

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUSTAVO HENRIQUE MITTMANN VOIGT

**MÉTODO DE DETECÇÃO DE ALVOS
PARA IMAGENS SAR VHF DE
INTENSIDADE COM RESOLUÇÃO NA
ORDEM DO COMPRIMENTO DE ONDA**

**Alegrete
2022**

GUSTAVO HENRIQUE MITTMANN VOIGT

**MÉTODO DE DETECÇÃO DE ALVOS
PARA IMAGENS SAR VHF DE
INTENSIDADE COM RESOLUÇÃO NA
ORDEM DO COMPRIMENTO DE ONDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Crístian Müller
Coorientador: Dimas Irion Alves

**Alegrete
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)
através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos
Institucionais).

-- Voigt, Gustavo Henrique Mittmann

Método de detecção de alvos para Imagens SAR VHF de intensidade com resolução na ordem do comprimento de onda / Gustavo Henrique Mittmann Voigt.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)
- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES, 2022.

"Orientação: Crístian Müller; Coorientação: Dimas Irion Alves".

1. Detecção de alvos. 2. Sistema SAR VHF UWB. 3. CARABAS-II. 4. Likelihood-Ratio Test.
I. Título.

GUSTAVO HENRIQUE MITTMANN VOIGT

**MÉTODO DE DETECÇÃO DE ALVOS PARA IMAGENS SAR VHF DE INTENSIDADE COM
RESOLUÇÃO NA ORDEM DO COMPRIMENTO DE ONDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 09 de Agosto de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Crístian Müller
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Mauro Fonseca Rodrigues
UNIPAMPA

Prof. Dr. Bruno Boessio Vizzotto
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN MULLER, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2022, às 20:01, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **BRUNO BOESSIO VIZZOTTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2022, às 20:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MAURO FONSECA RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 08:30, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0887403** e o código CRC **64752D05**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete
Av. Tiarajú, 810 – Bairro: Ibirapuitã – Alegrete – RS CEP: 97.546-550
Telefone: (55) 3422-8400

*Este trabalho é dedicado aos meus pais
Volmir e Vanise, que possibilitaram minha
existência e moldaram o meu Eu.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, por todo amor e carinho, pelo apoio e incentivo no decorrer de minha vida, especialmente neste período da graduação. Aos meus pais Volmir e Vanise, pelo apoio irrestrito e incondicional às decisões realizadas que resultaram no meu Eu atual. Às minhas irmãs Giovanna Isabel e Érika Maria pelo apoio, conversas francas e por alegrar meus dias. Agradeço à minha namorada Kauanny pelo apoio incondicional, pelo carinho e compreensão.

Aos orientadores deste trabalho, professores Crístian e Dimas, por acreditarem em meu potencial ao realizarem o convite de Iniciação Científica, por todas as reuniões, presenciais e online, que agregaram em minha vida acadêmica e profissional. Pelo empenho nas disciplinas ministradas, possibilitando a compreensão facilitada do conteúdo e determinado nível de descontração em sala de aula. Pela compreensão em situações adversas, apoio e parceria, mantendo um alto padrão de qualidade nos trabalhos publicados. Espero que esta parceria possa continuar a render ótimos frutos.

Ao professor Renato Machado, pelas revisões, sugestões, incrementos e parcerias nos trabalhos publicados.

Aos colegas de rodas de chimarrão, churrascos, conversas, estudos e jogatinas, Bruno, Dionathan, Gabriel, Henrique, Olivério, Sthefany e Raquel, que contribuíram fortemente nesta jornada, alegrando os semestres e sempre contribuindo com o próximo. Obrigado por todo o apoio, vocês são incríveis e a amizade de vocês é algo especial, espero os convites para os churrascos em Alegrete.

Aos colegas e amigos que fizeram parte do servidor de *Discord* no período de isolamento devido à pandemia global de Sars-Cov-2, possibilitando a manutenção dos contatos mesmo a distância, realização de jogatinas em tempos livres, implementando grupo de estudos para as disciplinas EAD, além de contribuírem para reduzir os traumas causados por essa terrível doença.

Estendo este agradecimento aos colegas de curso que de alguma forma contribuíram no decorrer das disciplinas, em discussões acadêmicas e compartilhamento de experiências.

Agradeço à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho e na jornada acadêmica.

Por fim, agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Saab AB e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de

Nível Superior (CAPES) - Código de financiamento 001 (Pró-Defesa IV) que apoiaram parcialmente o desenvolvimento deste trabalho.

*“Life is like riding a bicycle.
To keep your balance,
you must keep moving.”*

— Albert Einstein

RESUMO

Este documento apresenta um estudo realizado com o intuito de desenvolver um método de detecção de alvos para imagens de radar de abertura sintética (SAR) de resolução de comprimento de onda de intensidade. Os estudos apresentados neste trabalho estão amparados por uma revisão bibliográfica referente aos conceitos empregados, englobando informações sobre sistemas de radares de abertura sintética e conjunto de dados provenientes do sistema SAR VHF CARABAS-II, este conjunto é composto por 24 imagens SAR, cada qual, contendo 25 veículos distribuídos embaixo de vegetação densa. A baixa frequência de operação deste sistema possibilita a visualização parcial destes veículos. No decorrer deste trabalho é desenvolvido um método que utilize imagens SAR de intensidade, visando a detecção dos alvos presentes na mesma, minimizando o nível de falsos alarmes. Inicialmente uma proposta utilizando a distribuição bivariada exponencial como base para o *Likelihood-Ratio Test* é considerada e seus resultados são expostos. Um estudo estatístico é realizado visando obter uma descrição fiel do *background* de imagens SAR VHF diferença de intensidade, onde constatou-se que a distribuição ideal é a distribuição bivariada Gama. O método original foi adaptado de modo a utilizar imagens diferença de intensidade, utilizando a distribuição Gama bivariada como base para o LRT. Os resultados alcançados são comparados com trabalhos renomados na literatura, obtendo desempenho superior aos mesmos.

Palavras-chave: Detecção de alvos. Sistema SAR VHF UWB. CARABAS-II. Likelihood-Ratio Test.

ABSTRACT

This document presents a study carried out to develop a target detection method for intensity wavelength resolution synthetic aperture radar (SAR) images. The studies presented in this work are supported by a literature review referring to the concepts used, encompassing information on synthetic aperture radar systems and a set of data from the SAR VHF CARABAS-II system, this set is composed of 24 SAR images, each one, containing 25 vehicles distributed under dense vegetation. The low frequency of operation of this system allows the partial visualization of these vehicles. In the course of this work, a method is developed that uses intensity SAR images, aiming at the detection of the targets present in it, minimizing the level of false alarms. Initially a proposal using the exponential bivariate distribution as a basis for the Likelihood-Ratio Test is considered and its results are exposed. A statistical study is carried out in order to obtain a faithful description of the background of SAR VHF images, where it was found that the ideal distribution is the bivariate Gamma distribution. The original method was adapted to use intensity difference images, using the bivariate Gamma distribution as the basis for the LRT. The results achieved are compared with renowned works in the literature, obtaining superior performance.

Keywords: Target detection, SAR VHF UWB System, CARABAS-II, Likelihood-Ratio Test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geometria de voo de um <i>Side-Looking Airborne Radar</i>	20
Figura 2 - Imagem SAR proveniente do sistema CARABAS-II.	25
Figura 3 - Veículos militares utilizados como alvos durante o experimento. . .	29
Figura 4 - Sistema CARABAS-II embarcado em aeronave.	29
Figura 5 - Amostras de imagens provenientes do sistema CARABAS-II.	30
Figura 6 - Diagrama de blocos do método de detecção de mudanças.	33
Figura 7 - Imagens binárias de saída do método proposto nas quais as áreas ressaltadas em vermelho representam a região de alvos.	36
Figura 8 - Histograma da região com a presença da estrutura alongada destacada pelo retângulo azul na Figura 7(b).	38
Figura 9 - Diagrama de blocos do método de detecções de mudanças que utiliza imagens diferença	39
Figura 10 - Imagens binárias de saída do método proposto, nas quais as áreas ressaltadas em vermelho e verde representam as regiões de alvos da <i>Imagem 1</i> e <i>Imagem 3</i> , respectivamente.	41
Figura 11 - Avaliação do método proposto utilizando a curva de ROC ao variar-se os valores de parâmetros s	42
Figura 12 - Avaliação do método proposto e de referência (VU et al., 2019b) utilizando a curva de ROC.	43
Figura 13 - Imagens binárias de saída do método proposto, nas quais as áreas ressaltadas em vermelho representam as regiões de alvos da <i>Imagem A</i>	54
Figura 14 - Avaliação do método proposto utilizando a curva de ROC ao variar-se os valores de parâmetros s	56
Figura 15 - Avaliação do método proposto e de referência (VU et al., 2019b) utilizando a curva de ROC.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Performance do método com janelamento 50×50 utilizando a distribuição Exponencial	38
Tabela 2 -	Performance do método proposto utilizando parâmetros de limiar $Th = 0,5$ e $s = 0,275$	42
Tabela 3 -	Teste de Anderson-Darling realizado com a distribuição Exponencial.	48
Tabela 4 -	Teste de Anderson-Darling com distribuição Gama.	50
Tabela 5 -	Performance do método proposto utilizando parâmetros de limiar $Th = 0,05$ e $s = 0,25$	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFRL	<i>Air Force Research Laboratory</i>
FOI	<i>Swedish Defence Research Agency</i>
FOPEN	<i>Foliage Penetration Radar</i>
LRT	<i>Likelihood-Ratio Test</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
SAAB	<i>Svenska Aeroplan AB</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SLAR	<i>Side-Looking Airborne Radar</i>
VHF	<i>Very-High Frequency</i>
UWB	<i>Ultra-Wide Band</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$ \cdot ^2$	Módulo quadrado
$\Lambda(z)$	Teste de razão de verosimilhança sobre z
I_0	Função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA	19
2.1 Características de Sistemas SAR	23
2.2 Tipos de SAR e aplicações	23
2.3 Imagens SAR	24
2.3.1 Imagens SAR de Intensidade	26
3 IMAGENS SAR WAVELENGTH-RESOLUTION	27
3.1 Sistema CARABAS-II	28
3.2 Algoritmos de Detecção de Mudanças	30
3.2.1 Modelos Estatísticos	31
4 ESTUDO DE CASO 1: DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL	33
4.1 Método de Detecção de Mudanças Tradicional	33
4.1.1 Aspectos de Implementação	34
4.1.2 Desenvolvimento Matemático	34
4.2 Resultados Experimentais	35
4.3 Método de detecção de Mudanças Utilizando Imagens Diferença	39
4.4 Resultados Experimentais	40
4.5 Considerações Finais	43
5 ESTUDO DE CASO 2: ANÁLISE ESTATÍSTICA	45
5.1 Teste de Anderson-Darling	45
5.2 Teste de Anderson-Darling aplicado em Imagens SAR de Intensidade	46
6 ESTUDO DE CASO 3: DISTRIBUIÇÃO GAMA	51
6.1 Método de Detecção de Mudanças Utilizando Imagens Diferença	51
6.1.1 Desenvolvimento Matemático	52
6.2 Resultados Experimentais	53
6.3 Considerações Finais	57
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
Referências	61

1 INTRODUÇÃO

Os princípios de detecção de um radar se deram em 1886 pelo físico alemão Heinrich Hertz, que descobriu algumas propriedades básicas sobre ondas eletromagnéticas e sua interação com alguns materiais, como a reflexão que ocorre na incidência sobre superfícies metálicas. Esta técnica foi sendo desenvolvida por pesquisadores que estavam à frente de grandes inovações tecnológicas da época, sendo especialmente desenvolvidas durante a segunda guerra mundial, possibilitando um aumento da frequência de operação e uma maior potência de transmissão (BLUMTRITT; PETZOLD; ASPRAY, 1994).

Sistemas de rádio detecção e localização (*Radio Detection and Ranging* - RADAR) realizam a transmissão de ondas eletromagnéticas sobre algum objeto de interesse, no qual as mesmas são refletidas e captadas pelo receptor, sendo que esse sinal recebido é processado, obtendo assim, as informações desejadas (RICHARDS et al., 2010). Os objetos de interesse detectados são divididos em alvos e *clutter*¹, considerando as características dos mesmos, como composto de revestimento, posição, orientação e velocidade.

Radares são amplamente utilizados mundialmente em diversas aplicações, como o monitoramento de aviões em determinado espaço aéreo, o controle do desmatamento florestal, o monitoramento de queimadas, o controle da velocidade em rodovias, além de detectar objetos sobre vegetação espessa ou mesmo através de muros e paredes (MELVIN; SCHEER, 2014).

Radares de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* - SAR) são caracterizados pela utilização de sensores embarcados em uma plataforma móvel, podendo ser um avião ou um satélite, tradicionalmente. Dessa forma, o sistema percorre uma determinada rota transmitindo ondas eletromagnéticas com frequência e sinal definidos de modo a sanar a aplicação desejada. Uma parcela da potência transmitida pelo radar é refletida ao encontrar algum material metálico na região de iluminação, retornando para o sensor com menor potência e sendo recebida como um “eco” do sinal original transmitido. Estes sistemas de radares possuem a capacidade de operação ininterrupta, não sendo afetada pela condição climática ou horário do dia, pois os mesmos possuem fonte própria para a transmissão e recepção, não dependendo destes fatores para iluminar

¹ *Clutter* pode ser entendido como uma desordem natural existente na imagem, não podendo ser considerado como um ruído, dado que o mesmo possui um comportamento que está diretamente associado ao *background* da imagem.

eletromagneticamente o alvo e realizar seu imageamento (OLIVER; QUEGAN, 2004).

Radares de abertura sintética utilizam o movimento linear da aeronave na qual estão embarcados como meio de sintetizar uma abertura eletromagnética de tamanho superior à abertura eletromagnética das antenas utilizadas nesse sistema, i.e., fazendo uso do Efeito Doppler para obter uma abertura eletromagnética superior. Assim, permite-se ao sistema alcançar menores frequências de operação, sem necessitar o aumento do tamanho físico das antenas do sistema (OLIVER; QUEGAN, 2004). O processamento para a formação de imagens SAR faz uso da magnitude e da fase dos sinais recebidos através dos pulsos sucessivos irradiados sobre os elementos detectados pela abertura sintética. Após determinado número de ciclos, os dados armazenados são recombinaados para criar uma imagem de alta resolução referente à área de observação.

Imagens SAR de amplitude são amplamente discutidas academicamente visando a detecção de alvos que estejam escondidos sob vegetação intensa, sendo um tema com grande apelo militar. Diferentes abordagens foram propostas de modo a aumentar a taxa de detecção e contando conjuntamente com uma taxa de alarmes falsos baixa, destacando-se as abordagens considerando métodos de detecção de mudança, como (VU et al., 2019b) e (ULANDER et al., 2005). Recentemente, diversos estudos foram realizados alterando o método utilizado, considerando abordagens que utilizem pilhas de imagens (VU et al., 2019a), fazendo uso de redes neurais e aprendizado de máquina (YANG et al., 2019), ou até mesmo de teorias estatísticas, como o teorema de Bayes (ALVES et al., 2020a).

Existem métodos de detecção que fazem uso de imagens SAR de intensidade provenientes de sistemas SAR que operam na faixa de micro-ondas (MATSUOKA; YAMAZAKI, 2004). No entanto, há pouca discussão na literatura no que se refere à utilização desses métodos em sistemas que provêm imagens SAR *Ultra-Wide Band* (UWB) *Very-High Frequency* (VHF).

Este trabalho apresentará a proposta de um novo método de detecção de alvos que utiliza imagens SAR VHF de intensidade que possui resolução na ordem do comprimento de onda, com o qual pretende-se alcançar níveis competitivos de detecção minimizando a quantidade de falsas detecções. Pretende-se, adicionalmente, realizar um estudo estatístico referente a imagens SAR VHF de intensidade, visando encontrar a distribuição estatística que descreva precisamente o *background* dessas imagens. As hipóteses referentes ao método proposto neste trabalho são comparadas em termos de capacidade de detecção e taxa de alarmes falsos, com métodos reconhecidos que utilizam imagens de

amplitude em seu desenvolvimento.

Este trabalho é dividido da seguinte forma. No Capítulo 2 apresentam-se as principais propriedades no que se refere ao funcionamento de sistemas de radares de abertura sintética e suas imagens. Em seguida, no Capítulo 3 é exposto um caso específico de sistemas SAR, i.e., *wavelength-resolution*, ademais, expõem-se algumas características únicas observáveis em imagens provenientes destes sistemas, além de detalhar o conjunto de dados utilizado na realização deste estudo. Na sequência, no Capítulo 4 apresenta-se o estudo inicial proposto neste trabalho que contempla a utilização da distribuição exponencial em algoritmos de detecção de mudanças utilizando imagens de intensidade. Logo após, ao longo do Capítulo 5 realizou-se um estudo estatístico detalhado no que se refere a imagens SAR de intensidade *wavelength-resolution* e a correta distribuição a ser empregada em algoritmos de detecção de mudanças, analisando-se a utilização de imagens de diferença e a variação causada na análise estatística inserida por esta alteração. O Capítulo 6 demonstra o desenvolvimento realizado, além dos resultados obtidos ao utilizar-se imagens de diferença em conjunto com a distribuição Gama em algoritmos de detecção de mudanças. Este trabalho é finalizado no Capítulo 7, onde estão expostas as principais análises obtidas no decorrer do mesmo, ressaltando alguns resultados e propondo trabalhos futuros.

2 RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Radares de abertura sintética, também conhecidos como radares SAR, fazem parte dos sistemas de radares ativos, i.e., o próprio radar emite ondas eletromagnéticas na direção da região sombreada e coleta a parcela refletida desta onda. O caso específico de radares SAR faz uso de pulsos eletromagnéticos para a irradiação de determinada região do espaço e utiliza o intervalo entre pulsos para a recepção e medição das ondas refletidas pela superfície em questão (MELVIN; SCHEER, 2014).

Sistemas de radares de abertura sintética utilizam informações de movimento relativo entre alvos e sensores, de modo a obter um imageamento da região de interesse. De maneira contrária a sistemas de radares tradicionais, radares de abertura sintética embarcados em aeronaves obtêm os dados através de pequenos ângulos laterais, geralmente entre 10° e 40° , obtendo dessa maneira uma perspectiva de vista lateral. Dito isso, pode-se afirmar que sistemas SAR podem receber a nomenclatura Radar Aéreo de Vista Lateral (SLAR - *Side-Looking Airborne Radar*), observa-se que essa nomenclatura não é usualmente adotada pois sistemas SLAR normalmente referem-se a radares de abertura real (RICHARDS et al., 2010).

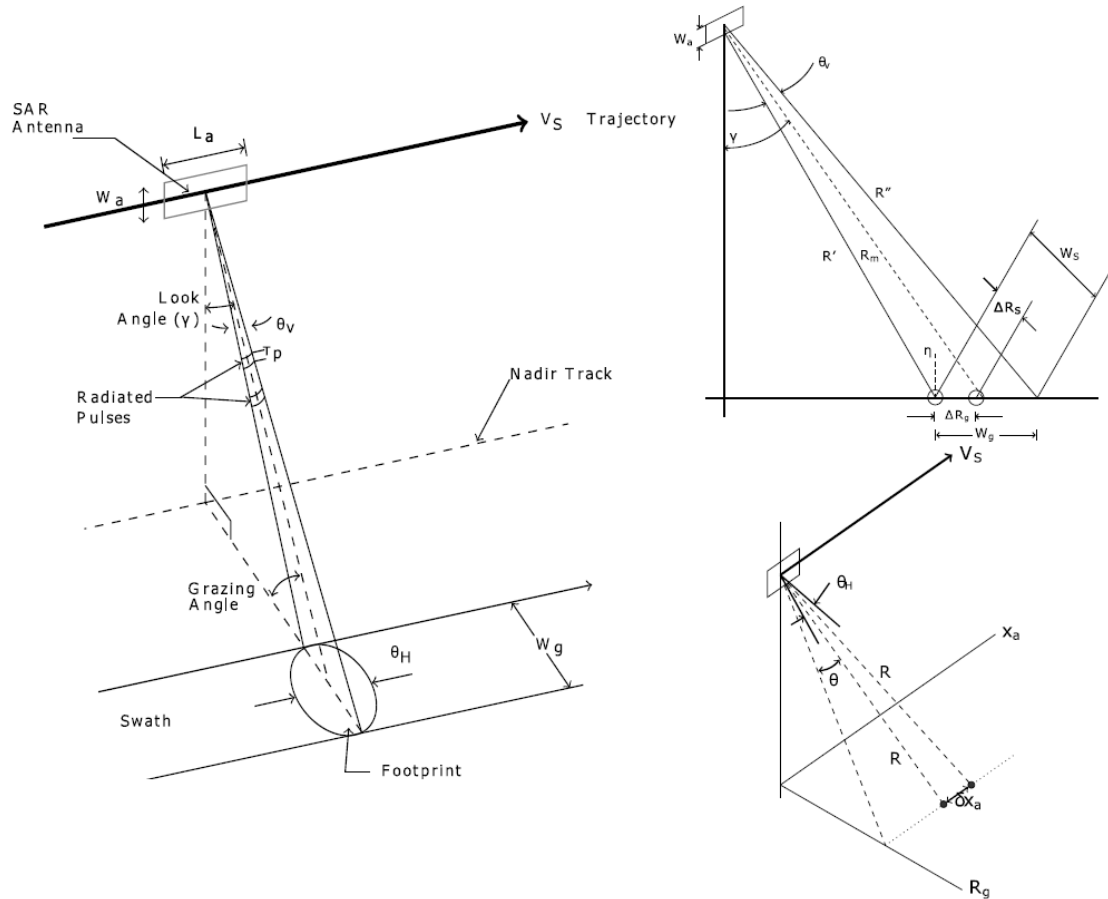
O funcionamento de radares SAR é inspirado em radares SLAR, que são sistemas baseados na emissão de sinais eletromagnéticos em direção ortogonal à geometria de voo da aeronave na qual o mesmo está embarcado. Sistemas SLAR podem ser divididos em radares de abertura sintética e radares de abertura real (RAR), sendo que, por convenção, a nomenclatura SLAR é utilizada referindo-se a radares de abertura real (RICHARDS et al., 2010).

A coleta de dados em radares SAR é realizada através do processo no qual um radar embarcado em plataforma móvel, seja avião ou satélite, transmite pulsos e coleta ecos das regiões imageadas. Os ecos associados com cada um dos pulsos provêm informações referentes à dimensão de alcance, enquanto os associados com a repetição de pulsos provê informações sobre a dimensão de azimute. Formando uma matriz bidirecional, cujos elementos possuem informações de amplitude e fase (MOREIRA et al., 2013).

Sistemas SAR são empregados de modo a realizar diferentes medidas sobre determinada localização, dessa forma alcançando resoluções azimutais mais finas, sendo esta uma grande vantagem deste sistema ao comparar-se com sistemas SLAR, considerando antenas de tamanhos similares. A geometria de sistemas SAR está exposta

na Figura 1. Uma análise referente a este ganho de resolução similar a desenvolvida por (TOMIYASU, 1978) e (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991) será brevemente apresentada. Pode ser observado na Figura 1 que a separação mínima entre dois pontos resolvíveis do solo (ΔR_g) pode ser descrito como uma função de sua separação na direção de alcance inclinado (ΔR_s), então ΔR_g pode ser descrita por

Figura 1 – Geometria de voo de um *Side-Looking Airborne Radar*.



Fonte: Adaptado de (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991).

$$\Delta R_g = \frac{\Delta R_s}{\sin(\eta)} = \frac{cT_p}{2 \sin(\eta)}, \quad (1)$$

sendo η o ângulo de incidência, o qual é idêntico ao ângulo de visão γ para a geometria considerada, T_p é a duração de pulso e c a velocidade da luz. Assumindo que técnicas de compressão de pulso são empregadas, o sinal de *chirp* comprimido é descrito em (MOREIRA et al., 2013), e considerando um processamento adequado do sinal recebido (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991), a resolução alcançável de alcance pode ser descrita por

$$\delta R_g = \frac{c}{2B_\omega \sin(\eta)}, \quad (2)$$

sendo B_ω a largura de banda do sinal transmitido. Dado que δR_g depende somente de B_ω e do processamento empregado no sinal recebido, é possível afirmar que sistemas SAR e SLAR possuem mesmas características no que se refere à dimensão de alcance. Sendo o ganho em resolução somente associado com a resolução de azimute.

De maneira similar, a resolução azimutal pode ser definida como a mínima distância na dimensão ao longo do trajeto do avião que pode ser distinguível pelo sistema. Dado que os sinais transmitidos possuem um espalhamento angular θ_H na região azimutal, é possível descrever a resolução azimutal para sistemas SLAR como

$$\delta x_a = R\theta_H = \frac{R\lambda}{L_a}, \quad (3)$$

sendo x_a a variável associada com a dimensão azimutal, R a variação de alcance, λ o comprimento de onda do sinal transmitido, e L_a o comprimento da antena na dimensão ao longo da trajetória. De acordo com (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991), (3) é o limiar de resolução azimutal para sistemas SLAR. Então, para alcançar resoluções azimutais mais finas, é necessário incrementar a dimensão da antena, no entanto, isso tende a não ser possível por razões práticas.

Entretanto, em cenários nos quais existe o movimento do radar, espera-se que o eco relativo à direção azimutal de alvos próximos tenda a resultar em diferentes desvios de frequência, que são causados pela diferença de velocidades instantâneas entre os mesmos. Esta observação expressa em (WILEY, 1965) é o princípio básico de tecnologias SAR.

No cenário utilizado, o efeito Doppler pode ser aproximado por

$$f_d = \frac{2V_{st} \sin(\theta)}{\lambda} \approx \frac{2V_{st}x_a}{\lambda R}, \quad (4)$$

sendo V_{st} a velocidade relativa entre objeto e a estação móvel. De modo a simplificar a equação, adotou-se as mesmas considerações realizadas em (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991), na qual $V_{st} \approx V_s$, sendo V_s a velocidade da estação móvel. Utilizando algumas manipulações algébricas, a resolução azimutal pode ser descrita como

$$\delta x_a = \frac{\lambda R}{2V_s} \delta f_d = \frac{\lambda R}{2V_s S_t}, \quad (5)$$

sendo S_t o tempo no qual o alvo está sendo iluminado pelo radar. Na geometria

apresentada na Figura 1, S_t é dada por

$$S_t = \frac{\lambda R}{V_s L_a}. \quad (6)$$

Desse modo, é possível reescrever (5) de modo a torná-la uma função que depende somente do tamanho da antena. Sendo assim, a resolução azimutal de sistemas SAR é dada por

$$\delta x_a = \frac{L_a}{2}. \quad (7)$$

Radares SAR fazem uso do movimento linear da aeronave na qual estão embarcados como meio de sintetizar uma abertura eletromagnética de tamanho superior à abertura eletromagnética das antenas utilizadas nesse sistema, i.e., fazendo uso do Efeito Doppler para uma abertura eletromagnética superior. Assim, permite-se ao sistema alcançar menores frequências de operação, sem necessitar o aumento do tamanho físico das antenas do sistema e possuindo uma capacidade de operação constante, i.e., não dependendo de fatores climáticos e de iluminação solar para sua operação (OLIVER; QUEGAN, 2004).

O conjunto de dados obtidos no sobrevoo sobre a região de interesse é armazenado durante o voo. Estes dados são tratados em laboratório, no qual realiza-se a formação das imagens de alta resolução provenientes das missões realizadas. A formação das imagens é realizada utilizando as informações de magnitude e fase dos sinais recebidos pelo radar após um número determinado de pulsos sucessivos em diferentes posições espaciais na mesma geometria de voo. Os dados são tratados e recombinaados de acordo com o Efeito Doppler inerentes ao transmissor, para assim formar essas imagens do terreno de interesse.

Existem diversos radares SAR acoplados em satélites, operando em frequências na ordem de GHz, como o sistema *RADARSAT Constellation* construído pela Agência Espacial Canadense, operando em 5,405 GHz. Além disto, existem radares SAR acoplados em aeronaves, como o sistema CARABAS-II desenvolvido pela FOI em parceria com a SAAB AB (LUNDBERG et al., 2006b), que será abordado com mais detalhes no Capítulo 3.

2.1 Características de Sistemas SAR

Sistemas SAR possuem um grande interesse de pesquisa mundialmente devido a algumas características que o tornam únicos. Destaca-se a capacidade de operação independentemente de condições climáticas favoráveis, dado que estes sistemas realizam o imageamento através de tecnologias de rádio-frequência (RICHARDS et al., 2010). Ademais, estes sistemas fazem uso do movimento constante no qual estão embarcados de modo a obter características singulares de acordo com a aplicação na qual fora desenvolvida. Podem ser empregados em mapeamentos urbanos, mapeamento de recursos minerais, monitoramento de regiões, monitoramento marítimo, entre outros.

Este tipo de sistema tende a destacar objetos ou construções desenvolvidas pelo homem, as quais normalmente tendem a oferecer uma maior refletividade eletromagnética e com menor quantidade de dispersores que o ambiente na região. Destaca-se adicionalmente, a maior resolução espacial obtida através de sistemas SAR ao comparar-se com sistemas de radares convencionais.

2.2 Tipos de SAR e aplicações

Na atualidade, é notável a existência de diversos radares de abertura sintética, cada qual provendo imagens com características específicas podendo ser utilizadas nas mais diversas aplicações. O sensoriamento remoto se destaca dentre estas aplicações, tendo diversos objetivos, como o imageamento urbano, marítimo, ou de superfícies. Empregando diferentes tipos de radares de abertura sintética, com frequências de operação escolhidas de modo a realizar um bom imageamento da área iluminada e cumprindo o seu objetivo pré-determinado.

Sistemas SAR embarcados em satélites são utilizados em diversas aplicações nas áreas de mineração, agricultura, ambiental e militar, como em situações de monitoramento e classificação de solo (MATSUOKA; YAMAZAKI, 2004), e.g., acompanhamento de geleiras e nível de neve, detecção de alagamentos, monitoramento de navios, detecção de terremotos (YANG et al., 2019).

Radares de abertura sintética embarcados em aeronaves possuem diversas aplicações militares, como por exemplo, detecção e monitoramento de alvos em determinadas áreas. Aplicações militares mais específicas possuem foco na detecção de alvos em regiões florestais, com isso, necessitam-se sistemas SAR com características de

penetração de folhagem (FOPEN) (VU et al., 2017).

Sistemas FOPEN, geralmente são compostos por radares UWB que operam nas bandas de frequência VHF ou UHF. Se caracterizam por formarem imagens com resolução na ordem do comprimento de onda do sinal eletromagnético emitido, recebendo o nome de *wavelength-resolution SAR Systems* (FROLIND; ULANDER, 1998). Com estas características possui a capacidade de detectar alvos escondidos dentro de vegetação de alta densidade (ULANDER et al., 2004), dado que a onda irradiada pelo sistema irá refletir somente em superfícies com dimensões superiores ao seu comprimento de onda e, conseqüentemente, penetrando nas copas das árvores e vegetação sem perda do sinal, possibilitando a detecção de veículos e estruturas presentes sob a vegetação.

2.3 Imagens SAR

Sistemas de radares de abertura sintética provêm imagens com características únicas, como a imunidade a reflexões solares e condições climáticas, alta reflexão de objetos metálicos, e.g, objetos feitos pelo homem, como construções e veículos, visíveis, sob o solo (*Ground-Penetrating Radar - GPR*) ou sob vegetação densa (FOPEN).

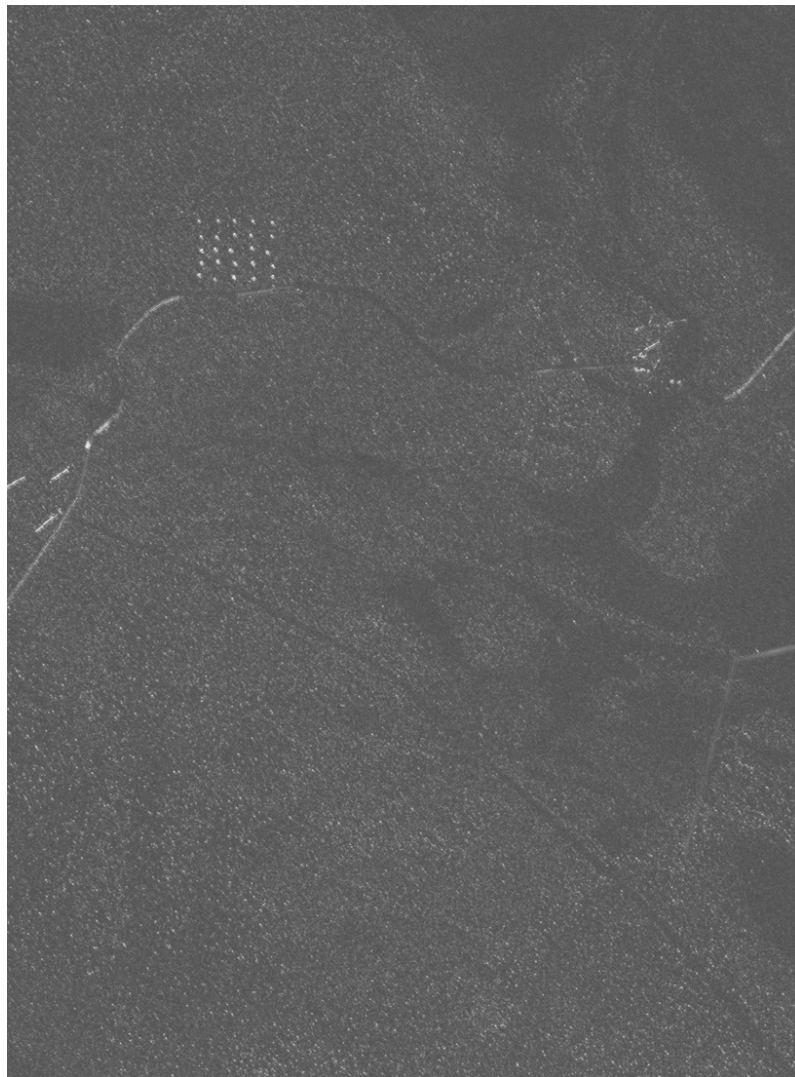
A formação de imagens SAR se dá pelo processo de sobrevoos sobre determinada região de interesse descrito anteriormente, no entanto, este processo resulta em uma imagem crua, que pode ser representada por uma matriz de elementos complexos. No entanto, estas imagens não possuem nenhuma informação utilizável.

O processo de transformação destas imagens cruas em informações úteis se dá pela utilização de técnicas de processamento de sinais. Este processo pode ser simplificado pela utilização de filtros de compreensão, i.e., duas filtragens casadas, uma para o *range* e outra para o azimute, conforme (MOREIRA et al., 2013).

Esta discussão prévia apresenta o processo de obtenção de informações úteis de imagens SAR cruas. No entanto, a maioria das aplicações que utilizem imagens SAR requerem um tratamento específico para obter determinadas características relacionadas com o cenário de interesse. Este processo de tratamentos, pode ser descrito em duas análises distintas (OLIVER; QUEGAN, 2004). A primeira, baseia-se nos processos dispersores locais e propriedades eletromagnéticas da superfície terrestre, onde todas as informações obtidas são diretamente relacionadas com as teorias eletromagnéticas. Já a segunda análise se relaciona com a informação obtida através da área de interesse, de modo a encontrar características ou padrões específicos nas imagens, sendo esta análise

diretamente relacionada com a teoria estatística. Destaca-se que ambas as análises podem ser empregadas em conjunto, dependendo da situação.

Figura 2 – Imagem SAR proveniente do sistema CARABAS-II.



Fonte: (FORCE., 2021).

Essas imagens são formadas em laboratório através dos dados coletados pelos radares de abertura sintética em suas missões de sobrevoo. São formadas através das informações de fase e magnitude recebidas, além de passar por um processo de calibração e geo codificação para finalmente formar uma imagem como a apresentada na Figura 2, sendo tratada como uma função bidimensional entre o alcance e o azimute.

2.3.1 Imagens SAR de Intensidade

O emprego de imagens SAR de intensidade proporcionam uma maior distância entre pixels relacionados com alvos e pixels provenientes de dispersores. Este tipo de imagem é tradicionalmente empregada em sistemas SAR de microondas, nos quais são utilizadas de modo a descrever áreas urbanas, superfície do oceano ou cenários de modo a mitigar o ruído granular presente nestes sistemas.

Imagens SAR de intensidade neste trabalho são caracterizadas pela sua obtenção através da operação $|\cdot|^2$ (módulo ao quadrado) realizada sobre imagens SAR de amplitude. Observa-se que esta operação resulta em uma imagem totalmente positiva, transformando pixels negativos provenientes de operações anteriores em pixels positivos. O emprego deste tipo de imagem tende a ressaltar pixels com alta amplitude nas imagens originais, e mitigar pixels com baixa amplitude, de modo a gerar uma imagem que contenha um grande espaçamento entre *clutter* e alvos, cenário este que pode ser explorado em métodos de detecção de mudanças.

3 IMAGENS SAR WAVELENGTH-RESOLUTION

Historicamente, um dos maiores desafios de monitoramento e detecção de alvos em sistemas de radares se dá em regiões com a presença de vegetação densa. Desenvolveram-se diversos sistemas de radares buscando obter uma solução para o problema apresentado, sendo esses sistemas denominados FOPEN.

Uma das alternativas para sanar este problema foi a utilização de imagens SAR, em que utilizou-se inicialmente sistemas SAR operando na faixa de frequência de microondas, observando-se uma enorme quantidade de alarmes falsos devido à abundância de pequenos dispersores relacionados à copa das árvores. Uma alternativa de modo a evitar estas falsas detecções foi desenvolvida diminuindo a frequência de operação para a banda UHF ou VHF, possibilitando uma maior penetração do sinal na vegetação.

Sistemas UHF e VHF FOPEN SAR possuem como características suas grandes larguras de banda fracionadas, além de grande fração de largura de banda e sua grande largura de banda da antena. Estas características somadas resultam em sistemas com resolução na ordem do comprimento de onda do mesmo. Imagens obtidas por sistemas que possuam esta característica são chamadas de Imagens *wavelength-resolution*.

Imagens *wavelength-resolution* se caracterizam por possuírem uma resolução na ordem do comprimento de onda do sistema. Esta célula de resolução pode ser descrita através de

$$\delta_A = \frac{\lambda_c c}{4\theta_H B_\omega}, \quad (8)$$

sendo λ_c o comprimento de onda correspondendo à frequência central do sistema, θ_H o ângulo de abertura, c a velocidade da luz e B_ω a largura de banda do sistema (MELVIN; SCHEER, 2014).

Imagens *wavelength-resolution* possuem uma característica diferente no que se refere à fenomenologia de dispersores, ao comparar-se com imagens SAR tradicionais. Em sistemas *wavelength-resolution*, elementos com tamanhos similares a alvos, tendem a apresentar um regime de ressonância de dispersores, enquanto objetos pequenos possuem um regime de dispersão *Rayleigh* (ULANDER et al., 2005).

Estes sistemas tendem a possuir uma menor influência de dispersores pequenos provenientes do solo da região de interesse, conforme as características fenomenológicas do sistema (ULANDER, 2004). Devido a isto, o processo de dispersão está relacionado somente com dispersores que possuam dimensões similares ao comprimento de onda do sistema.

Este comportamento garante que haverá somente um único dispersor em cada célula de resolução do sistema, garantindo que a imagem resultante não sofrerá de maneira significativa com o ruído granular que representa um dos maiores desafios em imagens SAR tradicionais. Além disto, grandes dispersores tendem a possuir um comportamento estático e sofrendo menor influência de condições climáticas, ao comparar-se com dispersores pequenos. Desse modo, é possível afirmar que grandes dispersores possuem uma tendência a serem estáveis no tempo, especialmente em sistemas que operam em baixa frequência. Sendo assim, é possível obter imagens com alta semelhança de determinada região ao realizar múltiplas passagens sobre a mesma (MACHADO et al., 2016).

Dito isto, é possível afirmar-se que imagens *wavelength-resolution* podem ser utilizadas em métodos de detecção de mudanças sem a necessidade de utilizar técnicas de mitigação de *clutter*, (VU, 2017) e (ULANDER et al., 2005). Neste trabalho, respeitando as observações realizadas, dispostas neste capítulo e seguindo uma abordagem similar a (ULANDER, 2004), no qual o autor define que a banda VHF possui o melhor comprimento de onda para radares que buscam suprir aplicações FOPEN especializadas em detecção de veículos, é adotado o conjunto de dados proveniente do sistema CARABAS-II.

3.1 Sistema CARABAS-II

O sistema CARABAS-II consiste num sistema de radar de abertura sintética embarcado em aeronaves desenvolvido pela FOI em parceria com a empresa sueca SAAB AB. Este sistema é caracterizado pela sua operação em VHF, operando na faixa de frequência de 20 a 90 MHz, resultando em uma resolução espacial em torno de 2,5 m e o tamanho de cada pixel correspondendo a 1 m². Estas características proporcionam a este sistema a capacidade de detecção de objetos escondidos pela vegetação, ou seja, capacidade de penetração de vegetação, tornando-se um sistema denominado FOPEN.

Esta capacidade de detecção foi testada por meio de uma campanha aérea realizada em uma região remota ao Norte da Suécia, composta majoritariamente de vegetação densa, entretanto, contendo estradas, linhas de transmissão, rios e lagos. A região testada localiza-se próxima da base militar sueca *RFN Vidsel*, possui um tamanho de 3 km × 2 km e este teste foi realizado no ano de 2002. As imagens deste sistema foram obtidas através da distribuição de 25 veículos militares terrestres em quatro diferentes locais nesta

região, resultando em quatro missões (LUNDBERG et al., 2006b). Foram utilizados três modelos de veículos militares com diferentes dimensões: dez veículos do modelo TGB11 ($4,4 \times 1,9 \times 2,2$ m), oito veículos do modelo TGB30 ($6,8 \times 2,5 \times 3,0$ m), além de sete veículos do modelo TGB40 ($7,8 \times 2,5 \times 3,0$ m), sendo as dimensões correspondendo à comprimento \times largura \times altura. A Figura 3 apresenta os veículos utilizados, sendo possível observar algumas características referentes à vegetação da região de interesse.

Figura 3 – Veículos militares utilizados como alvos durante o experimento. Na esquerda o TGB11, no centro o TGB30 e na direita o TGB40.



Fonte: (LUNDBERG et al., 2006b).

Na realização desta campanha aérea, ocorreram seis voos para cada local de alocação dos veículos, ou seja, seis passagens para cada missão, sendo que dois voos foram realizados para cada geometria de voo. A Figura 4 apresenta uma imagem do sistema CARABAS-II embarcado na aeronave utilizada para a realização destas missões.

Figura 4 – Sistema CARABAS-II embarcado em aeronave.



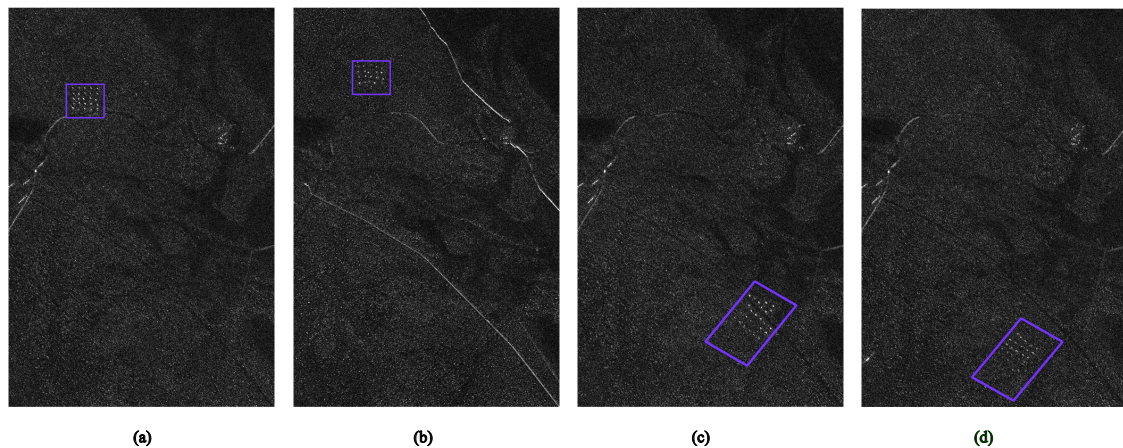
Fonte: (LUNDBERG et al., 2006b).

O conjunto de dados referente a este sistema consiste de 24 imagens, cada qual com tamanho de 3000×2000 pixels, que foi publicamente disponibilizado por meio da

AFRL (*Air Force Research Laboratory*) (FORCE., 2021), sendo que este conjunto está calibrado, filtrado, equalizado e georreferenciado.

A Figura 5 apresenta amostras provenientes do sistema CARABAS-II, expondo as diferentes localizações onde foram dispostos os 25 veículos militares, além de expor diferentes geometrias de voo adotadas. Destaca-se que a localização dos alvos está ressaltada pela cor roxa.

Figura 5 – Amostras de imagens provenientes do sistema CARABAS-II, com os alvos destacados, referentes à Missão 2 e Passagem 1 (a), Missão 3 e Passagem 2 (b), Missão 4 e Passagem 5 (c) e Missão 5 e Passagem 1 (d).



Fonte: Adaptado de (FORCE., 2021).

3.2 Algoritmos de Detecção de Mudanças

Algoritmos de detecção de mudança são amplamente utilizados em imagens de radares, e são bastante discutidos na literatura quando utilizam como entrada imagens SAR (ULANDER et al., 2004). Diversos algoritmos de detecção de mudanças são baseadas em testes de hipóteses (VU et al., 2019b), (ULANDER et al., 2005), como os considerados nesse trabalho, estes algoritmos são baseados em um teste de hipóteses para determinar se um alvo está presente ou não em determinado pixel da imagem testada. As hipóteses se dividem em

$$H_0 : z = q \text{ (Sem alvos),} \quad (9)$$

$$H_1 : z = s + q \text{ (Com alvos),} \quad (10)$$

nas quais a hipótese H_0 considera que o pixel avaliado está relacionado diretamente com o *background* da imagem, enquanto a hipótese H_1 considera que o pixel avaliado está diretamente relacionado com o alvo, s está relacionada com o alvo, q é definida por $q = c + n$, no qual, c é relacionada com o *clutter* e n com o ruído presente na imagem. Estes algoritmos fazem uso de testes de razão de verossimilhança LRT (*Likelihood-Ratio Test*) como uma abordagem comum para resolução dessas hipóteses (LUNDBERG et al., 2006b).

Os testes de razão de verossimilhança se amparam em uma distribuição estatística para determinar se a hipótese testada é válida para uma taxa fixa de falso alarme (FAR). O teste estatístico pode ser descrito por

$$\Lambda(z) \geq \frac{P(z|H_1)}{P(z|H_0)}, \quad (11)$$

no qual $P(z|H_1)$ e $P(z|H_0)$ são modelados utilizando o modelo estatístico previamente escolhido.

3.2.1 Modelos Estatísticos

A escolha das distribuições estatísticas para a modelagem de imagens SAR é um processo complexo, devido às características únicas do ambiente e do sistema utilizado. Visando desenvolver algoritmos de detecção de alvos, autores renomados realizaram diversas simplificações nos quesitos estatísticos. Dentre elas, destaca-se a extrapolação estatística ao assumir que um par de imagens SAR possa ser modelada por uma distribuição bivariada sendo que ambas separadas são modeladas por essa distribuição, o que em termos estocásticos ao não levar em conta fatores como a independência e correlação entre imagens, torna essa extrapolação incorreta. No entanto, em termos de engenharia, esta extrapolação vem sendo utilizada em diversos trabalhos consolidados na literatura, devido a isto, será seguido ao longo deste trabalho a mesma extrapolação.

Diversas distribuições já foram utilizadas para modelar estatisticamente pares de imagens SAR VHF *wavelength-resolution*, dentre as quais pode-se destacar distribuição Gama bivariada (VU et al., 2019b), Rayleigh bivariada (GOMES et al., 2019) e até mesmo a Gaussiana bivariada, mesmo essa última sendo uma escolha apenas utilizada por sua simplicidade, conforme explicado pelo autor (ULANDER et al., 2004). Adicionalmente, segundo (OLIVER; QUEGAN, 2004), imagens de intensidade SAR de micro-ondas

tradicionais podem ser modeladas a partir de uma distribuição exponencial. Desse modo, seguindo critérios de seleção similares aos utilizados em (VU et al., 2019b) (GOMES et al., 2019) (ULANDER et al., 2004), pode-se utilizar a distribuição exponencial bivariada para modelar estatisticamente pares de imagens de intensidade SAR VHF *wavelength-resolution*. Esta distribuição foi descrita por (NADARAJAH; KOTZ, 2006) e é expressa por

$$f(x,y) = \frac{\mu_1\mu_2}{1-\rho} \exp\left[-\frac{\mu_1x + \mu_2y}{1-\rho}\right] I_0\left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2xy}}{1-\rho}\right], \quad (12)$$

sendo μ_1 e μ_2 a inversa da média de X e Y , respectivamente, ρ o coeficiente de correlação entre X e Y , e I_0 sendo a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero.

Outro modelo estatístico que pode ser utilizado para descrever com qualidade os dados provenientes de imagens SAR de intensidade é a distribuição Gama bivariada (VU et al., 2019b). Esta é descrita através de

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{\Gamma(k_2)\Gamma(k_1 - k_2)\theta_1\theta_2(1-\eta)\eta^{(k_2-1)/2}} \left(\frac{x_1}{\theta_1}\right)^{k_1-k_2} \left(\frac{x_1}{\theta_1} \frac{x_2}{\theta_2}\right)^{(k_2-1)/2} \\ \times \exp\left[-\frac{1}{1-\eta} \left(\frac{x_1}{\theta_1} + \frac{x_2}{\theta_2}\right)\right] \int_0^1 (1-t)^{(k_2-1)/2} t^{(k_1-k_2-1)} \exp\left[\frac{\eta}{1-\eta} \left(\frac{x_1}{\theta_1}\right) t\right] \\ \times I_{k_2-1}\left[\frac{2}{1-\eta} \sqrt{\eta \left(\frac{x_1}{\theta_1} \frac{x_2}{\theta_2}\right) (1-t)}\right] dt, \quad (13)$$

sendo $I_{(\cdot)}[\cdot]$ a notação referente à função de Bessel modificada de primeira ordem, x_1 e x_2 variáveis aleatórias, $k_{(\cdot)}$ e $\theta_{(\cdot)}$ os parâmetros de forma e escala.

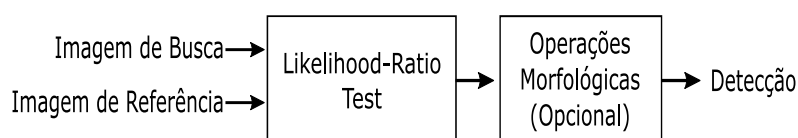
4 ESTUDO DE CASO 1: DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

Visando obter um método de detecção de alvos para imagens SAR VHF de intensidade com resolução na ordem do comprimento de onda, nesta secção são abordados estudos referentes à utilização da distribuição exponencial em um método de detecção de alvos. Ademais, são apresentados aspectos de implementação, equacionamentos, discussões e resultados obtidos. A escolha desta distribuição visando descrever estatisticamente a hipótese nula de imagens SAR VHF de intensidade *wavelength-resolution* segue a premissa expressa em (OLIVER; QUEGAN, 2004).

4.1 Método de Detecção de Mudanças Tradicional

O método de detecção de mudanças proposto nesta secção é realizado em duas etapas básicas, conforme exposto na Figura 6. Inicialmente, o LRT é executado, atuando com duas imagens de intensidade como entrada e resultando em uma imagem binária em sua saída. A próxima etapa consiste na realização de operações morfológicas na imagem binária proporcionando uma mitigação de detecções isoladas e de múltiplas detecções do mesmo alvo, destaca-se que esta etapa é opcional.

Figura 6 – Diagrama de blocos do método de detecção de mudanças.



Fonte: Autor.

A realização do LRT é realizada através da utilização de duas imagens em sua entrada, sendo ambas imagens de intensidade e obtidas através da operação $|\cdot|^2$ em cada pixel das imagens de amplitude provenientes do conjunto de dados a ser utilizado. Adicionalmente, destaca-se que a imagem na qual é realizada a busca de alvos recebe o nome de imagem de busca, similarmente, à imagem na qual assume-se que não há alvos e é utilizada para descrever o *background* é chamada de imagem de referência.

O teste proposto em (17) realiza a operação de limiar que consiste em designar o valor 1 aos pixels nos quais o valor obtido através do LRT seja maior ou igual ao valor do parâmetro de limiar Th , i.e., $\Lambda(z) \geq Th$, e conseqüentemente, designando o valor 0 aos pixels nos quais o valor obtido através do LRT seja menor ao valor do parâmetro de

limiar Th , i.e., $\Lambda(z) < Th$, dessa maneira, resultando em uma imagem binária. Ressalta-se adicionalmente que os parâmetros estatísticos necessários para a distribuição bivariada exponencial são obtidos através de um janelamento de 100×100 pixels com um passo com tamanho de 10 pixels, seguindo o padrão sugerido por (LUNDBERG et al., 2006a).

As operações morfológicas são aplicadas sobre a matriz binária de saída do LRT e foram selecionadas de modo a facilitar o objetivo do método proposto, i.e., facilitar a detecção de alvos minimizando as falsas detecções. Nesta seção é utilizada uma operação de erosão seguida de duas operações de dilatação, com o objetivo de mitigar pixels isolados e agrupar pixels próximos, diminuindo o número de falso alarme e evitando a múltipla detecção de um alvo.

4.1.1 Aspectos de Implementação

Visando a implementação do método descrito anteriormente, alguns aspectos devem ser ressaltados como a constante de intensidade s e o parâmetro de limiar Th , os quais foram definidos empiricamente de modo a obter resultados, i.e., uma tabela detalhada expondo os pares estudados, além de múltiplas curvas de ROC para uma avaliação do desempenho.

As operações morfológicas adotadas nessa seção foram escolhidas visando uma comparação justa com (LUNDBERG et al., 2006b) e (ULANDER et al., 2005), além de outros artigos da literatura que sigam essa mesma escolha. Primeiramente, é adotada a operação de erosão com tamanho igual ao da célula de resolução do sistema ($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$). Logo em seguida, é adotada a operação de dilatação, que possibilita a junção de detecções que estão em uma região compreendida de 10 metros (3 pixels).

4.1.2 Desenvolvimento Matemático

O equacionamento do LRT, que possui como base a distribuição bivariada exponencial, pode ser obtido conforme demonstrado a seguir. Utilizando como base (12) em conjunto com (11), obteve-se o seguinte processo de equacionamento, no qual a hipótese $P[z|H_1]$ descreve a presença de alvos na área testada e é descrita pela seguinte

equação

$$P[z|H_1] = \frac{\mu_1\mu_2}{1-\rho} \exp \left[-\frac{\mu_1(x-S_x)^2 + \mu_2(y-S_y)^2}{1-\rho} \right] I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}(x-S_x)^2(y-S_y)^2}{1-\rho} \right]. \quad (14)$$

De maneira análoga, a hipótese $P[z|H_0]$ descreve a ausência de alvos na área testada e é descrita pela seguinte equação

$$P[z|H_0] = \frac{\mu_1\mu_2}{1-\rho} \exp \left[-\frac{\mu_1x^2 + \mu_2y^2}{1-\rho} \right] I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}x^2y^2}{1-\rho} \right]. \quad (15)$$

Através dessas hipóteses, pode-se realizar o LRT utilizando como base (11), obtendo

$$\frac{P[z|H_1]}{P[z|H_0]} = \frac{\frac{\mu_1\mu_2}{1-\rho} \exp \left[-\frac{\mu_1(x-S_x)^2 + \mu_2(y-S_y)^2}{1-\rho} \right] I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}(x-S_x)^2(y-S_y)^2}{1-\rho} \right]}{\frac{\mu_1\mu_2}{1-\rho} \exp \left[-\frac{\mu_1x^2 + \mu_2y^2}{1-\rho} \right] I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}x^2y^2}{1-\rho} \right]}. \quad (16)$$

É possível considerar $S_x = 0$ dado que a imagem de referência não possui alvos, além de realizar algumas simplificações algébricas, obtendo-se a equação final do LRT

$$\Lambda(z) = \exp \left[\frac{\mu_2 S_y (2y - S_y)}{1 - \rho} \right] \frac{I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}x^2(y-S_y)^2}{1-\rho} \right]}{I_0 \left[\frac{2\sqrt{\rho\mu_1\mu_2}x^2y^2}{1-\rho} \right]}. \quad (17)$$

Destaca-se a possibilidade de detecção de mudanças negativas assumindo valores diferentes de S_y ou até mesmo considerando S_x no lugar de S_y . Adicionalmente, devido às características do conjunto de dados utilizado, são consideradas somente mudanças positivas, i.e., presença de alvos na imagem de interesse $S_x = 0$. Motivado por questões de simplificação de nomenclatura, neste capítulo S_y será substituído por s , mantendo sua definição de constante de intensidade referente à imagem de busca.

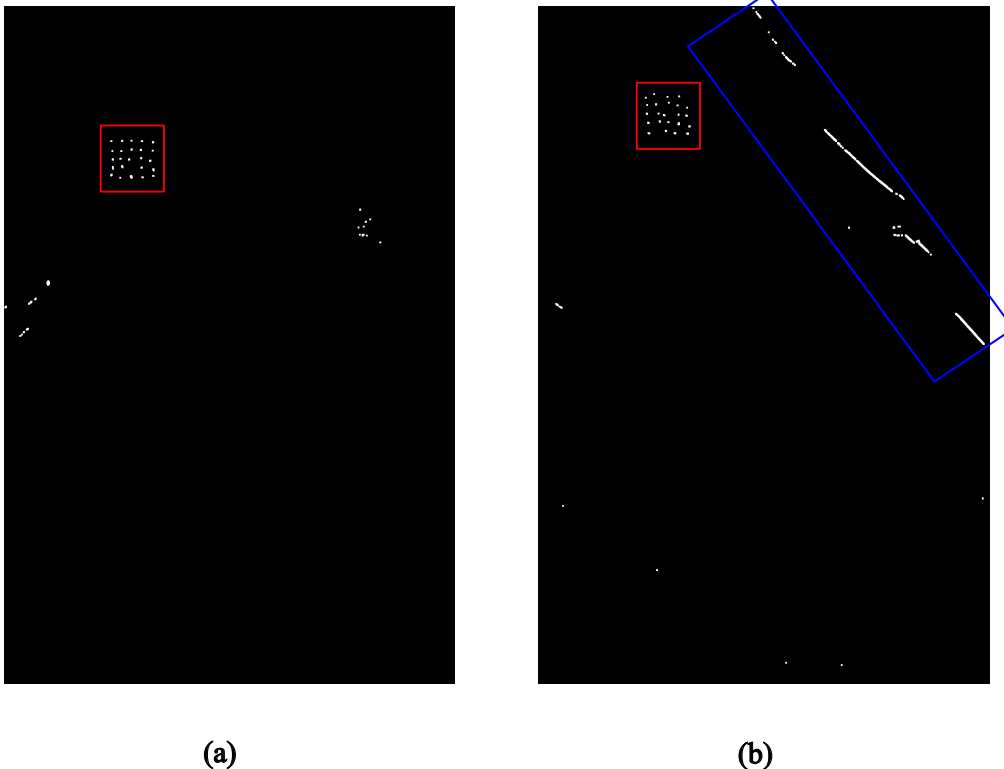
4.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos ao testar o método de detecção de mudanças citado nessa seção utilizando o conjunto de dados provenientes do sistema CARABAS-II. O mesmo será avaliado em termos de probabilidade de detecção P_d , além

da taxa de falsos alarmes *FAR*, i.e., número de falsos alarmes por km^2 .

Destaca-se que nesse trabalho é considerado como detecção qualquer objeto existente na matriz binária após a aplicação das operações morfológicas. Entretanto, será considerado detecção correta qualquer detecção existente que esteja dentro de um limite máximo de 10 metros da região de alvos original. De maneira similar, considera-se falso alarme qualquer detecção fora dessa região.

Figura 7 – Imagens binárias de saída do método proposto nas quais as áreas ressaltadas em vermelho representam a região de alvos. (a) Demonstra a imagem binária de saída quando as imagens M2P5 e M4P5 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente. (b) Demonstra a imagem binária de saída quando as imagens M3P2 e M5P2 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente. A região azul ressaltada está relacionada com a detecção da estrutura alongada, gerando um grande número de falsos alarmes.



Fonte: Autor.

A primeira avaliação deste método está expressa na Figura 7, a qual apresenta dois exemplos de imagens binárias de saída, considerando que os valores dos parâmetros foram empiricamente designados. Neste primeiro teste, utilizou-se uma constante de intensidade $s = 0,6$ e uma limiar de $Th = 10$. A Figura 7 a) apresenta a imagem binária de saída quando as entradas são M2P5 (Missão 2 e Passagem 5) e M4P5 (Missão 4 e Passagem 5), como sendo as imagens de busca e de referência, respectivamente. De maneira análoga, a Figura 7 b) apresenta a imagem binária de saída quando utiliza-se

como entrada as imagens M3P2 e M5P2, como imagens de busca e de referência, respectivamente. No processo de simulação observaram-se estruturas alongadas em algumas imagens, causadas pelo não casamento entre o *clutter* presente na imagem e a distribuição exponencial. A escolha destas imagens foi realizada visando expor um caso com a presença da estrutura alongada e outro com a ausência da mesma.

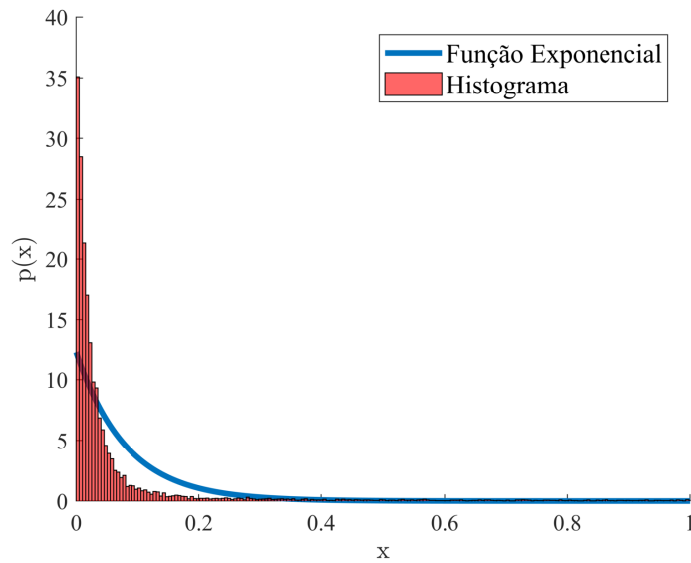
Com os resultados expostos na Figura 7 é facilmente identificável a alta probabilidade de detecção, i.e., detectando todos os 25 alvos em ambas imagens, dentro da região de alvos destacada pelo quadrado vermelho. Entretanto, conforme visto na Figura 7 b), o método detectou a estrutura indesejada destacada pelo retângulo azul, aumentando consideravelmente o número de falsos alarmes. Observa-se, adicionalmente, o fato de que as imagens apresentaram uma quantia considerável de falsos alarmes.

A ocorrência destes falsos alarmes, além da detecção da estrutura indesejada pode ser justificada pela seleção da distribuição estatística para descrever o background de imagens SAR de intensidade com resolução na ordem do comprimento de onda. Sabe-se que a distribuição exponencial realiza uma boa descrição do background estatístico para cenários nos quais existe a ausência de fortes dispersores neste tipo de imagens, no entanto, essa distribuição tende a não descrever corretamente o background de imagens nas quais existe a presença de fortes dispersores. As imagens deste conjunto de dados possuem diferentes estruturas, formando diversos dispersores com intensidades diferentes, como por exemplo ruas, cercas, além de outras estruturas construídas pelo homem, que tendem a resultar em um background heterogêneo.

Motivado pela melhor visualização deste descasamento estatístico nos cenários com a presença da estrutura indesejada, a Figura 8 demonstra um histograma da imagem considerando um janelamento de 100×100 pixels com a presença desta estrutura, além de apresentar a distribuição exponencial parametrizada para estes dados. Nesta figura é possível afirmar que o método de detecção de mudanças proposto neste capítulo é incapaz de descrever imagens com um *background* heterogêneo com precisão, justificando a necessidade de maiores estudos sobre a estatística do *background*. Outra possibilidade de sanar este problema se dá pela inclusão de outros passos de processamento antes do LRT visando remover este tipo de estrutura, os quais serão apresentados no Capítulo 6.

A Tabela 1 apresenta os pares de imagens utilizados nessa seção, os quais serão representados utilizando uma nomenclatura simplificada, sendo que M_x representa a missão x e P_y representa a passagem y . Nesta tabela é possível observar a influência das imagens com a presença das estruturas alongadas no resultado final da simulação,

Figura 8 – Histograma da região com a presença da estrutura alongada destacada pelo retângulo azul na Figura 7(b).



Fonte: Autor.

além disto, observa-se uma probabilidade de detecção $P_d = 0,825$.

Tabela 1 – Performance do método com janelamento 50×50 utilizando a distribuição Exponencial

Experimento	Imagem de Busca		Imagem de Referência		Alvos	Detectados	FA	Probabilidade de Detecção
	Missão	Passagem	Missão	Passagem				
1	1	1	2	1	25	24	13	0,96
2	2	1	3	1	25	17	16	0,68
3	3	1	4	1	25	25	11	1
4	4	1	1	1	25	19	15	0,76
5	1	2	3	2	25	23	30	0,92
6	2	2	4	2	25	25	31	1
7	3	2	1	2	25	19	36	0,76
8	4	2	2	2	25	12	31	0,48
9	1	3	4	3	25	25	16	1
10	2	3	1	3	25	18	15	0,72
11	3	3	2	3	25	25	14	1
12	4	3	3	3	25	19	15	0,76
13	1	4	2	4	25	21	35	0,84
14	2	4	3	4	25	25	28	1
15	3	4	4	4	25	20	35	0,8
16	4	4	1	4	25	12	31	0,48
17	1	5	3	5	25	25	15	1
18	2	5	4	5	25	15	9	0,6
19	3	5	2	5	25	25	14	1
20	4	5	1	5	25	16	14	0,64
21	1	6	4	6	25	25	18	1
22	2	6	1	6	25	19	14	0,76
23	3	6	2	6	25	25	16	1
24	4	6	3	6	25	16	16	0,64
				Total	600	495	488	0,825

Fonte: Autor.

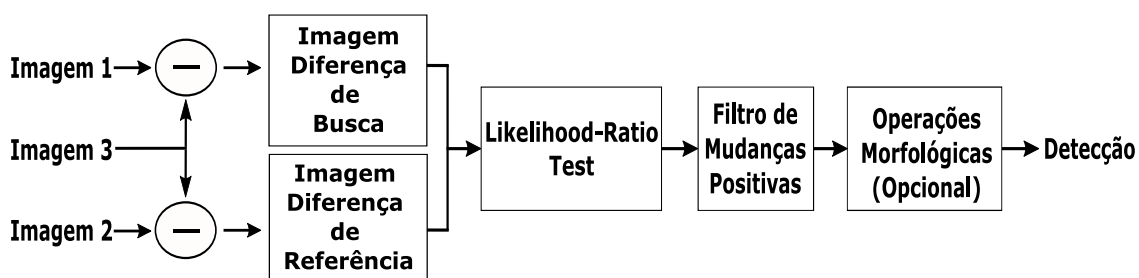
4.3 Método de detecção de Mudanças Utilizando Imagens Diferença

Visando corrigir os problemas enfrentados na Seção 4.1 no que se refere à detecção errônea de estruturas alongadas na imagem, propõe-se uma alteração nas imagens de entrada do método. Neste novo método de detecção de mudanças utiliza-se um par de imagens diferença, as quais são denominadas imagem diferença de busca e de referência. O processo de formação destas imagens se dá pela utilização de três imagens tradicionais de intensidade e realizando uma operação de subtração entre elas, i.e., *Imagem 1 - Imagem 3* para formar a imagem de busca e *Imagem 2 - Imagem 3* para formar a imagem de referência.

O diagrama de bloco simplificado deste método está exposto na Figura 9, o qual apresenta inicialmente o processo de formação das imagens diferença e, logo após, o bloco de LRT, o qual foi previamente descrito minuciosamente na Seção 4.1, e finalmente é aplicado um bloco opcional formado de operações morfológicas. Este bloco fora previamente descrito na Seção 4.1.1.

Devido à operação de subtração realizada na etapa inicial deste método, ocorre a aparição de alvos provenientes da imagem comum, i.e., *Imagem 3*. Este comportamento descreve-se pela utilização da operação de módulo na formação de imagens de intensidade. No decorrer deste trabalho, motivado pela busca de uma comparação justa com métodos tradicionais, são analisados e contabilizados somente mudanças relacionadas com pixels com intensidade positiva, através da implementação de um filtro que ignorará os pixels negativos provenientes da imagem comum.

Figura 9 – Diagrama de blocos do método de detecções de mudanças que utiliza imagens diferença



Fonte: Autor.

4.4 Resultados Experimentais

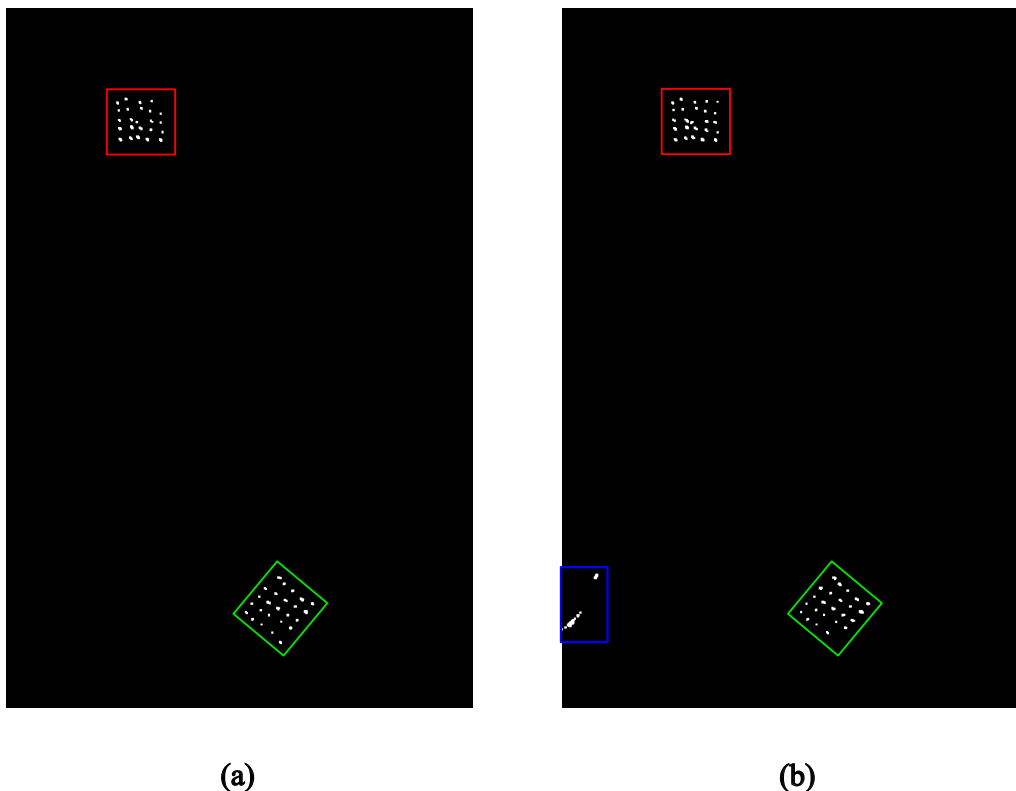
Os resultados experimentais foram obtidos ao testar o método de detecção de mudanças citado nessa seção utilizando todo o conjunto de dados provenientes do sistema CARABAS-II. O mesmo é avaliado em termos de probabilidade de detecção P_d , além da taxa de falsos alarmes FAR , i.e., número de falsos alarmes por km^2 . Destaca-se que será utilizada a mesma definição de alvos descrita anteriormente na Seção 4.2.

A primeira avaliação deste método está expressa na Figura 10, a qual apresenta dois exemplos de imagens binárias de saída, considerando que os valores dos parâmetros foram empiricamente designados. Neste primeiro teste, utilizou-se uma constante de intensidade $s = 0,225$ e um limiar $Th = 30$. A Figura 10 (a) apresenta a imagem binária de saída quando a imagem de busca é formada pela operação de subtração entre M2P5 (Missão 2 e Passagem 5) e M4P5 (Missão 4 e Passagem 5), e a imagem de referência é formada pela diferença entre M3P2 e M4P2. De maneira análoga, a Figura 10 (b) apresenta a imagem binária de saída quando utiliza-se como entrada as imagens M3P2-M5P2 e M4P2-M5P2, como imagens de busca e de referência, respectivamente. Em ambos casos, os alvos estão destacados pela região em vermelho, e a região em verde delimita os alvos introduzidos pela operação realizada com a imagem comum, i.e., *Imagem 3*.

Com os resultados expostos na Figura 7 é observável uma taxa de detecção elevada, conforme expresso na Figura 7 (a), na qual o método detectou os 25 alvos na imagem, com a ocorrência de 2 falsas detecções. Já na Figura 7 (b), observa-se que o problema relacionado com a detecção de estruturas alongadas foi sanado, no entanto, o número de detecções não foi o desejado, i.e., 100% de detecções. Este problema de detecção está fortemente relacionado com a seleção de valores para o parâmetro s e de valores de limiar. Observa-se, adicionalmente, a aparição de alvos provenientes da imagem comum, que são explicáveis devido à inclusão de fortes dispersores nas imagens de busca e de referência, acarretando em um cenário no qual a distribuição exponencial bivariada não confere uma boa descrição do *background* da imagem.

A Tabela 2 apresenta os pares de imagens utilizados nessa seção, os quais serão representados utilizando uma nomenclatura simplificada, sendo que Mx representa a missão x e Py representa a passagem y . Nesta tabela é possível observar a grande influência causada pelo experimento 18 no que se refere ao número de detecções e quantidade de falsos alarmes, degradando o desempenho de FAR do método. Este

Figura 10 – Imagens binárias de saída do método proposto, nas quais as áreas ressaltadas em vermelho e verde representam as regiões de alvos da *Imagem 1* e *Imagem 3*, respectivamente. (a) Exibe a imagem binária de saída quando as imagens M2P5-M3P5 e M4P5-M3P5 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente. (b) Exibe a imagem binária de saída quando as imagens M3P2-M4P2 e M5P2-M4P2 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente. Em ambas imagens, as regiões de alvos estão destacadas pela região em vermelho, e as regiões de alvos inseridas pela imagem comum estão destacadas pela região em verde.



Fonte: Autor.

fenômeno foi observado e discutido anteriormente (ALVES et al., 2020a), sendo que um meio para obter melhor desempenho neste experimento específico é a utilização de mais etapas de processamento (VU et al., 2017). Além disto, observa-se uma probabilidade de detecção $P_d = 0,99$ deste método.

Um meio de avaliar a performance deste método está exposto na Figura 11, onde considerou-se diferentes valores de s e visualizou-se o efeito causado na curva de ROC. Para valores de $FAR = 10^0$, obteve-se as seguintes probabilidades de detecção: $P_d = 96,1\%$ para $s = 0,2$, $P_d = 98,1\%$ para $s = 0,25$ e $P_d = 98,3\%$ para $s = 0,3$, sendo que não houveram resultados para $s = 0,35$ com este nível de FAR para os valores de limiar avaliados. Observa-se que com o aumento do valor de s , ocorre um aumento na probabilidade de detecção, no entanto, a quantia total de detecções é reduzida, i.e., o

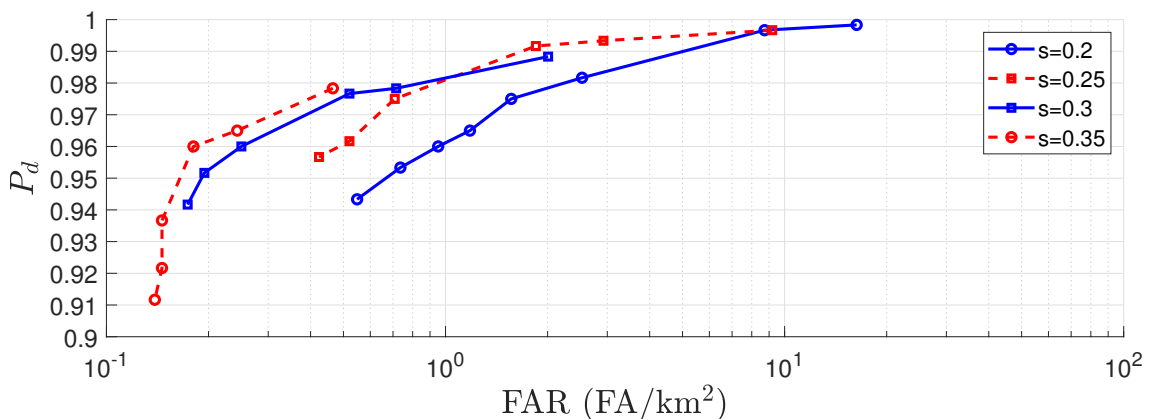
Tabela 2 – Performance do método proposto utilizando parâmetros de limiar $Th = 0,5$ e $s = 0,275$.

Experimentos	Imagem de Busca		Imagem de Referência		Alvos Detectados	Probabilidade de Detecção	Falsos Alarmes	Taxa de Falsos Alarmes (km^{-2})
	Imagem A	Imagem C	Imagem B	Imagem C				
1	M2P1	M3P1	M4P1	M3P1	25	1	1	0.16
2	M3P1	M4P1	M5P1	M4P1	25	1	5	0.83
3	M4P1	M5P1	M2P1	M5P1	25	1	0	0
4	M5P1	M2P1	M3P1	M2P1	25	1	4	0.66
5	M2P2	M3P2	M4P2	M3P2	25	1	1	0.16
6	M3P2	M4P2	M5P2	M4P2	25	1	2	0.33
7	M4P2	M5P2	M2P2	M5P2	25	1	5	0.83
8	M5P2	M2P2	M3P2	M2P2	24	0.96	0	0
9	M2P3	M3P3	M4P3	M3P3	25	1	3	0.5
10	M3P3	M4P3	M5P3	M4P3	25	1	0	0
11	M4P3	M5P3	M2P3	M4P3	25	1	2	0.33
12	M5P3	M2P3	M3P3	M2P3	25	1	4	0.66
13	M2P4	M3P4	M4P4	M3P4	25	1	2	0.33
14	M3P4	M4P4	M5P4	M4P4	25	1	1	0.16
15	M4P4	M5P4	M2P4	M5P4	25	1	3	0.5
16	M5P4	M2P4	M3P4	M2P4	23	0.92	2	0.33
17	M2P5	M3P5	M4P5	M3P5	25	1	1	0.33
18	M3P5	M4P5	M5P5	M4P5	22	0.88	147	24.5
19	M4P5	M5P5	M2P5	M5P5	25	1	2	0.33
20	M5P5	M2P5	M3P5	M2P5	25	1	7	1.16
21	M2P6	M3P6	M4P6	M3P6	25	1	0	0
22	M3P6	M4P6	M5P6	M4P6	25	1	1	0.16
23	M4P6	M5P6	M2P6	M5P6	25	1	4	0.66
24	M5P6	M2P6	M3P6	M2P6	25	1	1	0.16
Total					594	0.99	199	0.98

Fonte: Autor.

número de detecções possui um ponto de saturação próximo. Adicionalmente, observa-se que para o caso de $s = 0,35$ é possível obter o melhor desempenho em termos de P_d com baixos níveis de FAR, no entanto, a utilização das operações morfológicas resultam na mitigação de alguns alvos. Devido a isto, valores menores de s podem ser adotados para caracterizar padrões de alvos neste conjunto de dados. A busca de valores ótimos para os parâmetros s e Th serão tema de estudos posteriores.

Figura 11 – Avaliação do método proposto utilizando a curva de ROC ao variar-se os valores de parâmetros s .



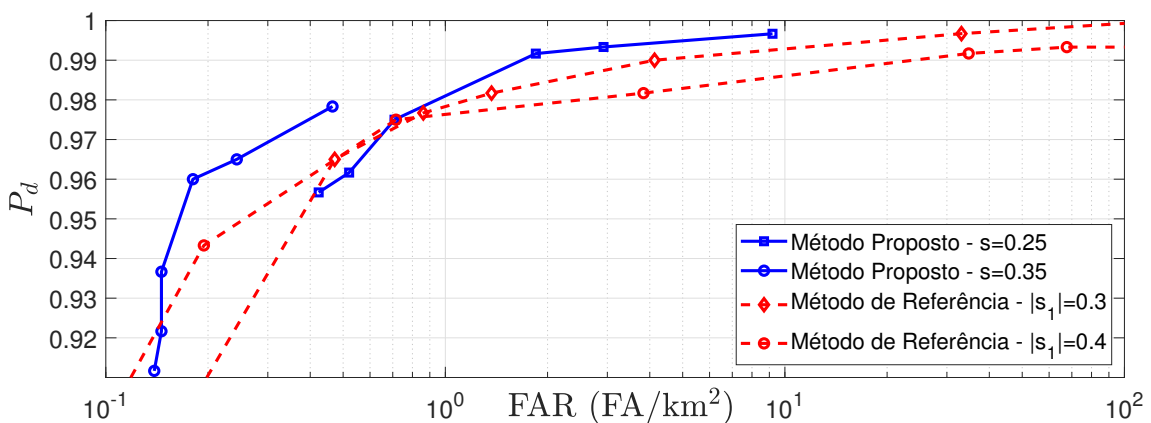
Fonte: Autor.

Outro método de avaliação da performance se dá pela comparação com métodos consagrados na academia que fazem uso de imagens de amplitude em seu desenvolvimento. O método apresentado em (VU et al., 2019b) possui o melhor desempenho, de conhecimento do autor, utilizando este conjunto de dados e possuindo as mesmas condições de desenvolvimento. Observa-se que a notação utilizada nas publicações originais foram mantidas. Analisando os resultados obtidos na Figura 12, para um nível de $FAR = 10^0$, observam-se as seguintes probabilidades de detecção:

- Para o método de referência: $P_d = 97,6\%$ para $s_1 = 0,4$ e $P_d = 97,8\%$ para $s_1 = 0,3$, em que s_1 segue a nomenclatura utilizada no artigo original (VU et al., 2019b).
- Para o método proposto: $P_d = 98,1\%$ para $s = 0,25$, nenhum resultado fora obtido para estes níveis de FAR utilizando $s = 0,35$, mas como fora mencionado anteriormente, ao utilizar esta configuração é possível obter os melhores níveis de P_d com baixos níveis de FAR.

Como resultado, observa-se que o método proposto superou o método de referência em termos de P_d e FAR . Ainda, observa-se certa similaridade entre ambos métodos na região de baixa detecção, no entanto, esta região normalmente não é interessante para aplicações práticas.

Figura 12 – Avaliação do método proposto e de referência (VU et al., 2019b) utilizando a curva de ROC.



Fonte: Autor.

4.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou um método de detecção de mudanças utilizando imagens de intensidade, contando com seu desenvolvimento, descrição, teste estatístico, além de

apresentar os resultados iniciais obtidos ao testá-lo com o conjunto de dados proveniente do sistema CARABAS-II.

No Capítulo 4 explanou-se detalhadamente a dedução e o desenvolvimento realizado para encontrar a distribuição estatística empregada, resultando em imagens com um baixo nível de detecções e um alto nível de falsos alarmes, vide Seção 4.2. Contando, inclusive, com a presença de estruturas indesejadas na formação das imagens.

Como alternativa ao método apresentado, desenvolveu-se uma nova metodologia que faz uso de imagens diferença visando diminuir as influências causadas pelas estruturas alongadas apresentadas anteriormente. Este método está descrito minuciosamente na Seção 4.3, apresentando os mesmos aspectos de implementação e equacionamento apresentados na Seção 4.3, destacando-se pelo uso de imagens diferença, alcançando um desempenho superior. A Seção 4.4 apresenta uma discussão detalhada e precisa da performance obtida pelo método utilizando imagens diferença em sua composição.

Estudos estatísticos são tema do próximo capítulo, visando encontrar uma distribuição que melhor se adeque às imagens provenientes deste conjunto de dados. Este estudo possui motivação baseada na obtenção de níveis de P_d superiores aos atuais e contando com valores de FAR inferiores. Este estudo estatístico é abordado no Capítulo 5.

5 ESTUDO DE CASO 2: ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste capítulo será realizado um teste estatístico de modo a encontrar a distribuição estatística que melhor descreva as imagens provenientes do conjunto de dados utilizado. Para a realização dos testes estatísticos é implementado um teste baseado em *Goodness-on-Fit* (GoF), o qual realiza uma avaliação comparativa entre a variável nula da distribuição testada e o *background* da imagem escolhida.

Existem diversos testes de GoF na literatura disponíveis para o uso, no entanto, ao decorrer deste estudo, é utilizado o Teste de GoF de Anderson-Darling (ANDERSON; DARLING, 1952). Esta escolha foi motivada devido à melhor descrição de distribuições de cauda ao comparar-se com outros testes GoF (WANG et al., 2009). Este foi um fator fundamental dado que imagens provenientes de sistemas SAR com resolução na ordem do comprimento de onda possuem como principal característica um padrão de distribuição de intensidade tendendo a comportamentos de cauda, o que se deve às intensidades dos alvos serem muito superiores que a intensidade presente em seus arredores (LUNDBERG et al., 2006b).

5.1 Teste de Anderson-Darling

O teste estatístico de Anderson-Darling (AD) consiste em um teste hipotético não paramétrico, e visa definir se determinada hipótese nula (H_0) da distribuição testada deva ser rejeitada ou não, no que se refere a descrever determinado conjunto de dados. Este teste é utilizado para investigar se determinada distribuição testada descreve de maneira satisfatória uma amostra de dados pré definida.

O teste baseia-se na distância A_n entre $F_Y(y)$ e $F_0(y)$, que correspondem respectivamente à função de distribuição empírica (EDF) e a função de distribuição cumulativa (CDF), de H_0 . A distância A_n foi desenvolvida em (WANG et al., 2009) e pode ser descrita por

$$A_n \triangleq n \int_{-\infty}^{\infty} (F_Y(y) - F_0(y))^2 \theta(F_0(y)) dF_0(y), \quad (18)$$

no qual $Y = \{Y_i\}_{i=1}^n$, para n amostras testadas e $\theta(t) = \frac{1}{t(1-t)}$ é a função-peso definida em $0 \leq t \leq 1$.

Uma simplificação pode ser realizada ao ordenar as observações de forma

crescente $Y_1, Y_2 \dots Y_i$ e dividir a integral em n partes. Utilizando manipulações algébricas, (18) pode ser escrita por

$$A_n = - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1) [\ln Z_i + \ln Z_{n+1-i}]}{n} - n, \quad (19)$$

sendo $Z_i = F_0(Y_i)$.

O teste de Anderson-Darling se dá pela comparação entre A_n e o valor crítico τ . Caso $A_n > \tau$, o teste de AD irá rejeitar a hipótese nula, de modo análogo, caso $A_n < \tau$, o teste de AD irá falhar ao rejeitar a hipótese H_0 . O valor crítico τ pode ser escolhido seguindo o critério

$$P_r(A_n \geq \tau | H_0) = 1 - P_r(A_n < \tau | H_0) = \alpha, \quad (20)$$

em que α é o nível de significância.

De fato, a distribuição $P_r(A_n < \tau | H_0)$ é desconhecida, no entanto, uma solução assintótica para A_n dado H_0 , para $n \geq 5$, é uma boa aproximação para essa distribuição, a qual é dada por

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_r(A_n < \tau | H_0) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\tau} \sum_{j=0}^{\infty} \binom{-\frac{1}{2}}{j} (4j+1) e^{-\frac{(4j+1)^2 \pi^2}{8\tau}} \int_0^{\infty} e^{\frac{\tau}{8(1+\omega^2)} - \frac{\omega^2(4j+1)^2 \pi^2}{8\tau}} d\omega. \quad (21)$$

Uma aproximação numérica para (21) apresentada por (MARSAGLIA; MARSAGLIA, 2004) será utilizada para a realização deste teste de AD, sendo esta escolha motivada pela grande quantidade de recursos computacionais que seriam necessários para a resolução desta equação.

5.2 Teste de Anderson-Darling aplicado em Imagens SAR de Intensidade

A seleção correta do modelo estatístico que descreva o conjunto *clutter* mais ruído possui grande influência no desempenho de diversas aplicações utilizando imagens SAR com resolução na ordem do comprimento de onda (VU et al., 2019b; GOMES et al., 2019). A relação entre uma distribuição estatística com descrição dos dados mais precisa e a melhora na performance em algoritmos de detecção de mudanças foi observado anteriormente em (ULANDER et al., 2005). Diferentes modelos estatísticos para imagens

SAR de baixa frequência com resolução na ordem do comprimento de onda em casos de amplitude já foram estudados, e.g., distribuição Gaussiana, Rayleigh, Gama (VU et al., 2019b)-(ULANDER et al., 2005).

De modo a obter desempenhos superiores em termos de probabilidade de detecção, imagens de intensidade são motivo de estudos nesta seção. Este tipo de imagem possui como característica a tendência de ressaltar alvos. Tradicionalmente, imagens SAR de intensidade são motivo de estudos em sistemas que trabalhem na faixa de microondas, nos quais as imagens são modeladas através da distribuição exponencial (THOMAS; JOY, 2006). No entanto, observa-se que esta seleção pode ser inadequada em imagens provenientes de sistemas SAR de baixa frequência que são caracterizados por possuírem resolução na ordem do comprimento de onda.

Buscando encontrar um modelo estatístico que descreva com maior exatidão o cenário exposto em imagens SAR com resolução na ordem do comprimento de onda, nesta seção, é realizada uma análise utilizando o conjunto de dados provenientes do sistema CARABAS-II. Destaca-se que, devido à estabilidade temporal presente nestas imagens, é possível analisar uma imagem e estender esta análise para todo o conjunto de dados.

Para a avaliação inicial, é estudado a distribuição Exponencial que foi discutida em algoritmos de detecção de mudanças no Capítulo 4. Neste caso, aplicou-se o teste de Anderson-Darling considerando a distribuição Exponencial utilizando um $\alpha = 0,05$. Destaca-se, adicionalmente, o fato da imagem testada ter sido dividida em múltiplas células com tamanho de 50×50 pixels visando uma melhor análise do teste estatístico. Este tamanho de célula foi definido de modo a garantir uma melhor visualização, uma divisão igualitária ao longo da imagem, além de garantir que o janelamento irá cobrir uma região muito superior que a representação dos alvos. O resultado proveniente desta discussão inicial está exposto na Tabela 3.

O resultado apresentado na Tabela 3 está dividido em múltiplas células representando uma de 50×50 pixels, no qual as células destacadas pela cor verde indicam que o teste de Anderson-Darling falhou em rejeitar a hipótese nula nesta região, i.e., é plausível utilizar a distribuição exponencial para modelar as amostras testadas. Já as células ressaltadas na cor vermelha, indicam que o teste de Anderson-Darling rejeitou a hipótese nula da distribuição testada, i.e., a distribuição Exponencial não descreve de modo satisfatório a amostra testada.

Conforme é visível na Tabela 3, a distribuição Exponencial não foi capaz de

De acordo com (MACHADO et al., 2016) a distribuição de *clutter* mais ruído de imagens obtidas através da diferença entre duas imagens SAR de baixa frequência e caracterizadas por possuir resolução na ordem do comprimento de onda que possuam as mesmas características de voo, podem ser modeladas com uma distribuição Gaussiana. Destaca-se, adicionalmente, que o valor absoluto de variáveis aleatórias que são originalmente modeladas através de uma distribuição Gaussiana podem ser descritas utilizando uma distribuição *Folded-Normal* (LEONE; NELSON; NOTTINGHAM, 1961), no entanto, caso a variável aleatória resultante possua média zero ($\mu = 0$), poderá ser modelada através de uma distribuição *Half-Normal* (BYERS, 2014). Baseado nessas considerações, o valor absoluto da diferença entre duas imagens do CARABAS-II pode ser descrita através de uma distribuição *Half-Normal* assumindo que a média da imagem resultante tenda a zero. Adicionalmente, caso uma variável aleatória descrita por uma distribuição *Half-Normal* seja elevada ao quadrado, a mesma se torna uma distribuição Chi Quadrada com um grau de liberdade, i.e., distribuição Gama (BROCKWELL et al., 2016). Finalmente, baseado nesta análise, imagens diferença de intensidade provenientes do sistema CARABAS-II podem ser modeladas utilizando a distribuição Gama.

Para avaliar a seleção da distribuição Gama para descrever com precisão modelos de *clutter* mais ruído de imagens de diferença SAR de baixa frequência caracterizadas por uma resolução na ordem do comprimento de onda, são realizados testes de Anderson-Darling considerando os mesmos parâmetros utilizados anteriormente. De modo a realizar a análise, serão utilizadas as imagens de diferença de intensidade, obtidas através de um par de imagens de amplitude, provenientes do sistema CARABAS-II com geometrias de voo similares, nomeadas de *Imagem 1* e *Imagem 2*. Para a criação das imagens diferença de amplitude, utiliza-se de uma operação simples de subtração em cada pixel, i.e., *Imagem 1* - *Imagem 2*. Então, o resultado obtido é submetido a uma operação de módulo quadrado, de modo a obter uma imagem de intensidade, i.e., $|\cdot|^2$. Os resultados desta avaliação experimental estão apresentadas na Tabela 4, a qual apresenta o mesmo esquemático de cores apresentado na Tabela 3 e descrito anteriormente.

Como pode ser observado na Tabela 4, a distribuição Gama descreve de maneira satisfatória a maioria das células avaliadas. Ainda, é possível observar que situações nas quais ocorreu a rejeição da distribuição Gama estão majoritariamente relacionados com mudanças, i.e., alvos ou células isoladas na imagem. Esta rejeição de células isoladas estão relacionadas com falsos negativos dado que nenhuma técnica de correção de erros de Tipo I foram empregados nesta avaliação inicial. Esta escolha de não

6 ESTUDO DE CASO 3: DISTRIBUIÇÃO GAMA

Visando obter um método de detecção de alvos para imagens SAR VHF de intensidade com resolução na ordem do comprimento de onda, nesta secção são abordados estudos referentes à utilização da distribuição Gama em um método de detecção de alvos. Ademais, são apresentados aspectos de implementação, equacionamento, discussões e resultados obtidos.

A escolha da distribuição Gama para descrever estatisticamente a hipótese nula de imagens SAR VHF de intensidade de diferença com resolução na ordem do comprimento de onda se deve de modo a comprovar os estudos realizados no Capítulo 5.

6.1 Método de Detecção de Mudanças Utilizando Imagens Diferença

O método de detecção de mudanças proposto nesta seção é realizado em três etapas básicas, conforme exposto na Figura 9. Inicialmente, é realizada a formação das imagens diferença, utilizando uma operação de subtração entre imagens de intensidade. Logo após, o LRT é executado, atuando com duas imagens diferença de intensidade como entrada e resultando em uma imagem binária em sua saída, sendo este bloco descrito em detalhes na Seção 6.1.1. A próxima etapa consiste na realização de operações morfológicas na imagem binária proporcionando uma mitigação de detecções isoladas e de múltiplas detecções do mesmo alvo, destacando-se que esta etapa é opcional e será utilizado o mesmo bloco utilizado na Seção 4.1.1.

Devido à operação de subtração realizada na etapa inicial deste método, ocorre a aparição de alvos provenientes da imagem comum, i.e., *Imagem 3*. Este comportamento descreve-se pela utilização da operação de módulo na formação de imagens de intensidade. No decorrer deste trabalho, motivado pela busca de uma comparação justa com métodos tradicionais, são analisados e contabilizados somente mudanças relacionadas com pixels com intensidade positiva, através da implementação de um filtro que ignorará os pixels negativos.

6.1.1 Desenvolvimento Matemático

O desenvolvimento matemático do LRT que possui como base a distribuição bivariada Gama, a qual foi escolhida após um estudo estatístico realizado no Capítulo 5. O equacionamento para utilização da distribuição Gama em LRT em situações nas quais utilizaram-se imagens de intensidade já foi realizado previamente por (VU et al., 2019b). Nesta seção, é discutida uma variação do cenário estudado pelo autor, no qual imagens de diferença são utilizadas.

A função de densidade de probabilidade (PDF) da distribuição Gama bivariada pode ser descrita através de

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{\Gamma(k_2)\Gamma(k_1 - k_2)\theta_1\theta_2(1 - \eta)\eta^{(k_2-1)/2}} \left(\frac{x_1}{\theta_1}\right)^{k_1-k_2} \left(\frac{x_1 x_2}{\theta_1 \theta_2}\right)^{(k_2-1)/2} \\ \times \exp\left[-\frac{1}{1 - \eta} \left(\frac{x_1}{\theta_1} + \frac{x_2}{\theta_2}\right)\right] \int_0^1 (1 - t)^{(k_2-1)/2} t^{(k_1-k_2-1)} \exp\left[\frac{\eta}{1 - \eta} \left(\frac{x_1}{\theta_1}\right) t\right] \\ \times I_{k_2-1} \left[\frac{2}{1 - \eta} \sqrt{\eta \left(\frac{x_1 x_2}{\theta_1 \theta_2}\right)} (1 - t) \right] dt, \quad (22)$$

sendo $I_{(\cdot)}[\cdot]$ a notação referente à função de Bessel modificada de primeira ordem, x_1 e x_2 variáveis aleatórias, $k_{(\cdot)}$ e $\theta_{(\cdot)}$ os parâmetros de forma e escala. O parâmetro de associação η entre x_1 e x_2 é calculado por

$$\eta = \rho \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}, \quad 0 \leq \rho < 1, \quad 0 \leq \eta < 1, \quad (23)$$

sendo ρ o coeficiente de correlação do momento de produto de Pearson. O coeficiente de correlação é estimado através de amostras de dados originais utilizando

$$\rho = \frac{E[(X_1 - \mu_1)(X_1 - \mu_2)]}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (24)$$

sendo $\mu_{(\cdot)}$ e $\sigma_{(\cdot)}$ as médias e desvio padrão das variáveis aleatórias.

Para o caso especial onde $k_1 = k_2 = k$, a função de distribuição de probabilidade

conjunta pode ser simplificada para

$$f(x_1, x_2) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta_1\theta_2(1-\rho)\eta^{(k-1)/2}} \left(\frac{x_1 x_2}{\theta_1 \theta_2}\right)^{(k-1)/2} \exp\left[-\frac{1}{1-\rho}\left(\frac{x_1}{\theta_1} + \frac{x_2}{\theta_2}\right)\right] \\ \times I_{k-1}\left[\frac{2}{1-\rho}\sqrt{\rho\left(\frac{x_1 x_2}{\theta_1 \theta_2}\right)}(1-t)\right], \quad (25)$$

conforme apresentado por (IZAWA, 1965).

Conforme citado no decorrer deste trabalho, o LRT pode ser descrito através de

$$\Lambda(z) = \frac{P(z|H_1)}{P(z|H_0)}, \quad (26)$$

em que ambas as probabilidades $P(z|H_1)$ e $P(z|H_0)$ são modeladas utilizando a distribuição Gama bivariada, $z = (x, y)$, e x e y representam a intensidade do pixel na posição testada na imagem de referência e de busca, respectivamente.

O teste estatístico hipotético assumindo que $k_2 \geq k_1$ é derivada da seguinte equação

$$\Lambda(z) = \left(\frac{|z_1 - s_1|}{|z_1|}\right)^{k_1 - (k_2 + 1)/2} \exp\left[-\frac{1}{1-\eta}\left(\frac{|z_1 - s_1| - |z_1|}{\theta_1}\right)\right] \chi(|z_1|, |z_2|). \quad (27)$$

Já no caso de $k_1 = k_2 = k$, o teste estatístico hipotético pode ser simplificado, assumindo a forma

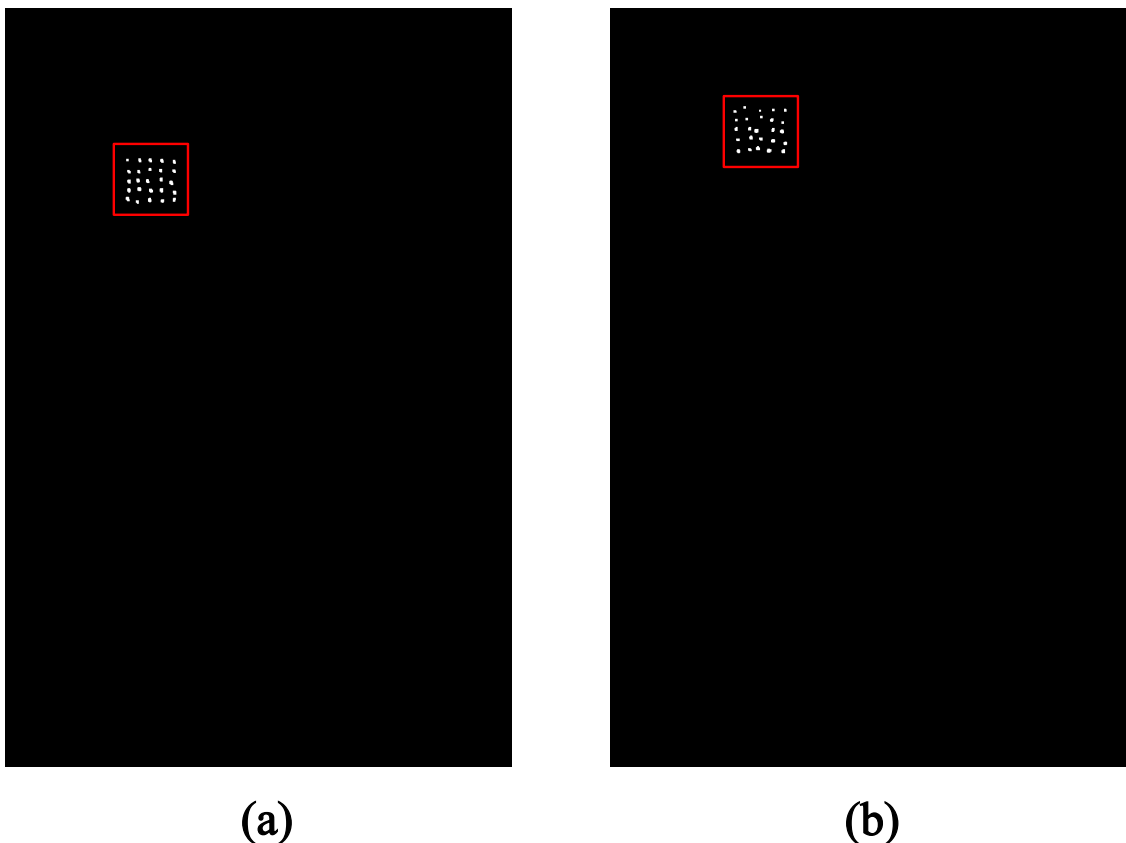
$$\Lambda(z) = \left(\frac{|z_1 - s_1|}{|z_1|}\right)^{(k-1)/2} \exp\left[-\frac{1}{1-\rho}\left(\frac{|z_1 - s_1| - |z_1|}{\theta_1}\right)\right] \\ \times I_{k-1}\left[\frac{2}{1-\rho}\sqrt{\rho\left(\frac{|z_1 - s_1| |z_2|}{\theta_1 \theta_2}\right)}\right] \left(I_{k-1}\left[\frac{2}{1-\rho}\sqrt{\rho\left(\frac{|z_1| |z_2|}{\theta_1 \theta_2}\right)}\right]\right)^{-1}. \quad (28)$$

6.2 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos ao testar o método de detecção de mudanças citado nessa seção utilizando todo o conjunto de dados provenientes do sistema CARABAS-II. O mesmo é avaliado em termos de probabilidade de detecção Pb , além da taxa de falsos alarmes FAR , i.e., número de falsos alarmes por km^2 . Ressalta-se que a correta detecção de objetos e sua identificação, i.e., sendo um alvo ou um falso alarme, segue a mesma definição descrita anteriormente na Seção 4.2.

A primeira avaliação deste método está expressa na Figura 13, a qual apresenta dois exemplos de imagens binárias de saída, considerando que os valores dos parâmetros foram empiricamente designados. Neste primeiro teste, utilizou-se uma constante de intensidade $s = 0,25$ e uma limiar de $Th = 5$. A Figura 13 (a) apresenta a imagem binária de saída quando a imagem de busca é formada pela operação de subtração entre M2P5 (Missão 2 e Passagem 5) e M3P5 (Missão 3 e Passagem 5), já a imagem de referência sendo formada pela diferença entre M4P5 e M3P5. De maneira análoga, a Figura 13 (b) apresenta a imagem binária de saída quando utiliza-se como entrada as imagens M3P2-M4P2 e M5P2-M4P2, como imagens de busca e de referência, respectivamente. Em ambos casos, os alvos estão destacados pela região em vermelho. Destaca-se que neste caso, não ocorre a detecção de alvos introduzidos pela operação realizada com a imagem comum, caso que foi observado nos resultados expostos no Capítulo 4.

Figura 13 – Imagens binárias de saída do método proposto, nas quais as áreas ressaltadas em vermelho representam as regiões de alvos da *Imagem A*. (a) Exibe a imagem binária de saída quando as imagens M2P5-M3P5 e M4P5-M3P5 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente. (b) Exibe a imagem binária de saída quando as imagens M3P2-M4P2 e M5P2-M4P2 são inseridas na entrada do método, como imagem de busca e referência, respectivamente.



Com os resultados expostos na Figura 13 é observável uma taxa de detecção extremamente elevada, conforme expresso na Figura 13 (a), na qual o método detectou todos os 25 alvos na imagem, sem a ocorrência de falsas detecções, de modo similar, na Figura 13 (b), houve a detecção dos 25 alvos na imagem, resultando em uma taxa de 100% de detecções, sem a presença de falsas detecções. Observa-se que o problema enfrentado no Capítulo 4 foi sanado, no que se refere à presença de estruturas alongadas, ademais, destaca-se que utilizando esta distribuição estatística, não ocorreu detecções relacionadas com a imagem comum.

A Tabela 5 apresenta os pares de imagens e o processo de formação das imagens diferença utilizados neste capítulo ao utilizar os seguintes parâmetros de limiar $Th = 0,05$ e constante de intensidade $s = 0,25$. Além de apresentar a nomenclatura simplificada de imagens utilizada nesse trabalho, ou seja Mx representa a missão x e Py representa a passagem y . Nesta tabela é possível observar a grande influência causada pelo experimento 18 no que se refere ao número de detecções e quantidade de falsos alarmes, degradando o desempenho de FAR do método. Este fenômeno foi observado e discutido anteriormente (ALVES et al., 2020a), sendo que um meio para obter melhor desempenho neste experimento específico é através da utilização de mais etapas de processamento (VU et al., 2017). Além disto, observa-se uma altíssima probabilidade de detecção $P_d = 0,98$ deste método. Ainda, observa-se que a taxa de detecção observada nesta tabela é levemente inferior ao comparar-se com os resultados expostos na Tabela 2, no entanto, um caso mais generalizado será exposto a seguir.

Um meio de avaliar a performance deste método está exposto na Figura 14, no qual considerou-se diferentes valores de s e visualizou-se o efeito causado na curva de ROC. Para valores de $FAR = 10^1$, obteve-se as seguintes probabilidades de detecção: $P_d = 99,7\%$ para $s = 0,2$, $P_d = 99,4\%$ para $s = 0,25$ e $P_d = 99,1\%$ para $s = 0,3$. Observa-se que para valores de $FAR = 10^0$ as três variações de valores para s resultam em uma probabilidade de detecção próxima a $P_d = 98,1\%$. Devido a isto, valores menores de s podem ser adotados para caracterizar padrões de alvos neste conjunto de dados. A busca de valores ótimos para os parâmetros s e Th serão tema de estudos posteriores.

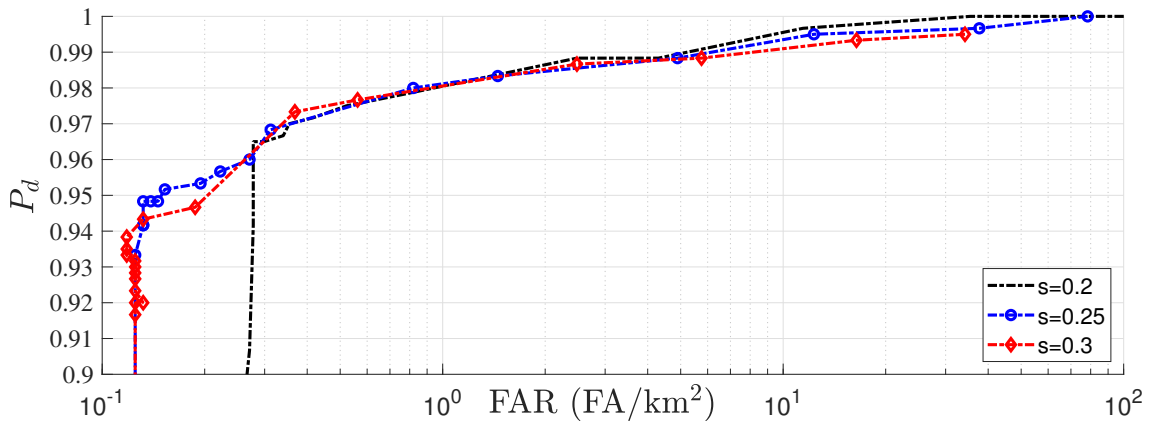
Outro método de avaliação da performance deste método se dá pela comparação com métodos consagrados na academia que fazem uso de imagens de amplitude em seu desenvolvimento. O método apresentado em (VU et al., 2019b) possui o melhor desempenho, de conhecimento do autor, utilizando este conjunto de dados e possuindo as mesmas condições de desenvolvimento. Ainda, observa-se que a notação utilizada nas

Tabela 5 – Performance do método proposto utilizando parâmetros de limiar $Th = 0,05$ e $s = 0,25$.

Experimentos	Imagem de Busca		Imagem de Referência		Alvos Detectados	Probabilidade de Detecção	Falsos Alarmes	Taxa de Falsos Alarmes (km^{-2})
	Imagem A	Imagem C	Imagem B	Imagem C				
1	M2P1	M3P1	M4P1	M3P1	25	1	5	0.83
2	M3P1	M4P1	M5P1	M4P1	25	1	12	2
3	M4P1	M5P1	M2P1	M5P1	25	1	1	0.16
4	M5P1	M2P1	M3P1	M2P1	24	0.96	2	0.33
5	M2P2	M3P2	M4P2	M3P2	25	1	5	0.83
6	M3P2	M4P2	M5P2	M4P2	25	1	3	0.5
7	M4P2	M5P2	M2P2	M5P2	25	1	6	1
8	M5P2	M2P2	M3P2	M2P2	22	0.88	1	0.16
9	M2P3	M3P3	M4P3	M3P3	25	1	11	1.83
10	M3P3	M4P3	M5P3	M4P3	25	0.92	6	1
11	M4P3	M5P3	M2P3	M4P3	25	1	5	0.83
12	M5P3	M2P3	M3P3	M2P3	25	0.96	5	0.83
13	M2P4	M3P4	M4P4	M3P4	25	1	5	0.83
14	M3P4	M4P4	M5P4	M4P4	25	1	1	0.16
15	M4P4	M5P4	M2P4	M5P4	25	1	2	0.33
16	M5P4	M2P4	M3P4	M2P4	22	0.88	2	0.33
17	M2P5	M3P5	M4P5	M3P5	25	1	9	1.5
18	M3P5	M4P5	M5P5	M4P5	22	0.88	92	15.33
19	M4P5	M5P5	M2P5	M5P5	25	1	1	0.16
20	M5P5	M2P5	M3P5	M2P5	25	1	17	2.83
21	M2P6	M3P6	M4P6	M3P6	25	1	4	0.66
22	M3P6	M4P6	M5P6	M4P6	25	1	4	0.66
23	M4P6	M5P6	M2P6	M5P6	25	1	10	1.66
24	M5P6	M2P6	M3P6	M2P6	25	1	0	0
Total					590	0.98	209	1.45

Fonte: Autor.

Figura 14 – Avaliação do método proposto utilizando a curva de ROC ao variar-se os valores de parâmetros s .

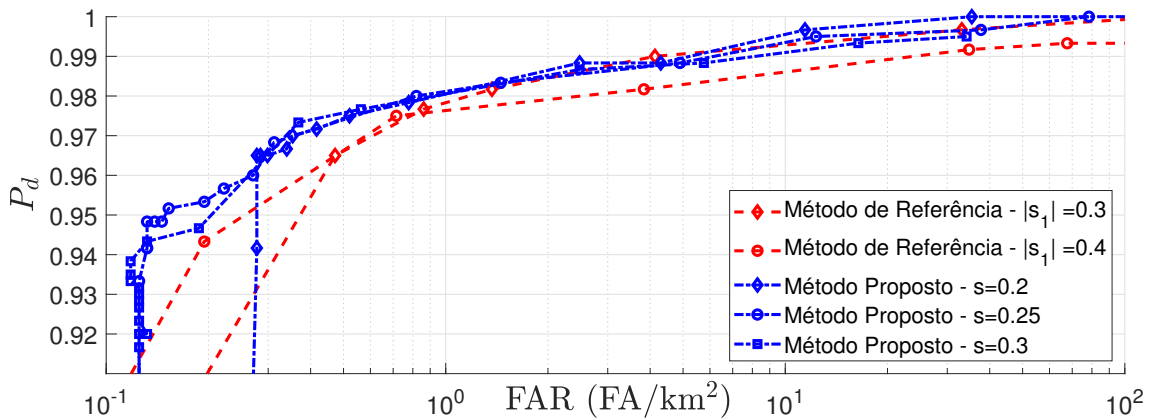


Fonte: Autor.

publicações originais foram mantidas. Analisando os resultados obtidos na Figura 15, para um nível de $FAR = 10^1$, observam-se as seguintes probabilidades de detecção:

- Para o método de referência: $P_d = 99,3\%$ para $|s_1| = 0,3$ e $P_d = 98,5\%$ para $|s_1| = 0,4$, onde $|s_1|$ segue a nomenclatura utilizada no artigo original (VU et al., 2019b).
- Para o método proposto: $P_d = 99,7\%$ para $s = 0,2$, $P_d = 99,4\%$ para $s = 0,25$ e $P_d = 99,1\%$ para $s = 0,3$.

Figura 15 – Avaliação do método proposto e de referência (VU et al., 2019b) utilizando a curva de ROC.



Fonte: Autor.

Como resultado, observa-se que o método proposto superou o método de referência em termos de P_d e FAR . Além disso, destaca-se que o método proposto e o método de referência possuem determinada proximidade neste ponto estudado, possuindo regiões com uma discrepância de resultados superior, como, por exemplo, a região que conta com um nível de $FAR = 10^0$.

6.3 Considerações Finais

Este capítulo apresentou um método de detecção de mudanças utilizando imagens diferença de intensidade, contemplando as etapas de desenvolvimento, descrição matemática, teste estatístico, além de apresentar os resultados iniciais obtidos ao testá-lo com o conjunto de dados proveniente do sistema CARABAS-II.

No Capítulo 5 explanou-se detalhadamente a dedução e o desenvolvimento realizado para encontrar a distribuição estatística empregada. Utilizando a distribuição Gama, realizou-se o equacionamento, vide Seção 6.1.1, resultando em imagens com uma taxa de detecções altíssima e contando com um baixo nível de falsos alarmes, vide Seção 6.2. Realizou-se a comparação entre o algoritmo desenvolvido e estudos consagrados na literatura, constatando-se que o presente trabalho alcançou níveis superiores em termos de FAR , conforme expresso no decorrer da Seção 6.2.

Destaca-se que melhores resultados podem ser obtidos através de otimização dos parâmetros empregados, e.g., parâmetro de intensidade s e valor de limiar Th . Ademais, destaca-se que a utilização de diferentes operações morfológicas na imagem de saída pode resultar em uma melhoria do mesmo. Por fim, destaca-se que o emprego de técnicas que

realizam a predição do solo, conforme estudado em (PALM et al., 2020), tendem a resultar em níveis superiores de detecção, através da remoção de alvos das imagens de referência. Estes itens elencados serão motivo de estudos posteriores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de conclusão de curso apresenta um estudo detalhado sobre radares de abertura sintética e a utilização de imagens de intensidade em algoritmos de detecção de mudanças. Dentre os objetivos propostos para este trabalho, destaca-se o desenvolvimento de um algoritmo de detecções de mudanças que obtenha níveis competitivos com os existentes na literatura, além de realizar a validação do mesmo através da utilização do conjunto de dados proveniente do sistema CARABAS-II.

De modo a alcançar os objetivos propostos, no decorrer deste trabalho propôs-se dois algoritmos de detecção de mudanças, buscando alcançar altos níveis de taxa de detecção e minimizando a taxa de falsas detecções. Ademais, realizou-se um estudo estatístico completo de modo a encontrar uma distribuição estatística que obtenha um comportamento similar ao *background* das imagens de intensidade provenientes do conjunto de dados utilizado.

Diante dos resultados iniciais expostos no decorrer do Capítulo 4, pode-se comprovar a utilização de imagens de intensidade *wavelength-resolution* em algoritmos de detecção de mudanças. Observou-se, entretanto, a detecção errônea de objetos alongados, devido a natureza das imagens de intensidade de ressaltar regiões com altos dispersores. Este fato foi corrigido através da utilização de imagens diferença de intensidade nos algoritmos desenvolvidos. No entanto, esta alteração acarretou em uma discrepância estatística na imagem, alterando a distribuição ideal.

Um estudo estatístico baseado em testes *Goodness-on-Fit* foi realizado nas imagens diferença de intensidade, de modo a encontrar a distribuição que descreva com maior precisão o *clutter* e ruído das imagens deste conjunto de dados, conforme exposto no Capítulo 5. Utilizou-se o teste de Anderson-Darling nesta etapa do trabalho, e ficou provado um desempenho superior da distribuição Gama, ao comparar-se com a distribuição que vinha sendo utilizada, i.e., distribuição Exponencial. Este aumento de desempenho pode ser comprovado ao realizar uma análise referente à área abaixo da curva, que é uma das análises com maior relevância em termos de curvas ROC. Resultando em uma menor perda de alvos, devido à aproximação mais fidedigna obtida ao utilizar a distribuição Gama. Garantindo um melhor desempenho em diferentes situações de operação, e possivelmente em outros conjuntos de dados com um comportamento estatístico similar.

O Capítulo 6 demonstra os passos para a implementação e testes realizados

utilizando a distribuição Gama na etapa de LRT do método, visando comprovar os resultados expostos nos testes estatísticos. Ademais, compararam-se os resultados obtidos em curvas ROC com um método que possui, no conhecimento do autor, o melhor desempenho da literatura.

Diante dos fatos expostos no decorrer deste trabalho, é plausível realizar a afirmação que os objetivos propostos foram concluídos com êxito. Adicionalmente, ressalta-se alguns temas para estudos futuros, como um estudo referente à utilização de outras operações morfológicas e seus impactos sobre os resultados apresentados, ou até mesmo a expansão do método utilizado para outros conjuntos de dados. Além do estudo referente a otimizações no algoritmo de modo a otimizar o tempo de processamento necessário pelo mesmo.

Destaca-se que alguns resultados expostos no decorrer deste trabalho renderam publicações em congressos. Dentre os resultados expostos, ressalta-se a descrição completa do método de detecção de mudanças utilizando imagens de intensidade e a distribuição exponencial, além de resultados prévios, apresentada e publicada em congresso internacional, vide (VOIGT et al., 2021b). De modo similar, os resultados completos obtidos através da variação do método citado foram expostos em um artigo apresentado e publicado na SBRT (Sociedade Brasileira de Telecomunicações), vide (VOIGT et al., 2021a), no qual, é avaliado a utilização de imagens diferença, além da comparação com métodos consolidados na literatura. Ressalta-se que um artigo para publicação em revista internacional está na etapa final de produção, este aborda o estudo estatístico sobre imagens diferença de intensidade, contanto adicionalmente com um estudo de caso referente à aplicação de imagens diferença em método de detecção de mudanças utilizando a distribuição Gama no LRT, esse método é avaliado e comparado com métodos consolidados na literatura em termos de probabilidade de detecção e curvas ROC.

REFERÊNCIAS

- ALVES, D. I. et al. Wavelength-resolution sar change detection using bayes' theorem. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, IEEE, v. 13, p. 5560–5568, 2020.
- ALVES, D. I. et al. A statistical analysis for wavelength-resolution sar image stacks. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 17, n. 2, p. 227–231, 2020.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. Asymptotic theory of certain “goodness of fit” criteria based on stochastic processes. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 23, n. 02, p. 193–212, Jun. 1952.
- BLUMTRITT, O.; PETZOLD, H.; ASPRAY, W. **Tracking the History of Radar**. [S.l.]: IEEE-Rudgers Center for the History of Electrical Engineering, 1994. ISBN 9780780399877.
- BROCKWELL, P. J. et al. **Introduction to time series and forecasting**. [S.l.]: Springer, 2016.
- BYERS, R. Half-normal distribution. **Wiley StatsRef: Statistics Reference Online**, Wiley Online Library, 2014.
- CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic aperture radar**. [S.l.]: Wiley, New York, 1991. v. 11.
- FORCE., U. A. **The Sensor Data Management System**. 2021. Disponível em: <https://www.sdms.afrl.af.mil/>.
- FROLIND, P.-O.; ULANDER, L. Motion compensation effects for repeat-pass processing in wavelength-resolution SAR. In: **IGARSS '98. Sensing and Managing the Environment. IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Symposium Proceedings. (Cat. No. 98CH36174)**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 5, p. 2637–2639.
- GOMES, N. R. et al. Comparison of the Rayleigh and K-Distributions for Application in Incoherent Change Detection. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 16, n. 5, p. 756–760, 2019.
- IZAWA, T. Two or multi-dimensional gamma-type distribution and its application to rainfall data. **Papers in Meteorology and Geophysics**, v. 15, p. 167–200, 1965.
- LEONE, F. C.; NELSON, L. S.; NOTTINGHAM, R. The folded normal distribution. **Technometrics**, Taylor & Francis, v. 3, n. 4, p. 543–550, 1961.
- LUNDBERG, M. et al. A challenge problem for detection of targets in foliage. In: ZELNIO, E. G.; GARBER, F. D. (Ed.). **Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII**. SPIE, 2006. v. 6237, p. 160 – 171. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.663594>.
- LUNDBERG, M. et al. A challenge problem for detection of targets in foliage. In: **SPIE Defense and Security Symposium: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XIII**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 6237.

MACHADO, R. et al. The stability of UWB low-frequency SAR images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 13, n. 8, p. 1114–1118, ago. 2016.

MARSAGLIA, G.; MARSAGLIA, J. Evaluating the anderson-darling distribution. **Journal of statistical software**, v. 9, p. 1–5, 2004.

MATSUOKA, M.; YAMAZAKI, F. Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes. **Earthquake Spectra - EARTHQ SPECTRA**, v. 20, ago. 2004.

MELVIN, W. L.; SCHEER, J. A. **Principles of Modern Radar: volume III - Radar Applications**. 1st. ed. Edison, USA: SciTech Publishing, 2014. Hardcover.

MOREIRA, A. et al. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and remote sensing magazine**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 6–43, 2013.

NADARAJAH, S.; KOTZ, S. Reliability for some bivariate exponential distributions. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2006, p. 1–14, fev. 2006.

OLIVER, C.; QUEGAN, S. **Understanding synthetic aperture radar images**. 1st. ed. [S.l.]: SciTech Publishing, 2004.

PALM, B. G. et al. Wavelength-resolution SAR ground scene prediction based on image stack. **Sensors**, v. 20, n. 7, Apr. 2020.

RICHARDS, M. A. et al. **Principles of modern radar**. 1st. ed. [S.l.]: Citeseer, 2010.

THOMAS, M.; JOY, A. T. **Elements of information theory**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 2006.

TOMIYASU, K. Tutorial review of synthetic-aperture radar (sar) with applications to imaging of the ocean surface. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 66, n. 5, p. 563–583, 1978.

ULANDER, L. M. H. VHF-band SAR for detection of concealed ground targets. In: **RTO SCI Symposium on Sensors and Sensor Denial by Camouflage, Concealment and Deception**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 1–11.

ULANDER, L. M. H. et al. Change detection for low-frequency SAR ground surveillance. **IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation**, v. 152, n. 6, p. 413–420, dez. 2005.

ULANDER, L. M. H. et al. Performance of VHF-band SAR change detection for wide-area surveillance of concealed ground targets. In: **SPIE Defense and Security Symposium: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery XI**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 5427.

VOIGT, G. H. et al. Target detection method for intensity vhf wavelength-resolution sar images. **Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais**, XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14209/sbrt.2021.1570724219>.

VOIGT, G. H. M. et al. Change detection method for intensity VHF wavelength-resolution SAR images. In: BRUZZONE, L.; BOVOLO, F. (Ed.). **Image and Signal Processing for Remote Sensing XXVII**. SPIE, 2021. v. 11862, p. 182 – 190. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2599952>.

VU, V. T. Wavelength-resolution SAR incoherent change detection based on image stack. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 7, p. 1012–1016, jul. 2017.

VU, V. T. et al. A detector for wavelength resolution SAR incoherent change detection. In: **IEEE Radar Conference (RadarConf)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.

VU, V. T. et al. Bivariate Gamma Distribution for Wavelength-Resolution SAR Change Detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 1, p. 473–481, 2019.

VU, V. T. et al. False alarm reduction in wavelength-resolution SAR change detection using adaptive noise canceler. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 591–599, jan. 2017.

WANG, H. et al. Spectrum sensing in cognitive radio using goodness of fit testing. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 8, n. 11, p. 5427–5430, 2009.

UNITED STATES PATENT OFFICE. Carl A. Wiley. **Pulsed Doppler Radar Methods And Apparatus**. 1965. US 3 196 436, 20 Jul. 1965.

YANG, S. et al. Extreme self-paced learning machine for on-orbit sar images change detection. **IEEE Access**, v. 7, p. 116413–116423, ago. 2019.