ao experimento Barreiras, embora a campanha de aquisição de dados pelo sensor SAR R-99 não tenha sido contemplada com a operação em modo interferométrico na ocasião em que as imagens da região de teste foram geradas, o interferograma simulado é coerente com a proposta de relevo plano, constatado pelo padrão de franjas paralelas. Mostrou-se que a aleatoriedade das distribuições dos espalhadores elementares causa variação no módulo da correlação complexa, verificada na imagem de coerência gerada.

As imagens em amplitude geradas pelo protótipo apresentam ruído *speckle* inerente a qualquer imagem oriunda de um sistema SAR real. Apresentam também uma redução gradativa dos valores dos pixels na direção em alcance,

assemelhando-se ao efeito de decaimento do sinal nesta direção. Sobre o padrão da antena, o formato da curva da função de autocorrelação (ACF) na direção em azimute da imagem em intensidade simulada para a antena principal indica que pode ser adotado o padrão regular de antena para o sensor virtual.

A homogeneidade da imagem em amplitude simulada para a antena principal e das imagens provenientes do sensor SAR R-99 foram comprovadas através do ajuste de distribuições estatísticas do tipo Raiz Quadrada da Gamma ( $\Gamma^{1/2}$ ) a estes dados. O teste  $\chi^2$  para o mesmo conjunto de imagens ratificou que todas são correspondentes a uma região homogênea, admitindo-se o nível de significância de 1%.

As limitações do protótipo verificadas pelo experimento Barreiras estão diretamente relacionadas à formulação matemática proposta para as respostas individuais dos difusores elementares, que não contempla todos os problemas inerentes da síntese de imagens SAR reais. Credita-se a este fato o motivo pelo qual a ACF da imagem simulada não se ajusta perfeitamente sobre as curvas correspondentes às imagens do sensor SAR R-99.

Quanto ao experimento Tapajós, verificou-se que os produtos simulados são susceptíveis às variações do terreno representado por modelos digitais de elevação sob a vegetação virtual. Nas imagens em amplitude simuladas as vertentes frontais das elevações apresentam módulo do sinal retroespalhado maior do que as vertentes dorsais. O interferograma exhibe um padrão de franjas não-paralelas, com curvaturas provocadas pelas elevações e depressões do terreno.

Ainda para as imagens em amplitude do experimento Tapajós, estas apresentam ruído *speckle* característico das imagens SAR reais e uma redução gradual do brilho na direção de alcance (devido ao aumento progressivo do

ângulo de incidência nesta direção). Entretanto, o padrão de textura produzido para as imagens das antenas principal e secundária corresponde a regiões homogêneas.

Um teste complementar foi conduzido para verificar a alteração no grau de homogeneidade da imagem simulada em amplitude, modificando-se as distribuições dos espalhadores. Para os arranjos adaptados, admitiu-se que cada árvore era formada por espalhadores dispersos de forma cilíndrica e esférica para o tronco e a copa, respectivamente.

O resultado deste teste comprovou que o modelo modificado altera o padrão de textura das imagens, tornando-as mais heterogêneas. Entretanto, os efeitos da flutuação na amplitude do sinal devido à movimentação do terreno são mascarados pela variabilidade das alturas das árvores que constituem o modelo de vegetação, principalmente para sensores SAR que utilizam radiação com comprimentos de onda menores (baixa penetração no dossel). Deste modo, constata-se que as limitações do protótipo, apontadas pelo experimento Tapajós, estão diretamente relacionadas à modelagem da estrutura da vegetação.

Com esta dissertação são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Substituir o fornecimento direto das resoluções espaciais em alcance e azimute por entrada de parâmetros de construção da antena e do sinal irradiado para o cálculo de tais informações;
- Adotar outras distribuições para a dispersão dos espalhadores no modelo de vegetação, sofisticando-o para arranjos mais complexos, como aquele baseado em parâmetros biofísicos de árvores na segunda fase do experimento Tapajós;

- Considerar interações do sinal transmitido com os difusores e o solo, o espalhamento direto pela superfície terrena (avaliando-se seu grau de rugosidade) e demais mecanismos de espalhamento, contemplando também na modelagem matemática a influência de árvores de grande porte;
- Agregar módulos de processamento complementares (desdobramento de fase, geocodificação etc.); e
- Considerar modelos matemáticos mais complexos para as respostas individuais dos difusores elementares, que considerem maior número de variáveis influentes na aquisição dos dados SAR, como a influência de filtros para atenuação dos lóbulos secundários da função de espalhamento pontual do sistema, as geometrias dos difusores, o ruído térmico, o fator de brilho dos espalhadores, a polarização da onda e a geometria de aquisição (níveis orbitais, problemas de movimento da plataforma, rotas de vôo etc.).

Por fim, pode-se concluir que a hipótese de trabalho adotada foi comprovada. Com base nos conceitos expostos, foi desenvolvida uma metodologia para a simulação de dados SAR, implementada em forma de um protótipo que utiliza um modelo matemático para as respostas individuais de difusores elementares ao radar de abertura sintética. Estes difusores são dispersos em arranjos simplificados seguindo distribuição uniforme no espaço tridimensional com configuração similar a estruturas de vegetação. A validade da simulação foi confirmada pelos experimentos realizados. Este estudo pode ser aplicado para testar modelos de caracterização da vegetação e sistemas de processamento de dados SAR.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARONOFF, S. **Remote sensing for GIS managers**, 1. ed. Readlands: ESRI Press, 2005. 457 p. ISBN (1-58948-081-3)
- ATTEMA, E. P. W.; ULABY, F. T. Vegetation modeled as a water cloud. **Radio Science**, v. 13, p. 357-364, 1978.
- BRISCO, B.; BROWN, R.J. Agricultural applications with Radar. In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. cap. 7, p. 381- 406.
- CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**, 2. ed. New York: The Guilford Press, 1996. cap. 7, p. 201-237.
- CCRS. Canada Centre for Remote Sensing. Tutorial: **Fundamentals of remote sensing**. 2007. 258 p. [on line]. Disponível em: <[http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals\\_e.pdf](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf)>. Acesso em 02 fev. 2008.
- CLOUDE, S.R.; PAPATHANASSIOU, K.P. Polarimetric SAR interferometry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1551-1565, 1998.
- COHENCA, D. Evolução anual de desmatamentos na Floresta Nacional do Tapajós de 1997 a 2005. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6653-6660. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.
- CORREIA, A. H. **Projeto, desenvolvimento e avaliação de classificadores estatísticos pontuais e contextuais para imagens SAR polarimétricas**. 1998. 271 p. (INPE-7178-TDI/679). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1998. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/09.14.14.45>>. Acesso em: 25 ago. 2007.
- CORREIA, A. H. **Polarimetria e interferometria de dados SAR: fundamentos e aplicações para uso e cobertura da terra**. 2005. 48 p. Exame de qualificação - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.
- COSTA, S. S.; CAMPOS, M. A. A.; ROGÉRIO, A. P. C. "Imageamentos realizados pelo sistema aerotransportado SAR/SIPAM". In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6661-6665. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7

CUMMING, I. G.; WONG, F. H. **Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation**, Norwood: Artech House, 2005. 625 p.

DEFESANET. “**Sistemas do R-99B. aeronave de sensoriamento remoto (vigilância terrestre)**”, 23 set. 2003. Disponível em: <<http://www.defesanet.com.br/rv/sivam/r99b/>>. Acesso em: 31 jul. 2007.

DIEGUEZ, J. P. P. **Métodos numéricos computacionais para a engenharia**. Vol. I. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1992. 301 p.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; PIERCE, L. E. Land cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic aperture radar. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 199 – 214, 1995.

ELACHI, C. **Physics and techniques of remote sensing**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1987. 440 p.

FRANCESCHETTI, G.; IODICE, A.; MIGLIACCIO, M.; RICCIO, D. A novel across-track SAR interferometry simulator, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 950 - 962, May 1998.

FRANCESCHETTI, G.; LANARI R. **Synthetic aperture radar processing**, 1. ed. Florida: CRC press LLC, 1999. 307 p.

FREITAS, C. C.; FRERY, A. C.; CORREIA, A. H. The polarimetric G distribution for SAR data analysis. **Environmetrics**, n. 16, p. 13-31, aug. 2004.

FRERY, A. C.; MÜLLER, H. J.; YANASSE, C. C. F.; SANT’ANNA, S. J. S. A model for extremely heterogeneous clutter. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 3, p. 648-659, may 1997.

GABOARDI, C. **Utilização de imagem de coerência SAR para classificação do uso da terra: Floresta Nacional do Tapajós**. 2002. 137 p. (INPE-9612-TDI/842). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2002.

GOODMAN, J. W. A random walk through the field of speckle, **Optical Engineering**, v. 25. n. 5, p. 610-612, 1986.

HELLWICH, O. **Basic principles and current issues of SAR interferometry**. 1999. Disponível em: <<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/1999/isprs-workshop/cd/pdfpapers/hellwich.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2007.

IEAv. Instituto de Estudos Avançados – Força Aérea Brasileira. Tutorial: **Imageamento por radar**. 2002. 83 p.

- JENSEN, J.R. **Remote Sensing of the Environment: an earth resource perspective**, Upper Saddle River N.J.: Prentice-Hall, 2000. 545p.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M. Radar fundamentals: the geoscience perspective. In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Principles and applications of imaging radar: manual of remote sensing**, 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. cap. 3, p. 131 – 181.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**, 4. ed. New York: John Wiley and Sons Inc., 2000. cap.8, p. 616-706.
- MARLIANI F.; PALOSCIA, S.; PAMPALONI, P.; KONG, J. A. Simulating coherent backscattering from crops during the growing cycle, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 1, p. 162–177, jan. 2002.
- 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, São José dos Campos. 2000.
- MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; DUTRA, L. V. MAPSAR image simulation based on L-Band polarimetric SAR data of the airborne SAR R99 sensor of the CENSIPAM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 4943-4949. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.
- NARVAES, I. S.; SILVA, A. Q.; SANTOS, J. R. Evaluation of the interaction between SAR L-band signal and structural parameters of forest cover. In: **IEEE International Geoscience And Remote Sensing Symposium**, , Barcelona, Espanha. 2007. p. 1607 - 1610. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.17.15.27>>. Acesso em: 27 jul. 2008.
- NIEVINSKI, F. G.; SOUZA, S. F. Demonstração de processamento interferométrico de imagens de radar de abertura sintética, utilizando programas e dados disponíveis gratuitamente. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos, INPE, p. 4429-4436. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.35/doc/4429.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2007
- PLAUT, J. J.; RIVARD, B.; D'IORIO, M. A. Radar: sensors and case studies. In: Rencz, A. N. **Remote sensing for the earth sciences: manual of remote sensing**, 3. ed., v. 3, John Wiley and Sons Inc., 1999. cap.12, p.613-642.

QUARZEDDINE, M. S. **Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry**. (MSc Degree) – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, 2002. 64p.

RANEY, R. K. Radar fundamentals: technical perspectives. In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**, 3. ed., v. 2, New York: John Wiley and Sons Inc., 1998. cap. 2. p. 9-130.

SALVADOR, L.; BEMAD, P.; FIDALGO, A.; ILUNDAIN, G.; DOMINGUEZ, J.M.; OJALVO, L.; LÓPEZ, A.; MADROÑO, D. IFSAR: an airborne interferometric SAR simulator, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 5, Sept. 2004, p. 3349 - 3352. Issue on the 2004 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'04).

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

SANTOS, J. R.; NEEFF, T.; ARAUJO, L. S.; GAMA, F. F.; DUTRA, L. V.; SOUSA JÚNIOR, M. A. Interferometria SAR (bandas X e P) na estimativa de biomassa florestal. In: Universidade Federal do Paraná; Departamento de Geomática; Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. (Org.). **Série em Ciências Geodésicas: cartografia, instrumento de renovação política e inovação tecnológica**, 1. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2004, v. 4, p. 161-175.

SARABANDI, K.; LIN, Y. C. Simulation of interferometric SAR response to deciduous and coniferous forest stands, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 4, Aug. 1997, p. 1887 - 1889. Issue on the 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'97).

SARABANDI, K.; LIN, Y. C. Simulation of interferometric SAR response for characterizing the scattering phase center statistics of forest canopies, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 38, p. 115–125, Jan. 2000.

SILVA, W. F. **Imagens polarimétricas em banda L do SAR R99B e do MAPSAR (simuladas) para distinguir culturas agrícolas**. 2007-03-19. 145 p. (INPE-14821-TDI/1261). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/05.11.19.02>>. Acesso em: 09 mar. 2008.

SPIEGEL, M. R. **Manual de fórmulas, métodos e tabelas de matemática**, Coleção Schaum, tradução de Roberto Chioccarello, revisão e ampliação de

José Maria Lemes da Silva, 2. ed. São Paulo: Makron Books, McGraw-Hill, 1992. 420 p.

TOUZI, R.; LOPES, A.; BRUNIQUEL, J., VACHON, P. W. Coherence estimation for SAR imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 37, n. 1, p. 135-149, jan. 1999.

TREUHAF, R. N.; MADSEN, S. N.; MOGHADDAM, M.; VAN ZYL, J. J. Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar. **Radio Science**, v. 31, n. 6, p. 1449-1485, dez. 1996.

TREUHAF R.N.; ASNER, G. P.; LAW, B. E.; VAN TUYL, S. Forest leaf area density profiles from the quantitative fusion of radar and hyperspectral data. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 4568-4580, 2002

TREUHAF R. N.; ASNER, G. P.; LAW, B. E. Structure-based forest biomass from fusion of radar and hyperspectral observations. **Geophysical Research Letters** v. 30, p. 1472–1475, maio 2003.

TREUHAF R.N.; LAW, B. E.; ASNER, G. P. Forest attributes from radar interferometric structure and its fusion with optical remote sensing. **BioScience**, v. 54, n. 6, p. 561-571, jun. 2004.

TREUHAF, R. N.; CHAPMAN, B.; DUTRA, L. V.; SANTOS, J. R.; GONÇALVES, F.; MURA, J. C.; GRACA, P. M. A; DRAKE, J. Estimating 3-dimensional structure of tropical forests from radar interferometry. **Ambiência**, v. 2, n. 1, p. 111-119, 2006.

ULABY, F.T.; MOORE, R.K.; FUNG, A . K. **Microwave remote sensing: active and passive: radar remote sensing and surface scattering and emission theory**, 2. ed. v. 2. Norwood: Artech House, 1982. 1064 p.

ULABY, F. T.; DOBSON, M. C. **Handbook of radar scattering statistics for terrain**, Norwood, Artech House, 1989. 357 p.

ULABY, F. T.; SARABANDI, K.; MCDONALD, K.; WHITT, M.; DOBSON, M. C. Michigan microwave canopy scattering model, **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, n. 7, p. 1223 - 1253, 1990.

VAREKAMP, C.; HOEKMAN, D. H. High-resolution InSAR image simulation for forest canopies, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, p. 1648 –1655, jul. 2002.

WEHNER, D.R. **High resolution radar**, 1. ed. Norwood: Artech House, 1987. 484 p.

WILLIAMS, M. L. **PoISARProSim: a coherent, polarimetric SAR simulation of forests for PoISARPro**. 2006. 65 p. Disponível em:

<[http://earth.esa.int/polsarpro/Manuals/PolSARproSim\\_Design.pdf](http://earth.esa.int/polsarpro/Manuals/PolSARproSim_Design.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2007

YANASSE, C. C. F. **Statistical analysis of synthetic aperture radar images and its applications to system analysis and change detection**. 1991. 318 p. PhD Thesis – The University of Sheffield, Sheffield. 1991.

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.