

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

LUCAS PEDROSO RAMOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO
EM ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE ALVOS PARA IMAGENS
SAR VHF UWB**

Alegrete

2018

LUCAS PEDROSO RAMOS

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO
EM ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE ALVOS PARA IMAGENS
SAR VHF UWB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Elétrica, realizado na Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Cristian Müller
Coorientador: Prof. Me. Dimas Irion Alves

Alegrete

2018

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) .

R175e RAMOS, LUCAS PEDROSO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO EM
ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE ALVOS PARA IMAGENS SAR VHF UWB /
LUCAS PEDROSO RAMOS.

52 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2018.

"Orientação: Crístian Müller".

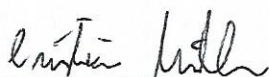
1. DETECÇÃO DE ALVOS. 2. SAR. 3. OPERAÇÕES MORFOLÓGICAS. 4.
ENGENHARIA ELÉTRICA. 5. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA. I.
Título.

LUCAS PEDROSO RAMOS

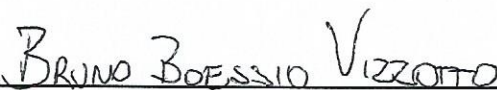
**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO
EM ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE ALVOS PARA IMAGENS
SAR VHF UWB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Elétrica, realizado na Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

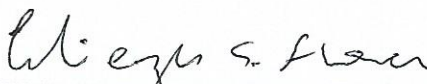
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26 de Junho de 2018.



Prof. Me. Crístian Müller
Orientador



Prof. Dr. Bruno Boessio Vizzotto
UNIPAMPA



Prof. Me. Eliezer Soares Flores
UNIPAMPA

**Alegrete
2018**

*A toda a minha família, em especial aos meus pais Valci Dourado Ramos e Lúcia
Margarete Lopes Pedroso, que com muito amor, carinho e apoio, não mediram esforços
para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.*

Agradecimentos

Esta fase da minha vida é muito especial e não posso deixar de agradecer a Deus por toda força, ânimo e coragem que me ofereceu para ter alcançado minha meta.

Agradeço à minha família, que quase não tenho palavras para descrever sua importância em minha vida. Pai e mãe, eu nunca teria conseguido sem o apoio de vocês. Obrigado por tudo, de coração.

Agradeço aos professores que sempre estiveram dispostos a ajudar e contribuir para um melhor aprendizado em especial aos meus professores e orientadores Crístian e Dimas. Agradeço a eles por transmitirem seus conhecimentos e por sempre estarem ali me orientando e dedicando parte do seu tempo a mim. Agradeço também a minha instituição por ter me dado à chance e todas as ferramentas que permitiram chegar hoje ao final desse ciclo.

Agradeço a *Swedish Defence Research Agency* (FOI) por fornecer os dados referentes ao sistema CARABAS II, este que foi de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

A minha namorada, melhor amiga e companheira de todas as horas, Luana Knierim, pelo carinho, compreensão, amor e solidariedade recebida em todos os momentos.

Amigos são os irmãos que a gente escolhe, mas há irmãos que não escolhemos, que vem junto com a família, como num pacote. Mas, se pudesse escolher, escolheria vocês mesmos. Obrigado por serem parte do que eu sou e pela cumplicidade de sempre, Débora Bottura, Jacson Soares, Gabriel Cocco, Gabriel Macedo, Larissa Prado.

Por fim, agradeço a todos de coração, os que foram aqui mencionados e os que não, porque não dá para falar de todos em particular, mas todos foram importantes para meu percurso.

*“Procure ser uma pessoa de valor, em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso.
O sucesso é consequência...”*
(Albert Einstein)

Resumo

Os radares de abertura sintética (SAR) destacam-se pela sua aplicação em sistemas de monitoramento ambiental e terrestre. Esta aplicação é conveniente em virtude da característica deste sistema em fornecer, quando desejado, imagens de alta resolução, assim como ser menos susceptível às condições climáticas, quando comparado aos sistemas óticos. Este tipo de sistema, quando utilizado em baixas frequências, possui resolução similar ao comprimento de onda do sinal, de modo a tornar-se adequado para aplicações em regiões florestais, pois essa resolução ameniza a influência, na formação da imagem, de folhagens, galhos, dentre outras estruturas. Neste cenário, está inserido o sistema SAR CARABAS II (*Coherent All Radio Band Sensing*), o qual será objeto de estudo deste trabalho. A banda de frequência VHF (*Very High Frequency*) utilizada por este sistema fornece uma boa penetração na vegetação e até certo ponto no solo, tornando este dispositivo um sistema de elevado interesse em aplicações militares, seja para a detecção de alvos camuflados em florestas ou até mesmo a obtenção de mapas topográficos. Dentre os algoritmos de detecção de alvos utilizados para essa aplicação, pode-se destacar os algoritmos de detecção de mudança, os quais são o foco de estudo desse trabalho. Algoritmos de detecção de mudanças visam destacar variações entre imagens, de tal maneira a diferenciar os alvos de outros sinais provenientes de ruídos, *clutter* (ecos resultantes do ambiente de aquisição de dados). Desse modo, este documento apresenta o estudo realizado sobre a influência dos principais parâmetros utilizados nos algoritmos de detecção de alvos para radares SAR VHF *Ultra-wideband* (UWB). Como resultado do estudo realizado, obteve-se um aumento em termos da probabilidade de detectar um alvo corretamente, bem como uma redução na ocorrência de falsos alarmes.

Palavras-chave: SAR. Detecção de alvos. CARABAS.

Abstract

Synthetic aperture radars (SAR) stand out for their application in environmental and terrestrial monitoring systems. This application is convenient because of the characteristic of this system in providing, when desired, high resolution images as well as being less susceptible to climatic conditions when compared to optical systems. This type of system, when used at low frequencies, has a resolution similar to the wavelength of the signal, so as to be suitable for applications in forest regions, since this resolution softens the influence, in the image formation, of foliage, branches, among other structures. In this scenario, the SAR system CARABAS II (Coherent All Radio BAnd Sensing) is inserted, which will be the object of study of this work. The VHF (Very High Frequency) frequency band used by this system provides good penetration into the vegetation and to some extent on the ground, making this device a system of high interest for military applications, or for the detection of camouflaged targets in forests or even obtaining topographic maps. Among the target detection algorithms used for this application, it is possible to emphasize the change detection algorithms, which are the focus of study of this work. Change detection algorithms aim to highlight variations between images in such a way as to differentiate the targets from other noise signals, clutter (echoes resulting from the data acquisition environment). Thus, this paper presents the study carried out on the influence of the main parameters used in the target detection algorithms for VHF Ultra-wideband (UWB) SAR systems. As a result of the study, we obtained an increase in terms of the probability of correctly detecting a target, as well as reducing the occurrence of false alarms.

Key-words: SAR. Target Detection. CARABAS.

Lista de ilustrações

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Geometria de imageamento de um radar de visada lateral. | 16 |
| Figura 2 – Resolução espacial de um radar de visada lateral. | 16 |
| Figura 3 – Sistema CARABAS II. | 20 |
| Figura 4 – Localização da faixa de testes militares RFN VidseL. | 21 |
| Figura 5 – Veículos TGB11, TGB30 e TGB40, respectivamente. | 21 |
| Figura 6 – Localização das florestas na região. | 22 |
| Figura 7 – Processamento de imagens SAR. | 23 |
| Figura 8 – Algoritmo de detecção proposto pela FOI. | 26 |
| Figura 9 – Par de imagens SAR. | 26 |
| Figura 10 – Imagem obtida após etapa de detecção de mudanças. | 28 |
| Figura 11 – Filtro CFAR. | 28 |
| Figura 12 – Imagem obtida após a normalização CFAR. | 29 |
| Figura 13 – Exemplo do processo de erosão. | 31 |
| Figura 14 – Exemplo do processo de dilatação. | 31 |
| Figura 15 – Detecção final para imagens SAR. | 34 |
| Figura 16 – Filtro CFAR Modificado. | 35 |
| Figura 17 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Diamante, com tamanho 3×3 para o algoritmo proposto pela FOI. | 41 |
| Figura 18 – Comparação das curvas ROC dos melhores resultados para diferentes padrões de operações morfológicas: (a) Padrão Inicial; (b) Padrão utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão. | 43 |
| Figura 19 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Diamante, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 3×3 | 44 |
| Figura 20 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 5×5 | 45 |
| Figura 21 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 7×7 | 46 |
| Figura 22 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz e (c) Diamante com tamanho 3×3 no algoritmo CDA iterativo. | 47 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Características do sistema CARABAS II. | 19 |
| Tabela 2 – Geometria dos alvos. | 21 |
| Tabela 3 – Resultados obtidos para a simulação da FOI. | 38 |
| Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos com o algoritmo da FOI . . . | 39 |
| Tabela 5 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Quadrático com variação dimensional e de limiar. | 39 |
| Tabela 6 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Diamante com variação dimensional e de limiar. | 40 |
| Tabela 7 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Circular com variação dimensional e de limiar. | 40 |
| Tabela 8 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Cruz com variação dimensional e de limiar. | 40 |
| Tabela 9 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Quadrático com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão. | 41 |
| Tabela 10 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Diamante com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão. | 42 |
| Tabela 11 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Cruz com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão. | 42 |
| Tabela 12 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 3×3 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$ | 43 |
| Tabela 13 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 5×5 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$ | 44 |
| Tabela 14 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 7×7 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$ | 45 |
| Tabela 15 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o algoritmo CDA iterativo com diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$ | 47 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|-------|--|
| SAR | <i>Synthetic Aperture Radar</i> |
| SLAR | <i>Side-Looking Airborne Radar</i> |
| RAR | <i>Real Aperture Radar</i> |
| UWB | <i>Ultra-Wide Band</i> |
| FOI | <i>Swedish Defence Research Agency</i> |
| SAAB | <i>Svenska Aeroplan AB</i> |
| VHF | <i>Very High Frequency</i> |
| ICD | <i>Incoherent Change Detection</i> |
| CCD | <i>Coherent Change Detection</i> |
| STAP | <i>Space-time Adaptive Processing</i> |
| FOPEN | <i>Foliage Penetration Radar</i> |
| CFAR | <i>Constant False Alarm Rate</i> |
| FAR | <i>False Alarm Rate</i> |
| P_d | Probabilidade de detecção |
| ROC | <i>Receiver Operation Characteristic</i> |
| Th | <i>Threshold</i> |
| FFBP | <i>Fast Factorized Back Projection</i> |

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 13 |
| 1.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.2 | Objetivos Específicos | 14 |
| 1.3 | Apresentação do Trabalho | 14 |
| 2 | Fundamentação Teórica | 15 |
| 2.1 | SAR - <i>Synthetic Aperture Radar</i> | 17 |
| 3 | Materiais e Métodos | 19 |
| 3.1 | CARABAS II | 19 |
| 3.2 | Conjunto de Dados | 20 |
| 3.3 | Algoritmo de Detecção de Mudanças | 23 |
| 3.3.1 | Algoritmo de Detecção de Mudança Coerente - CCD | 24 |
| 3.3.2 | Algoritmo de Detecção de Mudança Incoerente - ICD | 25 |
| 3.4 | Algoritmo proposto pela FOI | 26 |
| 3.4.1 | Change Detection Algorithm - CDA | 27 |
| 3.4.2 | Constant False Alarm Rate - CFAR Filter | 28 |
| 3.4.3 | Análise de Detecção | 29 |
| 3.5 | Melhora do Algoritmo de Detecção | 34 |
| 3.5.1 | Aprimoramento no Filtro CFAR | 34 |
| 3.5.2 | Algoritmo CDA Iterativo | 35 |
| 3.6 | Metodologia | 36 |
| 4 | Resultados | 38 |
| 4.1 | Algoritmo proposto pela FOI | 38 |
| 4.2 | Aprimoramento no Filtro CFAR | 43 |
| 4.3 | Algoritmo CDA Iterativo | 46 |
| 4.4 | Considerações Finais | 48 |
| 5 | Conclusões e Trabalhos Futuros | 49 |
| | Referências | 50 |

1 Introdução

Os primeiros estudos relacionados aos sistemas de radares foram realizados a partir do final do século XIX (EAVES; REEDY, 1987). Ao decorrer dos anos, essa tecnologia começou a se desenvolver, tendo seu grande avanço durante a Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de detectar alvos inimigos para a defesa do território em diferentes condições climáticas (SKOLNIK, 1981).

Segundo Blumtritt, Petzold e Aspray (1994), o termo radar refere-se a um sistema utilizado para determinar posição, movimento e características de um objeto remoto, através de ondas refletidas (ecos). Conforme Mahafza (2002), os sistemas de radares usam formas de ondas moduladas e antenas diretivas para transmitir energia eletromagnética a uma determinada região do espaço. Por consequência, objetos presentes nessa região refletirão parte dessa energia de volta ao radar.

Dentre os diversos tipos de radares pode-se destacar os radares de abertura sintética (SAR). Estes radares baseiam-se na movimentação relativa entre a antena do dispositivo e o alvo, para obter dados similares aos obtidos por sistemas com uma abertura efetiva de antena muito maior, por exemplo, os radares de abertura real (RAR). Dessa forma, este tipo de dispositivo é capaz de alcançar uma melhor resolução espacial (OLIVER; QUEGAN, 2004).

Este sistema quando combinado com sinais na faixa de frequência VHF possui uma grande quantidade de aplicações. Dentre elas, pode-se destacar o uso do sistema em regiões com densas vegetações, pela sua característica de transpassar as copas das árvores, permitindo o monitoramento de regiões florestais (MELVIN; SCHEER, 2014). Sistemas utilizados neste tipo de aplicação são denominados radares de penetração de folhagens (FOPEN), os quais podem ser associados às aplicações civis (detecção de desmatamento) ou aplicações militares (detecção de alvos militares), sendo que para ambas situações o sistema deve possuir uma elevada taxa de probabilidade de detecção de alvos associada a uma baixa presença de falsos alarmes (GUSTAVSSON et al., 1998). Neste cenário, estão contidos os radares suecos CARABAS (*Coherent All Radio BAnd Sensing*), desenvolvido pela SAAB (*Svenska Aeroplan AB*) em conjunto com a FOI (*Swedish Defence Research Agency*) (GUSTAVSSON et al., 1998).

O sistema CARABAS é utilizado para o monitoramento terrestre de grandes áreas de interesse. Atualmente, os radares CARABAS possuem três versões, sendo que os dados utilizados para o estudo deste trabalho de conclusão de curso são referentes ao sistema CARABAS II. Os dados obtidos neste sistema permitiu a geração de diversos produtos como, por exemplo, algoritmos de detecção alvos. Dentre os diversos tipos de algoritmos de

detecção, o algoritmo de detecção mudanças será o utilizado neste trabalho (ULANDER et al., 2005). Diante o exposto, este trabalho visa realizar um estudo dos parâmetros utilizados em algoritmos de detecção de alvos em imagens SAR UWB, considerando dados obtidos pelo sistema CARABAS II. Espera-se que este estudo resulte em uma melhora no desempenho dos algoritmos apresentados em Lundberg et al. (2006), Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016) em termos da detecção correta de alvos e da ocorrência de falsos alarmes.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral estudar a influência dos principais parâmetros de algoritmos de detecção de alvos para imagens do tipo SAR UWB, com foco em aplicações FOPEN. Neste estudo, serão considerados os algoritmos e propostas apresentados em Lundberg et al. (2006), Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016).

1.2 Objetivos Específicos

Avaliar e estudar os seguintes parâmetros na aplicação de interesse:

- Janela na etapa de normalização CFAR (*Constant False Alarm Rate*) ;
- Limiar de Operação;
- Dimensão dos elementos estruturantes das operações morfológicas;
- Tipos de elementos estruturantes das operações morfológicas.

1.3 Apresentação do Trabalho

O restante deste documento está organizado em três capítulos. O Capítulo 2, apresenta uma breve fundamentação teórica a respeito dos radares de visada lateral e sua resolução espacial. O sistema CARABAS II é apresentado no Capítulo 3, assim como, a campanha de voo referente a obtenção dos dados utilizados. Ainda no Capítulo 3, será abordado o algoritmo de detecção proposto pela FOI, seguido da proposta de redução de falsos alarmes apresentada em Fabrin et al. (2017) e o algoritmo de detecção de alvos iterativo proposto por Molin Jr. et al. (2016). Para finalizar o Capítulo 3, é apresentada a metodologia que foi utilizada neste trabalho. No Capítulo 4, são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos a partir do estudo proposto. Por fim, o Capítulo 5 finaliza o documento com conclusões e algumas considerações finais

2 Fundamentação Teórica

A utilização do termo radar (*Radio Detection and Ranging*), conforme Watson-Watt (1959), pode ser caracterizada como a arte de detectar por meio de ondas refletidas, a presença de objetos, determinando sua direção e intervalos, reconhecendo seu caráter e empregando dados assim obtidos no desempenho de operações militares, navais ou outras. Em 1886, os primeiros estudos que podem ser relacionados aos radares foram documentados através de Heinrich Hertz, que demonstrou que as ondas de rádio são refletidas a partir de objetos metálicos e dielétricos (EAVES; REEDY, 1987). Em 1903, foi registrado o primeiro radar da história de Christian Hulsmeyer, que criou um dispositivo capaz de detectar ondas de rádio refletidas por um navio (EAVES; REEDY, 1987).

A evolução deste tipo de sistema ocorreu em diversos países, simultaneamente, durante as décadas de 1920 e 1930. No entanto, o grande interesse em radares é associado ao desenvolvimento de radares para detectar alvos inimigos, durante a Segunda Guerra Mundial (SKOLNIK, 1981; BLUMTRITT; PETZOLD; ASPRAY, 1994). Além de aplicações militares, este sistema, ao longo dos anos, foi utilizado para outras diversas aplicações como, por exemplo, segurança de rotas aéreas, detecção de objetos sob folhagens, desmatamento de florestas tropicais, entre outras (MELVIN; SCHEER, 2014).

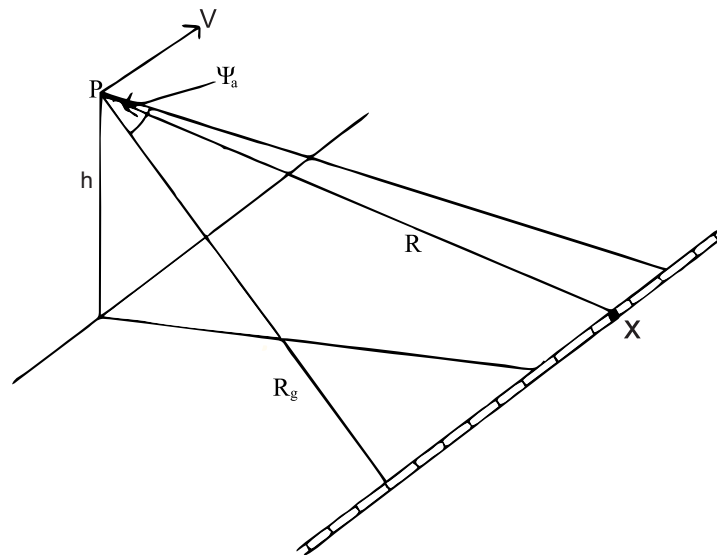
Mesmo com a diminuição de confronto entre os países, o interesse da indústria e da academia por avanços em pesquisas relacionadas aos sistemas de radares continuou crescendo devido a vasta gama de aplicações em que estes sistemas podem ser utilizados. A partir da década de 1950, com o objetivo de substituir a antena giratória fixa utilizada no *Plan Position Indicator* (PPI) por uma antena móvel que pudesse ser fixada na fuselagem de um avião, surgiu o radar de visada lateral (SLAR) (NOVO, 1992). A Figura 1 ilustra a geometria básica de um SLAR, que consiste em um sistema de visada lateral acoplado em uma plataforma (satélite ou aeronave) que se movimenta a uma velocidade V , com uma determinada altura h , alcance do solo R_g e ângulo de radiação ψ_a (OLIVER; QUEGAN, 2004). A distância para o alvo, R , é determinada a partir da medição do tempo T_r para o pulso viajar até o alvo e retornar. Pode-se relacionar a distância percorrida pela onda eletromagnética, R , em função da velocidade da luz v_{luz} , da seguinte maneira:

$$R = \frac{v_{luz} \cdot T_r}{2}. \quad (2.1)$$

A direção de viagem da plataforma P é conhecida como direção de azimute e a direção ortogonal a rota de voo da plataforma é chamada de direção de alcance ou radial (*range*) (OLIVER; QUEGAN, 2004). Segundo Dutra et al. (2003) os radares SLAR podem ser divididos em radares de abertura real (RAR) e radares de abertura sintética (SAR),

em que o termo SLAR, por convenção, no decorrer deste trabalho irá se referir apenas a sistemas do tipo RAR.

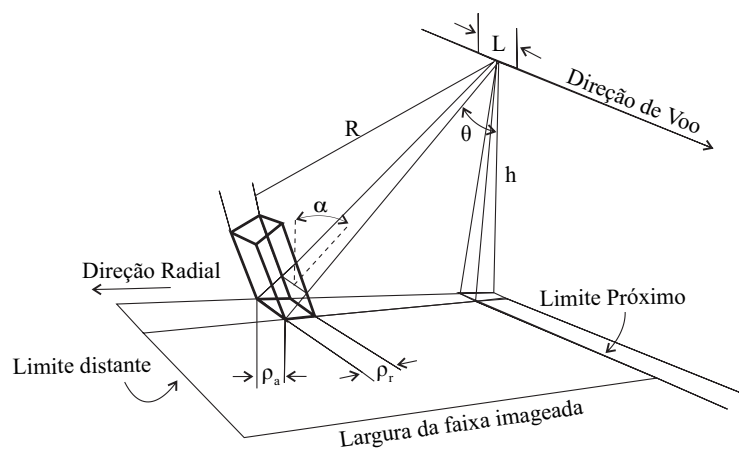
Figura 1 – Geometria de imageamento de um radar de visada lateral.



Fonte: (OLIVER; QUEGAN, 2004). Adaptado pelo autor.

A resolução espacial dos sensores determina as menores dimensões de um objeto que poderá ser identificado pelo sensor. Segundo Meneses e Almeida (2012), esta resolução é controlada por dois parâmetros independentes: resolução radial ρ_r e a resolução azimutal ρ_a , conforme descrito na Figura 2 (LIU, 2015).

Figura 2 – Resolução espacial de um radar de visada lateral.



Fonte: (LIU, 2015). Adaptado pelo autor.

Segundo Curlander e McDonough (1991), a resolução do radar na direção radial é definida como a distância mínima entre dois pontos distinguíveis pelo sistema na direção de alcance. Esta resolução é medida de acordo com a duração do pulso transmitido T_r , em que α refere-se a inclinação local do alvo, conforme apresentado na Figura 2. Esta relação pode ser descrita como (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991; OLIVER; QUEGAN, 2004):

$$\rho_r = \frac{v_{luz} \cdot T_r}{2 \cdot \text{sen}\alpha}. \quad (2.2)$$

Com a realização do processamento dos pulsos recebidos, a resolução em alcance poderá ser obtida conforme apresentado em (2.3). De acordo com o exposto, observa-se que a resolução em alcance para ambos os radares SLAR ou SAR é obtida da mesma maneira, visto que esta resolução depende apenas da largura de banda de frequência do sinal transmitido B e do processamento do sinal recebido (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991). Dessa forma, pode-se descrever a resolução em alcance como:

$$\rho_r = \frac{v_{luz}}{2 \cdot B \cdot \text{sen}\alpha}. \quad (2.3)$$

De maneira similar, a resolução azimutal é definida como sendo a distância mínima entre dois pontos distinguíveis pelo sistema na direção de azimute. Para um SLAR, esta resolução é descrita como (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991):

$$\rho_a = R \cdot \beta = \frac{h \cdot \beta}{\cos\theta} = \frac{h \cdot \lambda}{\cos\theta \cdot L}, \quad (2.4)$$

em que L é o comprimento da antena ao longo da direção azimute, β é a largura do feixe de onda, θ é o ângulo de iluminação e λ é o comprimento de onda. Visto que a resolução azimutal é diretamente proporcional a λ , quanto menor for o comprimento de onda, menor será a resolução azimutal do sistema. Em radares SLAR, para obter uma melhor resolução azimutal, conforme demonstrado em (2.4), deve-se aumentar o tamanho da abertura da antena ou diminuir a distância entre o radar e o alvo, limitando a sua utilização. Logo, quanto mais próximo do sensor, melhor é a resolução azimutal (MENESES; ALMEIDA, 2012).

2.1 SAR - *Synthetic Aperture Radar*

Uma das principais vantagens dos sistemas de radares em relação aos dispositivos imageadores óticos é a sua capacidade de produzir imagens de alta qualidade da superfície terrestre, superando a cobertura das nuvens e as limitações noturnas (JAKOWATZ et al., 1996), através de sensores ativos que transmitem a radiação eletromagnética em elevados comprimentos de onda (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991). Dentre os diversos tipos de radares pode-se destacar os radares SAR, que são o foco de interesse deste trabalho.

O conceito de sistemas SAR foi concebido na década de 1950 por Carl Wiley, simbolizando um avanço significativo na tecnologia de radares (MOREIRA et al., 2013). A geometria deste sistema consiste em uma estação móvel acoplada com um sensor imageador de visada lateral, operando com ângulos de iluminação que, usualmente, variam de 10° e 45° (RICHARDS et al., 2010). O princípio de funcionamento deste dispositivo consiste na formação de imagens a partir do processamento de um conjunto de ecos sequencialmente recebidos, os quais são resultantes da interação dos pulsos transmitidos com a superfície terrestre (MOREIRA et al., 2013). Essa recepção do conjunto de ecos pode ser feita através da mesma antena emissora (sistemas monoestáticos) ou uma segunda antena (sistemas biestáticos) (MOREIRA et al., 2013).

Segundo Dutra et al. (2003), o processamento do sinal em um sistema SAR é dividido em duas etapas: processamento na direção radial e o processamento azimutal. O sinal recebido pelo sensor com valores de fase e magnitude é dividido em componentes de fase e de quadratura, sendo amostrado de acordo com uma determinada função de referência e convertido para o formato digital formando uma sequência de dados denominada de *range bin* ou *range gate*. Esta sequência irá formar uma linha na imagem com número de pixels dependente da taxa de amostragem empregada no sinal. Com o deslocamento do sensor na direção de azimute, o processamento de pulsos irá compor as demais colunas da imagem (processamento em azimute) (DUTRA et al., 2003).

Ao contrário do sistema SLAR, a resolução azimutal do sistema SAR independe da distância entre a plataforma e o alvo, de modo a depender apenas de L (CURLANDER; MCDONOUGH, 1991). Desse modo a resolução azimutal de um sistema SAR pode ser escrita como:

$$\rho_a(SAR) = \frac{L}{2}. \quad (2.5)$$

Para a obtenção dos dados das imagens SAR, existem diversos modos de operação, destacando-se os modos *spotlight* e *stripmap*. Estes modos se diferenciam em algoritmos de categorização em relação a aplicação, geometria de coleta e simplificação de suposições matemáticas (JAKOWATZ et al., 1996). O modo *spotlight* é utilizado para o monitoramento de pequenas regiões, de modo a obter resoluções espaciais que se aproximam das imagens ópticas remotas, enquanto o modo *stripmap* é utilizado para o monitoramento de regiões maiores apresentando resoluções associadas a maiores dimensões (JAKOWATZ et al., 1996).

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo será apresentado o sistema CARABAS II, utilizado para a obtenção das imagens que serão estudadas no decorrer deste trabalho de conclusão de curso. Em seguida, o algoritmo de detecção de alvos adotado pela FOI é descrito, assim como, as melhorias que serão estudadas para o algoritmo de detecção. Por fim, a metodologia utilizada no trabalho será apresentada.

3.1 CARABAS II

O desenvolvimento do CARABAS II, segundo (ULANDER et al., 2001), começou no ano de 1994, com integração concluída no ano de 1996. Com o sucesso dos primeiros testes em outubro de 1996, o sistema passou a ser utilizado em diversas missões na Suécia, Finlândia, França e Estados Unidos.

CARABAS II é a segunda geração de um sistema SAR VHF UWB desenvolvido pela FOI em conjunto com a empresa SAAB, que opera na frequência 20-90 MHz, com comprimentos de onda entre 3,3 m e 15 m (LUNDBERG et al., 2006). A frequência utilizada por este sistema permite obter informações de objetos ocultos em florestas densas, assim como, mapear o volume de biomassa florestal (ULANDER et al., 2001). Além da resolução do sistema, existem diversos outros parâmetros que tornam esse radar adequado para aplicações tais como a detecção de alvos. A Tabela 1 apresenta alguma das principais informações provenientes do sistema CARABAS II.

Tabela 1 – Características do sistema CARABAS II.

| Parâmetros do sistema | Valor(es) |
|----------------------------------|--------------------|
| Altitude nominal de voo | 3 - 9 km |
| Velocidade nominal de voo | 127 m/s |
| Banda de frequência | 20 - 86 MHz |
| Ângulo de abertura | 90° |
| Pico de potência transmitida | 500 W |
| Modulação de pulso | FM não linear |
| Sub-bandas de frequência | 35 (1 RFI sniff) |
| Passo de frequência | 1,875 MHz |
| Frequências centrais | 21,25 MHz - 85 MHz |
| Frequência de repetição de pulso | 5000 Hz |
| Largura de pulso | 5 - 15 μ s |
| Máximo alcance | 26,4 km |

Fonte: (LUNDBERG et al., 2006).

O sensor do sistema CARABAS II foi acoplado em uma aeronave Saberline, a qual é apresentada na Figura 3. Os dados obtidos foram gravados em um disco rígido a bordo, enquanto todo o processamento dos sinais foi realizado *offline*, em laboratório (LUNDBERG et al., 2006).

Figura 3 – Sistema CARABAS II.



Fonte: (LUNDBERG et al., 2006).

3.2 Conjunto de Dados

Com o intuito de incentivar a comunidade no desenvolvimento de novos algoritmos para detecção de alvos em florestas, a FOI disponibilizou um conjunto de 24 imagens¹, coletadas utilizando o sistema SAR CARABAS II. Estas imagens fazem parte de um conjunto maior com 150 imagens obtidas durante uma campanha de vôo em 2002, em uma região militar chamada RFN Vidsel no norte da Suécia, conforme indicado, aproximadamente, na Figura 4 (LUNDBERG et al., 2006). Os alvos utilizados eram veículos militares dos modelos TGB11, TGB30, TGB40, com dimensões conforme a Tabela 2. Foram implantados 25 alvos: 10 veículos do modelo TGB11, 8 do modelo TGB30 e 7 do modelo TGB40. Os veículos estavam em uma área de 6 km^2 que contém, além dos alvos, rios, condutores de energia, cercas e árvores. Na Figura 5, é possível observar os veículos utilizados (LUNDBERG et al., 2006).

¹ Imagens disponíveis em: <<https://www.sdms.afrl.af.mil/>>

Figura 4 – Localização da faixa de testes militares RFN Vidsel.



Fonte: (GOOGLE MAPS, 2018).

Tabela 2 – Geometria dos alvos.

| Modelo | Comprimento (m) | Largura (m) | Altura (m) |
|--------|-----------------|-------------|------------|
| TGB11 | 4,4 | 1,9 | 2,2 |
| TGB30 | 6,8 | 2,5 | 3,0 |
| TGB40 | 7,8 | 2,5 | 3,0 |

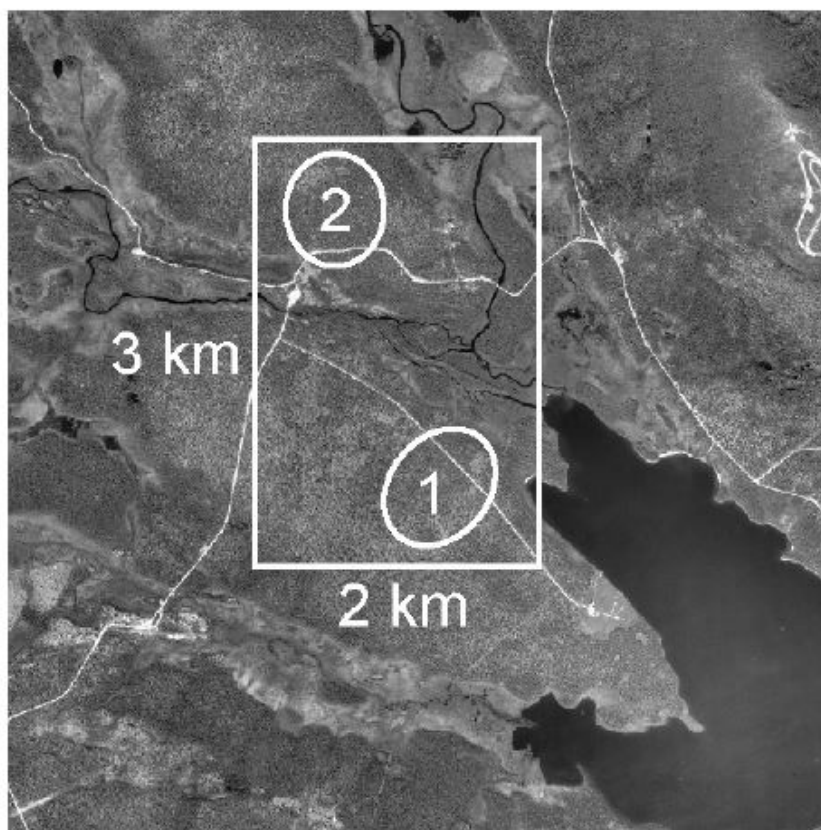
Figura 5 – Veículos TGB11, TGB30 e TGB40, respectivamente.



Fonte: (LUNDBERG et al., 2006).

As 24 imagens podem ser divididas em quatro missões, com seis imagens em cada uma. Duas regiões florestais com espécies de árvores do tipo pinheiro escocês foram escolhidas para posicionar os alvos sob folhagens, conforme é ilustrado na Figura 6. A floresta 1, localiza-se a oeste do limite norte do lago e a floresta 2 está situada a 2,5 km da floresta 1 (LUNDBERG et al., 2006).

Figura 6 – Localização das florestas na região.



Fonte: (LUNDBERG et al., 2006).

Os alvos foram distribuídos em quatro disposições distintas chamadas de Sigismund, Karl, Fredrik e Adolf-Fredrik (nomes de reis suecos), cada uma associada a uma determinada missão. As disposições Sigismund e Karl encontram-se na Floresta 2, enquanto as demais estão situadas na Floresta 1. Na disposição Sigismund, os alvos foram posicionados próximos da estrada em uma matriz 5×5 de veículos com espaçamento de 50 m e com a frente apontando para o sudoeste. Na disposição Karl, a matriz de veículos foi colocada ao norte da disposição Sigismund e com a frente dos veículos apontando para o noroeste. Na disposição Fredrik, os alvos ficaram próximos da estrada com orientação para o lado sudoeste. Por fim, na disposição Adolf-Fredrik, os alvos foram afastados da estrada e orientados para o lado oeste (LUNDBERG et al., 2006).

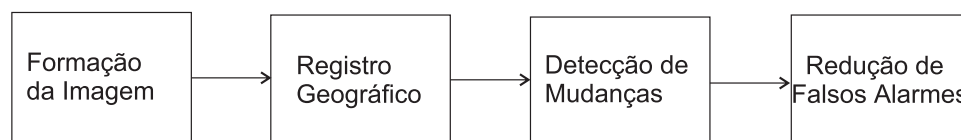
Após a coleta dos dados, a imagem SAR é formada a partir de um processo chamado de FFBP (*Fast Factorized Back Projection*) (ULANDER, 2005). Uma análise mais detalhada deste processo é descrita em (ULANDER; HELLSTEN; STENSTROM, 2003). Depois de concluir a etapa de formação de imagem e *design* experimental, foi realizada uma fase de caracterização, compreensão e mineiração de dados com o intuito de garantir o melhor uso dos dados durante os experimentos de detecção de mudanças. O resultado deste processo foi uma lista de pares de imagens apropriados para a utilização em algoritmos de detecção de mudanças (ULANDER, 2005),

O conjunto de 24 imagens fornecidos pela FOI, consiste apenas do valores de magnitude, visto que a informação de fase foi removida. Este conjunto de imagens foi georreferenciado pelo sistema Sueco RR92, e cobre uma área de $3 \times 2 \text{ km}^2$, onde cada pixel da imagem equivale a uma área de $1 \times 1 \text{ m}^2$, gerando uma imagem de 3000×2000 pixels (LUNDBERG et al., 2006).

3.3 Algoritmo de Detecção de Mudanças

Uma das técnicas utilizadas para a redução da taxa de falsos alarmes causada pela retrodifusão das árvores é a detecção de mudanças. Algoritmos de detecção de mudanças exploram o conceito de que os objetos de maior contribuição para o *clutter* tendem a permanecer estacionários entre diferentes aquisições de imagens. Para o algoritmo em estudo, a entrada de dados consiste em duas imagens, sendo uma de interesse utilizada para destacar os alvos, e uma segunda imagem de referência utilizada para reduzir os efeitos negativos do *clutter* da imagem de interesse. A etapa de detecção de mudanças faz parte de uma série de etapas realizadas no processamento de imagens SAR, conforme apresentado na Figura 7 (ULANDER et al., 2005). É importante salientar que as etapas de formação de imagem e registro geográfico não serão abordadas neste documento.

Figura 7 – Processamento de imagens SAR.



Fonte: (ULANDER et al., 2005) Adaptado pelo autor.

A FOI avaliou dois algoritmos de mudanças em um par de imagens CARABAS II SAR, chamados de: Algoritmo de Detecção Coerente (CCD - *Coherent Change Detection*) e Algoritmo de Detecção Incoerente (ICD - *Incoherent Change Detection*) (ULANDER et al., 2005). A diferença entre estes algoritmos é que no método CCD, o algoritmo utiliza

dados complexos de SAR, enquanto que no método ICD são utilizados os mesmos dados, porém, a informação de fase é removida (ULANDER et al., 2005).

3.3.1 Algoritmo de Detecção de Mudança Coerente - CCD

O algoritmo de detecção coerente baseia-se na técnica chamada de *Space-Time Adaptive Processing* (STAP), a qual se caracteriza pela exploração da diferença entre os alvos, efeito de *clutter* e o sinal de interferência nas suas características de espaço-tempo. Para esta análise, primeiro serão definidos os sinais da imagem referência e da imagem interesse em termos de alvo (\mathbf{s}), *clutter* (\mathbf{c}) e o ruído (\mathbf{n}) com os respectivos índices 1 e 2:

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

Para analisar se houve mudança em uma imagem ou não, é realizado um teste de hipótese, dado por:

$$\begin{aligned} H_0 : \mathbf{z} &= \mathbf{q} \text{ (sem mudança entre as imagens)} \\ H_1 : \mathbf{z} &= \mathbf{s} + \mathbf{q} \text{ (com mudança entre as imagens)}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

em que H_1 representa a hipótese de que foram verificadas mudanças na imagem, H_0 representa a hipótese de que não foram verificadas mudanças na imagem, \mathbf{z} representa o vetor de sinais recebidos, \mathbf{s} é o vetor que indica a presença de alvo em uma das duas imagens, e q é a soma do ruído com o *clutter*.

Com o objetivo de maximizar a probabilidade de detecção para uma taxa de falso alarme fixa, utiliza-se um teste de razão de verossimilhança, dado por:

$$\Lambda = \frac{P(\mathbf{z}|H_1)}{P(\mathbf{z}|H_0)}. \quad (3.3)$$

Visto que é preciso um modelo estatístico para as duas imagens, modelou-se o ruído e o *clutter* como uma distribuição Gaussiana, conforme é apresentado em (ULANDER et al., 2005). Desse modo, as funções de probabilidade $P(\mathbf{z}|H_0)$ e $P(\mathbf{z}|H_1)$ podem ser escritas como:

$$P(\mathbf{z}|H_0) = \frac{1}{\pi^2 |\mathbf{C}|} \exp(-\mathbf{z}^H \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}), \quad (3.4)$$

$$P(\mathbf{z}|H_1) = \frac{1}{\pi^2 |\mathbf{C}|} \exp(-(\mathbf{z} - \mathbf{s})^H \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{s})), \quad (3.5)$$

em que H refere-se ao transposição conjugada e \mathbf{C} é a matriz de covariâncias, dada por:

$$\begin{aligned} \mathbf{C} &= E \left\{ (\mathbf{z} - E \{ \mathbf{z} \}) (\mathbf{z} - E \{ \mathbf{z} \})^T \right\} \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_1 & \rho_{21} \sqrt{\sigma_2 \sigma_1} \\ \rho_{12} \sqrt{\sigma_1 \sigma_2} & \sigma_2 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

em que σ_k é a variância da imagem, apresentada em (3.7) e ρ_{kl} é a covariância entre as imagens k e l apresentada em (3.8).

$$\sigma_k = E \left\{ |q_k|^2 \right\}, \quad (3.7)$$

$$\rho_{kl} = \frac{E \{ q_k q_l^* \}}{\sqrt{\sigma_k \sigma_l}}. \quad (3.8)$$

De acordo com os modelos estatísticos adotados, o teste de razão de verossimilhança, apresentado em (3.3), é definido por:

$$\Lambda = \left| \mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z} \right| \left\{ \begin{array}{l} > \lambda \\ < \lambda \end{array} \right\}, \quad (3.9)$$

em que o limiar de operação λ é determinado para corresponder a uma taxa de falso alarme especificada. Se $\Lambda(z) > \lambda$, a hipótese H_1 é dita como verdadeira, caso contrário, H_0 é verdadeiro.

3.3.2 Algoritmo de Detecção de Mudança Incoerente - ICD

Este método utiliza apenas os valores de magnitude, sem os dados de fase das imagens SAR (ULANDER et al., 2005). Com o objetivo de reduzir o ruído das imagens e consequentemente os falsos alarmes, utiliza-se um filtro linear, denotado aqui por $\langle \cdot \rangle$. O novo vetor \mathbf{a} , é dado por:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle |\mathbf{z}_1| \rangle \\ \langle |\mathbf{z}_2| \rangle \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Da mesma forma da seção anterior, utilizam-se duas hipóteses H_0 e H_1 e atribui-se a distribuição gaussiana para o ruído e o *clutter*, e assumindo que \mathbf{a} seja modelado a partir de uma distribuição Gaussiana Bivariada com média diferente de zero. O teste de razão de verossimilhança para o algoritmo de detecção de mudança incoerente pode ser aproximado por (LUNDBERG et al., 2006):

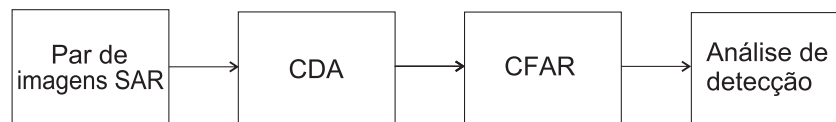
$$\Lambda = \left| \mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{a} \right| \left\{ \begin{array}{l} > \lambda \\ < \lambda \end{array} \right\}, \quad (3.11)$$

em que C é a matriz covariância 2×2 já apresentada em (3.6), \mathbf{z} representa o vetor de sinais recebidos e \mathbf{s} é o vetor que indica a presença de alvo em uma das duas imagens, como já citados anteriormente. Do mesmo modo que o método coerente, se $\Lambda > \lambda$, a hipótese H_1 é dita como verdadeira, caso contrário, H_0 é verdadeiro.

3.4 Algoritmo proposto pela FOI

Esta seção está dividida de acordo com a divisão do algoritmo adotada em Lundberg et al. (2006) e Ulander et al. (2005), conforme é apresentado na Figura 8. É importante salientar que as características dos dados de entrada e as configurações de simulação utilizadas em (LUNDBERG et al., 2006) são idênticas as utilizadas neste trabalho de conclusão de curso.

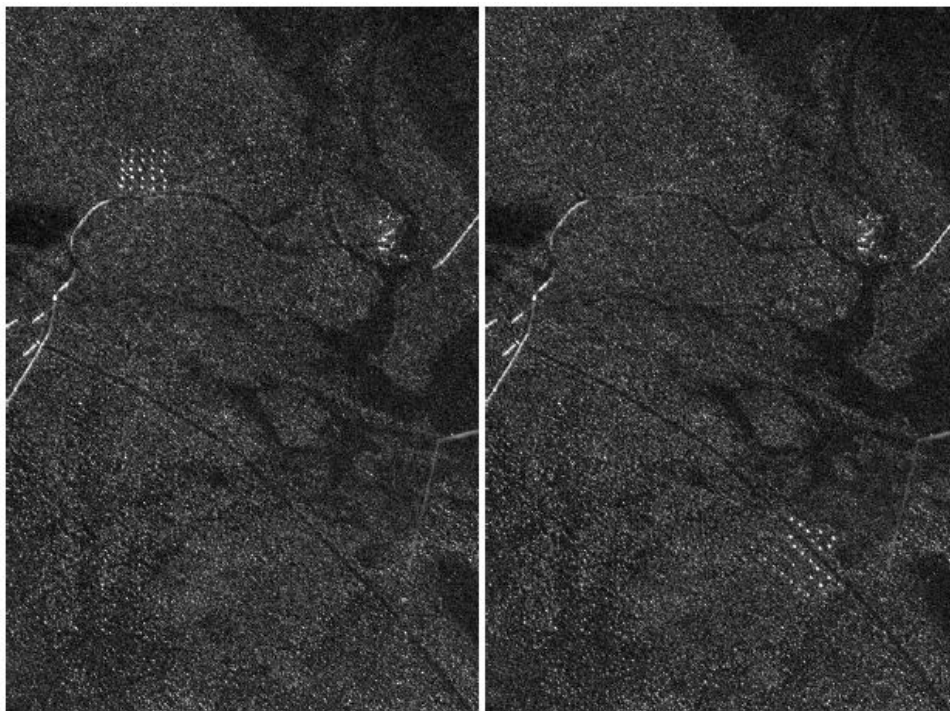
Figura 8 – Algoritmo de detecção proposto pela FOI.



Fonte: Autoral.

Este conjunto de dados que já passou pelo processo de georreferenciamento, consiste de uma matriz 2000 linhas e 3000 colunas de valores de magnitude. As duas imagens, apresentadas na Figura 9, descrevem a área de um mesmo território sobre diferentes passagens de voo, onde na imagem da esquerda encontra-se a missão Sigismund, com os 25 alvos destacados como objetos brilhantes no canto superior esquerdo, e na imagem da direita encontra-se a missão Fredrik, em que os 25 alvos estão situados no canto inferior direito.

Figura 9 – Par de imagens SAR.



Fonte: (LUNDBERG et al., 2006).

3.4.1 Change Detection Algorithm - CDA

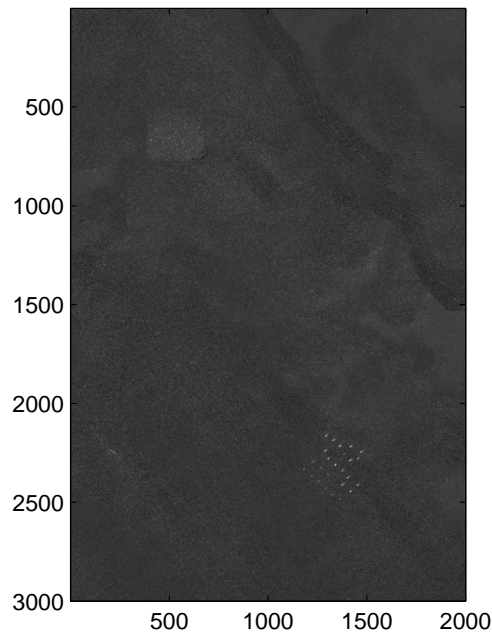
Considerando que a informação de fase não foi fornecida, utilizou-se o algoritmo de detecção de mudanças incoerente descrito na Seção 3.3.2. Então, primeiramente, define-se os alvos, *clutter* e o ruído com os respectivos índices 1 e 2, conforme foi apresentado em (3.1). Na sequência aplica-se um filtro de média no formato 5×5 com o objetivo de realizar a redução de ruídos de alta frequência na imagem, suavizando a mesma. Segundo Gonzalez e Woods (2000), este filtro calcula o valor médio a partir de uma área definida pelo tamanho do filtro, para cada pixel $[x, y]$ da imagem, causando atenuações locais e redução de ruído, através do borramento.

Em seguida, realiza-se o teste de razão de verossimilhança apresentado em (3.3), o qual foi utilizado na imagem para maximizar a probabilidade de detecção para uma taxa de falso alarme fixa, em relação a uma distribuição Gaussiana. Adotando a relação apresentada Lundberg et al. (2006), o teste de razão de verossimilhança pode ser escrito como:

$$\mathbf{I}_d[x, y] = \Lambda = \frac{\mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{z}[x, y]}{|\mathbf{s}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{s}|}, \quad (3.12)$$

em que $[x, y]$ refere-se às coordenadas das imagens, \mathbf{s} é o vetor que indica a presença de alvo em uma das duas imagens, podendo assumir os valores $\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ou $\mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, T denota a operação transposto, \mathbf{C} é a matriz covariância 2×2 estimada a partir de blocos (janelas) de 100×100 pixels, percorrendo a imagem com passos de 10 pixels até que toda a imagem tenha sido toda percorrida e $\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_i \\ \mathbf{z}_r \end{bmatrix}$, em que \mathbf{z}_i e \mathbf{z}_r representam as imagens de interesse e de referência, respectivamente. A Figura 10, representa a imagem após a etapa de detecção de mudança utilizando o par de imagens apresentados na Figura 9.

Figura 10 – Imagem obtida após etapa de detecção de mudanças.

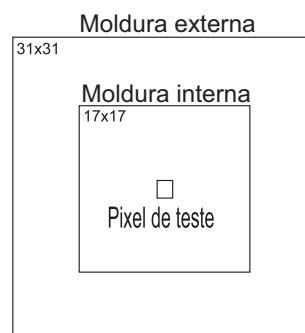


Fonte: Autoral.

3.4.2 Constant False Alarm Rate - CFAR Filter

Após a etapa de detecção de mudanças, é realizado uma normalização CFAR na imagem. Segundo Richards et al. (2010), os CFAR são projetados para rastrear alterações na interferência do sistema e, com isso, ajustar o limiar de detecção, mantendo, uma taxa de falso alarme constante. O filtro CFAR utilizado no algoritmo é composto por uma moldura externa com valores diferentes de zero, de tamanho 31×31 pixels, e uma moldura interna com valores iguais a zero, com tamanho 17×17 pixels, de acordo com a Figura 11 (ULANDER et al., 2005).

Figura 11 – Filtro CFAR.



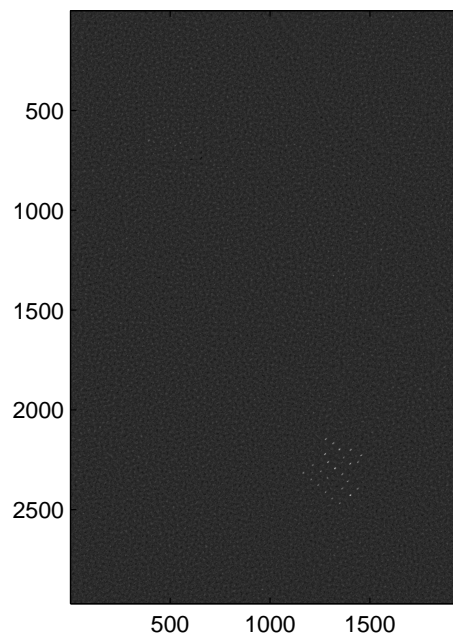
Fonte: (ULANDER et al., 2005). Adaptado pelo autor.

Neste processo, posiciona-se o pixel central do filtro, apresentado na Figura 11, em cada pixel $[x, y]$ da imagem resultante do CDA. Deste modo, são obtidos os valores de média (μ) e desvio padrão (σ) da estrutura externa formada pelo filtro. Em que, o novo pixel normalizado é dado por:

$$\mathbf{I}_N[x, y] = \frac{\mathbf{I}_d[x, y] - \mu}{\sigma}, \quad (3.13)$$

em que \mathbf{I}_d é a amplitude do pixel em teste e \mathbf{I}_N representa a sua nova amplitude após o processo de filtragem. O resultado da etapa de normalização para cada pixel da imagem após a etapa do CDA, para o exemplo da Figura 9, é demonstrado na Figura 12.

Figura 12 – Imagem obtida após a normalização CFAR.



Fonte: Autoral.

3.4.3 Análise de Detecção

Com a imagem normalizada, inicialmente é realizado a aplicação do limiar de operação (Th), também chamado de binarização, que tem como objetivo de identificar os alvos da imagem (MARQUES FILHO; NETO, 1999). Este limiar adotado é responsável por manter a probabilidade de um falso alarme em um níveis aceitavelmente baixos, podendo ser um valor adaptável considerando o ajuste local de interferência ou fixo (RICHARDS et al., 2010). A imagem binária pode ser descrita a partir da seguinte relação:

$$\mathbf{I}_B[x, y] = \begin{cases} 0 & \text{se } \mathbf{I}_N[x, y] < Th \\ 1 & \text{se } \mathbf{I}_N[x, y] \geq Th. \end{cases} \quad (3.14)$$

Por fim, a imagem binária é submetida a um conjunto de 3 operações morfológicas, sendo duas operações de dilatação e uma de erosão. O objetivo dessas operações é reduzir a taxa de falsos alarmes, excluindo objetos que possuam dimensões inferiores aos alvos. Visto que a resolução do radar é de aproximadamente 3 m, utilizou-se um elemento quadrático com tamanho 3×3 pixels. Esta escolha foi justificada pela simplicidade do elemento e pelo fato de que Lundberg et al. (2006) não fez nenhuma consideração sobre o formato do objeto. Além disso, foi inserida uma operação morfológica de abertura entre as duas operações de dilatação, com a finalidade de aproximar os resultados obtidos aos apresentados em Lundberg et al. (2006).

Conforme descrito por Marques Filho e Neto (1999), a morfologia matemática tem como princípio básico extrair informações relativas à geometria, topologia de uma imagem ou objeto desconhecido, através de um outro conjunto definido, chamado de elemento estruturante. Neste cenário, os processos de erosão e dilatação são de fundamental importância para os processamentos morfológicos, pela característica desses processos em adicionar ou remover pixels da imagem binária através da iteração da imagem com o elemento estruturante (GONZALEZ; WOODS, 2000; RUSS et al., 1994).

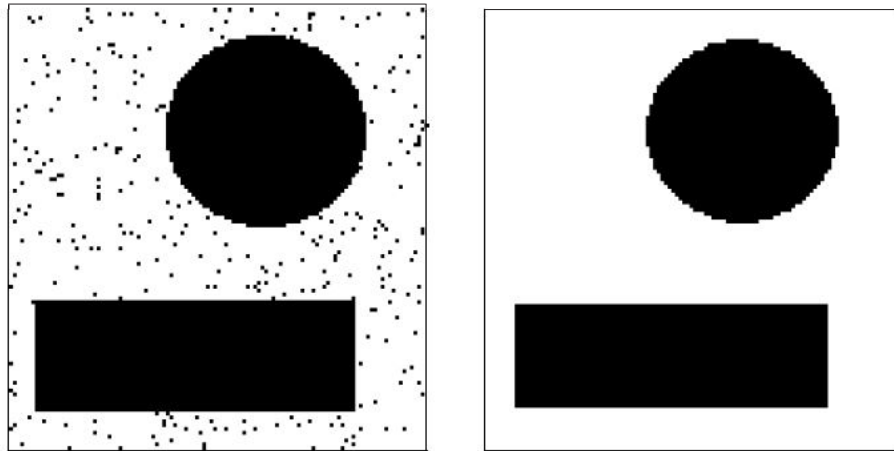
O processo de erosão de um conjunto de pixels A e um elemento estruturante F , pertencentes ao plano Z^2 , é definido por (GONZALEZ; WOODS, 2000):

$$A \otimes F = \{z | (F)_z \subseteq A\}, \quad (3.15)$$

em que $(F)_z$ representa o elemento estruturante F , transladado na posição $[x, y]$ ou z .

Nessa definição, F centralizado e posicionado no pixel $[x, y]$ da imagem tentará assemelhar-se com a vizinhança de cada pixel da imagem, caso seja verificado, o pixel da imagem erodida será considerado com valor 1 e será preservado, caso contrário o mesmo será definido com valor 0 (MARQUES FILHO; NETO, 1999). Como pode-se observar através da Figura 13, esta operação visa eliminar objetos pequenos, finos, bem como diminui o tamanho de objetos maiores na imagem.

Figura 13 – Exemplo do processo de erosão.



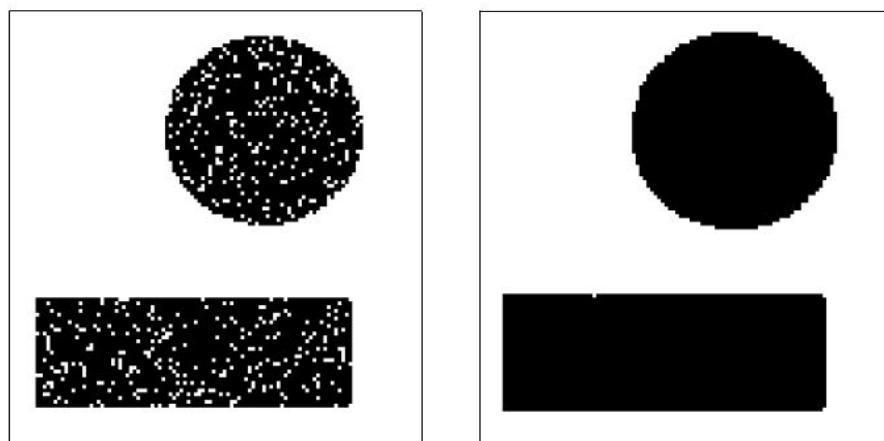
Fonte: (FACON, 2011).

O processo de erosão de um conjunto de pixels A e um elemento estruturante F , pertencentes ao plano Z^2 , é definido por (GONZALEZ; WOODS, 2000):

$$A \oplus F = \{z | (\tilde{F})_z \cap A \neq \emptyset\}. \quad (3.16)$$

Segundo Gonzalez e Woods (2000), a operação de dilatação, definida em (3.16), baseia-se na reflexão do elemento estruturante F em torno de sua origem $(\tilde{F})_z$, seguida da translação dessa reflexão em cada pixel $[x, y]$ ou z da imagem. Segundo (FACON, 2011), o elemento estruturante centrado e posicionado no pixel $[x, y]$, desliza sobre a imagem e verifica se há interseção com a vizinhança de $[x, y]$. Caso haja a interseção com os pixels próximos, o pixel assumirá valor 1, caso contrário, valor 0. Uma das características deste processo é a expansão dos pixels separados, conforme é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Exemplo do processo de dilatação.



Fonte: (FACON, 2011).

Diante disso, pode-se observar que o elemento estruturante é de elevada importância na morfologia matemática, interagindo diretamente com os pixels da imagem. Esta máscara é definida em forma e tamanho de acordo com os pixels que o formam, com origem no pixel central (FACON, 2011).

Segundo Facon (2011), um elemento estruturante é definido como um conjunto conhecido que pode apresentar diferentes geometrias e dimensões. Existem diversos formatos usuais de elementos estruturantes, porém, neste trabalho serão considerados alguns elementos de formatos clássicos, destacados a seguir:

- **Diamante:** Elemento estruturante no formato de diamante. O elemento de ordem $N_d = 3$ é dado pela matriz H_1 :

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Para o elemento estruturante diamante a ordem N_d diz respeito a distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos horizontal e vertical.

- **Quadrático:** Elemento estruturante no formato de quadrado. O elemento de ordem $N_q = 3$ é dado pela matriz H_2 :

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Para o elemento estruturante quadrado a ordem N_q diz respeito a ordem da matriz.

- **Circular:** Elemento estruturante no formato de “círculo”. O elemento de ordem $N_c = 3$ é dado pela matriz H_3 :

$$H_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

Para o elemento estruturante circular a ordem N_c diz respeito a distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos horizontal e vertical.

- **Cruz:** Elemento estruturante no formato de cruz. O elemento de ordem $N_x = 3$ é dado pela matriz H_4 :

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Para o elemento estruturante cruz a ordem N_x diz respeito a distância entre o ponto central da matriz e os pontos extremos da matriz nos sentidos diagonal.

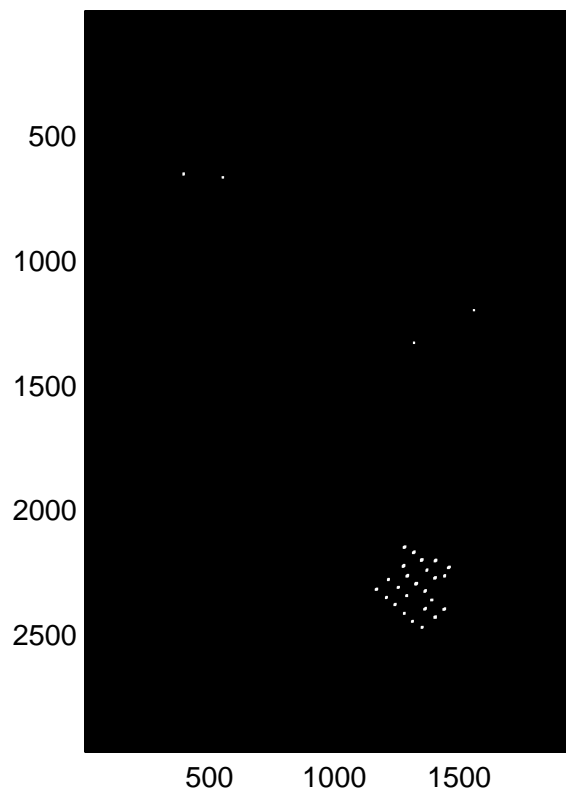
A fim de fazer a correta avaliação do algoritmo de detecção é necessário definir a probabilidade de detecção (P_d) e a taxa de falsos alarmes (FAR). A probabilidade de detecção (P_d) foi calculada pela razão entre a quantidade de alvos detectados e o número total de alvos presentes na imagem, e a taxa de falsos alarmes (FAR) é representada pela razão entre o número de falsos alarmes pela área total da imagem. Essas métricas, são calculadas por:

$$P_d = \frac{\text{Número de alvos detectados}}{\text{Número total de alvos}}, \quad (3.21)$$

$$\text{FAR} = \frac{\text{Número de falsos alarmes}}{\text{Área total da imagem}}. \quad (3.22)$$

A partir das definições anteriores, nota-se que na Figura 15, utilizando o par de imagens apresentado na Figura 9, obteve-se uma detecção de 100% dos alvos, detectando os 25 alvos presentes e uma taxa de falsos alarmes de 0,66/km². Considerando o desempenho dos 24 pares de imagens, foi obtido uma probabilidade média de detecção total $P_d = 97\%$ e uma FAR de 0,65 falsos alarmes/km². É importante salientar que para esta análise, é considerado falso alarme quando o alvo está fora de um raio de 10 metros (pixels) de sua posição original, conforme definido em Lundberg et al. (2006).

Figura 15 – Detecção final para imagens SAR.



Fonte: Autoral.

3.5 Melhora do Algoritmo de Detecção

Neste trabalho está-se interessado no aumento do desempenho do algoritmo de detecção nas métricas de probabilidade de detecção e FAR. Diante disso, foram propostas alterações nas etapas CDA e CFAR. É importante salientar, que essas melhorias foram propostas em conjunto pelos estudantes de graduação da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), orientados pelo professor Renato Machado. No decorrer da seção, estas alterações serão descritas.

3.5.1 Aprimoramento no Filtro CFAR

É proposto em Fabrin et al. (2017) um aperfeiçoamento da etapa de normalização CFAR através da inclusão de uma janela interna ao filtro levando em consideração o tamanho dos alvos de interesse, conforme é apresentado em vermelho na Figura 16. O funcionamento da normalização é similar ao apresentado na Seção 3.4.2, porém, para essa normalização deve-se levar em consideração a informação proveniente da janela adicional.

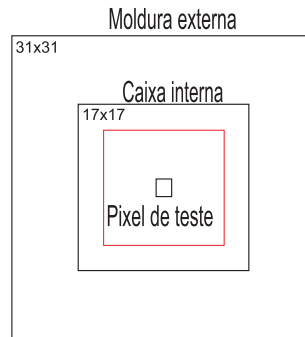
O novo pixel normalizado é dado por:

$$\mathbf{I}_{NA}[x, y] = \frac{\mu_{vermelho} - \mu}{\sigma}, \quad (3.23)$$

em que $\mu_{vermelho}$ é o valor médio dos pixels contidos na janela em vermelho, incluindo o pixel de teste.

Foram propostas janelas internas para o CFAR de tamanho 1×1 , 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 , 11×11 , 13×13 , a fim de analisar o desempenho da utilização do novo filtro CFAR. Para obter melhores níveis em termos de FAR para a proposta, variou os valores dos limiares de operação com o objetivo de manter uma probabilidade de detecção em 95%.

Figura 16 – Filtro CFAR Modificado.



Fonte: (FABRIN et al., 2017). Adaptado pelo autor.

Através de (3.23), é possível observar que não é mais o pixel da etapa de mudanças que é subtraído da média da janela externa e sim, uma média da nova janela. Segundo Fabrin et al. (2017), esta ideia reduzirá a taxa de falsos alarmes, visto que um pixel de valor alto, decorrente de algum ruído ou reflexão, não será detectado como alvo pelo fato da média suavizar este pixel.

3.5.2 Algoritmo CDA Iterativo

Para a alteração no bloco CDA, Molin Jr. et al. (2016) propõe um método de detecção iterativo, baseado na ferramenta de gráfico de controle (*control chart*) que consiste no acompanhamento de um processo através da determinação estatística de limiares superior e inferior (OAKLAND, 2007). Inicialmente, obtém-se a imagem diferença, a partir da combinação das imagens de interesse e de referência. Esta combinação é dada por:

$$\mathbf{I}_i[x, y] = \mathbf{I}_1[x, y] - \mathbf{I}_2[x, y], \quad (3.24)$$

em que, $[x, y]$ indicam a posição do pixel analisado.

Depois da obtenção da imagem de mudança, que apresenta uma distribuição aproximadamente normal segundo Molin Jr. et al. (2016), obtém-se a média (μ) e o

desvio padrão (*std*) referente a imagem diferença I_D . Logo após, determina-se os limiares superiores (L_S) e inferiores (L_I), os quais podem ser escritos como:

$$\begin{aligned} L_S &= \mu + k.std(\mathbf{I}_i) \\ L_I &= \mu - k.std(\mathbf{I}_i) \end{aligned} \quad (3.25)$$

em que k é o limiar de operação definido pela FOI, com valor 6.

A próxima etapa para esta melhora é a avaliação de cada pixel $[x, y]$ em termos destes limiares. Se o pixel não estiver contido no intervalo $[L_I, L_S]$, o mesmo é removido e o processo desta melhoria retorna para a etapa de cálculo da média e desvio padrão. As etapas deste processo são repetidas até que todos os pixels digitalizados estejam contidos entre os limiares estabelecidos.

Por fim, a imagem binária é formada com valores 1 referente aos pixels fora do intervalo e 0 atribuído para os demais pixels. É importante salientar que este método utilizou operações morfológicas com o intuito de remover detecções muito pequenas, remover pixels que não se mesclaram em nenhum grupo ou remover pixels que não estão em conformidade com o sistema e para unir os que fazem parte de um único alvo (MOLIN JR. et al., 2016).

Analogamente a melhora apresentada em Fabrin et al. (2017), a fim de analisar o desempenho da implementação deste novo CDA, foram realizadas simulações para diferentes valores de limiares de operação. Os resultados obtidos para esta implementação considerou um intervalo de limiar de operação entre 5,5 e 7,5 com passo de 0,25. Como resultado, observou-se que o algoritmo apresentou uma menor quantidade de falsos alarmes para uma mesma probabilidade de detecção, conforme os resultados apresentados em Molin Jr. et al. (2016).

3.6 Metodologia

Nessa seção é apresentada a metodologia utilizada para a realização deste trabalho. É importante salientar que, o conjunto de dados utilizados é apresentado na Seção 3.2, o qual é composto por um total de 600 alvos de interesse em uma área de 144 km².

Primeiramente para fins de avaliação dos parâmetros no algoritmo de detecção, simulou-se o algoritmo proposto pela FOI, descrito na Seção 3.4, no software MATLAB, assim como as melhorias propostas para o algoritmo, descritas na Seção 3.5. É importante salientar que, na melhoria apresentada em Fabrin et al. (2017), apenas foram utilizadas as janelas CFAR de tamanho 1×1, 3×3, 5×5 e 7×7, ignorando as janelas CFAR de tamanho 9×9, 11×11 e 13×13. Conforme apresentado em Fabrin et al. (2017), quando se utiliza a média na etapa CFAR, na prática, a resolução do sistema reduz, fazendo com que os alvos apareçam menores na imagem final, devido a isso uma janela grande de CFAR não se torna ideal.

Nas simulações dos algoritmos propostos, foram realizados alguns testes com diferentes dimensões e formatos de elementos estruturantes, e para cada teste foi realizado o ajuste do limiar por meio da curva *Receiver Operation Characteristic* (ROC) (METZ, 1978), testando limiares com valores entre 5 e 7, com passo de 0,25, para assim escolher o *Th* ótimo. As simulações foram realizadas considerando elementos estruturantes com dimensões 3×3 , 5×5 , 7×7 assim como geometrias no formato quadrático, diamante, circular e cruz, conforme foram apresentadas na Seção 3.4.3.

É válido salientar que, para uma comparação justa, foi utilizado o mesmo padrão nas operações morfológicas para todas as simulações, sendo uma operação de erosão e duas operações de dilatação, bem como, foi utilizado um elemento quadrático para a segunda dilatação de todas as simulações. A variação de diferentes elementos estruturantes foi realizada com o objetivo de aumentar a probabilidade de detecção (P_d) obtida através de (3.21), e diminuir a taxa de falsos alarmes (FAR), obtida através de (3.22).

Por fim, com os resultados obtidos é realizado um estudo em relação a melhor configuração para o estudo proposto. Essa configuração consiste na escolha da melhor combinação de resultados a partir do metodologia proposta, mantendo uma probabilidade de detecção de, no mínimo, 96%. É válido ressaltar que não foram encontrados estudos referentes ao impacto causado pela utilização de diferentes elementos estruturantes nas operações morfológicas em algoritmos CDA.

4 Resultados

Este capítulo apresentará os resultados obtidos para todas as simulações realizadas neste trabalho de conclusão de curso. Primeiramente, são apresentados os resultados de simulação obtidos para o algoritmo da FOI, seguido dos resultados de simulação obtidos para os aprimoramentos propostos em Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016).

4.1 Algoritmo proposto pela FOI

O primeiro passo foi a realização da simulação do algoritmo da FOI, descrito na Seção 3.4, para os 24 pares de imagens através do software MATLAB. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos para a simulação da FOI.

| Imagem analisada | | Imagem de referência | | Alvos | Detecções | P_d | Área (km^2) | Falso Alarme | FAR ($/km^2$) |
|------------------|----------|----------------------|----------|-------|-----------|-------|--------------------|--------------|--------------------|
| Missão | Passagem | Missão | Passagem | | | | | | |
| 2 | 1 | 3 | 1 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 2 | 0,33 |
| 3 | 1 | 4 | 1 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 9 | 1,50 |
| 4 | 1 | 5 | 1 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 2 | 0,33 |
| 5 | 1 | 2 | 1 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 2 | 0,33 |
| 2 | 2 | 4 | 2 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 2 | 0,33 |
| 3 | 2 | 5 | 2 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 1 | 0,17 |
| 4 | 2 | 2 | 2 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 4 | 0,67 |
| 5 | 2 | 3 | 2 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 2 | 0,33 |
| 2 | 3 | 5 | 3 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 5 | 0,83 |
| 3 | 3 | 2 | 3 | 25 | 23 | 0,92 | 6 | 3 | 0,50 |
| 4 | 3 | 3 | 3 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 1 | 0,17 |
| 5 | 3 | 4 | 3 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 0 | 0,00 |
| 2 | 4 | 3 | 4 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 3 | 0,50 |
| 3 | 4 | 4 | 4 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 1 | 0,17 |
| 4 | 4 | 5 | 4 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 4 | 0,67 |
| 5 | 4 | 2 | 4 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 7 | 1,17 |
| 2 | 5 | 4 | 5 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 0 | 0,00 |
| 3 | 5 | 5 | 5 | 25 | 18 | 0,72 | 6 | 12 | 2,00 |
| 4 | 5 | 2 | 5 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 4 | 0,67 |
| 5 | 5 | 3 | 5 | 25 | 22 | 0,88 | 6 | 20 | 3,33 |
| 2 | 6 | 5 | 6 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 2 | 0,33 |
| 3 | 6 | 2 | 6 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 3 | 0,50 |
| 4 | 6 | 3 | 6 | 25 | 25 | 1,00 | 6 | 0 | 0,00 |
| 5 | 6 | 4 | 6 | 25 | 24 | 0,96 | 6 | 4 | 0,67 |
| Total | | | | 600 | 582 | 0,97 | 144 | 93 | 0,65 |

Fonte: Autoral.

Como pode-se observar através da Tabela 4, os resultados obtidos para simulação da FOI estão semelhantes aos obtidos por Fabrin et al. (2017), reforçando a ideia de que essa pequena diferença nos resultados é ocasionada devido a falta de informações em relação as operações morfológicas utilizadas em Lundberg et al. (2006). Diante disso, ignorou-se esta pequena diferença para fins de validação do algoritmo.

Tabela 4 – Comparação entre os resultados obtidos com o algoritmo da FOI

| Algoritmo | P_d | FAR (/km ²) |
|----------------------|-------|-------------------------|
| FOI | 0.97 | 0,67 |
| Fabrin et al. (2017) | 0.97 | 0,65 |
| Autor | 0.97 | 0,65 |

Com a realização da simulação do algoritmo de detecção proposto pela FOI, foram realizadas diversas simulações considerando diferentes formatos e tamanhos de elementos estruturantes. A fim de comprovar o melhor desempenho para os elementos estruturantes, variou-se o valor do Th entre 5 e 7, para a construção da curva ROC e escolha do melhor Th para cada caso. Com isso, foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 5-8, sendo que os melhores resultados para uma probabilidade de detecção de 97% estão destacados em negrito.

Tabela 5 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Quadrático com variação dimensional e de limiar.

| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|-------------------------|---------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | FAR (/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d |
| 5.00 | 3.7778 | 0.9883 | 0.1181 | 0.9133 | 0.0000 | 0.2750 |
| 5.25 | 2.3958 | 0.9866 | 0.0556 | 0.9083 | 0.0000 | 0.2350 |
| 5.50 | 1.5625 | 0.9833 | 0.0347 | 0.8783 | 0.0000 | 0.2000 |
| 5.75 | 0.9514 | 0.9783 | 0.0278 | 0.8417 | 0.0000 | 0.1717 |
| 6.00 | 0.6458 | 0.9700 | 0.0069 | 0.8067 | 0.0000 | 0.1533 |
| 6.25 | 0.4514 | 0.9667 | 0.0069 | 0.7817 | 0.0000 | 0.1183 |
| 6.50 | 0.3056 | 0.9667 | 0.0069 | 0.7567 | 0.0000 | 0.0883 |
| 6.75 | 0.2153 | 0.9567 | 0.0069 | 0.7183 | 0.0000 | 0.0667 |
| 7.00 | 0.1736 | 0.9483 | 0.0000 | 0.6867 | 0.0000 | 0.0500 |

Tabela 6 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Diamante com variação dimensional e de limiar.

| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|------------------------|---------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d |
| 5.00 | 4.4653 | 0.9900 | 0.9167 | 0.9833 | 0.0347 | 0.9133 |
| 5.25 | 2.6250 | 0.9883 | 0.5903 | 0.9750 | 0.0139 | 0.8933 |
| 5.50 | 1.6597 | 0.9883 | 0.3403 | 0.9717 | 0.0139 | 0.8633 |
| 5.75 | 1.0972 | 0.9800 | 0.2083 | 0.9617 | 0.0069 | 0.8267 |
| 6.00 | 0.7014 | 0.9750 | 0.1389 | 0.9583 | 0.0069 | 0.7983 |
| 6.25 | 0.5139 | 0.9717 | 0.0903 | 0.9500 | 0.0069 | 0.7533 |
| 6.50 | 0.2917 | 0.9700 | 0.0764 | 0.9400 | 0.0069 | 0.7083 |
| 6.75 | 0.1875 | 0.9667 | 0.0486 | 0.9250 | 0.0000 | 0.6733 |
| 7.00 | 0.1528 | 0.9517 | 0.0278 | 0.9050 | 0.0000 | 0.6350 |

Tabela 7 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Circular com variação dimensional e de limiar.

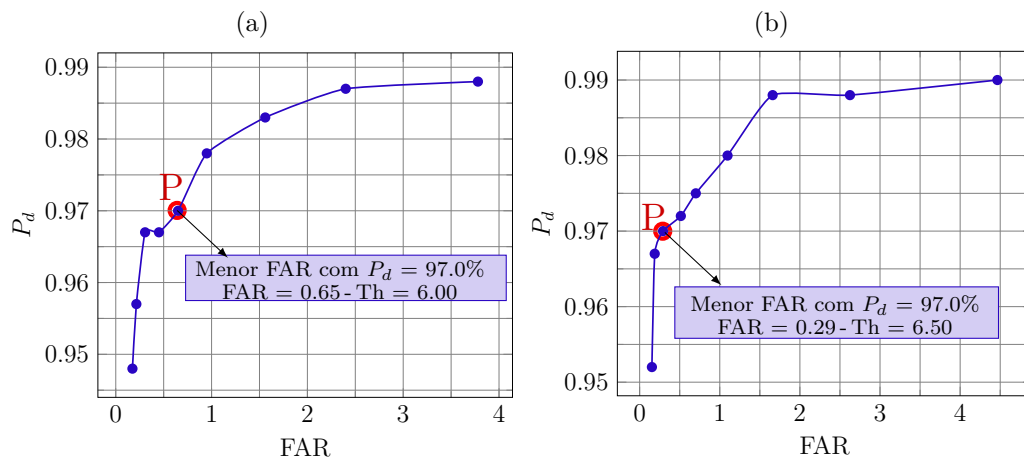
| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|------------------------|---------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d |
| 5.00 | 4.4653 | 0.9900 | 0.9167 | 0.9833 | 0.1111 | 0.9150 |
| 5.25 | 2.6250 | 0.9883 | 0.5903 | 0.9750 | 0.0556 | 0.9050 |
| 5.50 | 1.6597 | 0.9883 | 0.3403 | 0.9717 | 0.0347 | 0.8783 |
| 5.75 | 1.0972 | 0.9800 | 0.2083 | 0.9617 | 0.0278 | 0.8417 |
| 6.00 | 0.7014 | 0.9750 | 0.1389 | 0.9583 | 0.0069 | 0.8067 |
| 6.25 | 0.5139 | 0.9717 | 0.0903 | 0.9500 | 0.0069 | 0.7817 |
| 6.50 | 0.2917 | 0.9700 | 0.0764 | 0.9400 | 0.0069 | 0.7567 |
| 6.75 | 0.1875 | 0.9667 | 0.0486 | 0.9250 | 0.0069 | 0.7183 |
| 7.00 | 0.1528 | 0.9517 | 0.0278 | 0.9050 | 0.0069 | 0.6867 |

Tabela 8 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante no formato Cruz com variação dimensional e de limiar.

| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|-----------------------|---------------|------------------------|--------|------------------------|--------|
| | FAR($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) | P_d |
| 5.00 | 2.4097 | 0.9867 | 0.0069 | 0.8600 | 0.0000 | 0.1833 |
| 5.25 | 1.5278 | 0.9850 | 0.0000 | 0.8333 | 0.0000 | 0.1533 |
| 5.50 | 0.9722 | 0.9800 | 0.0000 | 0.7950 | 0.0000 | 0.1233 |
| 5.75 | 0.5833 | 0.9717 | 0.0000 | 0.7517 | 0.0000 | 0.0917 |
| 6.00 | 0.3819 | 0.9667 | 0.0000 | 0.7233 | 0.0000 | 0.0733 |
| 6.25 | 0.2708 | 0.9650 | 0.0000 | 0.6683 | 0.0000 | 0.0483 |
| 6.50 | 0.1667 | 0.9600 | 0.0000 | 0.6200 | 0.0000 | 0.0350 |
| 6.75 | 0.1389 | 0.9467 | 0.0000 | 0.5817 | 0.0000 | 0.0267 |
| 7.00 | 0.1042 | 0.9283 | 0.0000 | 0.5450 | 0.0000 | 0.0250 |

Através dos resultados obtidos nas Tabelas 5-8, observa-se a elevada influência do tamanho do elemento estruturante nas operações morfológicas, reduzindo a probabilidade de detecção dos alvos com o aumento no tamanho do elemento estruturante. Nessa simulação também é possível observar que o elemento estruturante com formato diamante e tamanho 3×3 obteve uma melhora significativa na taxa de FAR quando comparado com o resultado obtido por Lundberg et al. (2006), mantendo a mesma taxa de detecção em 97%, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Diamante, com tamanho 3×3 para o algoritmo proposto pela FOI.



Como pode ser observado através da Figura 17, o desempenho da modificação do elemento estruturante possui grande influência no resultado, e a utilização de diferentes operações morfológicas podem variar este comportamento. Em uma situação onde apenas foram utilizadas uma operação de dilatação, seguida de uma operação de erosão, alterou-se o comportamento dos elementos estruturantes, conforme apresentado nas Tabelas 9-11.

Tabela 9 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Quadrático com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão.

| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | FAR(/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d |
| 5.00 | 12.0347 | 0.9950 | 0.0694 | 0.9217 | 0.0000 | 0.2750 |
| 5.25 | 8.1458 | 0.9917 | 0.0556 | 0.9033 | 0.0000 | 0.2350 |
| 5.50 | 5.5069 | 0.9883 | 0.0278 | 0.8800 | 0.0000 | 0.2000 |
| 5.75 | 3.8611 | 0.9833 | 0.0208 | 0.8433 | 0.0000 | 0.1717 |
| 6.00 | 2.5694 | 0.9833 | 0.0069 | 0.8067 | 0.0000 | 0.1533 |
| 6.25 | 1.7014 | 0.9800 | 0.0069 | 0.7817 | 0.0000 | 0.1183 |
| 6.50 | 1.1319 | 0.9767 | 0.0069 | 0.7567 | 0.0000 | 0.0883 |
| 6.75 | 0.8264 | 0.9750 | 0.0069 | 0.7183 | 0.0000 | 0.0667 |
| 7.00 | 0.5486 | 0.9667 | 0.0000 | 0.6867 | 0.0000 | 0.0500 |

Tabela 10 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Diamante com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão.

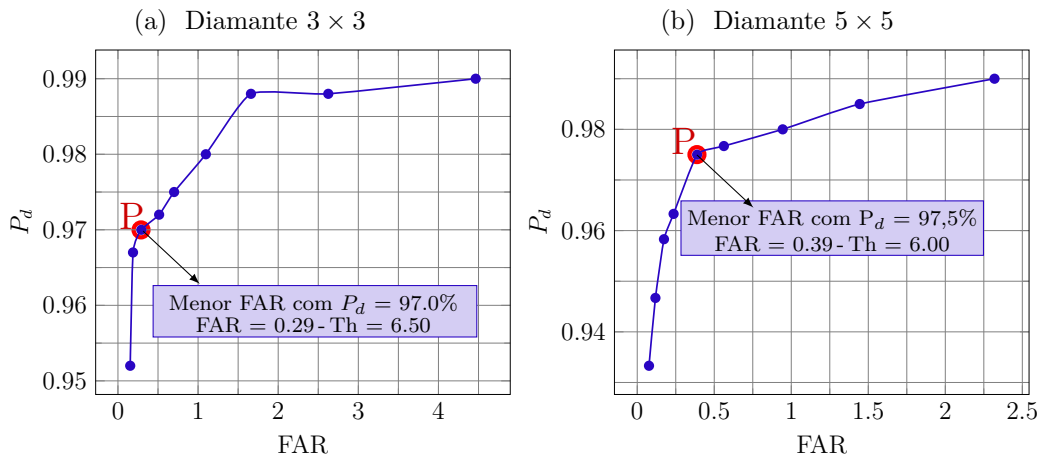
| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|------------------------|--------|-------------------------|---------|-------------------------|--------|
| | FAR(/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d |
| 5.00 | 28.0000 | 0.9967 | 2.3194 | 0.9900 | 0.0278 | 0.9150 |
| 5.25 | 19.5278 | 0.9950 | 1.4444 | 0.9850 | 0.0139 | 0.8933 |
| 5.50 | 13.9236 | 0.9950 | 0.9444 | 0.9800 | 0.0139 | 0.8633 |
| 5.75 | 9.7639 | 0.9933 | 0.5625 | 0.9767 | 0.0069 | 0.8267 |
| 6.00 | 6.9514 | 0.9917 | 0.3889 | 0.9750 | 0.0069 | 0.7983 |
| 6.25 | 4.8958 | 0.9883 | 0.2361 | 0.9633 | 0.0069 | 0.7533 |
| 6.50 | 3.4375 | 0.9867 | 0.1736 | 0.95833 | 0.0069 | 0.7083 |
| 6.75 | 2.4861 | 0.9833 | 0.1181 | 0.9467 | 0.0000 | 0.6733 |
| 7.00 | 1.8403 | 0.9800 | 0.0764 | 0.9333 | 0.0000 | 0.6350 |

Tabela 11 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o elemento estruturante Cruz com variação dimensional e de limiar, utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão.

| Th | 3×3 | | 5×5 | | 7×7 | |
|------|------------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| | FAR(/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d | FAR (/km ²) | P_d |
| 5.00 | 11.7500 | 0.9917 | 0.1181 | 0.9167 | 0.0000 | 0.2800 |
| 5.25 | 7.9931 | 0.9900 | 0.0486 | 0.9083 | 0.0000 | 0.2433 |
| 5.50 | 5.3611 | 0.9883 | 0.0278 | 0.8850 | 0.0000 | 0.2100 |
| 5.75 | 3.7569 | 0.9833 | 0.0278 | 0.8483 | 0.0000 | 0.1767 |
| 6.00 | 2.4792 | 0.9833 | 0.0000 | 0.8150 | 0.0000 | 0.1567 |
| 6.25 | 1.6458 | 0.9800 | 0.0000 | 0.7867 | 0.0000 | 0.1217 |
| 6.50 | 1.0903 | 0.9767 | 0.0000 | 0.7667 | 0.0000 | 0.0883 |
| 6.75 | 0.7847 | 0.9750 | 0.0000 | 0.7267 | 0.0000 | 0.6783 |
| 7.00 | 0.5278 | 0.9700 | 0.0000 | 0.6900 | 0.0000 | 0.0517 |

De acordo com a Figura 18, note que o melhor resultado obtido para o padrão inicial é utilizando o elemento estruturante diamante 3×3 e para o padrão utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão é o elemento estruturante diamante 5×5 . Para este caso, a diferença nos tamanhos das janelas está relacionada a utilização da operação de abertura. Com a ausência dessa operação, é necessário que a operação de erosão possua um efeito mais seletivo, devido a isso, ocorre um aumento no tamanho da janela do elemento estruturante. É importante ressaltar que, para manter o padrão encontrado pela FOI, Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016), será o mantido o padrão inicial nas operações morfológicas durante o decorrer do trabalho.

Figura 18 – Comparação das curvas ROC dos melhores resultados para diferentes padrões de operações morfológicas: (a) Padrão Inicial; (b) Padrão utilizando apenas uma operação de dilatação e erosão.



4.2 Aprimoramento no Filtro CFAR

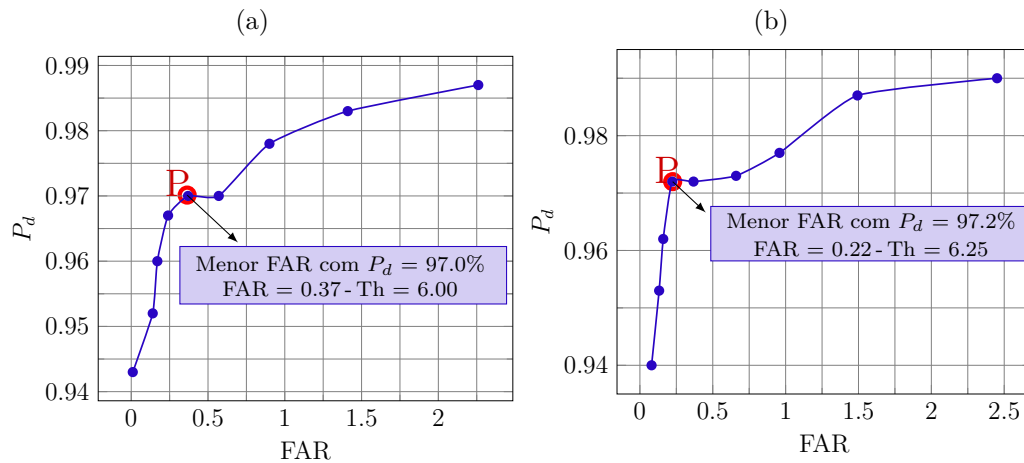
Esta seção apresenta os resultados obtidos nas simulações considerando diferentes formatos e tamanhos de elementos estruturantes aplicados no filtro CFAR modificado proposto em Fabrin et al. (2017). A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos na simulação considerando uma janela interna do filtro CFAR de tamanho 3×3 e o mesmo Th adotado pela FOI (LUNDBERG et al., 2006). É possível notar que apenas com a alteração na geometria do elemento estruturante, obteve uma redução significativa na taxa de falsos alarmes e manteve, aproximadamente, a mesma probabilidade de detecção em 97%, conforme destacado em negrito na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 3×3 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$.

| Geometria | Tamanho | P_d | FAR (/km ²) |
|------------|---------|---------------|-------------------------|
| Quadrático | 3×3 | 0.9700 | 0.3681 |
| | 5×5 | 0.8150 | 0.0069 |
| | 7×7 | 0.1533 | 0.0000 |
| Diamante | 3×3 | 0.9720 | 0.3681 |
| | 5×5 | 0.9517 | 0.0903 |
| | 7×7 | 0.7983 | 0.0069 |
| Cruz | 3×3 | 0.9683 | 0.2222 |
| | 5×5 | 0.7150 | 0.0000 |
| | 7×7 | 0.0850 | 0.0000 |

Para comprovar o desempenho do elemento estruturante, variou o valor do Th da mesma maneira já realizada anteriormente. Assim, a Figura 19 apresenta o melhor resultado em termos das métricas estudadas, variando o Th e considerando a utilização da janela interna de tamanho 3×3 no filtro CFAR modificado. É possível observar que o elemento estruturante no formato diamante e tamanho 3×3 obteve o melhor desempenho, comparado ao resultado obtido por Fabrin et al. (2017), reduzindo a taxa de falsos alarmes e mantendo a mesma probabilidade de detecção adotada pela FOI (LUNDBERG et al., 2006).

Figura 19 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Diamante, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 3×3 .



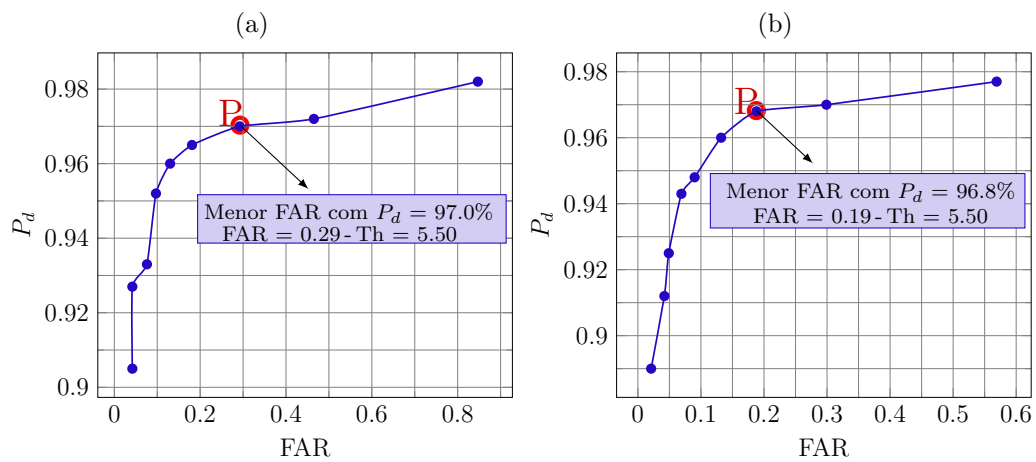
Para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 5×5 e o mesmo Th adotado pela FOI, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 13. Assim como nos outros casos, apenas com a alteração na geometria do elemento estruturante já houve uma melhora na taxa de falsos alarmes, mantendo, aproximadamente, a mesma probabilidade de detecção, conforme destacado em negrito na Tabela 13.

Tabela 13 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 5×5 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$.

| Geometria | Tamanho | P_d | FAR ($/\text{km}^2$) |
|------------|--------------|---------------|------------------------|
| Quadrático | 3×3 | 0.9583 | 0.1300 |
| | 5×5 | 0.8067 | 0.0000 |
| | 7×7 | 0.1700 | 0.0000 |
| Diamante | 3×3 | 0.9567 | 0.1181 |
| | 5×5 | 0.9250 | 0.0347 |
| | 7×7 | 0.7867 | 0.0069 |
| Cruz | 3×3 | 0.9483 | 0.0900 |
| | 5×5 | 0.7033 | 0.0000 |
| | 7×7 | 0.1017 | 0.0000 |

Analogamente, variou-se o valor do Th para obter o melhor desempenho do elemento estruturante utilizado nas operações morfológicas para este caso. Através dos resultados obtidos, verificou-se que o elemento estruturante cruz reduziu significativamente a taxa de falsos alarmes, mantendo uma taxa de detecção em 96,8%, conforme apresentado na Figura 20. É importante salientar que neste caso o elemento estruturante diamante também apresentou a mesma redução na taxa de falsos alarmes e uma probabilidade de detecção menor de 96,5%.

Figura 20 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 5×5 .



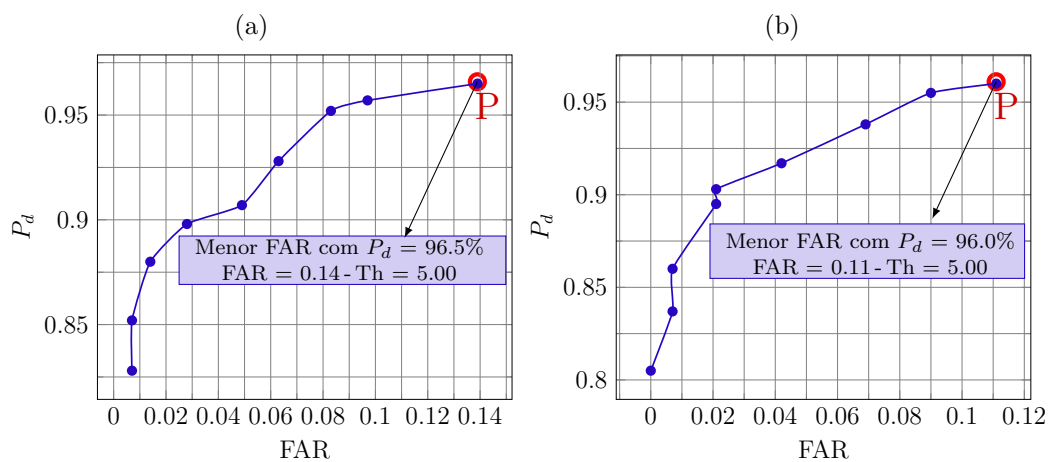
A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos na simulação considerando a janela interna de tamanho 7×7 do filtro CFAR. Pode-se observar que, assim como nos demais casos, os elementos estruturantes no formato diamante e cruz obtiveram uma melhora na taxa de falsos alarmes quando comparado com o elemento quadrático, utilizado em Fabrin et al. (2017), conforme destacado em negrito na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o CFAR modificado com janela interna de tamanho 7×7 em diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$.

| Geometria | Tamanho | P_d | FAR (/km ²) |
|------------|--------------|---------------|-------------------------|
| Quadrático | 3×3 | 0.9067 | 0.0486 |
| | 5×5 | 0.7567 | 0.0000 |
| | 7×7 | 0.1867 | 0.0000 |
| Diamante | 3×3 | 0.9133 | 0.0417 |
| | 5×5 | 0.8783 | 0.0139 |
| | 7×7 | 0.7333 | 0.0000 |
| Cruz | 3×3 | 0.9033 | 0.0208 |
| | 5×5 | 0.6667 | 0.0000 |
| | 7×7 | 0.1217 | 0.0000 |

Analogamente, variou-se o limiar de detecção para a escolha da melhor configuração para este caso, conforme é apresentado na Figura 21. É possível observar, através dos resultados obtidos, que o elemento estruturante cruz com tamanho 3×3 reduziu a taxa de falsos alarmes sem alterar significativamente a probabilidade de detecção. De maneira análoga a janela interna de 3×3 do CFAR, com a utilização do elemento estruturante no formato diamante também obteve-se a mesma redução da taxa de falso alarme, com uma probabilidade de detecção menor de 95,7%.

Figura 21 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz, de tamanho 3×3 aplicados na melhoria proposta no filtro CFAR com a janela interna de tamanho 7×7 .



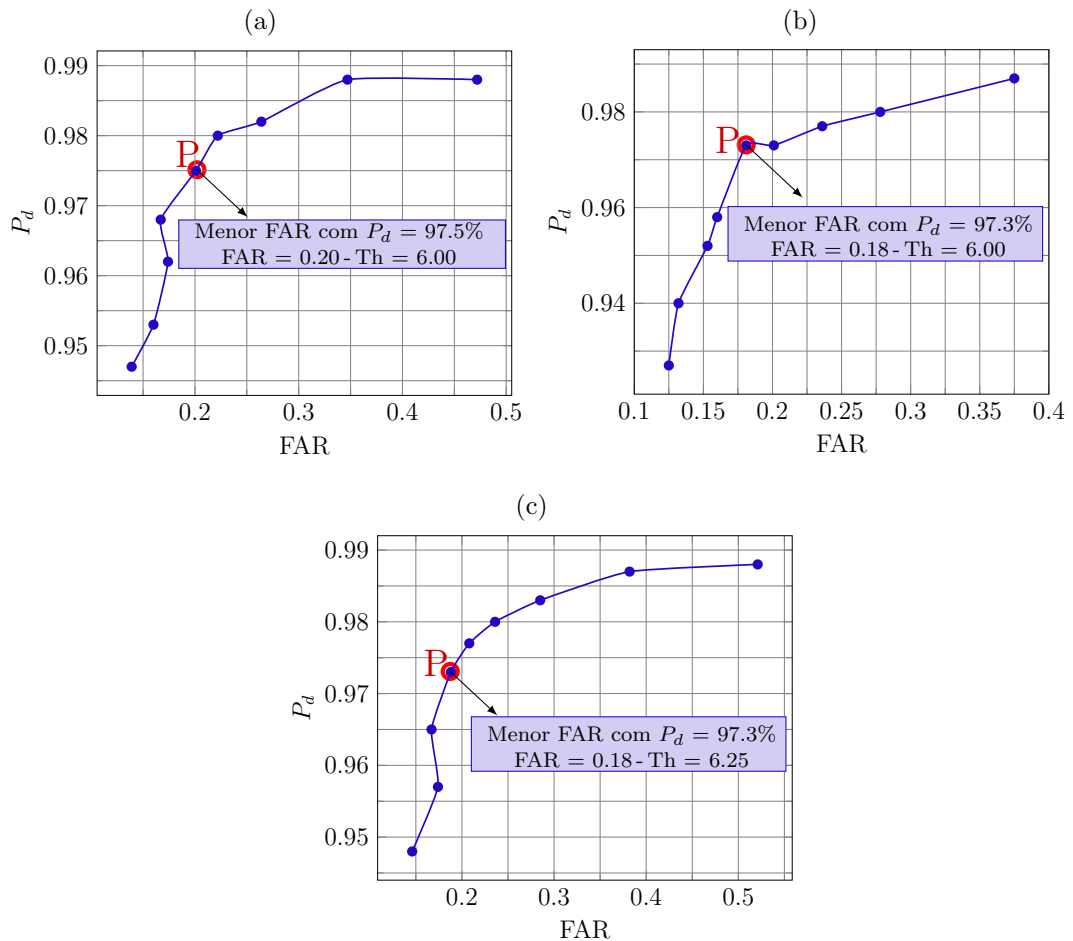
4.3 Algoritmo CDA Iterativo

Assim como no algoritmo com o CFAR modificado proposto por Fabrin et al. (2017), realizou-se o mesmo estudo no algoritmo CDA iterativo proposto por Molin Jr. et al. (2016). A partir dos resultados apresentados na Tabela 15, é possível observar que houve uma melhora na taxa de FAR utilizando o elemento estruturante na forma de cruz, assumindo o mesmo valor de Th adotado pela FOI no artigo (LUNDBERG et al., 2006), conforme destacado em **negrito** na Tabela 15. Neste caso, ambos elementos estruturantes, diamante e cruz, obtiveram a mesma redução de falsos alarmes e a mesma probabilidade de detecção de 97,3%, conforme é apresentado na Figura 22.

Tabela 15 – Parâmetros FAR e P_d obtidos para o algoritmo CDA iterativo com diferentes elementos estruturantes e $Th = 6$.

| Geometria | Tamanho | P_d | FAR (/km ²) |
|------------|---------|---------------|-------------------------|
| Quadrático | 3×3 | 0.9750 | 0.2014 |
| | 5×5 | 0.8083 | 0.0903 |
| | 7×7 | 0.4100 | 0.0417 |
| Diamante | 3×3 | 0.9767 | 0.2083 |
| | 5×5 | 0.9550 | 0.1736 |
| | 7×7 | 0.8083 | 0.1042 |
| Cruz | 3×3 | 0.9733 | 0.1806 |
| | 5×5 | 0.7717 | 0.0833 |
| | 7×7 | 0.3533 | 0.0417 |

Figura 22 – Comparação das curvas ROC entre os elementos estruturantes: (a) Quadrático; (b) Cruz e (c) Diamante com tamanho 3×3 no algoritmo CDA iterativo.



4.4 Considerações Finais

O primeiro resultado que deve ser ressaltado, apresentados nas Tabelas 9-11, refere-se ao fato de que os melhores resultados foram obtidos quando o elemento estruturante se aproxima em geometria (diamante) e tamanho (5×5) do alvo em estudo. Nesta análise, foi possível observar que os resultados estão relacionados diretamente na forma com que os alvos estão distribuídos no território, visto que, em três das quatro missões, os alvos estavam organizados de tal maneira a possuir uma inclinação em relação ao ângulo de passagem do voo, conforme apresentado em Lundberg et al. (2006).

Outra característica que deve ser ressaltada refere-se a melhora nos resultados obtidos para a implementação do algoritmo da FOI neste trabalho, ao adicionar a operação morfológica de abertura e uma segunda dilatação (padrão utilizado para os três algoritmos), conforme apresentado na Figura 18. No entanto, como consequência disso, percebeu-se uma redução na influência da geometria e tamanho do elemento estruturante nos resultados, uma vez que, conforme pode ser visto nas Tabelas 5-8, os melhores resultados obtidos são referentes aos elementos estruturantes com tamanho 3×3 , ao invés de 5×5 e o elemento cruz passou a ter uma resultado semelhante ao elemento diamante que, geralmente, é o melhor resultado por se aproximar mais da geometria dos alvos. Ainda relacionado ao efeito da adição da operação morfológica de abertura, percebeu-se que ela causou uma fragmentação dos alvos. Este problema foi observado na maioria das simulações, sendo mais expressivo na Figura 22.

Por fim, pode-se observar ainda que o elemento estruturante no formato cruz, por ser menos seletivo no processo de erosão em comparação ao elemento quadrático, obteve um número excessivo de falsos alarmes quando utilizado no algoritmo proposto pela FOI, conforme apresentado na Seção 4.1. Porém, quando combinado com os aprimoramentos propostos em Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016), este elemento obteve um melhor resultado para esse tipo de erosão, conforme apresentado nas Seções 4.2 e 4.3.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso possibilitou uma análise sobre a influência de diferentes geometrias e tamanhos de elementos estruturantes nas operações morfológicas em algoritmos de detecção de mudanças aplicados em imagens do tipo SAR UWB. Para fins de comparação de resultados, foi considerado o algoritmo de detecção de alvos proposto pela FOI apresentado em Lundberg et al. (2006), bem como duas melhorias para este algoritmo, apresentadas em Fabrin et al. (2017) e Molin Jr. et al. (2016).

Com a utilização de diferentes formatos e tamanhos, foi possível observar através de simulações que os elementos estruturantes utilizados nas operações morfológicas influenciam significativamente no desempenho do algoritmo de detecção. Considerando que os melhores desempenhos foram obtidos com elementos estruturantes de tamanho 3×3 e o tamanho do alvo é mais próximo da janela 5×5 , conclui-se que a operação morfológica de abertura, afetou diretamente no tamanho do elemento estruturante a ser utilizado, visto que o tamanho do elemento estruturante está relacionado diretamente com a dimensão dos alvos. Ainda, foi possível observar que a disposição em que o alvos encontram-se no território afeta diretamente o desempenho do algoritmo, visto que dependendo da disposição, cada alvo possui uma inclinação (no sentido horizontal) em relação ao ângulo da passagem do voo.

Como trabalhos futuros, sugere que diferentes formatos e geometrias de elementos estruturantes sejam testados em outras imagens SAR, destacando os melhores resultados, a partir de dimensões e formatos de alvos diferentes. Outra sugestão seria estudar a possibilidade de trabalhar com algoritmos adaptativos, permitindo a seleção de diferentes elementos estruturantes para a detecção de diferentes alvos. Por fim, deseja-se que este trabalho permita um contato inicial com outras instituições que realizam pesquisas no mesmo tema como a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) e o Blekinge Institute of Technology.

Referências

- BLUMTRITT, O.; PETZOLD, H.; ASPRAY, W. **Tracking the History of Radar**. [S.l.]: IEEE-Rutgers Center for the History of Electrical Engineering, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- CURLANDER, J. C.; MCDONOUGH, R. N. **Synthetic Aperture Radar**. [S.l.]: John Wiley & Sons New York, NY, USA, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- DUTRA, L. V. et al. Processamento de Imagens de Radar de Abertura Sintética-Princípios e Aplicações. In: **Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens, NPDI/DCC/ICEx/UFMG**. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- EAVES, J.; REEDY, E. **Principles of Modern Radar**. [S.l.]: Chapman & Hall, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- FABRIN, A. C. F. et al. A CFAR Optimization for Low-Frequency UWB SAR Change Detection Algorithms. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 2017. IGARSS'17. 2017 IEEE International**. [S.l.: s.n.], 2017. Citado 13 vezes nas páginas 14, 34, 35, 36, 38, 39, 42, 43, 44, 45, 46, 48 e 49.
- FACON, J. A Morfologia Matemática e suas Aplicações em Processamento de Imagens. In: **VII Workshop de Visao Computacional–WVC**. [S.l.: s.n.], 2011. v. 13. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 27, 30 e 31.
- GOOGLE MAPS. 2018. <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acesso: 03/06/2018. Citado na página 21.
- GUSTAVSSON, A. et al. Development and Operation of an Airborne VHF SAR System-Lessons Learned. In: IEEE. **Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS'98. 1998 IEEE International**. [S.l.], 1998. v. 1, p. 458–462. Citado na página 13.
- JAKOWATZ, C. V. et al. **Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2015. Citado na página 16.
- LUNDBERG, M. et al. A challenge problem for detection of targets in foliage. In: **Proc. SPIE**. [S.l.: s.n.], 2006. v. 6237, p. 62370K. Citado 18 vezes nas páginas 14, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 30, 33, 39, 41, 43, 44, 46, 48 e 49.
- MAHAFZA, B. R. **Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB**. [S.l.]: CRC press, 2002. Citado na página 13.

- MARQUES FILHO, O.; NETO, H. V. **Processamento Digital de Imagens**. [S.l.]: Brasport, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- MELVIN, W. L.; SCHEER, J. A. **Principles of Modern Radar**. [S.l.]: SciTech Publishing, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. d. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. **Embrapa Cerrados-Livros técnicos (INFOTECA-E)**, Brasília, DF: UnB, 2012., 2012. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- METZ, C. E. **Basic Principles of ROC Analysis**. [S.l.], 1978. v. 8. 283–298 p. Citado na página 37.
- MOLIN JR., R. D. et al. Iterative Change Detection Algorithm for Low-Frequency UWB SAR. In: **XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBrT2016**. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 8 vezes nas páginas 14, 35, 36, 38, 42, 46, 48 e 49.
- 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. Citado na página 18.
- NOVO, E. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. [S.l.]: Edgard Blücher, 1992. Citado na página 15.
- OAKLAND, J. S. **Statistical Process Control**. [S.l.]: Routledge, 2007. Citado na página 35.
- OLIVER, C.; QUEGAN, S. **Understanding Synthetic Aperture Radar Images**. [S.l.]: SciTech Publishing, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 16 e 17.
- RICHARDS, M. A. et al. **Principles of Modern Radar**. [S.l.]: Citeseer, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 18, 28 e 29.
- RUSS, J. C. et al. **The Image Processing Handbook**. [S.l.]: AIP Publishing, 1994. v. 8. 177–178 p. Citado na página 30.
- SKOLNIK, M. I. **Introduction to Radar Systems**. [S.l.]: Singapore:McGraw-Hill, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- ULANDER, L. et al. Performance of the CARABAS-II VHF-Band Synthetic Aperture Radar. In: IEEE. **Geoscience and Remote Sensing Symposium, International**. [S.l.], 2001. v. 1, p. 129–131. Citado na página 19.
- ULANDER, L. M. **VHF-Band SAR for Detection of Concealed Ground Targets**. [S.l.], 2005. Citado na página 23.
- ULANDER, L. M.; HELLSTEN, H.; STENSTROM, G. Synthetic Aperture Radar Processing using Fast Factorized Back-Projection. **IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems**, IEEE, v. 39, n. 3, p. 760–776, 2003. Citado na página 23.
- ULANDER, L. M. et al. Change Detection for Low-Frequency SAR Ground Surveillance. **IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation**, IET, v. 152, n. 6, p. 413–420, 2005. Citado 6 vezes nas páginas 14, 23, 24, 25, 26 e 28.
- WATSON-WATT, R. A. **The pulse of radar: the autobiography of Sir Robert Watson-Watt**. [S.l.]: Dial Press, 1959. Citado na página 15.