



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/11.25.16.41-TDI

DETECÇÃO DE ALVOS MARÍTIMOS A PARTIR DE DADOS SENTINEL-1 EM REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO NORDESTE DO BRASIL

Diego Xavier Bezerra

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. João Antonio
Lorenzetti, e Rafael Lemos Paes,
aprovada em 02 de dezembro de
2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/45RU2SE>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2021/11.25.16.41-TDI

DETECÇÃO DE ALVOS MARÍTIMOS A PARTIR DE DADOS SENTINEL-1 EM REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO NORDESTE DO BRASIL

Diego Xavier Bezerra

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelos Drs. João Antonio
Lorenzetti, e Rafael Lemos Paes,
aprovada em 02 de dezembro de
2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/45RU2SE>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bezerra, Diego Xavier.

B469d Detecção de alvos marítimos a partir de dados sentinel-1 em região oceânica adjacente ao Nordeste do Brasil / Diego Xavier Bezerra. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xx + 101 p. ; (sid.inpe.br/mte-m21d/2021/11.25.16.41-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. João Antonio Lorenzetti, e Rafael Lemos Paes.

1. Detecção de alvos. 2. SAR. 3. Distribuição gama generalizada. 4. Região Nordeste. I.Título.

CDU 528.854(261.67)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE DIEGO XAVIER BEZERRA
BANCA Nº290/2021, REG 798378/2019

No dia 02 de dezembro de 2021, às 15h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador (es).

Título: “DETECÇÃO DE ALVOS MARÍTIMOS A PARTIR DE DADOS SENTINEL-1 EM REGIÃO OCEÂNICA ADJACENTE AO NORDESTE DO BRASIL”

Membros da Banca:

Dr. Milton Kampel - Presidente - INPE
Dr. João Antonio Lorenzetti - Orientador - INPE
Dr. Rafael Lemos Paes - Orientador - ECEMAR
Dr. Rafael Antonio da Silva Rosa - Membro Externo - VISIONA



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Antonio da Silva Rosa (E), Usuário Externo**, em 06/12/2021, às 08:23 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO ANTONIO LORENZETTI (E), Usuário Externo**, em 06/12/2021, às 09:45 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Milton Kampel, Pesquisador**, em 13/12/2021, às 09:36 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Lemos Paes (E), Usuário Externo**, em 28/12/2021, às 00:09 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **8764934** e o código CRC **0F8B5069**.

Referência: Processo nº 01340.008230/2021-61

SEI nº 8764934

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais Argemiro e Elina pelo todo o amor do mundo, meus maiores exemplos de dedicação.

À minha namorada Caroline, pelo amor, carinho e ajuda nos momentos mais difíceis.

Aos meus orientadores, Dr. João Lorenzetti e Dr. Rafael Paes pela confiança e oportunidade de aprendizado. Agradeço aos membros da banca Dr. Milton Kappel e Dr. Rafael Rosa pelas contribuições de grande valor para o aperfeiçoamento deste trabalho.

À Marinha do Brasil, em especial ao Contra-Almirante (RM-1) Nilo Moacyr Penha Ribeiro, consultor e analista de risco de atividades marítimas e portuárias, à Capitão de Mar e Guerra (RM1-T) Carla Lage, ao Capitão de Mar e Guerra (T) Malburg e ao Capitão de Corveta Leandro de Brito Lanes pela ajuda na aquisição dos dados AIS. Agradeço às empresas HisdeSat e ExactEarth pela confiança no trabalho e a cortesia. Também, agradeço ao Dr. Paulo Nobre (CPTEC/INPE) pela disponibilidade e auxílio. Sem vocês este trabalho teria sido muito mais árduo.

Aos colegas de turma do Sensoriamento Remoto do INPE, em especial à Stella, Cândida, Gustavo, Raíssa, Ana, Thais, Arian e Rafael Viana pelo companherismo e ajuda nos estudos.

Ao INPE por ter proporcionado um local de trabalho de muita alegria e aprendizado. Agradeço ao corpo docente SERE/INPE e os demais colaboradores pelos conhecimentos compartilhados.

Ao professor Dr. Geraldo Ferreira (LABOMAR/UFC), pelo incentivo e orientação nos estudos em Sensoriamento Remoto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001 (processo 88887.334469/2019-00). Não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que lutam pela ciência.

RESUMO

A vigilância do ambiente marítimo é um tema de crescente interesse governamental. Em águas jurisdicionais brasileiras, as atividades de vigilância são sobretudo um desafio frente à sua imensa extensão e aos cenários de aumento de fluxo marítimo. O evento de derramamento de óleo no Nordeste do Brasil em 2019 evidenciou a necessidade de um monitoramento eficaz na região. A vigilância de ambientes marítimos realizada com técnicas tradicionais como o Sistema de Identificação Automática (AIS) é limitada devido à sua incapacidade de monitorar navios não-cooperativos. De forma complementar, o Sensoriamento Remoto (SR) ativo por meio de Radar de Abertura Sintética (SAR) tem se tornado uma importante ferramenta para sistemas integrados de monitoramento marítimo. Diversos esforços foram dedicados ao desenvolvimento de algoritmos de detecção de alvos em imagens SAR, sendo o *Constant False Alarm Rate* (CFAR) o mais utilizado até o presente momento. Entretanto, pouca atenção é dada em como as variações do ambiente (principalmente as dos ventos e ondas) afetam as detecções do CFAR. Para isto, delimitou-se o objetivo principal do trabalho em investigar os efeitos de condições ambientais e da geometria de aquisição em algoritmo de detecção CFAR por meio de imagens de polarização VV dos satélites Sentinel-1A e 1B (banda C). Para este fim, a metodologia adotada consistiu em: i) Geração de um *dataset* integrado de imagens e informações de ventos, ondas e ângulo de incidência do radar, para um total de 44/6 imagens Sentinel-1; ii) Implementação do CFAR baseado na distribuição *Generalized Gamma* (GFD); iii) Análise do comportamento estatístico da distribuição GFD frente às variações do ambiente e da geometria de aquisição; e iv) Análise dos resultados do CFAR em confronto com os dados AIS. Os resultados obtidos mostraram que foi possível gerar um *dataset* representativo de diversas condições ambientais marinhas. A distribuição GFD mostrou-se ajustar adequadamente às variações da geometria de aquisição e que tende a sofrer distorções em condições de mares mais desenvolvidos (*swell*). Constatou-se que o ajuste de limiar proposto reduziu, em média, 26% dos falsos alarmes, não ocasionando perda de alvos, e demonstrando que sua incorporação no CFAR permite a correção sob medida dos limiares conforme o ambiente marinho apresentado. Os resultados do experimento de detecção, em que os alvos apontados pelo CFAR foram confrontados com os do AIS, indicaram que 37,3% das embarcações presentes não estavam reportando suas posições. A aplicação da metodologia desenvolvida nesta pesquisa mostra-se útil para indicar alvos não-reportantes, os quais não usam AIS ou tentam evitar a sua identificação. Ressalta-se a importância desta abordagem para a potencialização da consciência situacional em mares brasileiros, uma vez que a integração entre diferentes sistemas tende a aprimorar as atividades de monitoramento marítimo.

Palavras-chave: Detecção de alvos. SAR. Distribuição gama generalizada. Região Nordeste.

MARITIME TARGET DETECTION USING SENTINEL-1 SAR DATA IN ADJACENT OCEANIC AREA OF NORTHEAST BRAZIL

ABSTRACT

Maritime surveillance is a growing topic of government interest. Surveillance activities in Brazilian jurisdictional waters are challenging due to their large extension and given future scenarios of increased maritime flow. Furthermore, the oil spill event in Northeast Brazil, which occurred in 2019, highlighted the need for effective monitoring for the region. Traditional surveillance techniques such as the Automatic Identification System (AIS) are limited since it cannot monitor non-cooperative ships. As a complement, active Remote Sensing (SR) systems such as Synthetic Aperture Radar (SAR) have recently been seen as an efficient tool for integrated marine monitoring systems. Several efforts were dedicated to the development of target detection algorithms in SAR images, with the Constant False Alarm Rate (CFAR) being the most used to date. However, limited efforts were made to understand how variations in the sea environment (mostly winds and waves) affect the CFAR detection process. Thus, the main objective of this work consisted of investigating the effects of environmental conditions and SAR acquisition geometry on CFAR using VV polarization images from Sentinel-1A and 1B satellites (C band). To this end, we sought to: i) Generate an integrated dataset, consisting of wind, waves, and SAR data, comprising a total of 446 Sentinel-1 images; ii) Implement a CFAR algorithm based on the Generalized Gamma (GFD) distribution; iii) Analyse the statistical behavior of the GFD distribution with varying the environment and acquisition geometry; iv) Analyse the CFAR detection results and compare it to AIS data. Results show that it is possible to generate a representative dataset of diverse marine environmental conditions. The GFD distribution was shown to fit well the varying acquisition geometry and tends to suffer from distortions under developed sea conditions (swell). It was verified that the proposed threshold adjustment reduced, on average, 26% of false alarms, and did not cause detection loss. The results of the detection experiment, in which the CFAR targets were confronted with the AIS, indicated that 37.3% of the vessels in the region were non-reporting. The methodology developed in the present study can potentially be used as a scheme for indicating non-reporting sea targets, which do not use AIS or try to avoid detection, thus improving the maritime domain awareness in Brazilian waters.

Keywords: Target detection. SAR. Generalized gamma distribution. Northeast Brazil.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Tipos de ondas que ocorrem no oceano.	6
Figura 2.2 – Geração e desenvolvimento de ondas por ventos.	7
Figura 2.3 – Bandas espectrais pertinentes ao micro-ondas.....	9
Figura 2.4 – Geometria de aquisição SAR.	10
Figura 2.5 – Variação do σ^0 (em escala dB) em relação ao ângulo de incidência e magnitude do vento.....	13
Figura 2.6 – Modos de aquisição da missão Sentinel-1.....	16
Figura 2.7 –Fontes de distorções em imagens SAR: (a) Ambiguidade azimutal, (b) Lóbulos laterais, (c) Desvio azimutal, (d) Células de chuva e (e) Estado do mar.....	19
Figura 2.8 – Estrutura de janelas do CFAR.....	22
Figura 2.9 – Influência da subestimativa (PDF azul) e sobrestimativa (PDF verde) do limiar correto (PDF vermelha) de detecção.....	24
Figura 3.1 – (a) Localização da área de estudo e (b) Densidade de rotas marítimas no ano de 2020.....	26
Figura 3.2 – Distribuição espacial das imagens utilizadas.	28
Figura 3.3 – Exemplo de embarcação em imagem Sentinel-1 VV (aquisição às 08:04am) colocada com mensagens AIS HisdeSat (pontos vermelhos).....	31
Figura 3.4 – Fluxograma das principais etapas metodológicas.....	33
Figura 3.5 – Elementos de detecção.....	47
Figura 4.1 – Distribuição da subimagens selecionadas (n=26657) em relação a: (a) Magnitude do vento U_{10} , (b) Período de onda P , (c) Idade de onda WA e (d) Ângulo de incidência θ	50
Figura 4.2 – Subimagens σ^0 em polarização VV (tamanho 667 x 667 pixels), em escala dB, separadas por classe de idade de onda WA (linhas) e de alcance (colunas).....	52
Figura 4.3 – Exemplos do encaixe da GFD por classe de idade de onda (linhas).....	54
Figura 4.4 – Exemplos de resultados da detecção do CFAR baseado no modelo GFD.....	57

Figura 4.5 – <i>Violinplots</i> do σ^0 máximo de diferentes tamanhos de embarcações, extraídos do dataset OpenSARShip 2.0, em polarização VV e escala dB	61
Figura 4.6 – <i>Violinplots</i> do σ^0 dos FAs, em polarização VV e escala dB, resultantes do CFAR aplicado para $PFA=10^{-4}$	61
Figura 4.7 – Comportamento do FAR em relação ao fator de ajuste f para $PFA=10^{-4}$	64
Figura 4.8 – (a) Região representante de condição de vagas jovens em imagem σ^0 , na polarização VV, em proximidade à costa de Aracaju (Sergipe)..	66
Figura 4.9 – (a) Região representante de condição de Marulhos em imagem σ^0 , na polarização VV, em proximidade à costa de Ilhéus (Bahia)...	67
Figura 4.10 – Elementos de detecção para (a) Imagem 1; (b) Imagem 2 e (c) Imagem 3	74
Figura 4.11 – Exemplos de detecções do CFAR não reportadas pelo AIS. (a) recife de coral; (b) células de chuva; (c) terminal portuário que encontra-se fora da linha de costa (linha rosa); (d) Navios “negros” e plataformas de óleo (apontadas pelas setas)	76

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Missões SAR orbitais	15
Tabela 3.1 – Especificações das imagens Sentinel-1 utilizadas.	27
Tabela 3.2 – Especificações dos produtos ERA5 (ventos e ondas)	29
Tabela 3.3 – Exemplo de tabela de atributos das subimagens.	39
Tabela 3.4 – Número ideal de falsos alarmes para uma subimagem e PFAs utilizadas	45
Tabela 3.5 – Especificações do experimento de correlação das detecções SAR- AIS.	48
Tabela 4.1 – Valores D_{KS} divididos por classe WA e faixa de alcance do radar.	55
Tabela 4.2 – Valores de FAR e N_{FA} médios das subimagens, divididos por classe WA e faixas de alcance do radar	59
Tabela 4.3 – Valores do retroespalhamento σ^0 médios dos falsos alarmes	59
Tabela 4.4 – Valores do fator de ajuste f , otimizados por classe WA	64
Tabela 4.5 – Taxa de falsos alarmes FAR para as subimagens analisadas em condições de vagas jovens	68
Tabela 4.6 – Taxa de falsos alarmes FAR para as subimagens analisadas em condições de marulhos	68
Tabela 4.7 – Elementos da detecção para as subimagens representantes de vagas jovens	69
Tabela 4.8 – Elementos da detecção para subimagens representantes de marulhos.....	69
Tabela 4.9 – Elementos correlacionados e não-correlacionados nas imagens SAR (detecções do CFAR) e do AIS.....	73

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIS	<i>Automatic Identification System</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
APA	Áreas de Proteção Ambiental
CCMP	<i>Cross-Calibrated Multi-Platform</i>
CDF	Função Distribuição Acumulada
CFAR	<i>Constant False Alarm Rate</i>
CSM	Consciência Situacional Marítima
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENL	Número Equivalente de <i>Looks</i>
ESA	European Space Agency
GDAL	<i>Geospatial Data Abstraction Library</i>
GFD	<i>Gamma Generalized Distribution</i>
GPS	Sistemas de Posicionamento Global
GRD	<i>Ground Range Detected</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMO	Organização Marítima internacional
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IW	<i>Interferometric Wide-Swath</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LIT	Laboratório de Integração de Testes
MDE	Modelos Digitais de Elevação
NaN	Elementos não-computáveis
NESZ	<i>Noise Equivalent Sigma Zero</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRCS	<i>Normalized Radar Cross Section</i>
PDF	Função Probabilidade Densidade
PFA	Probabilidade de Falso Alarme
PRF	<i>Pulse Repetition Frequency</i>
RCS	<i>Radar Cross Section</i>
S1A	Sentinel-1A
S1B	Sentinel-1B

SAR	Radar de Abertura Sintética
SisGAAz	Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul
SLC	<i>Single-Look Complex</i>
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
SOLAS	<i>Safety of Life at Sea</i>
SR	Sensoriamento Remoto
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UNCTAD	Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento
UTC	Tempo Universal Coordenado
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
WA	<i>Wave age</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZEE	Zona Econômica Exclusiva

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p	Velocidade de fase da onda
C_d	Coeficiente de arrasto
u^*	Velocidade de fricção do vento
U_{10}	Magnitude do vento em altura de 10 metros
λ_R	Comprimento de onda do radar
λ_B	Comprimento de onda ressonante de <i>Bragg</i>
dB	Decibel
V	Velocidade da plataforma SAR
H	Altura da plataforma SAR
θ	Ângulo de incidência do radar
R	Distância entre o sensor e o alvo
E_i	Campos eletromagnéticos incidente no alvo
E_s	Campos eletromagnéticos retornado ao radar
σ^0	Coeficiente de retroespalhamento Sigma-zero
A	Área iluminada pelo radar
G	Aceleração da gravidade
T	Limiar de detecção
$f_u(x)$	PDF subestimada
$f_o(x)$	PDF sobrestimada
T_u	Limiar subestimado
T_o	Limiar sobrestimado
P	Período de onda no pico do espectro
M	Média do σ^0 da subimagem
DP	Desvio Padrão do σ^0 da subimagem
H	Fator de calibração do ruído do sensor
C	Fator de calibração do σ^0

SNR_A	Relação Sinal-Ruído Aditiva
V	Parâmetro potência
k	Parâmetro forma
μ	Parâmetro escala
$\Gamma(\cdot)$	Função gama
$\text{sgn}(\cdot)$	Função sinal
$\Psi(\cdot)$	Função digamma
$\Psi(1, k)$	Função poligama de primeira ordem
$Q_{inv}(\cdot, k)$	Função gama inversa incompleta
N_T	Número total de pixels da subimagem
N_{FA}	Número de falsos alarmes
T_A	Limiar ajustado
F	Fator de ajuste do limiar

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Ondas de superfície no oceano	5
2.2 Radar de abertura sintética - SAR	8
2.2.1 Geometria de aquisição	9
2.2.2 Retroespalhamento	11
2.2.3 Clutter marinho	12
2.2.4 O Sentinel-1 no contexto das missões SAR	14
2.3 Qualidade das imagens SAR	17
2.3.1 Speckle	17
2.3.2 Fontes de distorções	18
2.4 Detecção de alvos marítimos	20
2.4.1 Pré-processamento e mascaramento terrestre	20
2.4.2 Pré-seleção	21
2.4.3 Discriminação	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Área de estudo	25
3.2 Dados utilizados	26
3.2.1 Imagens SAR	26
3.2.2 Dados de ventos e ondas	28
3.2.3 Dataset de embarcações - OpenSARShip	30
3.2.4 Sistema de Identificação Automática – AIS	30
3.3 Metodologia	32
3.3.1 Pré-processamento das imagens SAR	34
3.3.2 Integração dos dados SAR, ventos e ondas	35
3.3.2.1 Seleção das subimagens	37
3.3.3 Detecção CFAR baseada na distribuição estatística Gama Generalizada - GFD	39
3.3.4 Análise do ajuste do modelo GFD sobre o clutter marinho	42
3.3.5 Análise dos resultados de detecção do CFAR	43
3.3.5.1 Experimentos de detecção	46

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1 Geração e seleção das subimagens	49
4.2 Análise do comportamento do modelo GFD na superfície marítima	53
4.3 Análise dos resultados da detecção do CFAR	58
4.3.1 Análise dos falsos alarmes.....	58
4.3.2 Ajuste do limiar de detecção	62
4.3.3 Experimento de detecção.....	65
4.4 Correlação entre as detecções CFAR e AIS	72
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
APÊNDICE A - DATASET DE EMBARCAÇÕES - OPENSARSHIP 2.0.....	92
APÊNDICE B - SUBIMAGENS NÃO-SELECIONADAS	94
APÊNDICE C - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES D_{KS}	95
APÊNDICE D - RETROESPALHAMENTO DOS FALSOS ALARMES.....	96
APÊNDICE E - AMBIGUIDADES AZIMUTAIS EM IMAGENS SENTINEL-1 ..	98
APÊNDICE F – IMAGENS SENTINEL-1 UTILIZADAS EM EXPERIMENTO..	99

1 INTRODUÇÃO

A vigilância do ambiente marítimo é um tema de crescente interesse governamental no Brasil. A Organização Marítima Internacional (IMO) define o conceito de Consciência Situacional Marítima¹ (CSM) como a efetiva compreensão das atividades no domínio marinho que podem impactar na segurança, na defesa, na economia e no meio ambiente (IMO, 2012).

Em águas sob jurisdição brasileira, o alcance da CSM é sobretudo um desafio. Primeiro, destaca-se a imensa extensão da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira, na qual ocupa aproximadamente 3,5 milhões de km² e estende-se até 200 milhas náuticas (370 km) do litoral (CASTRO et al., 2017). Segundo, há tendência de aumento de fluxo marítimo no Brasil, evidenciada pelo crescente aumento de embarcações em rota de longo curso nos portos brasileiros ao longo das últimas duas décadas (FELIPE JUNIOR, 2019) e por projeções da Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), que apontam para o futuro taxas de crescimento anual de 3,4% para o comércio marítimo mundial, durante o período 2019-2024 (UNCTAD, 2019).

Este aumento de fluxo marítimo traz consigo riscos de grandes impactos. Por exemplo, o evento de derramamento de óleo cru sobre a costa do Nordeste Brasileiro no ano de 2019 ocasionou severas implicações a comunidades costeiras de baixa renda e a espécies tropicais de ecossistemas marinhos e costeiros, sendo considerado evento de derramamento de óleo de maior extensão já registrado na história brasileira (SOARES et al., 2020). Embora com investigação de causa ainda incompleta, tem-se como hipótese primária que este descarte ilegal foi realizado por embarcação. Não obstante, este evento evidenciou que a ausência de um monitoramento marítimo eficaz pode implicar em grandes perdas para diversos setores da sociedade.

¹ tradução do inglês de *Maritime Domain Awareness*.

Assim, a potencialização da CSM requer medidas de monitoramento operacional e de levantamento de informações precisas acerca de atividades marítimas, tais como de extração de petróleo, transporte de mercadorias e de passageiros. Neste contexto, a detecção de alvos e, sobretudo a detecção de embarcações, torna-se uma das principais aplicações em vigilância marítima. Tradicionalmente, este monitoramento é realizado por meio de Sistema de Identificação Automática (AIS, do inglês *Automatic Identification System*) a bordo de plataformas costeiras ou de satélites (SatAIS). A maior desvantagem deste sistema é que o aparelho a bordo das embarcações pode encontrar-se ausente, danificado, intencionalmente desligado ou simulando posições falsas, impossibilitando assim o seu rastreamento (PELICH et al., 2019; EMMENS et al., 2021).

Ao longo das últimas décadas, técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) óptico, termal e micro-ondas têm ganhado destaque como forma de auxiliar a detecção e o rastreamento de embarcações não-colaborativas. Isto é, por meio de imageamento de satélites, a posição geográfica de embarcações podem ser adquiridas, não dependendo da transmissão das mensagens AIS (RODGER; GUIDA, 2021).

Embora técnicas de SR óptico e termal demonstrem boa confiabilidade na detecção e no reconhecimento de alvos marítimos, estas apresentam dependência em relação a condições atmosféricas e de iluminação solar (KANJIR et al., 2018). Em contrapartida, o SR ativo na faixa do micro-ondas por meio de Radar de Abertura Sintética (SAR) orbital tem sido amplamente utilizado por apresentar fonte de iluminação própria, o que permite aquisição de imagens em qualquer horário do dia, e possui baixa susceptibilidade aos efeitos atmosféricos (ELDHUSET, 1996; CRISP, 2004; MALLAS; GRABER, 2013). Além disso, o SAR orbital possibilita a vigilância marítima sobre extensas áreas afastadas da costa e a aquisição de provas legais sobre derramamento de óleo, podendo favorecer assim sistemas de monitoramento, a exemplo do Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), que encontra-se atualmente em

desenvolvimento (NUNZIATA et al., 2019; FINGAS; BROWN, 2018; FONSECA, 2016).

Muitos esforços foram dedicados ao desenvolvimento de algoritmos de detecção de alvos em imagens SAR. De forma geral, os métodos são baseados em modelos estatísticos (IERVOLINO; GUIDA, 2017; EL-DARYMLI et al., 2013), modelos físicos (MIGLIACCIO et al., 2005; GAMBARDELLA et al., 2008) e modelos baseados em dados (DENG et al., 2019; ZHANG et al., 2020). Entre os algoritmos existentes, a Taxa Constante de Falso Alarme - CFAR (do inglês, *Constant False Alarm Rate*) é até o tempo presente o mais amplamente utilizado para a detecção de alvos marítimos devido a sua estrutura simples, eficiência computacional e a sua propriedade de regulação de falsos alarmes (AI et al., 2021). O CFAR é baseado na modelagem estatística da superfície marítima presente nas imagens SAR, em que alvos de maior brilho em relação ao seu entorno são identificados de uma forma adaptativa.

Uma variedade de modificações do CFAR foi proposta ao longo do tempo, incluindo modificações na estrutura de busca dos alvos, ou para maior robustez estatística. Entretanto, pouca atenção é dada em como as variações do ambiente afetam os resultados de detecção do CFAR, e sobretudo como informações ambientais podem ser usadas em seu favor. Especificamente, a presença de ondas longas na superfície no oceano e a quebra de ondas (*wave breaking*) demonstram afetar o processo de formação da imagem SAR, causando aumento da heterogeneidade (i.e., inclusão de elementos brilhantes), assim potencialmente dificultando o processo de detecção (LI et al., 2017a; SUN et al., 2018).

Ademais, distribuições estatísticas notáveis dos últimos anos, que se apresentam mais flexíveis, a exemplo da distribuição gama generalizada (GAO et al., 2016) não foram investigadas a respeito da sua funcionalidade em diversos ambientes marinhos e geometria de aquisição do radar, sobretudo, em um grande conjunto de imagens. Isto é uma funcionalidade importante para

algoritmos de detecção, ou em outras palavras, é importante que o algoritmo consiga se adaptar bem às variações impostas pela natureza e pela geometria em que as imagens SAR são adquiridas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral consiste em investigar os efeitos de condições ambientais e da geometria de aquisição em algoritmo de detecção CFAR por meio de imagens de polarização VV dos satélites Sentinel-1A e 1B (banda C), em região oceânica adjacente ao Nordeste Brasileiro.

Os objetivos específicos são:

- 1) Adquirir e organizar um dataset de imagens SAR e informações ambientais representativo de diversas condições ambientais e de geometria de aquisição;
- 2) Analisar o comportamento de distribuição estatística dos valores de retroespalhamento do ambiente marinho, utilizada no algoritmo CFAR sob diferentes condições de geometria de aquisição e ambientais;
- 3) Aplicar o CFAR nas imagens SAR e analisar a influência do ambiente marinho e da geometria de aquisição nos resultados de detecção;
- 4) Confrontar as detecções do CFAR com o AIS, verificando o quanto do AIS está representado pelas detecções.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ondas de superfície no oceano

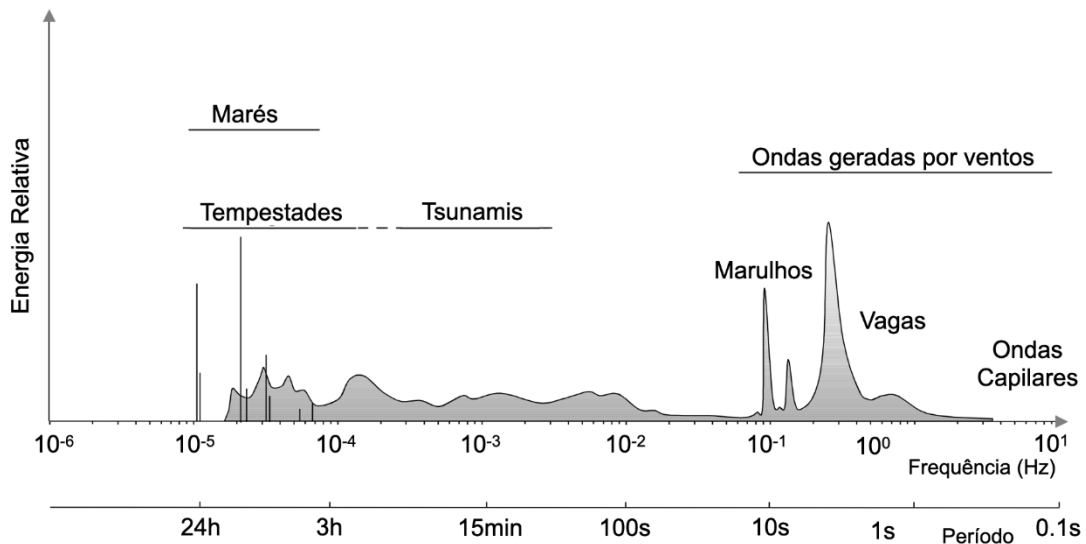
Ondas são fenômenos oscilatórios que se propagam em um meio e transportam consigo energia. Na superfície do oceano, ondas são formadas por combinações de forças de perturbação e restauração; Forças de perturbação atuam fornecendo energia para a formação da onda, ao passo que forças de restauração causam redução na energia da onda, tornando a superfície da água achatada após sua formação e restaurando seu equilíbrio (GARRISON, 2015). Exemplo destas forças incluem a gravidade da Terra, interação entre oceano e corpos celestes (Lua e Sol), tensão superficial, força de Coriolis (devido a rotação da Terra), flutuações da crosta terrestre e a ação dos ventos (OCAMPO-TORRES, 2018).

Ondas no oceano podem ser caracterizadas em termos do seu período, que representa o tempo em que sucessivas cristas de ondas passam por um ponto fixo (HOLTHUJISEN, 2007). Na Figura 2.1 os principais tipos de ondas oceânicas são apresentados em relação ao seu período e frequência. Em maior escala de períodos encontram-se as marés (> 3h), que são ocasionadas por mudanças na magnitude de forças gravitacionais, combinada com a rotação da terra. Tempestades (> 30s) e tsunamis (> 5min) compõem fenômenos que podem causar enormes danos a regiões costeiras. Uma onda é também caracterizada por seu comprimento de onda, definido como a distância entre sucessivas cristas. Para cada tipo específico de ondas temos a assim chamada, relação de dispersão, que é a relação funcional entre o período da onda e seu comprimento de onda associado.

Atentando-se para menores escalas de período, ondas geradas pela ação dos ventos incluem as ondas capilares, capilares-gravidade, as vagas (*wind sea*) e marulhos (*swell*). Ondas capilares possuem como força dominante de restauração a tensão superficial e apresentam períodos menores que 0,1s. As

vagas e marulhos, por sua vez, são controladas pela força da gravidade e possuem período entre 1 e 30s. Estas últimas primariamente são de interesse para a avaliação do estado do mar, e são as quais será dado enfoque nesta dissertação.

Figura 2.1 - Tipos de ondas que ocorrem no oceano.



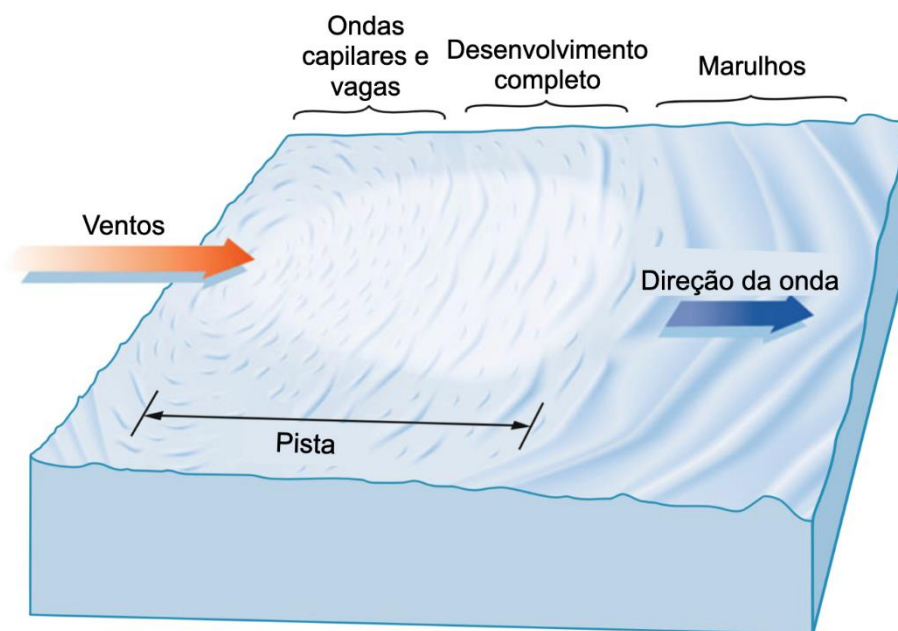
Fonte: Adaptado de Holthuisen (2007).

A ação dos ventos tem papel fundamental no processo de geração e desenvolvimento de ondas, particularmente em águas profundas. Três fatores afetam o estágio de desenvolvimento das ondas: (1) a magnitude do vento sobre a superfície; (2) o tempo no qual o vento atua e (3) a pista (extensão da área de atuação do vento) (GARRISON, 2015). Inicialmente, à medida que o vento sopra sobre a superfície do mar, a energia é transferida para o oceano e as ondas geradas aumentam de tamanho, se espalhando de forma que as ondas mais energéticas se propagam na direção do vento (Figura 2.2).

Conforme o vento local continua a agir e percorre a pista, as ondas continuam a aumentar até atingir o limite no qual as perdas energéticas (dissipação) se equilibram com a entrada de energia proveniente dos ventos (fonte). Neste ponto, o mar encontra-se em um estágio denominado de desenvolvimento completo, e as ondas possuem amplitude e inclinação máximas, ponto no qual

ocorre a quebra de onda (LEFRÈVE; COTTON, 2001). A partir desse momento, as ondas continuam a se propagar e viajam longas distâncias em mar aberto, com perdas mínimas de energia. Neste caso, o ambiente é dominado por marulhos e o vento responsável por sua geração já não se encontra presente (FOLLEY, 2017).

Figura 2.2 - Geração e desenvolvimento de ondas por ventos.



Fonte: Adaptado de Folley (2017).

Para o estudo separado dos estágios descritos acima, é fundamental o uso de métodos de classificação de ondas. Komen et al. (1994) propõe o critério de idade de onda, ou *wave age* (WA), que é calculado a partir da razão entre a velocidade de fase da onda (C_p) e a velocidade de fricção do vento (*friction velocity*) (u^*) sobre a superfície do mar. O critério WA pode ser definido como:

$$WA = \frac{C_p}{u^*} \quad (2.1)$$

A velocidade de fricção u^* está relacionada com a habilidade do vento em gerar ondas curtas, e pode ser estimada a partir da Equação 2.2:

$$u^* = \sqrt{C_d} U_{10} \quad (2.2)$$

onde U_{10} é a magnitude do vento em altura de 10 metros e C_d é o coeficiente de arrasto, que de acordo com Wu (1980) pode ser estimado a partir de:

$$C_d = (0,8 + 0,065 \times U_{10}) \times 10^{-3} \quad (2.3)$$

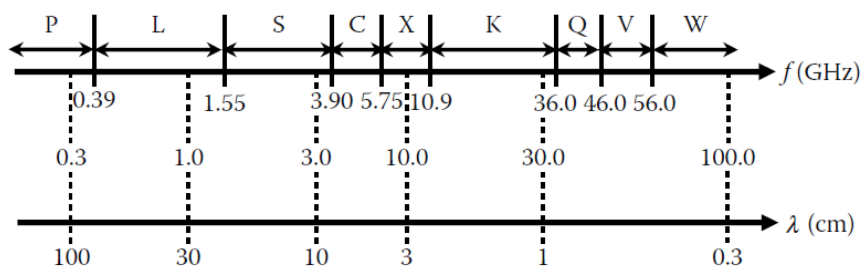
Dessa forma, a partir das informações do vento e de ondas para uma determinada região, é possível medir o estágio de desenvolvimento local e separar faixas dos valores de WA para a classificação de ambientes marinhos distintos. De acordo com Komen et al. (1994), podemos separar da seguinte forma: Vagas jovens ($WA \leq 10$), vagas velhas ($10 < WA \leq 35$) e marulhos ($WA > 35$). As vagas jovens representam o ambiente em que as ondas são fortemente influenciadas pela ação do vento local (zona de geração), e apresentam alta variabilidade com a magnitude e direção do vento. Vagas velhas, por sua vez, representam o ambiente em que as ondas estão próximas do máximo pico de transferência de energia do vento para a superfície do mar. Em último estágio encontram-se os marulhos, que possuem formações de cristas e cavados acentuadas quando comparado às vagas, e se propagam até atingir a linha de costa.

2.2 Radar de abertura sintética - SAR

O SAR é um sistema sensor ativo utilizado para o imageamento de objetos na superfície terrestre. O SAR opera em formato coerente, isto é, pulsos de mesma amplitude e fase inicial são transmitidos pelo sensor, permitindo que uma antena virtual simule uma coleção de antenas de maior comprimento através do movimento do sensor em direção de voo; daí o termo “abertura sintética” (WOODHOUSE, 2006).

De forma distinta a sensores do SR óptico e termal, o SAR opera na porção micro-ondas do espectro eletromagnético (Figura 2.3). Nesta faixa do espectro, a atmosfera possui alta transmitância (baixa interação com o sinal SAR) para comprimentos de ondas (λ) maiores que 3 cm e menores que 100 cm (LEE; POTTIER, 2009; LORENZZETTI, 2015). Ademais, a bordo de plataformas orbitais, imagens podem ser adquiridas de forma sistemática e com geometria de aquisição consistente, independente da iluminação solar ou do horário do dia.

Figura 2.3 – Bandas espectrais pertinentes ao micro-ondas.



Fonte: Lee e Pottier (2009).

A seguir, serão descritas as principais características do imageamento SAR em relação à geometria de aquisição, ao retroespalhamento de alvos pontuais e da superfície marítima, bem como as características das missões SAR.

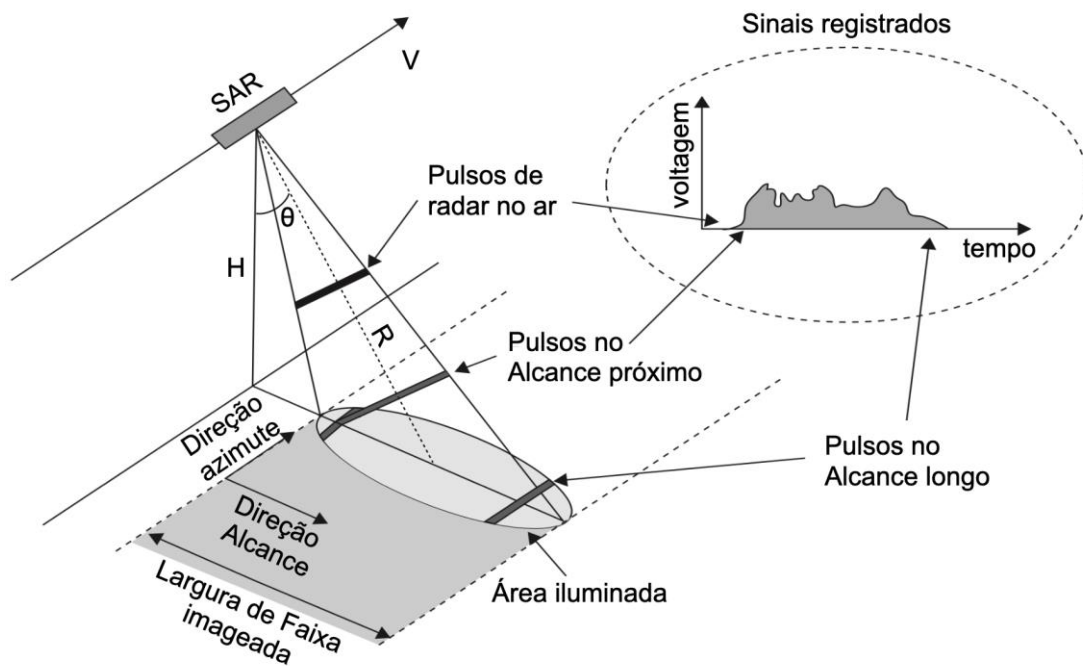
2.2.1 Geometria de aquisição

Considerando uma plataforma SAR que se desloca a uma velocidade V e a uma altura H em relação ao solo (Figura 2.4), define-se o eixo em direção de voo como direção azimute e o eixo perpendicular como direção de alcance (ou *range*). Os sinais registrados nestas duas direções são armazenados e processados sequencialmente, gerando assim as imagens SAR (MOREIRA et al., 2013).

À medida que o SAR se desloca na direção azimutal, um grande número de pulsos são transmitidos (à uma taxa temporal em função da Frequência de Repetição dos Pulsos ou PRF - *Pulse Repetition Frequency*), que interagem com

os alvos na superfície, são retroespalhados de volta ao sensor, e então registrados pelo processador SAR. Devido à largura azimutal dos pulsos e à alta PRF (normalmente da ordem 1000 pulsos por segundo), um mesmo ponto no terreno é iluminado um grande número de vezes enquanto está inserido nos diversos feixes de radar, à medida que o sensor avança na direção azimutal. Neste caso, a resolução espacial azimutal é dependente do histórico de desvios de frequência *Doppler* do alvo, medidos durante o intervalo de transmissão e de recepção do pulso. Estes desvios acontecem devido ao movimento relativo da plataforma em relação ao alvo; assim diferentes frequências *Doppler* são registradas conforme o radar observa o alvo sob variados ângulos (MURA; MOREIRA, 1996; ULABY; LONG, 2014).

Figura 2.4 - Geometria de aquisição SAR.



Fonte: Adaptado de Zyl e Kim (2011).

Em direção alcance (ou *range*), a antena é apontada lateralmente a um ângulo de incidência θ em relação ao nadir² e a uma distância R do alvo, estabelecendo então a largura de faixa imageada na superfície. A faixa imageada mais próxima

² Nadir é entendido como a linha diretamente abaixo do satélite em órbita, representada na Figura 2.4 pela altura H .

ao sensor é denominada de alcance próximo (*near range*) e a região mais afastada de alcance longo (*far range*) (LEE; POTTIER, 2009). Esta característica de visada lateral associada a uma dada PRF favorece a separação dos alvos na direção azimute, evitando o retorno ambíguo dos sinais (EMERY; CAMPS, 2017). Uma alta resolução espacial no alcance (*range resolution*), por sua vez, é determinada pela largura de banda do pulso *chirp*³, sendo independente da distância do SAR em relação ao alvo (ZYL; KIM, 2011).

2.2.2 Retroespalhamento

Quando o sinal transmitido pelo SAR interage com o alvo, uma parte da energia carregada pelo sinal é absorvida e a outra parte é retroespalhada. As características desta interação são dependentes de fatores relacionados ao sistema SAR (frequência, polarização, ângulo de incidência, potência transmitida e ganho da antena) e as propriedades do alvo (geometria, rugosidade, teor de umidade e constante dielétrica). Considerando um alvo isotrópico e pontual, sua energia retroespalhada é representada em termos quantitativos pelo parâmetro Seção Reta Radar (*Radar Cross Section - RCS*), denotado como σ (SKOLNIK, 2001):

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} [m^2] \quad (2.4)$$

onde R é a distância entre o sensor e o alvo, E_i e E_s são os campos eletromagnéticos incidente no alvo e retornado ao radar, respectivamente.

No contexto de detecção de alvos marítimos, geralmente busca-se determinar o comportamento do retroespalhamento em áreas extensas, como à exemplo da superfície marítima. Assim, define-se a Seção Reta Radar Normalizada

³ Este é um tipo de sinal (ou forma de onda) de frequência linearmente modulada durante a emissão do pulso, o qual é utilizado em radar visando o aumento da resolução em alcance (*range*).

(*Normalized Radar Cross Section* - NRCS), ou coeficiente de retroespalhamento (σ^0), pela equação (SKOLNIK, 2001):

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A} = \frac{4\pi R^2 |E_s|^2}{A |E_i|^2} \left[\frac{m^2}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

onde A é a área iluminada pelo radar. Através desta normalização, obtém-se uma medida do retroespalhamento médio do alvo, de forma que não varia mais com a sua dimensão de área (WOODHOUSE, 2006). A utilização do σ^0 é sobretudo útil em situações em que se deseja extrair medidas físicas da imagem ou determinar limiares absolutos de detecção de alvos (CRISP, 2004). Para alvos pontuais metálicos, altos valores de σ^0 tendem a ser apresentados, enquanto para a superfície marítima os valores tendem a ser menores, e variam dependendo do *clutter* marinho.

2.2.3 Clutter marinho

Clutter marinho (*sea clutter*) pode ser entendido como o retroespalhamento proveniente da superfície do oceano, o qual do ponto de vista de detecção, se busca separar dos alvos. A natureza do *clutter* marinho depende fundamentalmente da rugosidade da superfície, que por sua vez é influenciada por condições locais de vento e pelo ângulo de incidência (ULABY; LONG, 2014).

Entre ângulos de incidência de 20° a 60° (típicos do SAR), o mecanismo dominante do retroespalhamento na superfície do oceano é o efeito ressonante de *Bragg*, que ocorre quando as ondas incidentes do radar são retroespalhadas por ondas de gravidade de curtos períodos (ondas capilares), geradas por ventos na superfície. Estas ondas curtas causam ressonância (soma coerente) dos pulsos do radar, interferindo no sinal retroespalhado. O espalhamento *Bragg* ocorre através da seguinte relação (HOLT, 2004):

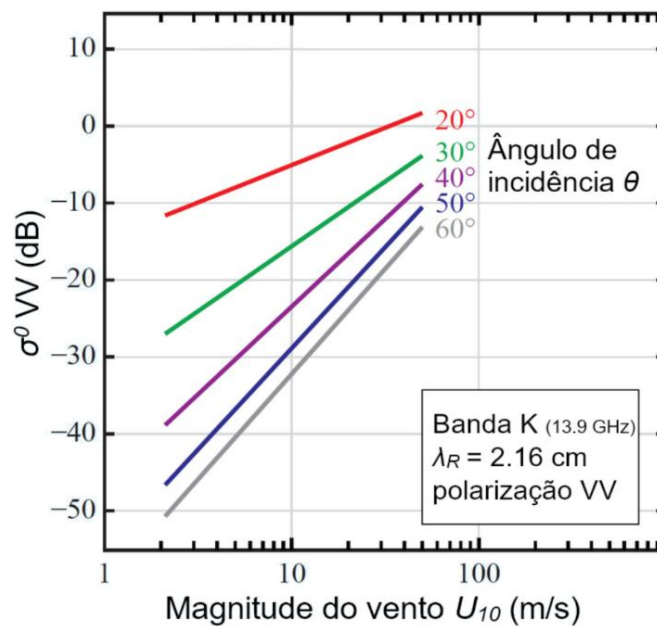
$$\lambda_B = \frac{\lambda_R}{2\sin\theta} \quad (2.6)$$

onde λ_B é o comprimento de onda ressonante de *Bragg*, λ_R é o comprimento de onda do radar e θ o ângulo de incidência do radar.

Para condições de fortes ventos, por exemplo, a geração de ondas ressonantes é favorecida, ocasionando aumento do coeficiente de retroespalhamento σ^θ , sobretudo quanto menor for o ângulo de incidência. Este efeito é ilustrado na Figura 2.5, que apresenta a variação do σ^θ para a banda K ($\lambda_R = 2,16$ cm). Embora detalhes da variação do σ^θ se alterem com o comprimento de onda do radar, este comportamento é similar para a maior parte das bandas do microondas (ULABY; LONG, 2014).

Além do espalhamento *Bragg*, resalta-se outros efeitos, geralmente menos intensos, sobre o *clutter* marinho: modulação hidrodinâmica por ondas de longo período (HASSELMANN et al., 1985), quebra de ondas (PHILLIPS, 1988; MAGALHÃES et al., 2021) e alteração da velocidade radial (*velocity bunching*) (ARDHUIN et al., 2017).

Figura 2.5 - Variação do σ^θ (em escala dB) em relação ao ângulo de incidência e magnitude do vento.



Fonte: Adaptado de Ulaby e Long (2014).

2.2.4 O Sentinel-1 no contexto das missões SAR

O desenvolvimento tecnológico da indústria espacial levou ao lançamento de diversas missões SAR. Na Tabela 2.1 são listadas missões SAR orbitais descomissionadas, atualmente em operação e planejadas para futuros lançamentos. De forma geral, os satélites equipados com sensores SAR possuem órbita quase-polar e altitude entre 500 e 800 km. Atualmente, diversas configurações (bandas, polarizações e modos de aquisição) encontram-se disponíveis, o que amplia as opções de escolha para estudos de detecção de alvos marítimos.

De modo geral, verifica-se que sensores SAR operam nas bandas X (2,4-3,8 cm), C (3,9-7,5 cm) e L (15-30 cm) (Figura 2.3). Em aplicações marítimas, a banda X tende a apresentar maior sensibilidade a efeitos atmosféricos (BRAUN; GADE, 2006; FICHE et al., 2015), enquanto o uso da banda L tem apresentado uso limitado em detecção de alvos devido ao baixo contraste entre embarcações e o *clutter* marinho (MARINO et al., 2015). Ademais, a banda L possui maior susceptibilidade ao efeito *Faraday* da ionosfera, o qual degrada a qualidade e dificulta a interpretação das imagens (WRIGHT et al., 2003). Por outro lado, o uso da banda C tem demonstrado relativa boa performance na detecção de embarcações, embora não tenha capacidade de adquirir maiores detalhes da superfície marítima comparada a banda X (TOUZI et al., 2010; MARTÍN-DE-NICOLÁS et al., 2015; SANTAMARIA et al., 2015; PELICH et al., 2015).

Entre as missões atualmente em operação, destaca-se o Sentinel-1 devido a sua política de livre acesso dos dados. Estudos recentes demonstram que os dados dual-polarimétricos do Sentinel-1 tem beneficiado atividades operacionais de vigilância marítima em diversas regiões (SANTAMARIA et al., 2017; KRAUSE et al., 2018; ALEXANDROV et al., 2019; SNAPIR; et al., 2019; KUREKIN et al. 2019; PELICH et al., 2019). Embora dados de polarimetria

Tabela 2.1 - Missões SAR orbitais.

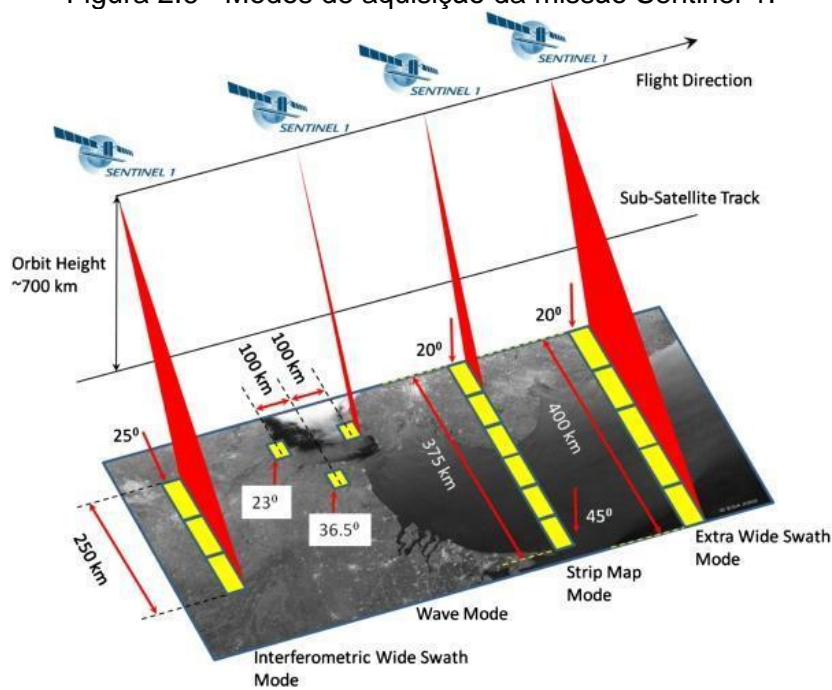
Satélite/Missão	Agência	Status	Data de Operação	Polarização	Banda	Acesso
RADARSAT-1	CSA	Descomissionada	1995-2013	Única (HH)	C	Livre Acesso
ENVISAT ASAR	ESA	Descomissionada	2002-2012	Dual	C	Livre Acesso
ALOS PALSAR	JAXA	Descomissionada	2006-2011	Full	L	Livre Acesso
RISAT-1	ISRO	Descomissionada	2012-2017	Dual/Full	C	Sob demanda
RADARSAT-2	CSA	Operacional	2007-atual	Full	C	Sob demanda
Cosmo SkyMed	ISA	Operacional	2007-atual	Dual	X	Sob demanda
TerraSAR-X	DLR	Operacional	2007-atual	Dual/Full	X	Sob demanda
TanDEM-X	DLR	Operacional	2010-atual	Full	X	Sob demanda
KOMPSAT-5	KARI	Operacional	2013-atual	Full	X	Sob demanda
Sentinel-1	ESA	Operacional	2014-atual	Dual	C	Livre Acesso
ALOS PALSAR 2	JAXA	Operacional	2014-atual	Dual/Full	L	Sob demanda
SAOCOM	CONAE	Operacional	2018-2025	Única/Dual/Full	L	Restrito
RADARSAT-Constellation	CSA	Operacional	2019-2026	Full	C	Restrito
NovaSAR-S	UKSA/SSTL	Operacional	2018-2025	Única/Dual/Tri	S	Restrito
Cosmo SkyMed 2nd Gen	ISA	Planejada	2021-2027	Dual/Full	X	-
ALOS PALSAR 4	JAXA	Planejada	2022-2027	-	L	-
TerraSAR-X New Gen	DLR	Planejada	2022-2028	Full	X	-
NISAR	ISRO/NASA	Planejada	2022-2025	Full	L, S	-
RISAT-1A	ISRO	Planejada	2022-2025	Dual/Full	C	-

Fonte: Adaptado de Migliaccio et al. (2015) e Fingas e Brown (2018).

completa (*full-pol*) tenham maior potencial para discriminação de alvos no oceano, estes possuem restrita largura de faixa imageada e possuem acesso limitado. Por outro lado, os dados dual-polarimétricos possuem a vantagem de maior largura de faixa imageada e de permitir de validação dupla de detecção, de forma que pode-se realizar investigação de qual polarização promove melhor performance (KLEYNHANS et al., 2015).

Vários modos de aquisição encontram-se disponíveis para o Sentinel-1 (Figura 2.6). O modo *StripMap* é utilizado para situações emergenciais, o *Extra-Wide Swath* é voltado principalmente para o monitoramento em regiões polares (altas latitudes) e o *WaveMode* é projetado para obtenção de campos de ventos e espectro de ondas em regiões de mar aberto. Devido às limitações destes modos em cobrir somente áreas específicas e por possuírem baixa quantidade de imagens, o modo *Interferometric-Wide (IW)* torna-se o modo de aquisição padrão para aplicações em larga escala de detecção e classificação de alvos no oceano (HUANG et al., 2018).

Figura 2.6 - Modos de aquisição da missão Sentinel-1.



Fonte: ESA (2018).

Para futuras missões SAR, nota-se uma tendência de operação em formato de constelação (dois ou mais satélites em mesma órbita ou órbitas próximas e em separações espaciais relativamente pequenas), promovendo assim menores taxas de revisita e maior cobertura de área imageada. Ainda, missões recém lançadas ou futuramente planejadas como o RADARSAT-*Constellation*, SAOCOM, NovaSAR-S e o RISAT-1A, deverão incorporar arquitetura de polarimetria compacta, que pode propiciar performance similar aos sistemas *full-pol* e maior largura de faixa imageada (SHIRVANY et al., 2012; MIGLIACCIO et al., 2015; PAES, 2015; COSTA, 2019; ROSSI et al., 2019).

2.3 Qualidade das imagens SAR

Devido às próprias características do sensor SAR, da geometria de aquisição e das condições ambientais, uma série de erros e artefatos podem ser introduzidos nas imagens. Como consequência, estas distorções dificultam a interpretação dos dados e afetam diretamente a performance de detecção (CRISP, 2004; PICHEL et al., 2004; VESPE; GREIDANUS, 2012). A seguir serão discutidos o ruído *speckle* e outras causas de fontes de distorções em imagens SAR.

2.3.1 Speckle

Apesar de conter valiosas informações acerca da textura nas imagens, do ponto de vista do processamento digital de imagens o *speckle* pode ser considerado um ruído que dificulta as etapas de segmentação, detecção e classificação de alvos (RANEY, 1998; LEE et al., 1994; ABRAMOV et al., 2017). No ambiente marítimo, o *speckle* interfere nas propriedades estatísticas do *clutter* e pode apresentar aparência de alvos, especialmente em imagens de média e baixa resolução espacial (EMERY; CAMPS, 2017; SCHWEGMANN, 2018).

A formação do *speckle* é inerente ao sistema SAR e ocorre devido à soma coerente da amplitude e da fase dos sinais provenientes de espalhadores, distribuídos aleatoriamente no *pixel* (LEE; POTTIER, 2009). Esta soma pode ser

construtiva ou destrutiva, ocasionando aspecto granular nas imagens SAR (efeito “sal e pimenta”). Com isso, tem-se que a atenuação do *speckle* não é possível com o aumento da potência do sinal transmitido pelo SAR e requer-se a utilização de medidas alternativas (MOREIRA et al., 2013).

2.3.2 Fontes de distorções

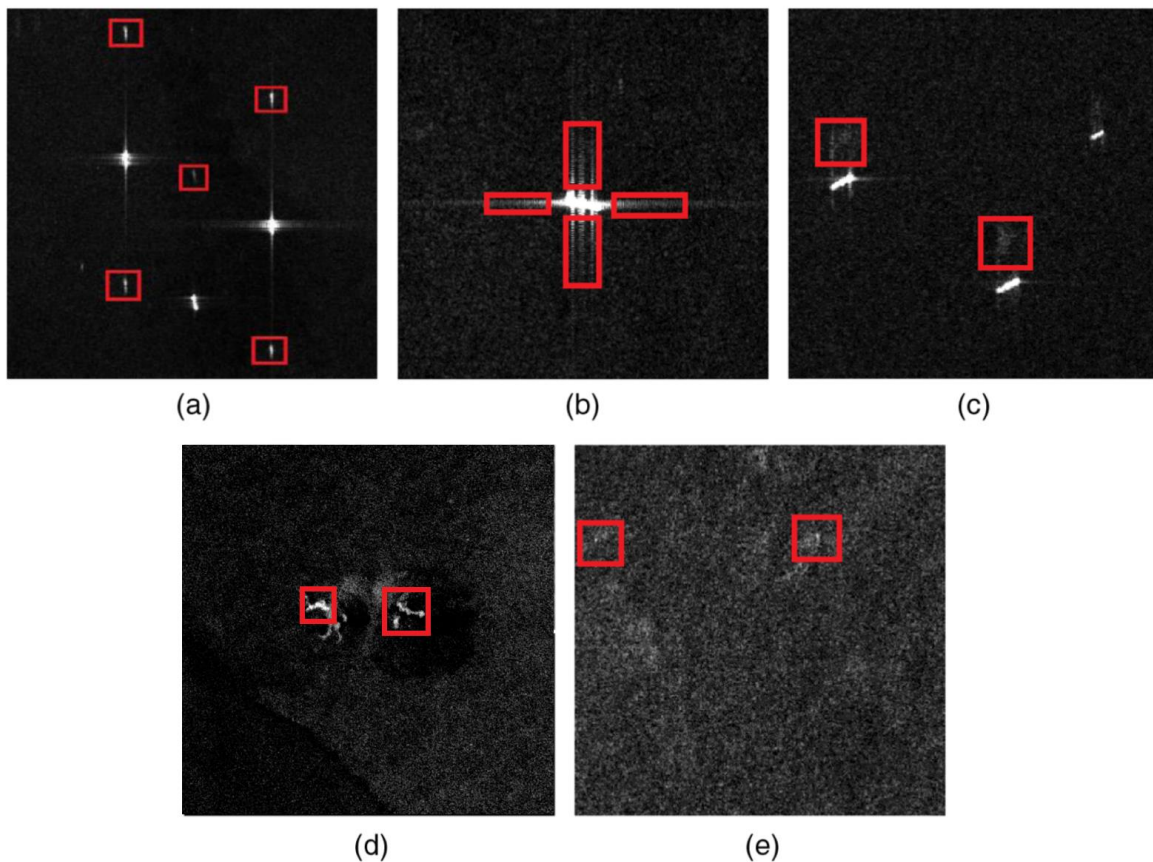
Além do ruído *speckle*, problemas de qualidade podem surgir por feições introduzidas nas imagens. Estas feições podem possuir caráter local, ou estar distribuídas ao longo de toda a cena. A seguir, distorções comumente encontradas são descritas:

- a) Ambiguidade azimutal. Ambiguidades apresentam-se nas imagens como feições “fantasmas”, deslocadas na direção azimute em relação ao alvo real (Figura 2.7a). Estas feições tendem a se tornar mais proeminentes em situações de alto contraste entre o alvo e o *clutter* marinho. Fundamentalmente, é uma distorção que depende da Frequência de Repetição de Pulso (PRF) utilizada no sistema SAR (MOREIRA, 1993; VESPE; GREIDANUS, 2012; ESPESETH et al., 2020);
- b) Lóbulos laterais. Neste caso, ruídos provenientes de fontes afastadas da direção de interesse são introduzidos na imagem devido a energia capturada pelos lóbulos laterais da antena (SMITH, 2001). Estas feições possuem aparência de “cruz”, orientada em direção alcance(*range*) e azimute (Figura 2.7b);
- c) Desvio azimutal. Este é ocasionado por objetos em movimento, nos quais introduzem componente adicional *Doppler* ao radar (WOODHOUSE, 2006). Em embarcações, este efeito torna-se aparente devido ao seu deslocamento azimutal em relação a esteira de turbulência (Figura 2.7c);
- d) Células de chuva. Geralmente acompanham feições de alto brilho com manchas escuras adjacentes, sendo causadas pelo bloqueio do sinal

radar (Figura 2.7d). Estas feições são encontradas em imagens SAR de variadas frequências, possuindo padrão circular em ambientes de ventos fracos, e elíptico em condições de ventos fortes (ALPERS et al., 2016; ULABY; LONG, 2014);

- e) Estado do mar. Conforme explicitado anteriormente, a superfície marítima varia continuamente ao longo do tempo, de forma que variações na rugosidade da superfície ocasionam mudanças no retroespalhamento. Particularmente em condições de fortes ventos e baixos ângulos de incidência (FICHE et al., 2015), picos do sinal proveniente do mar (*sea spikes*) podem apresentar aparência de alvos (Figura 2.7e).

Figura 2.7 - Fontes de distorções em imagens SAR: (a) Ambiguidade azimutal, (b) Lóbulos laterais, (c) Desvio azimutal, (d) Células de chuva e (e) Estado do mar.



Fonte: Adaptado de Li et al. (2019).

Ressalta-se outros elementos encontrados na literatura que ocasionam artefatos, como: Características geométricas de embarcações (PICHEL et al., 2004), proximidade da costa (STASOLLA et al., 2016), resolução da imagem (VACHON et al., 1997) e interferência de radiofrequências (SANTAMARIA et al., 2017).

2.4 Detecção de alvos marítimos

Objetivando garantir resultados satisfatórios e controle sobre o processo, sistemas de detecção geralmente são divididos em quatro etapas de processamento: Pré-processamento, mascaramento terrestre, pré-seleção e discriminação (CRISP, 2004). A junção destas duas últimas etapas forma o detector. A seguir, cada etapa será discutida.

2.4.1 Pré-processamento e mascaramento terrestre

A finalidade do pré-processamento consiste na preparação das imagens de modo a otimizar as etapas subsequentes. Ao calibrar as imagens, é realizada a conversão dos valores digitais para valores radiometricamente calibrados, garantindo a consistência dos dados e permitindo extração de medidas físicas da imagem (SCHWEGMANN, 2018). Outra etapa consiste na geolocalização, que visa localizar as imagens em um sistemas de coordenadas, permitindo assim a extração da posição geográfica dos alvos (GREIDANUS; SANTAMARIA, 2014). Processos adicionais nesta etapa podem consistir da remoção do ruído termal do sensor, que afeta sobretudo os canais polarimétricos cruzados (PARK et al., 2018), além da aplicação de arquivos de órbita para obter maior acurácia posicional da imagem (FILIPPONI, 2019).

O mascaramento terrestre tem o objetivo evitar a inclusão de objetos terrestres de alta refletividade. Na faixa costeira, tais objetos podem ser representantes infraestruturas portuária, pesqueira e de contenção de sedimentos (WANG et al., 2014). Para isto, três abordagens de mascaramento são normalmente

empregadas: Utilização de dados vetoriais da linha de costa (SANTAMARIA et al., 2017), Modelos Digitais de Elevação (MDE) (IERVOLINO et al., 2015) ou detecção automática de linha de costa (NUNZIATA et al., 2016).

2.4.2 Pré-seleção

A etapa de pré-seleção (do inglês, *prescreening*) tem como finalidade a identificação de potenciais alvos nas imagens. Os algoritmos de pré-seleção podem ser baseados em limiarização global ou limiarização adaptativa. Tendo em vista que, para uma mesma cena, o *clutter* marinho pode possuir alta variabilidade, a limiarização global é raramente utilizada (CRISP, 2004). Com isso, o CFAR ou Taxa de Falso Alarme Constante (*Constant False Alarm Rate*) tem se demonstrado o método adaptativo mais empregado na detecção de alvos marítimos e apresenta as vantagens de menor custo computacional e a não-degradação da resolução espacial (CRISP, 2004; IERVOLINO, 2016; QUINA et al., 2019). O processo descrito nesta subseção refere-se ao CFAR em sua forma convencional e em El-Darymli et al. (2013) é encontrada revisão detalhada das suas modificações.

A técnica CFAR consiste em buscar, tendo por base a distribuição estatística do *clutter* marinho, *pixels* anormalmente brilhantes através de janelas móveis. Na Figura 2.8 é ilustrada a estrutura das janelas que compõem um CFAR convencional. Neste caso, a janela do alvo contém os *pixels* sob teste, e localiza-se centralmente à janela *background*. No meio destas encontra-se a janela de guarda, que auxilia para que os *pixels* dos alvos não contaminem as estatísticas extraídas na janela de *background*. A escolha do tamanho destas janelas deve ser relacionada à resolução espacial da imagem e ao tamanho dos alvos a serem detectados (CRISP, 2004).

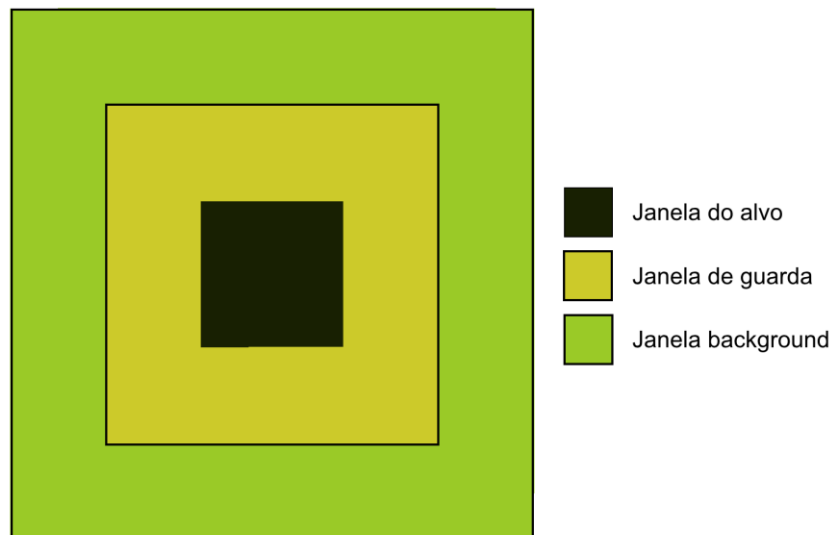
À medida que as janelas percorrem a imagem, os valores dos *pixels* do *background* são extraídos e uma Função de Densidade de Probabilidade (PDF) é utilizada para modelar estatisticamente os valores do *clutter* marinho. Então, é

estabelecido um limiar de separação dos alvos, de modo que a porcentagem dos *pixels* que encontram-se acima do limiar se mantenha constante (LEHNER et al., 2014). Nesse caso, para uma determinada PDF $f(x)$, os seus parâmetros necessitam ser estimados para calcular o limiar T , e o usuário deve escolher um determinado valor de Probabilidade de Falso Alarme (PFA). T pode ser calculado adaptativamente com a seguinte equação:

$$PFA = 1 - \int_{-\infty}^T f(x) dx = \int_T^{\infty} f(x) dx \quad (2.7)$$

O valor de PFA deve ser escolhido levando em conta um número aceitável de falsos alarmes na imagem (GREIDANUS et al., 2017). Sendo assim, um determinado usuário pode decidir aceitar maior quantidade de falsos alarmes ao escolher altos valores de PFA (o que leva a menores valores T) e então lidá-los em etapa posterior de discriminação; ou por outro lado, o usuário pode utilizar baixos valores de PFA (leva a maiores valores T) para restringir a quantidade de falsos alarmes, com o custo de perder alvos de menor retroespalhamento.

Figura 2.8 - Estrutura de janelas do CFAR.



Fonte: Adaptado de El-Darymli et al. (2013).

Diversos modelos de PDF ($f(x)$ na Equação 2.7) são utilizados neste processo, de modo que inexistente um único modelo que se encaixa em todos os casos. Em

imagens de baixa resolução (ou alto número de *looks*), a distribuição Gaussiana (ou Normal) é comumente utilizada (CRISP, 2004). Entretanto, com o aumento da resolução espacial de imagens SAR, distribuições não-gaussianas foram introduzidas incluindo a Weibull, Rayleigh e Log-normal. Distribuições como G^0 , K e Gama Generalizada (GFD) possuem maior complexidade na estimativa dos parâmetros, porém tendem a possuir melhor performance em manter uma taxa de falsos alarmes constante (QIN et al., 2013). Dependendo da distribuição, a estimativa dos seus parâmetros pode ser obtida de forma analítica ou numérica. Em estudo de Gao (2010) é fornecida síntese dos principais modelos utilizados e seus casos de aplicação.

Ressalta-se que para determinar PDF de melhor encaixe, comumente se utiliza medidas de aderência, a exemplo da distância Kolmogorov-Smirnov e da divergência Kullback-Leibler, a partir de amostras de *clutter* marinho extraídas das imagens (VACHON et al., 2007; LORENZZETTI et al., 2010).

Para exemplificar o processo de modelagem, podemos tomar o caso do *clutter* marinho em imagens SAR amplitude, o qual se utiliza normalmente a distribuição Rayleigh. Assim, para uma desejada PFA é possível obter analiticamente o limiar de detecção T com a equação (WARD et al., 2013):

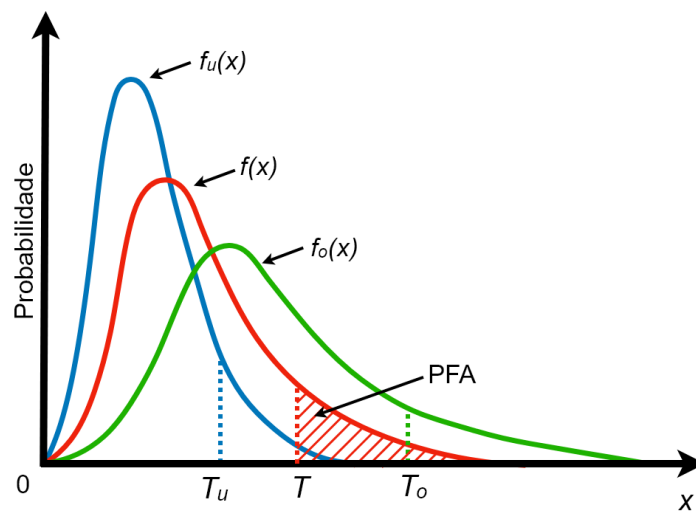
$$T = \sqrt{-x \log_e(PFA)} \quad (2.8)$$

onde x é a amplitude média do *clutter* marinho, extraído da janela *background*. Dessa forma, o pixel que está sob teste no CFAR pode ser comparado com o limiar e definido se é alvo ou não. A partir da equação, pode ser notado que diminuindo a PFA o limiar T tende a aumentar gradualmente, fazendo com que alvos sejam identificados como *clutter* marinho.

Ao ponto que o limiar é adquirido adaptativamente sobre a imagem, a sua estimativa pode não ser perfeita devido às mudanças do *clutter* marinho. Na Figura 2.9 é ilustrado o efeito da subestimativa (*underfitting*) e a sobrestimativa

(*overfitting*) do limiar. Uma vez definida a PFA e obtido T (com a Equação 2.8, se o modelo escolhido for o Rayleigh), podemos tomar $f(x)$ (linha vermelha) como a PDF que encaixa-se perfeitamente ao histograma dos dados. Agora, se o encaixe falha e assume a forma de $f_u(x)$ ou $f_o(x)$, uma quantidade excessiva de falsos alarmes seria admitida para o limiar T_u , enquanto o limiar T_o levaria a uma redução excessiva ou perda de alvos reais. Ou seja, nestes casos o processo de detecção falha em manter-se constante.

Figura 2.9 - Influência da subestimativa (PDF azul) e sobrestimativa (PDF verde) do limiar correto (PDF vermelha) de detecção.



Fonte: Adaptado de Qin et al. (2013).

2.4.3 Discriminação

Adiante, na etapa de discriminação objetiva-se a redução dos falsos alarmes que, por ocasião, sejam causados pelas distorções apresentadas na Seção 2.3.2. Em contraste à etapa de pré-seleção, esse é um processo que tende a possuir elevado custo computacional, porém é mais eficiente na redução de falsos alarmes (CRISP, 2004). Diversas abordagens são encontradas na literatura, tais como: Remoção de ambiguidade azimutal pelo cálculo do seu deslocamento (VELOTTO et al., 2014), detecção baseada na esteira de turbulência de embarcações (WANG et al., 2017), e utilização de técnicas de aprendizagem de máquina e visão computacional (SCHWEGMANN et al., 2016; AO et al., 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

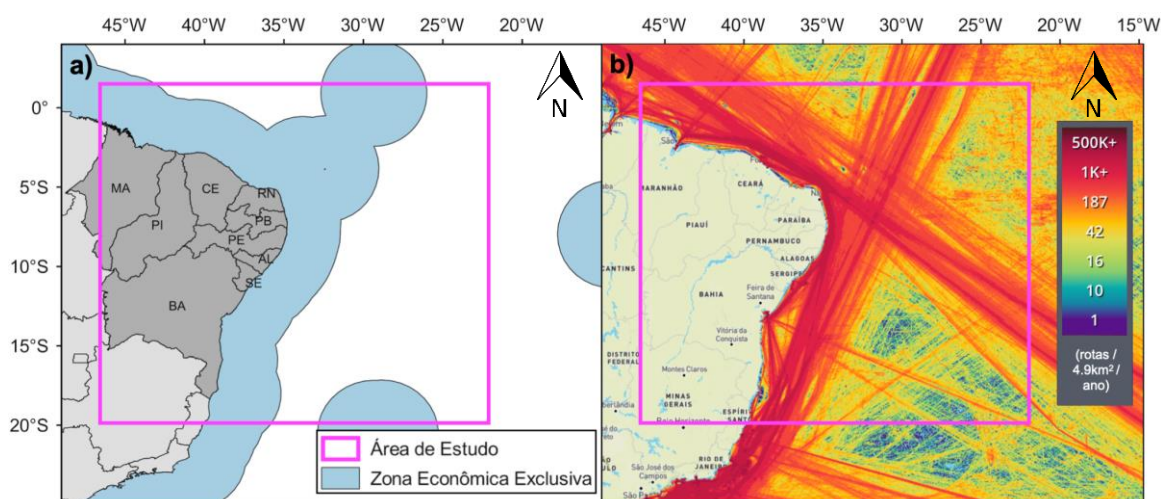
A área de estudo está localizada em região costeira e oceânica adjacente da região Nordeste do Brasil. A área compreende a costa dos Estados do Maranhão, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, além de parte do Espírito Santo e da ZEE brasileira (Figura 3.1a). A escolha desta área foi motivada pelos eventos de aparição de óleo bruto nas praias dos Estados, acima mencionados, no ano de 2019. Adicionalmente, a escolha se deu pela área ser caracterizada por uma alta densidade de rotas marítimas, movimentadas por embarcações que viajam em direção aos continentes europeu, africano, ao Mar do Caribe e aos portos da região Sul e Sudeste do Brasil (Figura 3.1b).

Ademais, do ponto de vista ambiental a região de estudo abriga Áreas de Proteção Ambiental (APAs) marinhas e ecossistemas tropicais de alta biodiversidade, tais como estuários, manguezais, praias arenosas e recifes de corais (LEÃO; DOMINGUEZ, 2000; SOARES et al., 2016). Em termos demográficos e econômicos, a região apresenta na sua faixa costeira uma alta densidade populacional e altos níveis de desigualdade social e pobreza, o que a torna vulnerável a danos causados por eventuais acidentes e descargas ilegais em alto mar (SOARES et al., 2020; ESTEVO et al., 2021).

A variabilidade sazonal dos ventos na região está primariamente associada à migração meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), determinada pelos padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre a bacia do oceano Atlântico Tropical (FERREIRA; MELLO, 2005). Ressalta-se outros sistemas atmosféricos atuantes na região, como as frentes frias, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e as brisas marítimas e terrestres. De acordo com Silva et al. (2017), os ventos são bem definidos em duas estações: A primeira possui ventos de menor intensidade durante os meses de fevereiro a

maio, alcançando velocidades médias mensais entre 5,1 a 6,3 m/s. A segunda estação, de maior magnitude dos ventos, ocorre entre os meses de julho a outubro e possui velocidades médias mensais entre 7,9 a 8,8 m/s (série histórica 1987-2011).

Figura 3.1 - (a) Localização da área de estudo e (b) Densidade de rotas marítimas no ano de 2020.



Fonte: (a) Produção do autor e (b) MarineTraffic (2021).

Tendo em vista esta variabilidade, o presente trabalho tem como um dos objetivos gerar um conjunto de dados representativo dos diferentes estágios de geração e formação de ondas (descritos na Seção 2.1). Para isso, imagens SAR e dados dos campos de ventos e ondas foram agrupados para a área de estudo.

3.2 Dados utilizados

3.2.1 Imagens SAR

Para este estudo foram utilizados dados SAR provenientes da constelação Sentinel-1. O Sentinel-1 é operado pela Agência Espacial Europeia (ESA) e consiste nos satélites Sentinel-1A (S1A) e Sentinel-1B (S1B), que estão em operação desde as datas 03/10/2014 e 26/08/2016, respectivamente. Os satélites operam em órbita quase-polar e heliossíncrona, em altitude de 693 km

e resolução temporal de 12 dias (6 dias de forma conjunta). O SAR a bordo destes satélites utiliza banda C (comprimento de onda de 5,54 cm), sendo capaz de transmitir em polarização vertical (V) ou horizontal (H) e receber simultaneamente em V ou H. Assim, para polarização dual as possíveis combinações são: HH+HV ou VV+VH. De forma geral, a combinação HH+HV é adquirida em regiões polares, enquanto a VV+VH é utilizada para as demais regiões do planeta (ESA, 2019).

As imagens utilizadas possuem formato *Ground Range Detected* (GRD) e são adquiridas em modo IW (descrito na Subseção 2.2.4), o qual proporciona dados de amplitude, divididos em três sub-cenas (IW1, IW2, IW3) e possui largura de faixa imageada de 250 km. O coeficiente Sigma-zero Equivalente ao Ruído de (*Noise Equivalent Sigma Zero* - NESZ), que mede a sensibilidade do radar ao ruído de base do sistema, para este produto é de no máximo -22 decibéis (dB) (GREIDANUS; SANTAMARIA, 2014). Este máximo valor de NESZ encaixa-se dentro das exigências de detecção de embarcações postas em estudo de Vespe e Greidanus (2012). Na Tabela 3.1 são descritas as demais características das imagens GRD do Sentinel-1 utilizadas. Também, foi dado foco às imagens de polarização VV por possuírem maior relação sinal/ruído, e também por representarem feições do oceano de forma mais fidedigna que aquelas visíveis na polarização VH (ULABY; LONG, 2014).

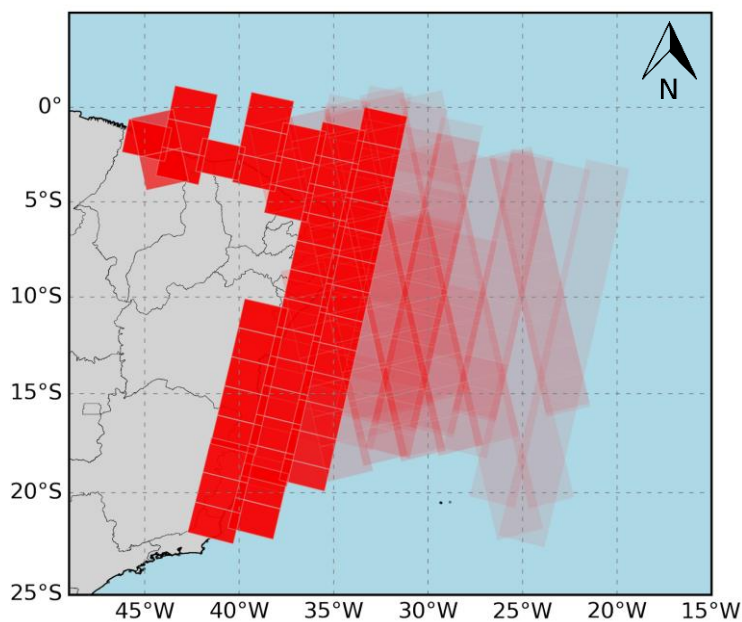
Tabela 3.1 – Especificações das imagens Sentinel-1 utilizadas.

Produto	IW GRD
Polarização	VV
Largura de faixa imageada	250 km
Bits por pixel	16
Espaçamento dos pixels (m)	10 x 10 (<i>range</i> x <i>azimute</i>)
Número de <i>looks</i>	5 x 1 (<i>range</i> x <i>azimute</i>)
NESZ	< -22 dB
Ângulos de Incidência	30,9°-45,6°
Download dos dados	<i>Sentinel Hub</i> (ESA)

Fonte: Produção do autor.

No total, foram utilizadas 446 imagens, das quais 344 são do S1A e 102 são do S1B. Na Figura 3.2 é apresentada a distribuição espacial das imagens. A aquisição de imagens Sentinel-1 em regiões de mar aberto na região é incomum e as imagens se concentram majoritariamente sobre as regiões costeiras. Porém notou-se que nos meses de outubro a novembro de 2019 foram realizados esforços adicionais de aquisição de imagens em mar aberto no Nordeste Brasileiro por parte da ESA (NOBRE et al., 2021, submetido à publicação). Buscando tomar proveito disso, foram selecionadas imagens distribuídas ao longo dos meses de abril a novembro de 2019, resultando no total de 446 imagens.

Figura 3.2 - Distribuição espacial das imagens utilizadas (446). Retângulos indicam a área de cobertura. Cores em vermelho intenso indicam áreas de alta densidade de imagens.



Fonte: Produção do autor.

3.2.2 Dados de ventos e ondas

Para o estudo foram utilizados os produtos de reanálise atmosférica global ERA5, que é a mais recente reanálise produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), e sucessor da reanálise ERA-Interim. O produto oferece estimativas horárias para variáveis terrestres,

atmosféricas e do oceano, e é usualmente usado para validação de produtos de sensoriamento remoto.

A reanálise ERA5 combina uma vasta quantidade de observações históricas e gera estimativas globais utilizando técnicas de assimilação de dados (HERSBACK et al., 2020). Na Tabela 3.2 são descritos detalhes das variáveis extraídas dos produtos ERA5.

Os dados utilizados do ERA5 foram selecionados espaço-temporalmente de acordo com o momento de aquisição e a cobertura das imagens SAR. Devido à resolução temporal de 1h, a diferença temporal entre as imagens e os dados do ERA5 são de no máximo 0,5h. Ressalta-se que apesar das diferentes resoluções espaciais das imagens Sentinel-1 e dos produtos ERA5 (dezenas de metros para o modo IW do Sentinel-1 e ~28km ou ~56km, em faixa equatorial, para o ERA5), em escala regional esta comparação ainda é compatível (MIGLIACCIO et al., 2007; NUNZIATA et al., 2012; JATIAULT et al., 2017).

Tabela 3.2 – Especificações dos produtos ERA5 (ventos e ondas).

	Ventos	Ondas
Resolução espacial	0,25° (~ 28km)	0,50° (~ 56km)
Resolução temporal	1h	1h
Variáveis utilizadas	Componentes <i>u</i> e <i>v</i> do vento em altura de 10 m	Período de onda no pico do espectro (<i>P</i>)
Dados de entrada	Escaterômetros, radiômetros passivos e bóias	Campos de correntes, ventos e batimetria
Download dos dados	https://cds.climate.copernicus.eu	
Referência	Hersback et al. (2020)	

Fonte: Produção do autor.

3.2.3 Dataset de embarcações - OpenSARShip

Com o fim de analisar o retroespalhamento dos alvos detectados pelo CFAR em relação ao de embarcações reais, foi utilizado o *dataset* OpenSARShip⁴. O OpenSARShip foi elaborado com o intuito de prover à comunidade científica uma base de dados específica de embarcações em imagens SAR do Sentinel-1, permitindo análises das suas geometrias e espalhamento (HUANG et al., 2018). As amostras (*ship chips*) são dispostas radiometricamente calibradas e em formato *GeoTIFF*. Além disso, elas são integradas com AIS, o que permite extrair informações adicionais como comprimento e tipo de embarcação. Neste trabalho foi utilizada a versão 2.0, que inclui informações sobre interferência de mais de um navio nas amostras (LI et al., 2017b). Assim, é permitido que apenas amostras contendo uma embarcação sejam utilizadas. Amostras deste *dataset* estão dispostas na Figura A.1 (Apêndice A ao fim do documento). Ao todo, foram selecionadas 6895 amostras sem interferência para a polarização VV.

3.2.4 Sistema de Identificação Automática – AIS

Para fins de validação dos resultados do CFAR, foram utilizados dados do Sistema de Identificação Automática (do inglês, *Automatic Identification System* - AIS) de embarcações. O AIS é um sistema de comunicação voltado à identificação de embarcações e tem o propósito de evitar colisões e auxiliar nas operações de busca e salvamento. O equipamento AIS instalado em embarcações transmite em banda *Very High Frequency* (VHF) e utiliza Sistemas de Posicionamento Global (GPS) para determinar a sua posição. De acordo com a Convenção SOLAS (do inglês, *Safety of Life at Sea*), o uso do AIS é mandatório para os seguintes tipos de embarcações: Navios de tonelage bruta maior que 300 em rotas internacionais, navios cargueiros de tonelage bruta maior que 500 e navios de passageiros (IMO, 2014).

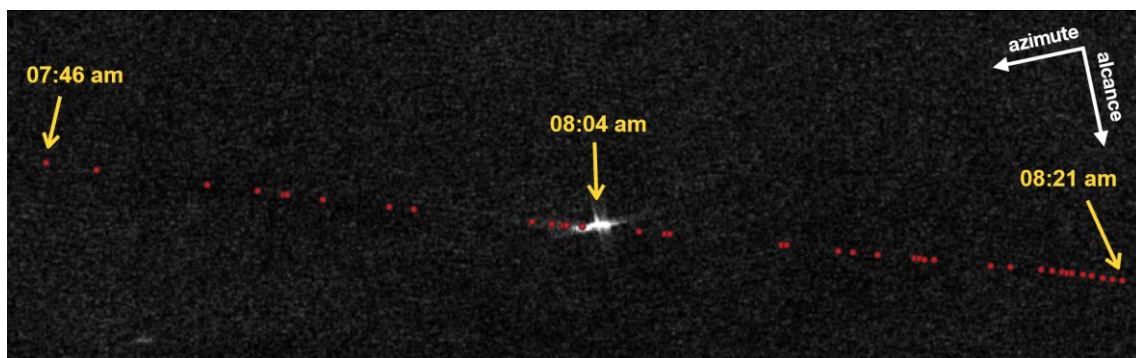
Para este estudo, foram cedidos dados de AIS pelas empresas HisdeSat e pelo Centro Integrado de Segurança Marítima (CISMAR – Marinha do Brasil). O AIS

⁴ Acesso disponível em <<https://opensar.sjtu.edu.cn/>>. Acesso em 21/12/2021.

proveniente da HisdeSat é adquirido por uma constelação de 60 micro-satélites, que orbitam em 650 km de altitude e cobrem uma faixa de 5000 km na superfície (MILER; BUJAK, 2013). Neste estudo optou-se pela utilização dos dados AIS da HisdeSat devido a sua alta frequência temporal, de intervalo de tempo quase-real (< 3 min) entre as mensagens (Figura 3.3). Os dados recebidos são referentes ao período de dezembro/2019. As informações associadas às estas mensagens AIS incluem:

- MMSI: Identificação única associada à cada dispositivo AIS;
- IMO: Identificação única associada ao registro da embarcação;
- TIME: Informação de data e hora associada à mensagem;
- LAT: Latitude em que a mensagem foi reportada (graus decimais);
- LON: Longitude em que a mensagem foi reportada (graus decimais);
- TYPE: Tipo de embarcação.

Figura 3.3 - Exemplo de embarcação em imagem Sentinel-1 VV (aquisição às 08:04am) colocada com mensagens AIS HisdeSat (pontos vermelhos). Central à figura há uma embarcação de 181 m de comprimento.



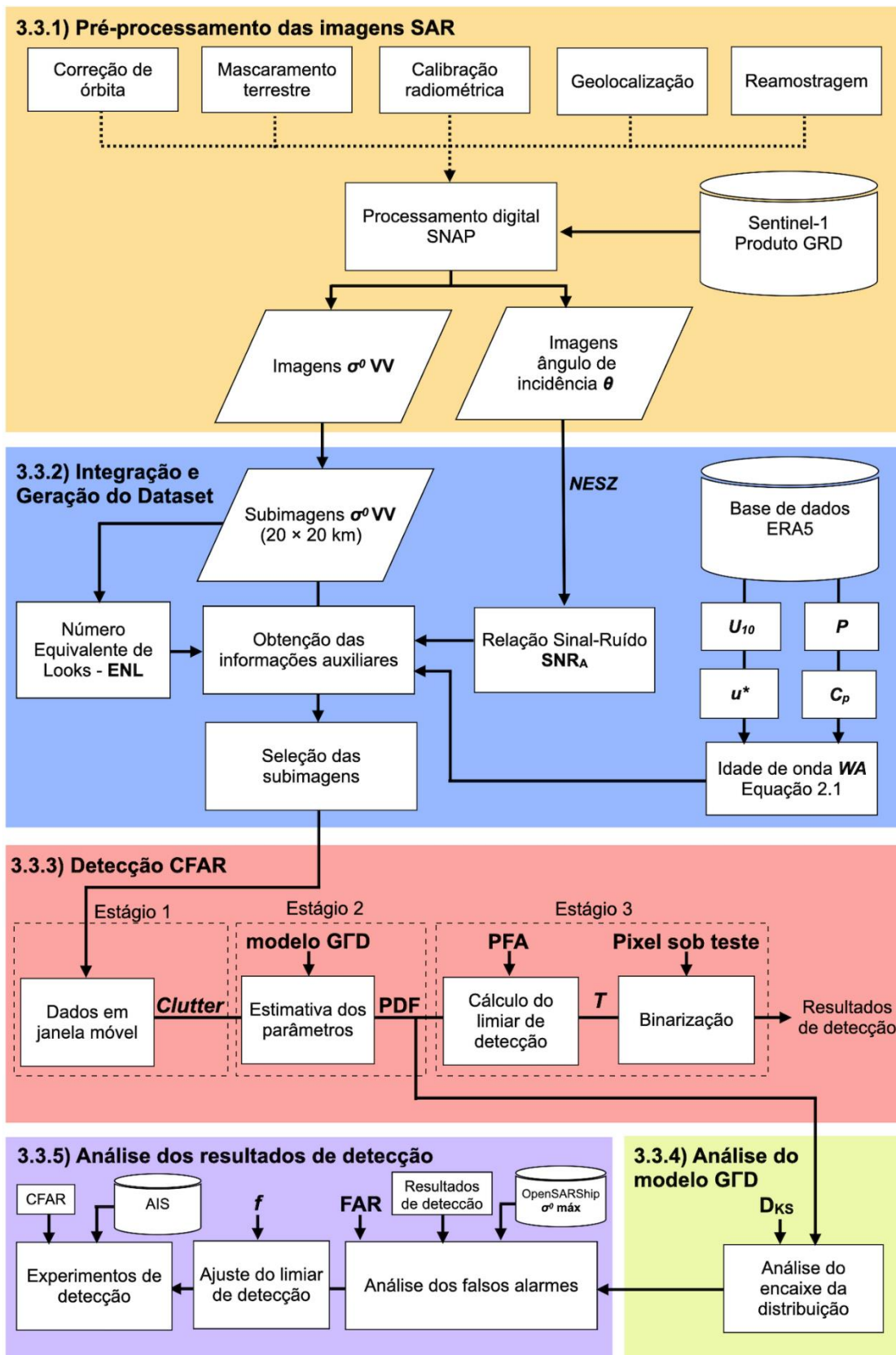
Fonte: Produção do autor.

3.3 Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo é ilustrada, de forma simplificada, na Figura 3.4. Nesta seção, as cinco principais etapas serão detalhadas, consistindo em:

- 1) Pré-processamento das imagens SAR;
- 2) Geração de *dataset* de imagens SAR representativo de diversas condições ambientais (ventos e ondas) e geometria de aquisição (ângulo de incidência do radar);
- 3) Detecção CFAR baseada na distribuição estatística gama generalizada (GFD);
- 4) Análise do comportamento da GFD;
- 5) Análise dos resultados da detecção CFAR.

Figura 3.4 - Fluxograma das principais etapas metodológicas.



Fonte: Produção do autor.

3.3.1 Pré-processamento das imagens SAR

Como primeira etapa, as imagens SAR foram pré-processadas para a obtenção do coeficiente de retroespalhamento σ^0 na polarização VV. Esta etapa foi realizada por meio do *software* SNAP (sigla para *Sentinel Application Platform*), versão 8.0, desenvolvido pela ESA. Tendo em vista o grande volume de imagens, os procedimentos desta etapa foram realizados com a ferramenta *Batch Processing*, que possibilita a execução de fluxogramas de processamento de forma iterativa e automática.

O procedimento inicial do pré-processamento consiste na aplicação dos arquivos de órbita para cada imagem. As informações de órbita do satélite são adquiridas no momento de aquisição das imagens SAR, porém os pontos precisos de efeméride do satélite são disponibilizados apenas dias ou semanas após a geração do produto (GMV, 2019). Este procedimento realiza *download* e atualiza as informações de órbita disponibilizadas nos metadados das imagens. Com isso, é permitida maior acurácia posicional das imagens, favorecendo o seu cruzamento com a posição das embarcações nas mensagens AIS.

A maior parte das imagens situa-se em regiões de interface mar-terra (ver Figura 3.2). O próximo procedimento é o de mascaramento terrestre, que visa isolar os pixels representantes do oceano. Para tornar os pixels terrestres em elementos não-computáveis e assim não influenciar o processo de detecção posteriormente, foi aplicada uma máscara através de arquivo vetorial (*shapefile*) dos limites territoriais do Brasil, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foi aplicado um *buffer* de 250 m no arquivo vetorial para evitar a inclusão de elementos brilhantes representantes de estruturas próximas à linha de costa (GREIDANUS et al., 2017).

Em seguida, o procedimento de calibração converte os valores digitais dos pixels, que representam valores de intensidade do sinal, para valores de retroespalhamento σ^0 radiometricamente calibrados. Este procedimento é

realizado através dos fatores de calibração incluídos nos metadados das imagens, e permite que medidas quantitativas dos alvos e da superfície do oceano possam ser extraídas e comparadas entre diferentes sensores (SCHWEGMANN, 2018).

Adiante, as imagens foram geolocalizadas e projetadas para o sistema de referência WGS84 utilizando a ferramenta *Ellipsoid-Correction*. Inicialmente, as imagens representam a geometria do radar (alcance, azimuth) e este procedimento realiza conversão de modo que estas passam a representar sua localização na superfície da terra (latitude, longitude). Esta conversão é sobretudo importante tendo em vista que as imagens serão confrontadas com as coordenadas geográficas dos alvos presentes no AIS em etapa posterior. Foi utilizado o método de reamostragem vizinho mais próximo (*nearest neighbour*, em inglês) e o resultado consistiu em imagens de resolução espacial de 10 m. Em adição a isso, foram geradas camadas extras às imagens, representantes do ângulo de incidência θ para cada pixel, para posterior extração das faixas de alcance que as regiões das imagens são pertencentes.

Finalizando a etapa de pré-processamento, as imagens foram reamostradas por intermédio de janela móvel de tamanho 3×3 , resultando em resolução espacial de 30 m. A reamostragem é baseada no compromisso entre a redução do ruído *speckle* e a degradação mínima da resolução espacial. Em outras palavras, busca-se degradar a resolução para que o *speckle* seja reduzido, porém sem causar a perda de detecção de alvos relevantes.

3.3.2 Integração dos dados SAR, ventos e ondas

Antes de aplicar algoritmo de detecção sobre as imagens SAR pré-processadas, estas foram integradas com as informações ambientais (ventos e ondas) e do sensor (ângulo de incidência e ruído) em um único *dataset*. Esta etapa tem o propósito de gerar um *dataset* que cubra uma diversidade de condições

ambientais e de geometria de aquisição do radar. Esta etapa foi realizada com auxílio de linguagem de programação *Python*.

As imagens pré-processadas possuem tamanho que chega a cobrir área de ~250 × 200 km, e para uma mesma imagem, diferentes condições ambientais podem ser encontradas. Com o intuito de facilitar a etapa de detecção e adquirir informações locais nas imagens, foi realizada a divisão das imagens em subimagens, em partes iguais de tamanho 20 × 20 km (equivalente a 667 × 667 pixels). Essa subdivisão segue o trabalho de Wang et al. (2019), no qual utilizou imagens Sentinel-1 em modo *WaveMode* (explicado na Subseção 2.2.4) para classificar fenômenos geofísicos sobre o oceano.

O próximo procedimento foi obter as informações auxiliares dos produtos ERA5 (ventos e ondas) e as informações do sensor (ângulo de incidência e ruído) correspondentes a cada subimagem. Especificamente, para os campos meteoceanográficos e de ângulo de incidência foi realizada busca pelo pixel mais próximo às coordenadas centróide de cada subimagem. As informações foram extraídas na seguinte sequência:

- 1) Obtenção da magnitude de vento em altura de 10m (U_{10}). Neste caso, o cálculo se dá a partir das componentes u e v extraídos do produto ERA5, utilizando a seguinte equação:

$$U_{10} = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad [m/s] \quad (3.1)$$

- 2) Obtenção do período de onda no pico do espectro (P). Neste caso, P é extraído diretamente dos campos de onda do produto ERA5 e possui unidade de segundos (s). Este parâmetro representa o período das ondas oceânicas mais energéticas e está associado aos marulhos (*swell*);
- 3) Cálculo da idade de onda WA . O cálculo se dá com a Equação 2.1; A velocidade de fricção do vento, u^* , é estimada utilizando U_{10} nas Equações 2.2 e 2.3. A velocidade de fase c_p para águas profundas

independe da batimetria e pode ser estimada a partir do período de pico P com a relação de dispersão das ondas:

$$C_p = \frac{g}{2\pi} P \text{ [m/s]} \quad (3.2)$$

onde $g=9,8 \text{ m/s}^2$ e é a aceleração da gravidade. A partir disso, as imagens foram classificadas de acordo com Komen et al. (1994): Vagas jovens ($WA \leq 10$), vagas velhas ($10 < WA \leq 35$) e marulhos ($WA > 35$). Na Seção 2.1 encontra-se descrição destas classes;

- 4) Obtenção do ângulo de incidência θ . A partir das imagens θ geradas no pré-processamento, o ponto centróide (latitude, longitude) da subimagem foi utilizado para extrair da imagem o ângulo de incidência θ correspondente. Em seguida, as imagens foram classificadas em três faixas de alcance: Alcance próximo ($30^\circ < \theta \leq 35^\circ$), alcance médio ($35^\circ < \theta \leq 40^\circ$) e alcance longo ($40^\circ < \theta \leq 45^\circ$).

3.3.2.1 Seleção das subimagens

Para avaliar o comportamento da distribuição estatística na superfície marítima, primeiramente buscou-se isolar a influência de outras partes. Especificamente, buscou-se selecionar as subimagens representantes de *clutter* marinho homogêneo, isto é, que representem sinal puramente proveniente da superfície marítima. Além da exclusão de subimagens localizadas em continente ou na linha de costa, foram realizados os seguintes procedimentos:

- 1) Cálculo do Número Equivalente de Looks (ENL). O ENL indica o grau de homogeneidade do σ^0 na subimagem, de forma que menores valores de ENL tendem a representar subimagens com presença de alvos metálicos ou feições de alto brilho (distorções discutidas na Seção 2.3.2). O seu cálculo é realizado a partir do σ^0 observado na subimagem com a equação (VESPE; GREIDANUS, 2012):

$$ENL = \left(\frac{M}{DP} \right)^2 \quad (3.3)$$

onde M e DP é a média e desvio padrão do coeficiente de retroespalhamento σ^0 da subimagem, respectivamente. Para a seleção de imagens homogêneas, foi utilizado critério de $ENL > 2,0$, que foi determinado a partir do histograma ENL das subimagens.;

- 2) Cálculo da Relação Sinal-Ruído Aditiva (SNR_A). O retroespalhamento observado nas imagens SAR possuem ruído aditivo de fundo, sendo este composto predominantemente por ruído termal (PARK et al., 2018). Assim, valores de σ^0 menores que o ruído não serão distinguíveis nas subimagens. Este ruído é representado pelo NESZ, que embora seu máximo valor seja de -22 dB para o Sentinel-1, este varia ao longo da faixa de alcance, requerendo assim sua estimação para cada subimagem. O NESZ foi obtido em unidade linear a partir da equação (ZHANG et al., 2019):

$$NESZ = \frac{\eta}{C} \quad (3.4)$$

onde η é o fator de calibração de ruído e C é o fator de calibração do σ^0 , ambos disponibilizados nos metadados das imagens. A partir disso, SNR_A foi estimada com a equação (ESPESETH et al., 2020):

$$SNR_A = \frac{M - NESZ}{NESZ} \quad (3.5)$$

dessa forma, foram selecionadas subimagens em que $SNR_A > 1$ ($SNR_A > 0$, em dB), ou em outras palavras, o sinal retroespalhado médio da subimagem está em nível acima do ruído do sensor.

Conforme as informações auxiliares respectivas às subimagens foram adquiridas, estas foram inseridas em tabela de forma a compor os dados necessários para as análises realizadas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Exemplo de tabela de atributos das subimagens.

ID Sub-imagem	Data e hora (UTC-0)	U_{10} (m/s)	P (s)	WA	θ (°)	ENL	NESZ (dB)	SNR_A (dB)
1	02/03/2019 08:00:08	2.7	16.9	98.7	32.8	2.7	-30.6	7.0
2	12/08/2019 07:55:13	8.8	9.6	14.5	44.7	3.3	-29.3	10.2
3	01/11/2019 20:33:15	5.7	16.6	42.2	38.0	3.0	-28.1	5.9
4	20/11/2019 20:26:58	7.5	12.0	21.9	36.2	2.8	-25.0	7.5

Fonte: Produção do autor.

3.3.3 Detecção CFAR baseada na distribuição estatística Gama Generalizada - GFD

Nesta subseção, a metodologia proposta para a detecção de alvos é apresentada. A detecção é baseada no algoritmo CFAR, o qual possui três estágios (Figura 3.4): (1) A seleção do *clutter* marinho; (2) a estimação dos parâmetros da distribuição e (3) o cálculo do limiar de detecção. Todos estes estágios foram implementados em linguagem de programação *Python*, e serão descritos a seguir.

O primeiro estágio se refere à seleção do *clutter* marinho através de janelas móveis e de tamanho fixo. As janelas percorrem a subimagem pixel a pixel (coluna por coluna, linha por linha), de forma que as informações do *clutter* são extraídas da janela *background*. Os tamanhos das janelas foram escolhidos levando em consideração o tamanho típico das embarcações. A seguinte configuração foi adotada: 1x1 (pixel sob teste), 20x20 (janela de guarda) e 100x100 (janela *background*). A janela de guarda foi determinada levando em

conta a maior embarcação presentemente existente⁵. Para a janela *background*, deseja-se cobrir a maior área possível, porém sem que acarrete grande custo computacional; o tamanho escolhido cobre uma área de 3000 × 3000 m central ao alvo, possuindo tamanho suficiente para aferir as propriedades estatísticas do *clutter* local. Para que todos os pixels da subimagem fossem avaliados, as bordas das subimagens foram preenchidas⁶ com elementos não-computáveis (*Not a Number* - NaN).

A ideia geral no segundo estágio do CFAR consiste na estimativa dos parâmetros da distribuição, de forma que se encaixem bem com os dados observados pelo SAR do *clutter* marinho. Neste trabalho foi escolhido o modelo GFD, que tem demonstrado melhor desempenho comparado a vários modelos clássicos, incluindo o Gaussiano, log-normal, Weibull e K (QIN et al., 2013; MARTÍN-DE-NICOLÁS et al., 2015; GAO et al., 2016). Ao longo dos últimos anos, a GFD se estabeleceu como um dos modelos estatísticos de maior flexibilidade e acurácia para imagens SAR de alta resolução (AO et al., 2018; PAPPAS et al., 2020). Também, a escolha GFD se deu para fins de referencia, tendo em vista que efeitos da presença de ondas de longo período em distribuições estatísticas tradicionais para imagens SAR oceânicas foram investigados por Sun et al. (2018), porém se desconhece neste caso estudos sobre a GFD.

A GFD foi inicialmente proposta por Stacy (1962) e sua PDF pode ser definida como (LI et al., 2011):

$$f(x) = \frac{|v|k^k}{\mu\Gamma(k)} \left(\frac{x}{\mu}\right)^{kv-1} \exp\left\{-k\left(\frac{x}{\mu}\right)^v\right\}, \quad |v|, k, \mu, x > 0 \quad (3.6)$$

⁵ Refere-se ao petroleiro de nome *Seawise Giant*, que possui 458 x 68 m (comprimento × largura). Neste caso, 20 pixels (600 m) é o suficiente para resguardar as estatísticas extraídas da janela *background*. <<http://www.aukevisser.nl/supertankers/id23.htm>>. Acesso em 02/09/2021.

⁶ Esta operação é comumente conhecida, em inglês, como *padding*. É uma técnica bastante utilizada, por exemplo, em imagens de entrada para o desenvolvimento de redes neurais convolucionais.

onde ν , k e μ correspondem aos parâmetros potência, forma e escala (em inglês *power*, *shape* e *scale*), respectivamente, e $\Gamma(\cdot)$ é a função Gama. A GFD tem a propriedade de modelar uma variedade de distribuições, incluindo as comumente utilizadas em detecção de alvos no mar; Rayleigh ($\nu=2$, $k=1$), exponencial ($\nu=1$, $k=1$), gama ($\nu=1$), log-normal ($k \rightarrow \infty$) e weibull ($k=1$). Exemplos de como a forma da PDF GFD varia com as diferentes combinações dos parâmetros são apresentados em Pappas et al. (2020).

Para definir os limiares de detecção, é necessário que os parâmetros ν , k e μ primeiramente sejam estimados. Os métodos estimadores convencionais incluem o Método dos Momentos (MoM) e o de Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood* - ML), os quais requerem aproximações numéricas. Neste trabalho foi utilizado o esquema de estimação proposto em Gao et al (2016), que é baseado em Nicolas (2002), e se mostra mais simples, conciso e rápido que os métodos convencionais, devido a permitir a obtenção analítica dos parâmetros. Inicialmente, são computados os três primeiros log-cumulantes empíricos a partir dos dados observados na janela *background*, através das equações:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i \\ c_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - c_1)^2 \\ c_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - c_1)^3 \end{cases} \quad (3.7)$$

onde x_i representa os valores de σ^0 observados na janela de *background* e N é a quantidade de pixels computáveis presentes na janela *background*.

Em seguinte, os parâmetros k , ν e μ são estimados através das equações (GAO et al., 2016):

$$k = \frac{\frac{c_2^3}{c_3^2} + \sqrt{\frac{c_2^6}{c_3^4} + \frac{2c_2^3}{c_3^2}}}{2} \quad (3.8)$$

$$v = \text{sgn}(-c_3) \sqrt{\frac{\psi(1, k)}{c_2}} \quad (3.9)$$

$$\mu = \exp \left\{ c_1 - \frac{\psi(k) - \ln k}{v} \right\} \quad (3.10)$$

onde $\text{sgn}(\cdot)$ é a função sinal, $\Psi(\cdot)$ denota a função digama (derivada logarítmica da função gama), e $\Psi(1, k)$ é a função poligama de primeira ordem (primeira derivada da função digama). Estas funções foram implementadas utilizando as bibliotecas *Numpy* e *Scipy*.

O terceiro estágio consiste no cálculo do limiar de detecção T . À medida que as janelas percorrem a subimagem e os parâmetros são estimados, o limiar de detecção da GFD é calculado adaptativamente com a equação (QIN et al., 2013):

$$T = \begin{cases} \mu \left\{ \frac{1}{k} Q_{Inv}(1 - PFA, k) \right\}^{\frac{1}{v}}, & v > 0 \\ \mu \left\{ \frac{1}{k} Q_{Inv}(PFA, k) \right\}^{\frac{1}{v}}, & v < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

onde $Q_{Inv}(\cdot, k)$ é a função gama inversa incompleta e PFA é o valor da probabilidade de falso alarme escolhida. O cálculo do Q_{Inv} foi implementado utilizando a função *gammaincinv* da biblioteca *Scipy*. A partir da obtenção do limiar, são geradas as subimagens binárias, de forma que os pixels sob teste com valores de $\sigma^0 < T$ são classificados como não-alvos (valor 0), e $\sigma^0 \geq T$, como potenciais alvos (valor 1).

3.3.4 Análise do ajuste do modelo GFD sobre o clutter marinho

Para analisar como o modelo GFD se comporta estatisticamente sob a influência das condições ambientais e de geometria do SAR, foi calculada a medida de

distância Kolmogorov-Smirnov (D_{KS}). Especificamente, esta distância mede o quanto o modelo GFD se ajusta sobre o *clutter* marinho. A D_{KS} foi calculada para todas as subimagens que passaram pela etapa de seleção (Subseção 3.3.2.1), que representam majoritariamente o sinal proveniente da superfície marítima. Para minimizar o tempo computacional, D_{KS} foi calculada em regiões menores (300x300 pixels), selecionadas aleatoriamente em cada subimagem.

O cálculo da D_{KS} é baseado na maior discrepância entre a Função Distribuição Acumulada empírica (CDF_E) (isto é, o histograma dos valores σ^0 observados) e a CDF teórica do modelo GFD (CDF_{GFD}). A CDF_{GFD} foi obtida com a equação (QIN et al., 2013):

$$CDF_{GFD}(x) = \begin{cases} Q_{Inv} \left\{ k \left(\frac{x}{\mu} \right)^v, k \right\}, & v > 0 \\ 1 - Q_{Inv} \left\{ k \left(\frac{x}{\mu} \right)^v, k \right\}, & v < 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

A partir disso, os valores de D_{KS} foram calculados com a seguinte equação (DEVORE; O'SULLIVAN, 2004):

$$D_{KS} = \max |CDF_E(x) - CDF_{GFD}(x)| \quad (3.13)$$

onde $\max|\cdot|$ representa operação de valor máximo absoluto. Dessa forma, quanto menor o valor de D_{KS} , melhor é o ajuste da distribuição no *clutter* marinho.

3.3.5 Análise dos resultados de detecção do CFAR

Nesta subseção será descrita a metodologia para a análise dos resultados de detecção obtidos com a aplicação do CFAR. Devido à limitação de recursos computacionais, não foi possível realizar processamento de todas as subimagens selecionadas. Neste caso, foi utilizado um conjunto de 2700 subimagens, divididas igualmente e selecionadas aleatoriamente para diferentes classes de idade de onda (classes *WA*) e faixas de alcance do radar. Três

aspectos foram investigados nesta análise: (1) O número de falsos alarmes; (2) o retroespalhamento dos falsos alarmes e (3) o ajuste dos limiares de detecção. Adicionalmente foram realizados experimentos para verificar o desempenho do CFAR em situações de alvos reais, validados por AIS.

Como visto anteriormente, o mau ajuste de distribuição estatística pode levar à uma quantidade indesejável de falsos alarmes no processo de detecção (Seção 2.4.2). Com isso, o primeiro aspecto investigado foi o número de falsos alarmes obtidos com o CFAR. De modo específico, busca-se verificar o desempenho do CFAR em manter uma quantidade desejável de falsos alarmes (QIN et al., 2013). Assim, foi calculada a taxa de falso alarmes (FAR), também entendida como PFA observada, a partir da equação:

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N_X N_Y} = \frac{N_{FA}}{N_T} \quad (3.14)$$

onde N_T é o número total de pixels da subimagem de tamanho $N_X \times N_Y$ e N_{FA} é o número total de falsos alarmes encontrados na subimagem. O N_{FA} representa o número total de pixels que o CFAR identificou como potenciais alvos (pixels de valor 1), e uma vez que as subimagens de *clutter* marinho foram isoladas, assume-se que os alvos estão ausentes; portanto, todos os pixels identificados são considerados como falsos alarmes para esta análise. Para efeito de comparação, é possível tomar como base uma quantidade ideal de falsos alarmes para uma subimagem, dados valores de PFAs e sabendo que uma subimagem possui $N_T = 667 \times 667$ (Tabela 3.4). Neste trabalho, buscou-se aplicar o CFAR para uma ampla faixa de PFAs: 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} e 10^{-6} .

O segundo aspecto analisado foi o retroespalhamento dos falsos alarmes. Para isso, foram computados o σ^0 médio dos pixels detectados respectivos as classes WA e de alcance do radar, nas diferentes PFAs utilizadas. Também, busca-se verificar a separabilidade deste retroespalhamento médio, que é representante da superfície marítima, com alvos reais. As amostras de alvos reais são do *dataset* OpenSARShip, das quais foram extraídos os valores de σ^0 máximo das

embarcações, que representam o máximo sinal no CFAR pode detectar (seta na Figura A.1 do Apêndice A).

Tabela 3.4 - Número ideal de falsos alarmes para uma subimagem e PFAs utilizadas.

PFA	N_{FA} ideal
10^{-2} (0.01)	4449
10^{-3} (0.001)	444
10^{-4} (0.0001)	44
10^{-5} (0.00001)	4
10^{-6} (0.000001)	1

Fonte: Produção do autor.

Embora a análise da FAR aponte a capacidade do CFAR em manter-se constante, faz-se necessário que o limiar de detecção T seja ajustado caso a quantidade de falsos alarmes não se estabeleça próxima do valor desejado (N_{FA} ideal). Com isso, o terceiro aspecto investigado foi uma correção do limiar a partir de um fator de ajuste f e da média do coeficiente de retroespalhamento σ^0 da subimagem (M) através da equação (GREIDANUS et al., 2017):

$$T_A = (T - M) \cdot f + M \quad (3.15)$$

onde T_A é o novo limiar ajustado. Na prática, o fator de ajuste f representa o quanto, em relação à média da subimagem, o limiar deve ser aumentado para prevenir a admissão de excessivos falsos alarmes. Neste estudo busca-se definir o valor ideal de f para as diferentes classes de idade de onda WA. Isto se deu pelo teste de diferentes valores de f , em que os novos limiares T_A foram guardados, aplicados nas subimagens e posteriormente computados os respectivos valores de N_{FA} . Ressalta-se que todos os cálculos realizados sobre as subimagens σ^0 foram em unidade linear, e a unidade dB foi utilizada para a plotagem dos resultados através da conversão: $10 \times \log_{10}(\sigma^0)$.

3.3.5.1 Experimentos de detecção

Até então, as subimagens foram analisadas assumindo que embarcações não estão presentes. Para verificar o desempenho do CFAR em situações com presença de alvos reais, dois experimentos foram realizados. No primeiro buscou-se validar o ajuste do limiar proposto e analisar os resultados das detecções do CFAR. Para o segundo, foi verificado o quanto que as posições de embarcações reportadas no AIS estão representadas pelas detecções do CFAR.

Nestes experimentos, os dados AIS foram utilizados como fonte de verdade de campo (*ground truth*), que embora nunca pode-se ter a certeza de que pequenas embarcações não-identificadas pelo AIS estão presentes, estes ajudam a revelar uma figura quantitativa do desempenho de detecção (CICUENDEZ-PEREZ et al., 2011; PELICH et al., 2015). Para cada imagem analisada, as mensagens AIS foram selecionadas em relação a ± 40 min do momento de aquisição da imagem (RODGER; GUIDA, 2021).

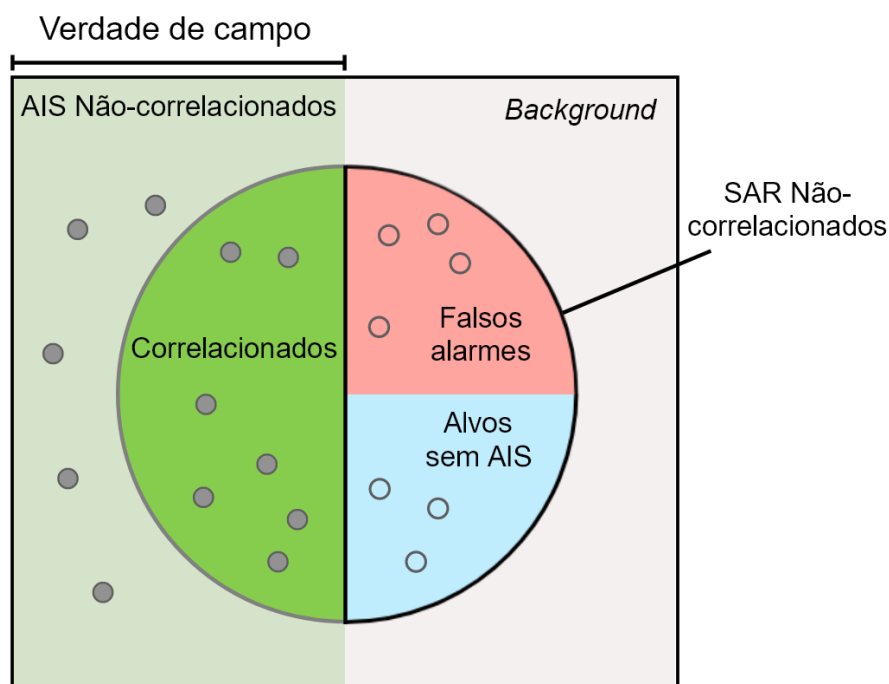
Tendo em vista que a quantidade de pixels detectados dos alvos pode variar com as PFAs utilizadas, foi optado por realizar a contagem dos alvos a partir de grupos de pixels adjacentes (*clusters*). Para isso, as imagens binárias foram transformadas em arquivos vetoriais (*shapefiles*) com a função *gdal_polygonize* da biblioteca GDAL⁷. A partir disso a performance do CFAR é avaliada por meio dos elementos de detecção. Estes elementos são ilustrados na Figura 3.5, que podem ser computados confrontando as detecções do CFAR (círculo central) com os alvos presentes no AIS (pontos preenchidos cinzas). Os elementos de detecção são definidos como:

- a) Total de detecções: Número de *clusters* identificados pelo CFAR (elementos dentro do círculo central);

⁷ GDAL - *Geospatial Data Abstraction Library*:
<https://gdal.org/programs/gdal_polygonize.html>. Acesso em 18/10/2021.

- b) Correlacionados: É a porção do total de detecções do CFAR que correspondem os pontos do AIS (detecções verdadeiras);
- c) SAR Não-correlacionados: São os elementos detectados pelo CFAR que não estão associados ao AIS (meio círculo central). Estes podem representar falsos alarmes (feições oceânicas brilhantes) ou alvos que não estão reportados no AIS;
- d) AIS Não-correlacionados: São os alvos presentes no AIS que não foram identificados pelo CFAR (perda de detecção);
- e) *Background*: Representa o que não foi detectado pelo CFAR, e não confirmado pelo AIS. Estes elementos representam, na verdade, a superfície marítima, e por isso não há a razão de os computar.

Figura 3.5 - Elementos de detecção.



Fonte: Adaptado de Walber (2014).

No primeiro experimento, duas regiões com notória presença de embarcações validadas por AIS foram avaliadas: uma representante de mares jovens e outra dominada por marulhos. Uma vez determinada a melhor configuração do CFAR a partir das análises anteriores, o segundo experimento foi realizado para três imagens SAR (apresentadas no Apêndice F), em que as detecções não-correlacionadas foram inspecionadas visualmente para determinar se os alvos

são não-reportantes do AIS ou representam falsos alarmes. Na Tabela 3.5 são listados os parâmetros utilizados. Adicionalmente, foi adotado um simples critério de discriminação, baseado nos resultados obtidos, com o fim de refinar as detecções encontradas com o CFAR: foram admitidos apenas os *clusters* com mais de 1 pixel e com retroespalhamento máximo acima de -10 dB. Assim, foi considerado que estes *clusters* discriminados são de maior confiabilidade e podem ser confrontados com o AIS.

Tabela 3.5 – Especificações do experimento de correlação das detecções SAR-AIS.

Imagens utilizadas	Imagem 1: 20/12/2019 08:09:00 (UTC-0) (Figura F.1) U_{10} médio = 8,7 m/s P médio = 5,8 s
	Imagem 2: 21/12/2019 08:04:58 (UTC-0) (Figura F.2) U_{10} médio = 6,5 m/s P médio = 7,5 s
	Imagem 3: 03/12/2019 08:02:51 (UTC-0) (Figura F.3) U_{10} médio = 10,3 m/s P médio = 14,6 s
Mascaramento terrestre	Linha de costa IBGE (<i>buffer</i> de 250 m) Janela de <i>background</i> : 100x100 (3000x3000 m) Janela de guarda: 20x20 (600x600 m)
Configuração do CFAR	Janela do alvo: 1x1 (30x30 m) PFA: 10^{-6} Limiarização adaptativa baseada nas classes WA
Critério de discriminação	Número de pixels do <i>cluster</i> > 1 & σ^0 máximo do <i>cluster</i> > -10 dB

Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

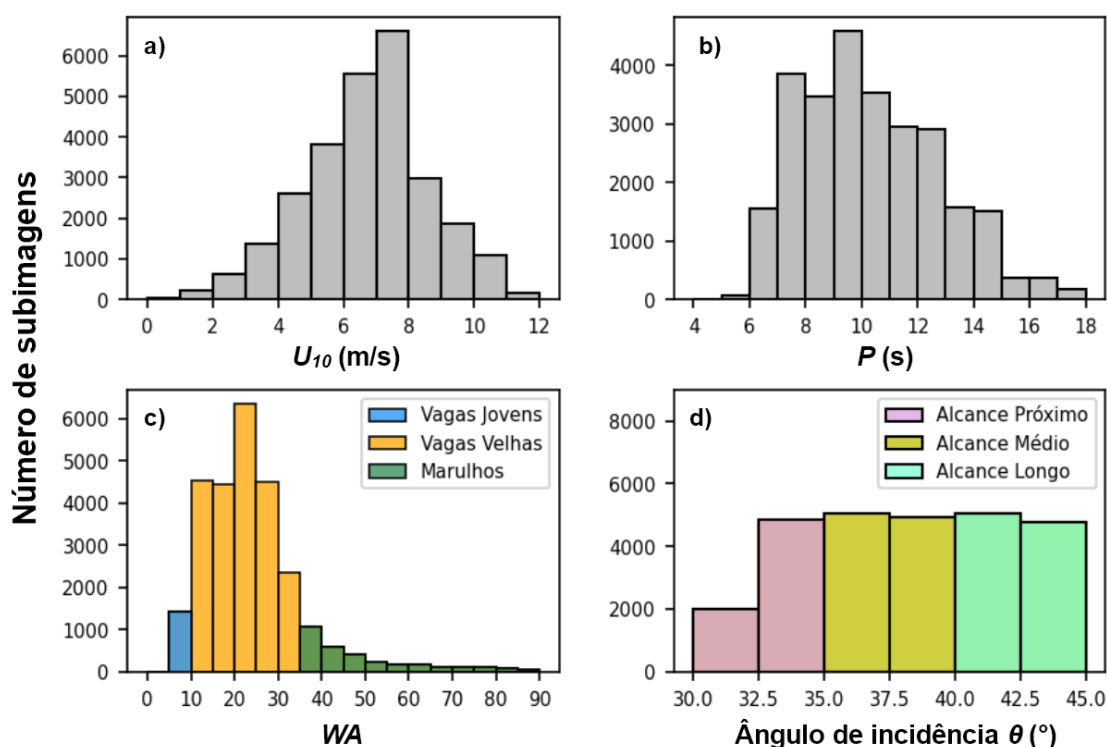
Neste capítulo, os resultados e discussões são divididos em quatro seções: A Seção 4.1 trata dos resultados da seleção das subimagens e da sua representatividade (Objetivo Específico 1); Na Seção 4.2 são detalhados os resultados da análise do comportamento da distribuição estatística GFD em diferentes condições ambientais (Objetivo Específico 2); Em seguida, na Seção 4.3, são apresentados os resultados da aplicação do CFAR, em que as condições ambientais e a geometria de aquisição são analisados (Objetivo Específico 3); A Seção 4.4 trata dos resultados do experimento do confronto entre as detecções do CFAR e AIS (Objetivo Específico 4).

4.1 Geração e seleção das subimagens

Após obtenção das informações auxiliares e da seleção das subimagens pelos critérios listados na Subseção 3.3.2, de um total de 36152 subimagens, 26657 (73,7%) foram selecionadas. No Apêndice B são dispostas amostras das subimagens não-selecionadas, que tendem a representar cenas heterogêneas (de alta variância do σ^0) ou compostas majoritariamente por ruído.

Na Figura 4.1a-b é demonstrada a distribuição das subimagens selecionadas em relação às informações ambientais. De forma geral, notou-se que as subimagens compreendem uma larga faixa de magnitude de vento e períodos de onda. Os valores de U_{10} variam de 0,3 a 12,5 m/s, e possuem média de 6,7 m/s. Estes valores representam diversas condições de vento e mostram-se dentro do que é esperado para a região, ao compará-los com médias mensais de estudo de Silva et al. (2017). O período de pico por sua vez, tem mínimo de 4,1 s, máximo de 17,7 s e média de 10,3 s. Em Silva et al. (2011) é reportado que na costa nordestina, a presença de ondas de período > 10s é frequentemente observada.

Figura 4.1 - Distribuição da subimagens selecionadas (n=26657) em relação a: (a) Magnitude do vento U_{10} , (b) Período de onda P , (c) Idade de onda WA e (d) Ângulo de incidência θ .



Fonte: Produção do autor.

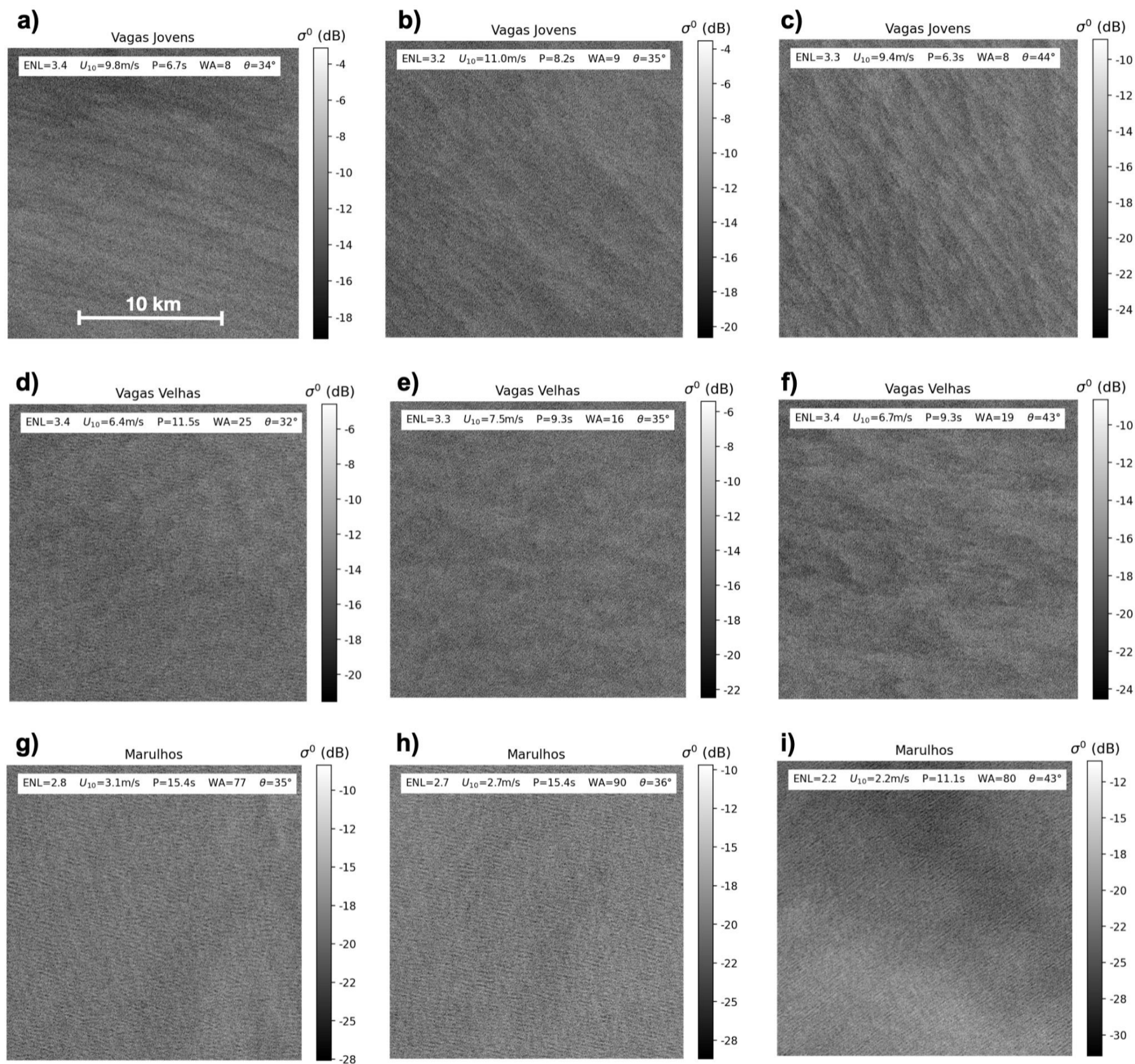
A Figura 4.1c apresenta a separação das imagens de acordo com as classes WA . Foi encontrada a seguinte quantidade de subimagens: 1406 para vagas jovens ($WA \leq 10$); 21929 para vagas velhas ($10 < WA \leq 35$) e 3322 para marulhos ($WA > 35$). Dessa forma, o ambiente predominante é o de vagas velhas, que representa um estado de mar de desenvolvimento completo, em que a energia dificilmente se altera à medida que o tempo passa (KOMEN et al., 1994; FARIAS et al., 2012).

Na Figura 4.1d é demonstrada a representatividade das subimagens em relação ao ângulo de incidência. Nota-se que as imagens estão bem distribuídas ao longo do alcance do radar, com exceção da faixa entre 30° e $32,5^\circ$ que apresenta menor número. Isto se deu devido a, nesta faixa, as subimagens estarem geralmente localizadas nos continentes ou próximas à linha de costa.

Examinando as subimagens que foram encontradas para as diferentes classes de WA, vê-se que as três classes se distinguem pelas feições apresentadas (Figura 4.2). Na primeira linha (vagas jovens) observa-se a presença de feições lineares, de extensão de ~2 a 5 km, que se alternam entre claro e escuro. Estas feições são típicas de ambientes dominados por fortes ventos e são notadamente conhecidas como *wind streaks* (ZHAO et al., 2016). Por outro lado, na última linha (marulhos) é possível observar a presença de ondas na superfície em ordem de extensão de centenas de metros. Neste caso, estas feições também alternam-se entre claro e escuro, porém estão relacionadas às cristas e cavados das ondas. De forma intermediária, as vagas velhas constituem um ambiente de transição e podem possuir padrões de ventos e ondas que competem entre si. Ademais, é possível observar que ao longo das faixas de alcance (colunas da esquerda para a direita) o sinal retroespalhado tende a ser menor, porém as feições se mantêm. Isto se dá devido ao espalhamento *Bragg*, em que os valores de σ^0 decrescem com o aumento do ângulo de incidência (ver Subseção 2.2.3).

De modo geral, se observa que o parâmetro WA permitiu separar ambientes marinhos distintos. Ainda assim, é importante ressaltar que há outros aspectos que afetam o sinal retroespalhado da superfície marítima, que não são levados em conta no cálculo do parâmetro WA, como a exemplo do histórico do vento local e da direção do vento em relação ao feixe do radar (ULABY; LONG, 2014). Apesar dessa limitação, a classificação pelo critério WA apresenta-se aceitável para a divisão de distintos ambientes marinhos.

Figura 4.2 - Subimagens σ^0 em polarização VV (tamanho 667 x 667 pixels), em escala dB, separadas por classe de idade de onda WA (linhas) e de alcance (colunas). Separando-se as faixas de alcance próximo ao longo (esquerda para a direita), as subimagens representam: (a), (b), (c) vagas jovens; (d), (e), (f) vagas velhas e (g), (h) e (i) marulhos. Em cada subimagem a escala de tons de cinza foi normalizada a fim de realçar as feições oceanográficas.



Fonte: Produção do autor.

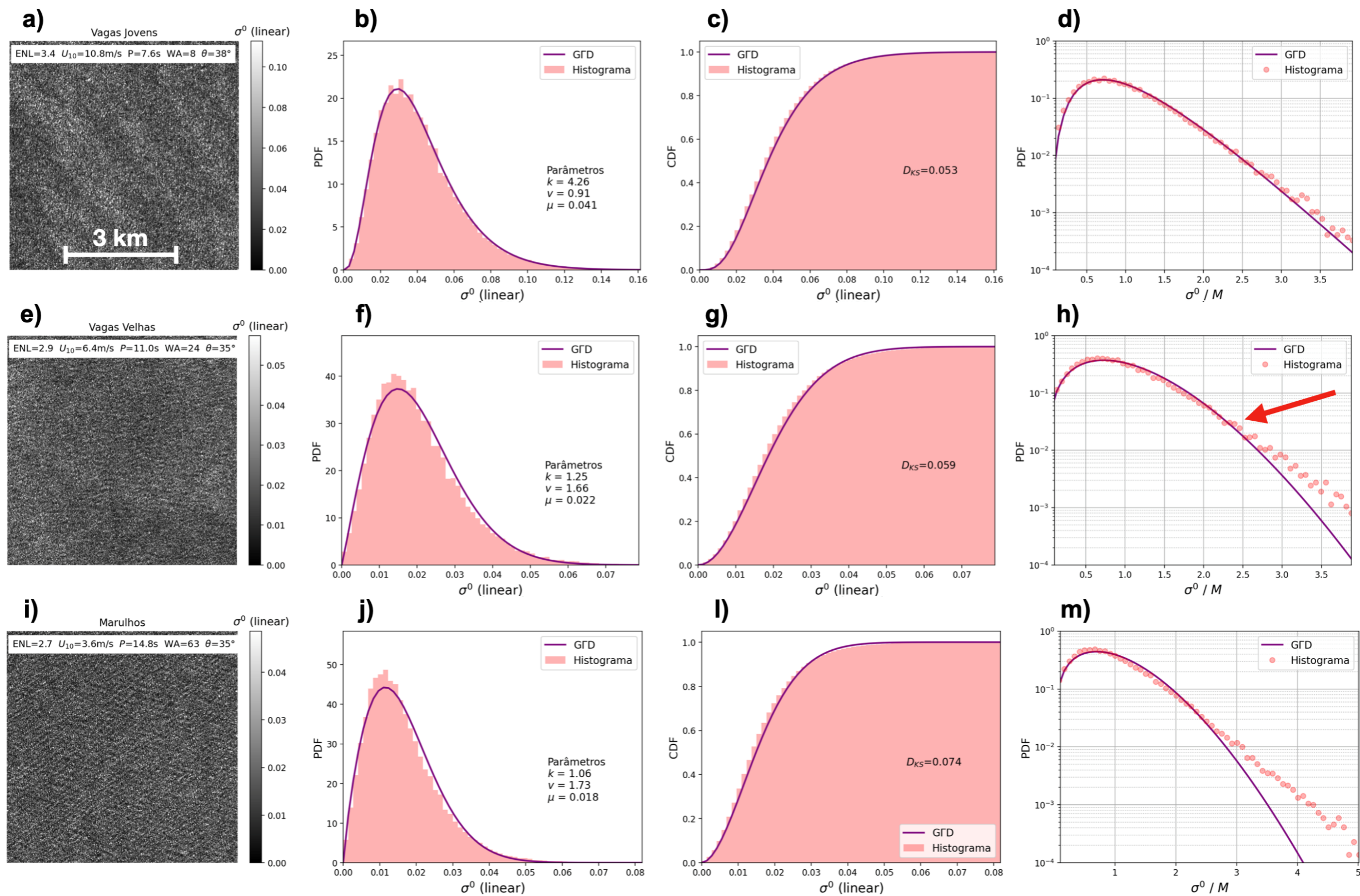
4.2 Análise do comportamento do modelo GFD na superfície marítima

Nesta seção é realizada a análise do comportamento do modelo GFD para as subimagens das diferentes classes *WA* e faixas de alcance. Para isso, o encaixe do modelo foi analisado por meio da distância Kolmogorov-Smirnov, D_{KS} , calculada para cada subimagem.

Na Figura 4.3 demonstra-se o encaixe do modelo GFD para três subimagens, respectivas às três classes *WA* (linhas na figura) na faixa de alcance médio. Com o propósito de revelar detalhes do encaixe, nas Figuras 4.3d-h-m os dados foram normalizados pelo valor médio do histograma (σ^0 / M) e plotados em escala semi-log. Nestes exemplos, é possível observar que o modelo GFD tem melhor encaixe em condição de vagas jovens e à medida em que a idade de onda aumenta, ocorre um descolamento do modelo, nitidamente observado na cauda da PDF (seta vermelha na Figura 4.3h). Comparativamente, esta seta representa valor de σ^0 de 0,04 (ou -13,8 dB). Esta região da cauda é onde comumente se determina o limiar de detecção, e nestes casos, devido a PDF se apresentar subestimada, há a tendência do processo de detecção incorporar excessivos falsos alarmes.

Este comportamento encontrado nos exemplos da Figura 4.3 é confirmado ao observar os valores D_{KS} obtidos para as subimagens selecionadas (Tabela 4.1). Nota-se que em média, os valores D_{KS} aumentam com a idade de onda: 0,057 para vagas jovens, 0,060 para vagas velhas e 0,063 para marulhos. Em relação às faixas de alcance do radar, os resultados obtidos indicam que o encaixe do modelo GFD não varia com o ângulo de incidência, mostrando habilidade em se adaptar às variações da geometria de aquisição. No Apêndice C pode ser observado, em maior detalhe, que a distribuição dos valores D_{KS} segue o mesmo padrão independente da faixa de alcance do radar. Diante disso, pode-se afirmar que a distribuição GFD é versátil em representar o *clutter* marinho em imagens σ^0 , porém tende a possuir menor aderência em condições de marulhos (*swell*).

Figura 4.3 - Exemplos do encaixe da GFD por classe de idade de onda (linhas). (a), (e) e (i) são as subimagens σ^0 (em escala linear) em teste (300 x 300 pixels), na polarização VV e região de alcance médio. (b), (f) e (j) representam a PDF empírica (histograma) e teórica (GFD). (c), (g) e (l) representam a CDF empírica (histograma) e teórica (GFD). (d), (h) e (m) indicam o encaixe da PDF, normalizada pelo valor médio do histograma (eixo horizontal) e em escala semi-log (eixo vertical).



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.1 - Valores D_{KS} divididos por classe WA e faixa de alcance do radar.

Classe WA	Alcance	N. de subimagens	D_{KS} médio	D_{KS} mínimo	D_{KS} máximo
Vagas Jovens	Próximo	308	0.059	0.041	0.100
	Médio	479	0.056	0.040	0.123
	Longo	619	0.056	0.041	0.082
Vagas Velhas	Próximo	5600	0.060	0.042	0.158
	Médio	8227	0.060	0.040	0.142
	Longo	8102	0.060	0.040	0.139
Marulhos	Próximo	958	0.063	0.044	0.174
	Médio	1273	0.063	0.044	0.174
	Longo	1091	0.064	0.041	0.195

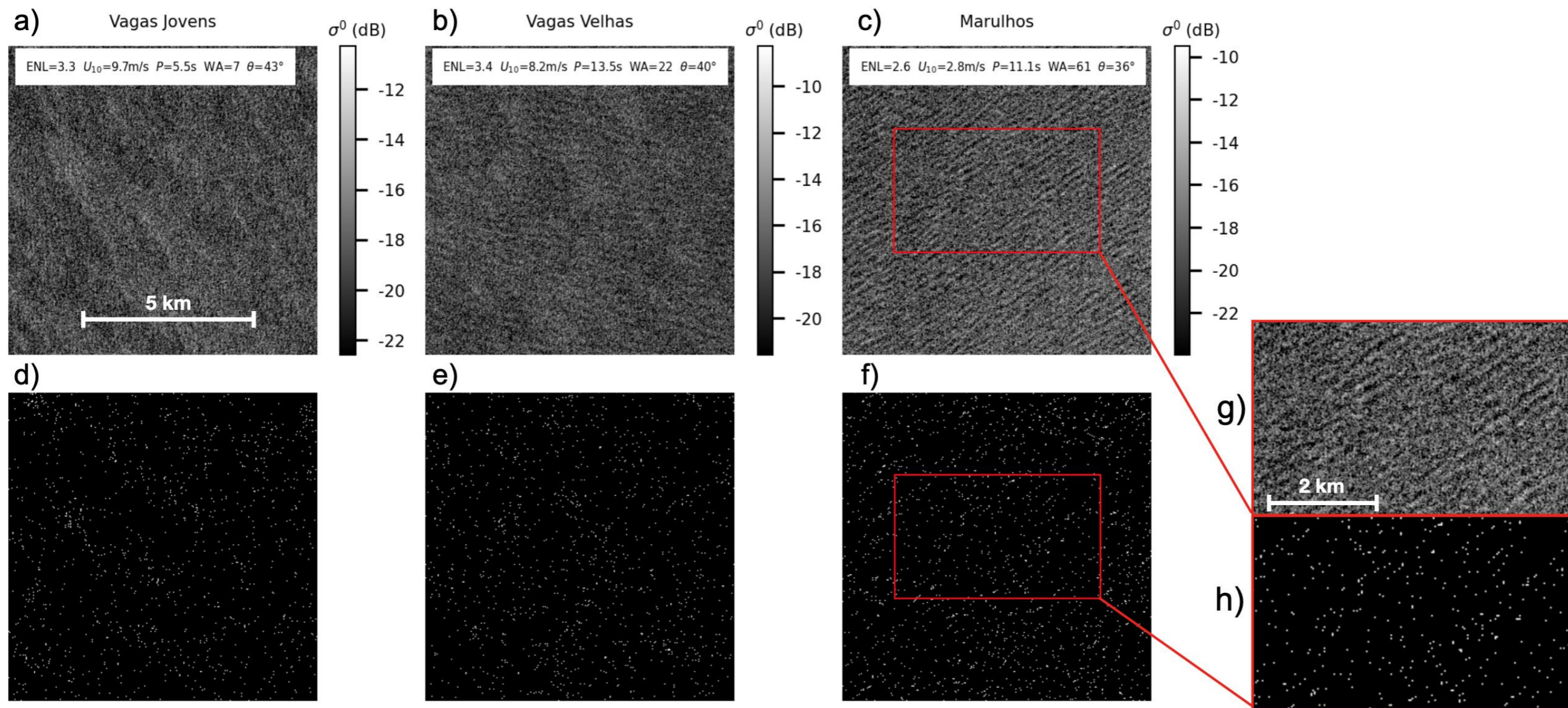
Fonte: Produção do autor.

Embora não se encontre estudos que tenham dado particular ênfase sobre os efeitos ambientais na distribuição GFD, alguns autores reportaram este tipo de descolamento para a distribuição K . Em Sun et al. (2018), os autores verificaram um melhor encaixe da distribuição K comparando-a com distribuições estatísticas tradicionais, porém o encaixe foi negativamente afetado em situações em que ondas de longo período estão presentes nas imagens. Em Greidanus et al. (2017) é reportado que em condições de quebra de ondas longas, excessivos falsos alarmes são encontrados para a distribuição K . É interessante observar que apesar da distribuição GFD demonstrar maior flexibilidade comparada a distribuição K (KRYLOV et al., 2013), esta igualmente apresenta distorções ao modelar ambientes dominados por marulhos.

Este efeito pode ser explicado pela introdução de elementos espalhadores por ondas de maior comprimento, que causam elevações na superfície do mar. Como pode ser visto na Figura 2 em Li et al. (2017a), estes elementos se localizam nas frentes íngremes das ondas e se tornam mais agregados à medida que as ondas se desenvolvem. Adicionalmente, pode ser argumentado que estes elementos alteram o sinal retroespalhado pela introdução de componente não-polarizado ao radar (i.e. espalhamento não-*Bragg*) (JANSSEN; ALPERS, 2006; KUDRYAVTSEV et al., 2014).

Para verificar como isto ocorre com a detecção, pode-se exemplificar este efeito ao aplicar o CFAR com um valor de alto PFA ($PFA=10^{-2}$) para as três classes WA. A distribuição espacial das detecções pode ser observada na Figura 4.4. É possível identificar que na condição de marulhos as detecções se apresentam com padrões lineares, mostrando-se alinhadas ao sentido de propagação de onda (Figura 4.4g e h).

Figura 4.4 – Exemplos de resultados da detecção do CFAR baseado no modelo GFD. (a), (b) e (c) representam regiões das subimagens σ^0 em polarização VV (300 x 300 pixels). (d), (e) e (f) demonstram os resultados da detecção para para PFA=10⁻² (0.01). Em (g) e (h) são ampliadas as regiões em retângulo vermelho. Pixels em branco indicam pixels acima do limiar de detecção.



Fonte: Produção do autor.

4.3 Análise dos resultados da detecção do CFAR

A partir da geração do *dataset* descrito na Seção 4.1, foi então possível realizar análise dos resultados da detecção, adquiridos ao aplicar o CFAR baseado no modelo GFD nas subimagens. Nesta seção, os resultados são investigados em relação aos falsos alarmes apresentados (Subseção 4.3.1) e ao ajuste de limiar proposto (Subseção 4.3.2). Para este último, foi realizado um experimento a partir de alvos reais, com suporte dos dados AIS, para verificação do ajuste do limiar (Subseção 4.3.3).

4.3.1 Análise dos falsos alarmes

Visando investigar os falsos alarmes (FAs), o CFAR foi aplicado em um conjunto de 2700 subimagens, escolhidas aleatoriamente e divididas igualmente para as classes *WA* e faixa de alcance. Esta subseção apresenta os resultados de três aspectos: (1) a quantidade de FAs resultantes do CFAR; (2) o retroespalhamento σ^0 médio dos FAs obtidos e (3) a comparação entre o retroespalhamento dos FAs e de embarcações do *dataset* OpenSARShip (acesso aberto e gratuito).

A Tabela 4.2 apresenta os resultados da taxa de falso alarme FAR e o respectivo número de falsos alarmes N_{FA} para o conjunto das subimagens, contabilizados a partir da quantidade de pixels detectados. Como esperado, o efeito da subestimativa do *clutter* marinho pelo modelo GFD se confirma pelos valores médios do N_{FA} , que aumentam de acordo com a classe *WA*. Os valores N_{FA} mostram-se sobretudo excessivos (acima do N_{FA} ideal) em condições de marulhos; para $PFA=10^{-4}$ por exemplo, o N_{FA} pode chegar até mais de 10 vezes a quantidade ideal (ver células azuis). Quanto à variação do N_{FA} em relação às faixas de alcance, estas mostram não afetar significativamente a quantidade de falsos alarmes, confirmando a habilidade do modelo GFD em se adaptar às diferentes geometrias de aquisição.

O retroespalhamento σ^0 resultante dos falsos alarmes são apresentados na Tabela 4.3. Pode ser observado que: (1) há uma diminuição do σ^0 com as faixas

Tabela 4.2 – Valores de FAR e N_{FA} médios das subimagens, divididos por classe WA e faixas de alcance do radar.

Classe WA	Alcance	N. de sub-imagens	PFA									
			10^{-2} (0.010)		10^{-3} (0.001)		10^{-4} (0.0001)		10^{-5} (0.00001)		10^{-6} (0.000001)	
			N _{FA} ideal									
			4449		444		44		4		1	
			FAR médio	N _{FA} médio	FAR médio	N _{FA} médio	FAR médio	N _{FA} médio	FAR médio	N _{FA} médio	FAR médio	N _{FA} médio
Vagas Jovens	Próximo	300	0.013	5584	0.0020	903	0.0004	188	0.0001	47	0.00003	15
	Médio	300	0.012	5471	0.0019	838	0.0003	154	0.0001	37	0.00002	10
	Longo	300	0.012	5375	0.0017	775	0.0003	133	0.0001	26	0.00001	7
Vagas Velhas	Próximo	300	0.014	6427	0.0027	1202	0.0006	286	0.0002	86	0.00007	33
	Médio	300	0.016	6943	0.0032	1416	0.0008	367	0.0003	114	0.00009	42
	Longo	300	0.016	7133	0.0034	1514	0.0009	405	0.0003	130	0.00011	49
Marulhos	Próximo	300	0.017	7351	0.0095	1647	0.0010	466	0.0004	160	0.00014	62
	Médio	300	0.018	7853	0.0042	1852	0.0012	551	0.0004	192	0.00018	78
	Longo	300	0.017	7369	0.0038	1670	0.0011	481	0.0004	172	0.00016	71

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 – Valores do retroespalhamento σ^0 médios dos falsos alarmes.

Classe WA	Alcance	N. de subimagens	PFA				
			10^{-2} (0.010)	10^{-3} (0.001)	10^{-4} (0.0001)	10^{-5} (0.00001)	10^{-6} (0.000001)
			σ^0 médio dos FAs (dB)				
Vagas Jovens	Próximo	300	-7.0	-6.0	-5.4	-4.9	-4.7
	Médio	300	-8.9	-7.9	-7.3	-7.0	-6.8
	Longo	300	-10.2	-9.2	-8.6	-8.0	-7.7
Vagas Velhas	Próximo	300	-9.7	-8.9	-8.4	-8.2	-8.1
	Médio	300	-11.9	-11.1	-10.7	-10.4	-10.1
	Longo	300	-14.8	-14.1	-13.6	-13.3	-13.0
Marulhos	Próximo	300	-11.3	-10.5	-10.0	-9.6	-9.3
	Médio	300	-13.7	-12.9	-12.4	-11.9	-11.6
	Longo	300	-15.4	-14.8	-14.4	-14.2	-14.0

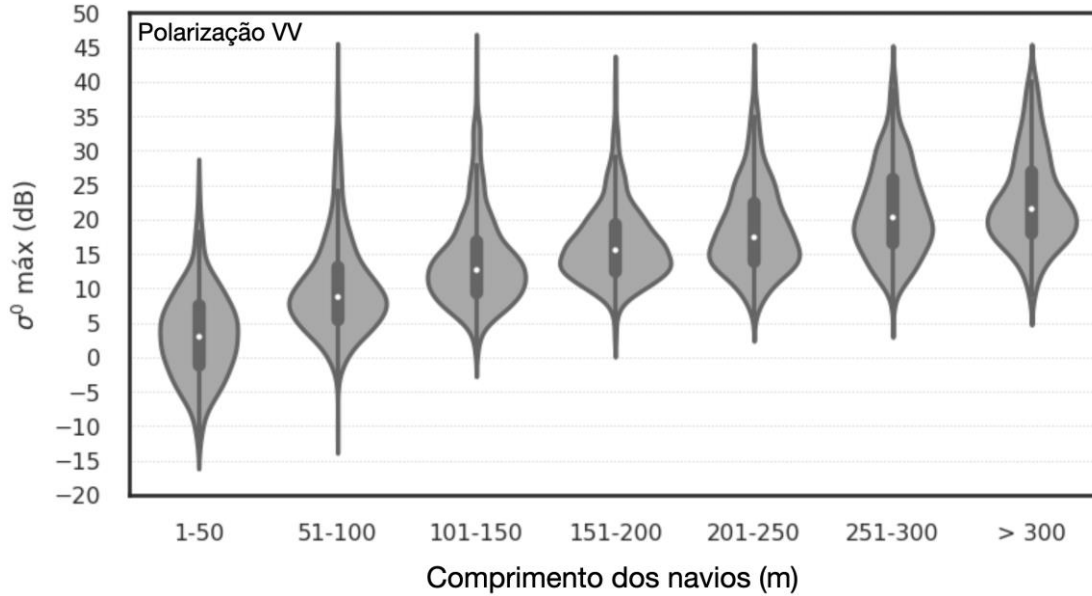
Fonte: Produção do autor.

de alcance mais longas, o que é esperado tendo em vista que o retroespalhamento do radar na superfície do oceano é primariamente dependente do ângulo de incidência (PHILLIPS, 1988); (2) Para uma mesma faixa de alcance, há uma diferença do valor de σ^0 entre as classes WA por volta de 2,3 dB, independente da PFA utilizada; (3) Vagas jovens tendem a ter maiores valores de σ^0 , enquanto a classe de marulhos apresenta menores valores. Isto pode ser explicado pela magnitude dos ventos, que é maior (menor) para a classe de vagas jovens (marulhos), e que, portanto, tende a gerar retroespalhamento de maior (menor) intensidade (HERSBACK, 2010).

Em relação a como o retroespalhamento dos FAs se difere ao retroespalhamento de embarcações, é possível realizar esta comparação através das Figuras 4.5 e 4.6. As figuras são apresentadas em formato de *violinplot*, que é similar ao gráfico de *boxplot*, porém fornece informações adicionais sobre a distribuição dos dados. A Figura 4.5 representa o retroespalhamento máximo das embarcações, isto é, o máximo valor de σ^0 encontrado nos pixels das embarcações (ver seta na Figura A.1). Nota-se um claro padrão de aumento de intensidade do retroespalhamento com o aumento do tamanho das embarcações, evidente sobretudo entre as embarcações de comprimento entre 1 e 150 m. Importante notar que o retroespalhamento das embarcações mostra não variar com as diferentes faixas de alcance do radar (Figura A.2 no Apêndice A).

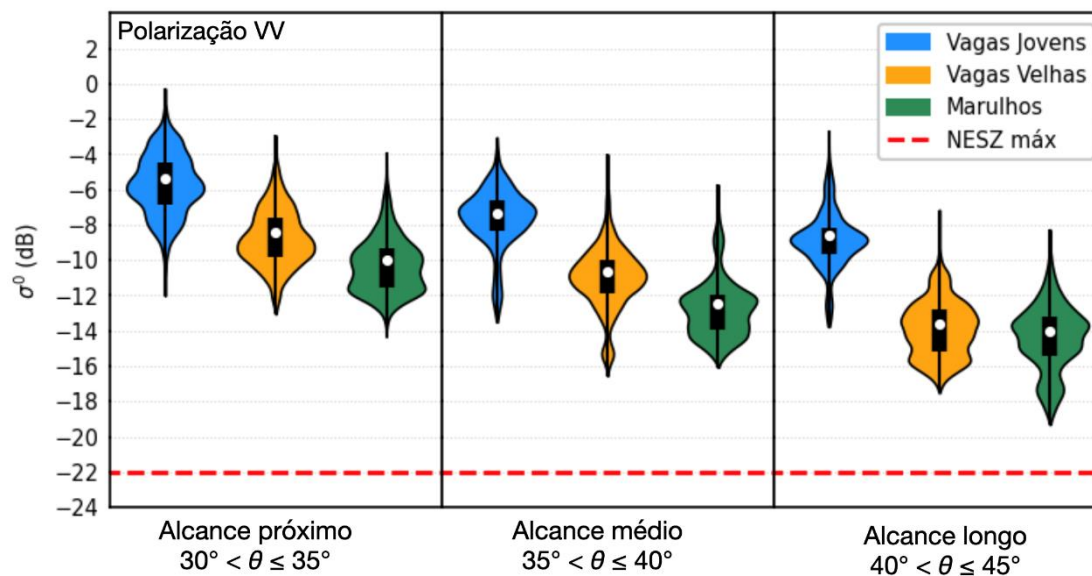
Na Figura 4.6 é ilustrada a distribuição do σ^0 dos falsos alarmes resultantes do CFAR, para o exemplo da PFA= 10^{-4} . As figuras respectivas das outras PFAs são dispostas no Apêndice D. Primeiro, nota-se que os FAs estão acima do valor NESZ máximo, que foi encontrado para as subimagens utilizadas (linha vermelha pontilhada), possuindo uma separação de pelo menos 3,0 dB (marulhos em alcance distante). Assim, é possível afirmar que os FAs não representam ruído. Ao comparar-se as Figuras 4.5 e 4.6, é possível constatar que os resultados estão consistentes com os encontrados nos trabalhos de

Figura 4.5 - *Violinplots* do σ^0 máximo de diferentes tamanhos de embarcações, extraídos do dataset OpenSARShip 2.0, em polarização VV e escala dB. Pontos em branco indicam valores da média.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 - *Violinplots* do σ^0 dos FAs, em polarização VV e escala dB, resultantes do CFAR aplicado para $PFA=10^{-4}$. Pontos em branco indicam valores de média reportados na Tabela 4.3. Retângulos pretos (*boxplots*) retratam os quartis.



Fonte: Produção do autor.

Vachon et al. (1997) e Tings et al. (2019), se considerarmos que uma maior separação entre o σ^0 dos falsos alarmes e das embarcações representa uma maior detectabilidade. Estes trabalhos encontraram que:

- Quanto maior o tamanho da embarcação, maior a sua detectabilidade;
- Quanto maior o ângulo de incidência (ou mais distante a faixa de alcance), maior a detectabilidade das embarcações;
- Quanto maior a magnitude do vento (ou menor a idade das ondas), menor a detectabilidade das embarcações.

Em adição a isso, os seguintes pontos são notados a partir dos resultados aqui encontrados:

- Abaixo de -10 dB a chance de um pixel ser representante de embarcação é pequena. Esta é uma informação que pode ser utilizada para a discriminação dos falsos alarmes, de forma que pixels abaixo deste limiar podem ser descartados. Também, dependendo do tamanho das embarcações que deseja-se detectar, diferentes limiares podem ser utilizados baseados na Figura 4.5;
- A condição de detecção mais desafiante se dá para pequenas embarcações (< 50 m) em condições de vagas jovens e em faixa de alcance próximo.

4.3.2 Ajuste do limiar de detecção

A partir dos resultados encontrados anteriormente, torna-se evidente o excesso de FAs com o uso do CFAR baseado no modelo GFD, sobretudo, em ambientes marinhos dominados por marulhos. A seguir serão descritos os resultados do cálculo do fator de ajuste f ótimo, implementado sobre o conjunto de subimagens utilizando a Equação 3.15. O intuito deste ajuste se dá para o controle da quantidade de FAs, de forma a deixá-la mais próxima do desejado (N_{FA} ideal).

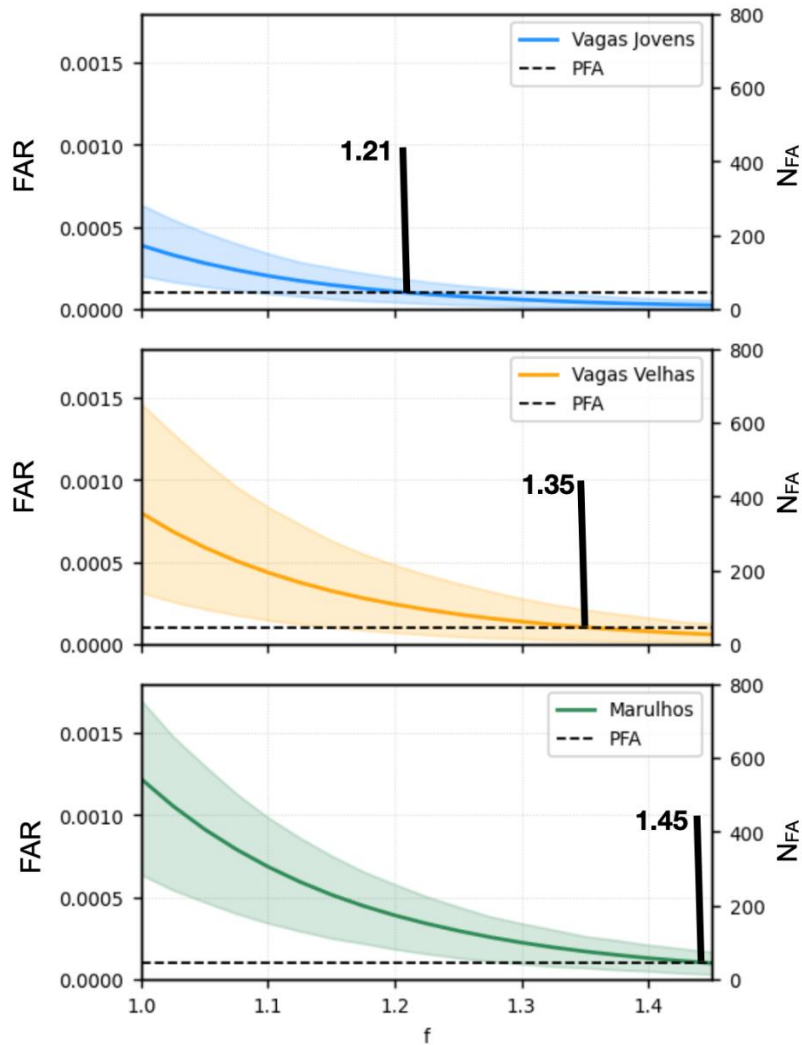
Tendo em vista que não foi encontrada variação do N_{FA} em relação às faixas de alcance, o ajuste foi realizado somente para as classes WA.

A Figura 4.7 apresenta a taxa de falso alarme FAR (eixo vertical esquerdo) e o respectivo número de falsos alarmes N_{FA} (eixo vertical direito) encontrados para os diferentes valores de f aplicados nas subimagens, de tamanho 667x667 pixels. A linha horizontal pontilhada indica o N_{FA} ideal de forma que quanto maior a distância entre esta linha e a linha sólida colorida, maior a quantidade de FAs incorporados pelo CFAR. Para $f=1.0$, isto é, em que a correção não é aplicada (ver Equação 3.15), são observados na condição de marulhos excessivos falsos alarmes, de em média, 450 pixels acima do esperado. Como visto na Subseção 4.3.1, condições de marulhos tendem a apresentar excessivos FAs e, portanto, requerem maiores valores de f para a compensação deste efeito.

A partir da interseção entre a linha média FAR (linhas sólidas coloridas) e as linhas da PFA (linhas pontilhadas horizontais), são extraídos os melhores valores de f para as classes WA. No caso, este exemplo indica o melhor ajuste para a PFA= 10^{-4} , e na Tabela 4.4 são dispostos os valores ótimos de f relativos às outras PFAs analisadas.

Pode-se afirmar que o uso das classes WA permite que o ajuste seja feito sob medida dependendo das informações de ventos e ondas. Em estudo de Greidanus et al. (2017), este ajuste foi realizado com valores de f para imagens amplitude do Sentinel-1, baseados na experiência operacional do Centro Comum de Investigação da União Europeia (*Joint Research Centre - JRC*). Neste trabalho, buscou-se realizar este ajuste baseado nas informações ambientais, as quais podem ser incorporadas no processo de detecção de forma a deixar este ajuste adaptativo ao ambiente marinho em que o CFAR está sendo executado.

Figura 4.7 - Comportamento do FAR em relação ao fator de ajuste f para $PFA=10^{-4}$. As faixas coloridas para as respectivas classes WA representam percentis de 10% a 90%. As linhas sólidas coloridas representam a média do FAR. Linha vertical de cor preta indica f ótimo.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.4 – Valores do fator de ajuste f , otimizados por classe WA .

PFA	Vagas Jovens	Vagas Velhas	Marulhos
10^{-2}	1.07	1.12	1.18
10^{-3}	1.14	1.25	1.32
10^{-4}	1.21	1.35	1.45
10^{-5}	1.32	1.52	1.65
10^{-6}	1.49	1.80	1.90

Fonte: Produção do autor.

4.3.3 Experimento de detecção

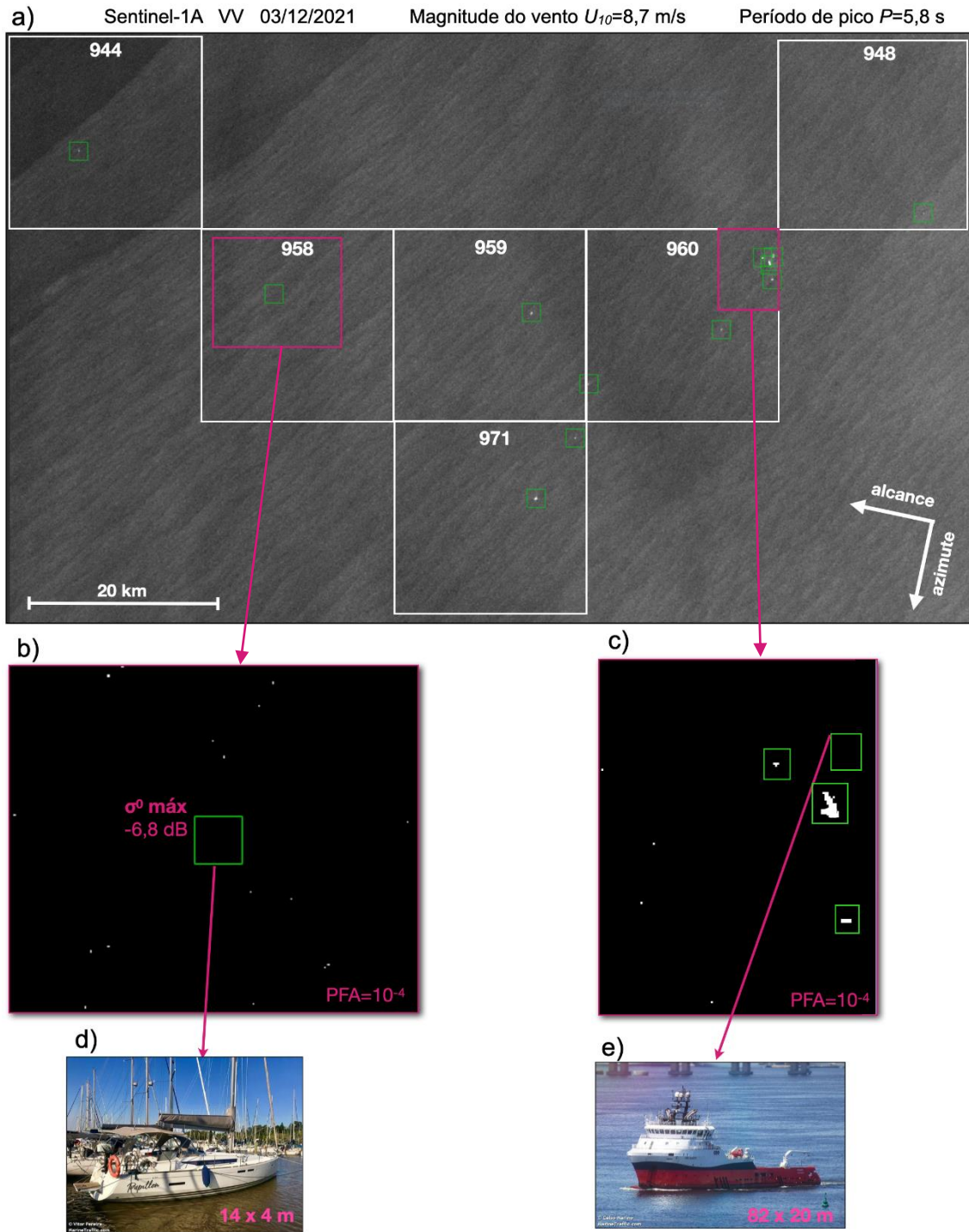
Nesta subseção são apresentados os resultados do primeiro experimento de detecção, efetuado em regiões com presença de alvos validados por AIS. O intuito deste experimento consiste em, primeiro, verificar eventuais benefícios do ajuste do limiar e, segundo, como se comportam as detecções do CFAR, os falsos alarmes e as eventuais perdas de detecção em relação a diferentes ambientes marinhos.

Neste experimento, o CFAR foi aplicado para os menores valores de PFA em busca de evitar demasiado número de falsos alarmes. Assim, foram utilizados os seguintes valores de PFA: 10^{-4} , 10^{-5} e 10^{-6} . As subimagens selecionadas para este experimento consistem em duas regiões, uma representante de condições de vagas jovens (Figura 4.8), e a outra, de marulhos (Figura 4.9). As regiões foram subdivididas em 14 subimagens (retângulos em branco) e apresentam um total de 20 alvos validados pelo AIS (retângulos em verde).

Os valores da taxa de falso alarme FAR, calculados a partir dos *clusters* detectados em cada subimagem, são apresentados nas Tabelas 4.5 e 4.6. Devido ao grande número de casas decimais dos valores FAR, os respectivos valores de N_{FA} são mostrados entre parênteses nas tabelas para melhor compreensão. Para o método do CFAR + ajuste do limiar, foram utilizados os fatores de ajuste listados na Tabela 4.4. Ao observar os valores médios do N_{FA} , nota-se que houve supressão dos falsos alarmes para todas as subimagens. Em geral, o ajuste do limiar resultou em uma diminuição de 26% do N_{FA} . Entretanto, para verificar este aparente benefício, posteriormente foi analisado se esta diminuição ocasionou a perda de alvos reais.

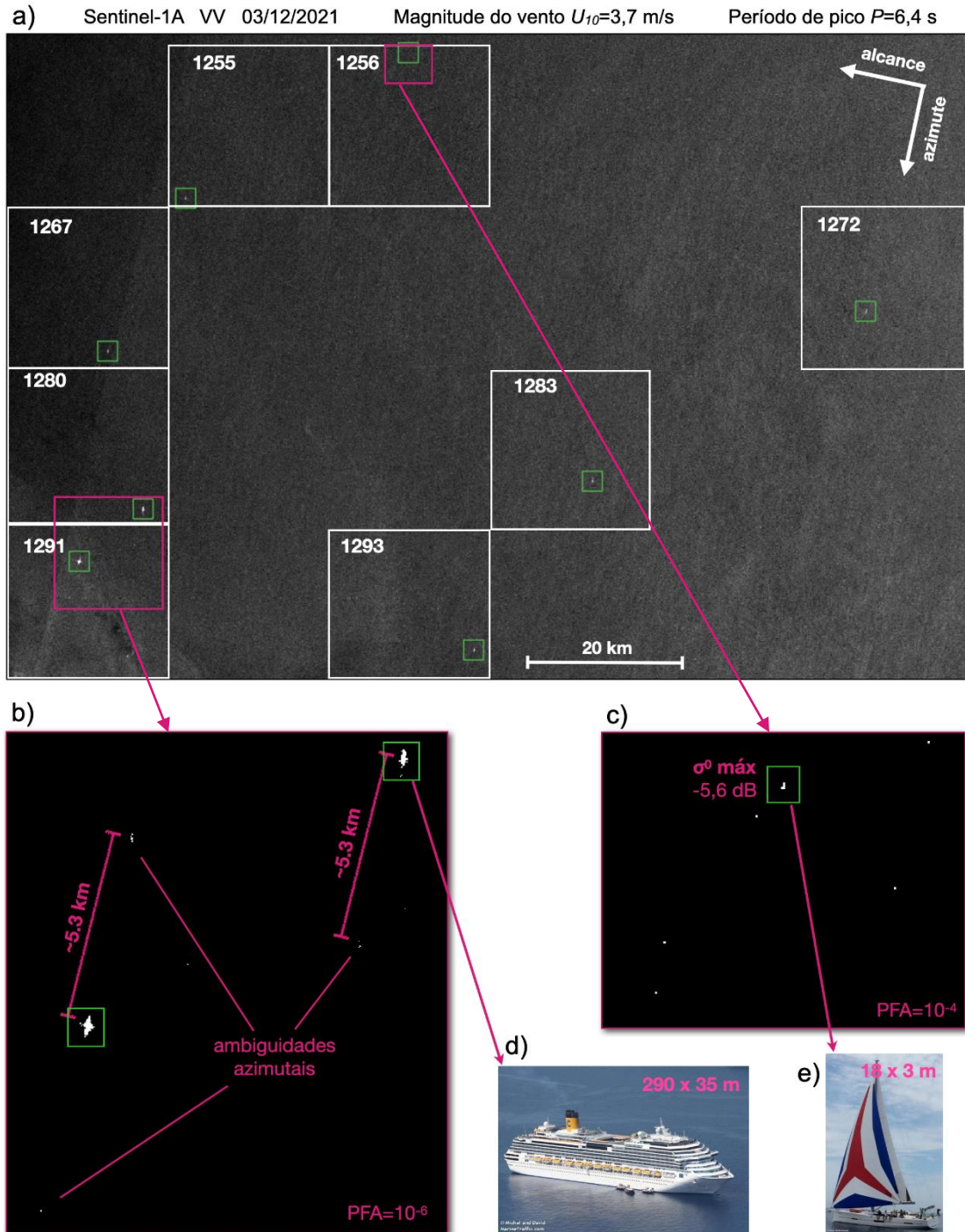
Na Tabela 4.7 são dispostos os elementos de detecção para as subimagens representantes de vagas jovens, contabilizados a partir dos *clusters* detectados pelo CFAR. Perdas de detecção foram contabilizadas somente nas subimagens

Figura 4.8 - (a) Região representante de condição de vagas jovens em imagem σ^0 , na polarização VV, em proximidade à costa de Aracaju (Sergipe). Retângulos em branco indicam os limites das subimagens analisadas. Retângulos em verde indicam embarcações confirmadas pelo AIS; (b) e (c) indicam resultados de detecção do CFAR; (d) e (e) são fotos das embarcações extraídas do marinetraffic.com.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 – (a) Região representante de condição de Marulhos em imagem σ^0 , na polarização VV, em proximidade à costa de Ilhéus (Bahia). Retângulos em branco indicam os limites das subimagens analisadas. Retângulos em verde indicam alvos detectados validados pelo AIS; (b) e (c) indicam resultados de detecção do CFAR; (d) e (e) fotos das embarcações extraídas do marinetraffic.com.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.5 – Taxa de falsos alarmes FAR para as subimagens analisadas em condições de vagas jovens. Entre parênteses estão representados os números de *clusters* detectados.

Método	PFA	Subimagem						Média
		971	960	959	958	948	944	
CFAR	10 ⁻⁴	0.00079 (351)	0.00106 (470)	0.00068 (303)	0.00051 (225)	0.0006 (265)	0.00101 (449)	0.00077 (343)
	10 ⁻⁵	0.00039 (173)	0.00052 (231)	0.00024 (106)	0.00013 (57)	0.00019 (84)	0.00035 (155)	0.0003 (134)
	10 ⁻⁶	0.00021 (93)	0.00029 (129)	0.00011 (48)	0.00005 (22)	0.00009 (40)	0.00013 (57)	0.00015 (65)
CFAR + ajuste do limiar	10 ⁻⁴	0.00024 (106)	0.00036 (158)	0.00017 (76)	0.00014 (62)	0.00019 (84)	0.00013 (58)	0.00021 (91)
	10 ⁻⁵	0.00017 (75)	0.0002 (88)	0.00007 (31)	0.00002 (8)	0.00004 (17)	0.00004 (17)	0.00009 (40)
	10 ⁻⁶	0.00012 (53)	0.00012 (53)	0.00005 (22)	0.00001 (2)	0.00001 (4)	0.00002 (8)	0.00005 (23)

Nota: A taxa de falso alarme (FAR) foi calculada desconsiderando os *clusters* dos alvos validados por AIS (A_V): $FAR = N_{FA} / (N_T - A_V)$.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.6 – Taxa de falsos alarmes FAR para as subimagens analisadas em condições de marulhos. Entre parênteses estão representados os números de *clusters* detectados.

Método	PFA	Subimagem								Média
		1293	1291	1283	1280	1272	1267	1255	1256	
CFAR	10 ⁻⁴	0.00135 (598)	0.00136 (603)	0.00132 (587)	0.00116 (516)	0.00134 (595)	0.001 (444)	0.00116 (516)	0.0014 (621)	0.00126 (560)
	10 ⁻⁵	0.00058 (258)	0.00077 (342)	0.00056 (249)	0.00057 (253)	0.00061 (271)	0.00039 (173)	0.0005 (222)	0.00054 (240)	0.00057 (251)
	10 ⁻⁶	0.00027 (120)	0.00048 (213)	0.00027 (120)	0.00033 (146)	0.00032 (142)	0.00022 (97)	0.00021 (93)	0.00024 (106)	0.00029 (130)
CFAR + ajuste do limiar	10 ⁻⁴	0.00024 (106)	0.00047 (209)	0.00025 (111)	0.00029 (129)	0.00026 (115)	0.00015 (66)	0.00019 (84)	0.00018 (80)	0.00025 (112)
	10 ⁻⁵	0.00009 (40)	0.00027 (120)	0.00009 (40)	0.00017 (75)	0.00009 (40)	0.00009 (40)	0.00007 (31)	0.00004 (17)	0.00011 (50)
	10 ⁻⁶	0.00007 (31)	0.00021 (93)	0.00006 (26)	0.00014 (62)	0.00007 (31)	0.00007 (31)	0.00005 (22)	0.00001 (4)	0.00009 (37)

Nota: A taxa de falso alarme (FAR) foi calculada desconsiderando os *clusters* dos alvos validados por AIS (A_V): $FAR = N_{FA} / (N_T - A_V)$.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.7 – Elementos da detecção para as subimagens representantes de vagas jovens.

Método	PFA	Subimagem	971	960	959	958	948	944	Soma
		Embarcações presentes	2	6	1	1	1	1	1
CFAR	10 ⁻⁴	Total de detecções	353	478	306	224	264	449	2074
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	351	473	305	224	263	448	2064
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2
	10 ⁻⁵	Total de detecções	115	172	82	60	79	149	657
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	113	167	81	60	78	148	647
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2
	10 ⁻⁶	Total de detecções	40	75	27	24	34	52	252
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	38	70	26	24	33	51	242
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2
CFAR + ajuste do limiar	10 ⁻⁴	Total de detecções	111	166	80	63	86	60	566
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	109	161	79	63	85	59	556
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2
	10 ⁻⁵	Total de detecções	22	38	9	9	14	12	104
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	20	33	8	9	13	11	94
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2
	10 ⁻⁶	Total de detecções	5	13	2	2	4	2	28
		Detecções Verdadeiras	2	5	1	0	1	1	10
		Falsos alarmes	3	13	1	2	3	1	23
		Perdas	0	1	0	1	0	0	2

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.8 – Elementos da detecção para subimagens representantes de marulhos.

Método	PFA	Subimagem	1293	1291	1283	1280	1272	1267	1255	1256	SOMA	
		Embarcações presentes	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
CFAR	10 ⁻⁴	Total de detecções	595	567	593	508	595	441	513	618	4430	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	594	566	592	507	594	440	512	617	4422	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 ⁻⁵	Total de detecções	223	219	208	173	239	130	197	236	1625	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	222	218	207	172	238	129	196	235	1617	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 ⁻⁶	Total de detecções	93	104	84	72	109	57	67	104	690	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	92	103	83	71	108	56	66	103	682	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CFAR + ajuste do limiar	10 ⁻⁴	Total de detecções	78	72	74	45	87	29	63	85	533	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	77	71	73	44	86	28	62	84	525	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 ⁻⁵	Total de detecções	9	27	10	12	11	7	10	14	100	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	8	26	9	11	10	6	9	13	92	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10 ⁻⁶	Total de detecções	4	16	3	6	4	2	1	3	39	
		Detecções Verdadeiras	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
		Falsos alarmes	3	15	2	5	3	1	0	2	31	
		Perdas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Produção do autor.

958 e 960, apresentando um total de duas perdas (células azuis na tabela). Importante notar que estas perdas de detecção estão presentes em todas as PFAs empregadas (células verdes), logo, não é possível atribuir estas perdas à escolha da PFA.

Estes dois casos de perdas podem ser visualizados na Figura 4.8b e c, onde os resultados da detecção são apresentados, abaixo da figura, de forma ampliada. Na subimagem 958, a perda foi encontrada para uma embarcação identificada como um veleiro de comprimento de 14 m (Figura 4.8d). Esta perda pode ser explicada ao observar a baixa refletividade do alvo, que apresenta σ^0 máximo de -6,8 dB, valor este que está no nível dos falsos alarmes na condição de vagas jovens e alcance médio (Figura 4.6). Portanto, infere-se que alvo se encontra abaixo da detectabilidade do CFAR (nas PFAs utilizadas). Ademais, o espaçamento dos pixels da imagem (30 × 30 m) desfavorece a detecção de embarcações deste porte.

Para a subimagem 960, dois fatores sugerem a perda de detecção. Primeiro, foram encontradas duas embarcações próximas ao alvo perdido (Figura 4.8c), que fizeram-se também presentes na janela de *background*, afetando assim a estimativa dos parâmetros da PDF. Com isso, o limiar de detecção é superestimado devido ao alto retroespalhamento das duas embarcações, dificultando a detecção. Esta “contaminação” do *background* é um notado problema apresentado pelo CFAR em sua forma tradicional, o qual limita sua utilização em situações de alta densidade de embarcações (BLAKE, 1988; AO et al., 2018). Para evitar este tipo de problema, Greidanus et al. (2017) adotaram a abordagem de remover da janela de *background* os pixels acima de uma linha de corte, referente ao percentil 95%. Esta abordagem também é utilizada em modificações do CFAR, como o OS-CFAR (*Order Statistics*-CFAR), no qual é reportado que o percentil 80% costuma funcionar bem (EL-DARYMLI et al., 2013). O segundo fator para esta perda consiste na subamostragem do *clutter* marinho, devido ao alvo perdido pelo CFAR estar localizado em região de borda da subimagem (Figura 4.8a). Esta subamostragem ocorre em razão que os

pixels fora da subimagem, próximos da borda, não foram incorporados no cálculo dos parâmetros, pois foi utilizado um preenchimento (*padding*) com elementos não-computáveis (NaNs). No caso, este problema pode ser evitado ao implementar no CFAR um mecanismo que utilize os valores de σ^0 presentes nas subimagens vizinhas.

Atentando-se para as subimagens representantes de marulhos, na Tabela 4.8, verifica-se que não ocorreram perdas de detecção (células azuis). Em relação aos falsos alarmes, a subimagem 1291 foi a que apresentou a maior quantidade, com 15 *clusters* falsamente detectados para $PFA=10^{-6}$ (célula verde). Após inspeção visual, foi verificado que destes 15 *clusters*, 8 se apresentaram relacionados à ambiguidades azimutais, estando localizados equidistantes, em distância de ~5,3 km, à embarcações de grande porte (retângulos verdes na Figura 4.9b). A distância das ambiguidades azimutais em relação a estas embarcações pode ser estimada a partir de Li e Johnson (1983), utilizando as informações disponibilizadas nos metadados do produto Sentinel-1. No Apêndice E é demonstrado que para a faixa de alcance desta subimagem (1291), a distância de ~5,3 km observada nas imagens se confirma. Outro ponto notado é que a região apresentou ventos de baixa magnitude (3,7 m/s), e particularmente nestas condições, as ambiguidades tendem a ser mais proeminentes em relação ao *clutter* (VELOTTO et al., 2014), e por isso foram detectadas pelo CFAR mesmo com a diminuição das PFAs.

Ainda na região de marulhos, há um caso interessante de detecção do CFAR confirmada pelo AIS. Na subimagem 1256 foi detectado um veleiro, de comprimento de 18 m (Figura 4.9c). Esta embarcação apresentou σ^0 máximo de -5,6 dB, que ao compararmos com o retroespalhamento médio dos falsos alarmes na condição de marulhos e alcance médio (Figura 4.6), pode-se afirmar que a embarcação possui refletividade acima do *clutter* que normalmente se apresenta nestas condições ambientais. Assim, isto evidencia que mesmo com um espaçamento de pixel 30 × 30 m, pequenas embarcações podem ser

detectadas dependendo das condições ambientais apresentadas, reforçando a importância de se incorporar informações ambientais no processo de detecção. Diante do exposto acima, é possível afirmar que a configuração do CFAR que mostrou a melhor performance de detecção é a composta por ajuste de limiar e $PFA=10^{-6}$. Isto se deu devido à supressão dos falsos alarmes e por não ter ocasionado perda de alvos.

4.4 Correlação entre as detecções CFAR e AIS

Nesta seção são apresentados os resultados da associação entre as detecções do CFAR e das mensagens AIS para as três imagens utilizadas (Apêndice F). Na Tabela 4.9 são fornecidos os números das detecções encontrados e na Figura 4.10 as detecções estão plotadas. O CFAR resultou em um total de 307 detecções (*clusters*) para as três imagens, dos quais 88 (28,7%) passaram pelos critérios de discriminação. Este alto número de *clusters* filtrados se deu devido a grande quantidade de *clusters* de tamanho de 1 pixel. Assim, estas 88 detecções são consideradas como detecções de maior confiabilidade, as quais são comparadas com os navios que transmitiram AIS.

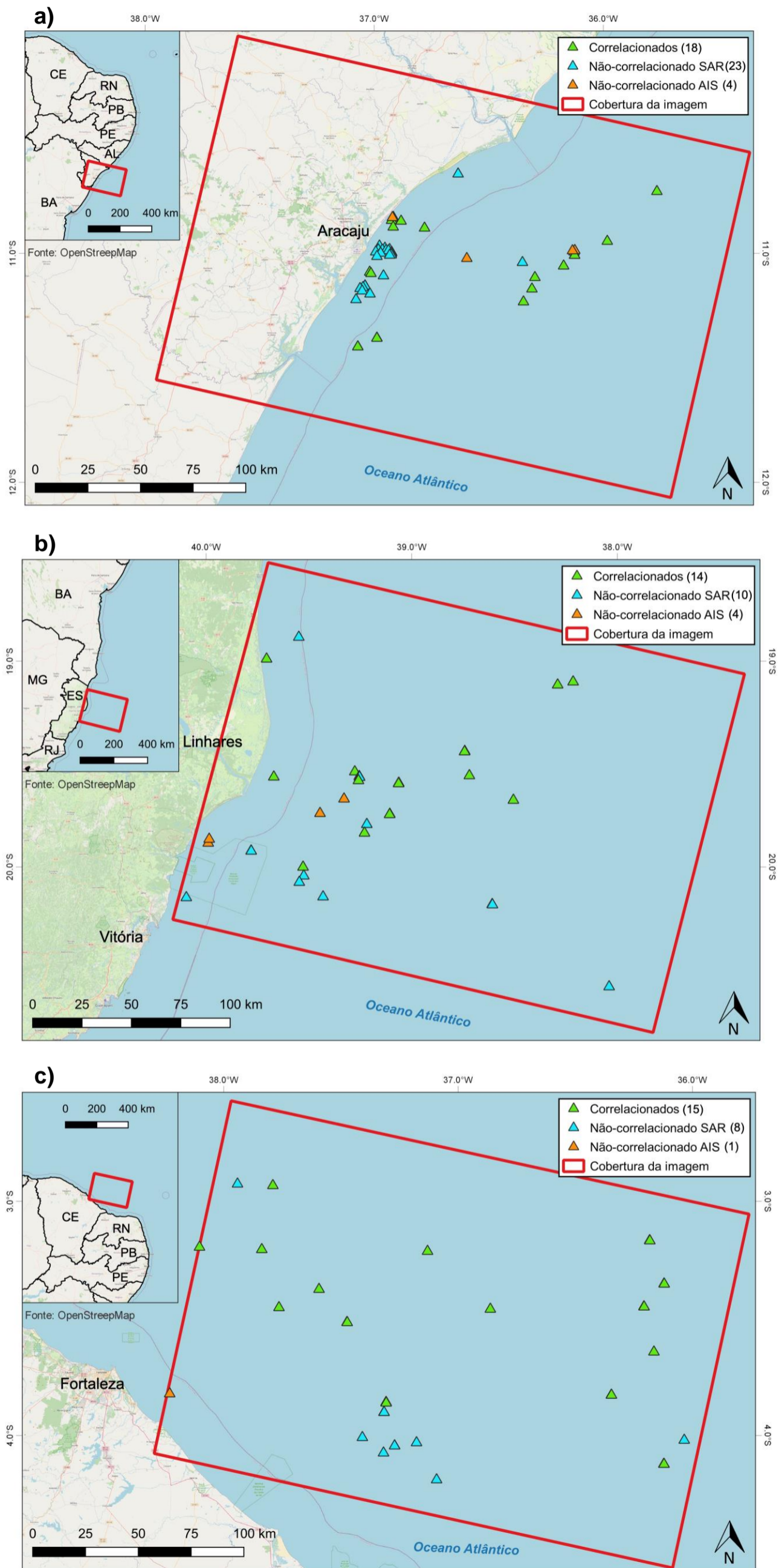
O AIS apresentou um total de 56 embarcações únicas nas imagens. Ao confrontar as detecções do CFAR de maior confiabilidade (88) com estas embarcações do AIS, foram encontrados 47 correlações de alvos (triângulos verdes nas figuras), o que representa 53,4% do total de detecções do CFAR e 83,9% do AIS. Em relação às posições não-correlacionadas, foi observado que um total de 9 pontos AIS (16,1%) não foram detectados pelo CFAR. Após inspecionar visualmente, foi encontrado que dos 9 pontos (triângulos laranjas), 4 se deram devido à falhas do CFAR (alvos próximo a bordas ou contaminação da janela *background*) e 5 foram decorrentes dos tamanhos das embarcações (< 20 m de comprimento), que encontram-se no nível de retroespalhamento do *clutter* local.

Tabela 4.9 – Elementos correlacionados e não-correlacionados nas imagens SAR (detecções do CFAR) e do AIS.

	Imagem 1 (Figura 4.10a)		Imagem 2 (Figura 4.10b)		Imagem 3 (Figura 4.10c)		SOMA	
	SAR	AIS	SAR	AIS	SAR	AIS	SAR	AIS
Total	41	22	24	18	23	16	88	56
Correlacionados	18		14		15		47	
% do total	43.9%	81.8%	58.3%	77.8%	65.2%	93.8%	53.4%	83.9%
Não-correlacionados	23	4	10	4	8	1	41	9
% do total	56.1%	18.2%	41.7%	22.2%	34.8%	6.3%	46.6%	16.1%

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.10 – Elementos de detecção para (a) Imagem 1; (b) Imagem 2 e (c) Imagem 3. As respectivas imagens σ^0 estão dispostas no Apêndice F.

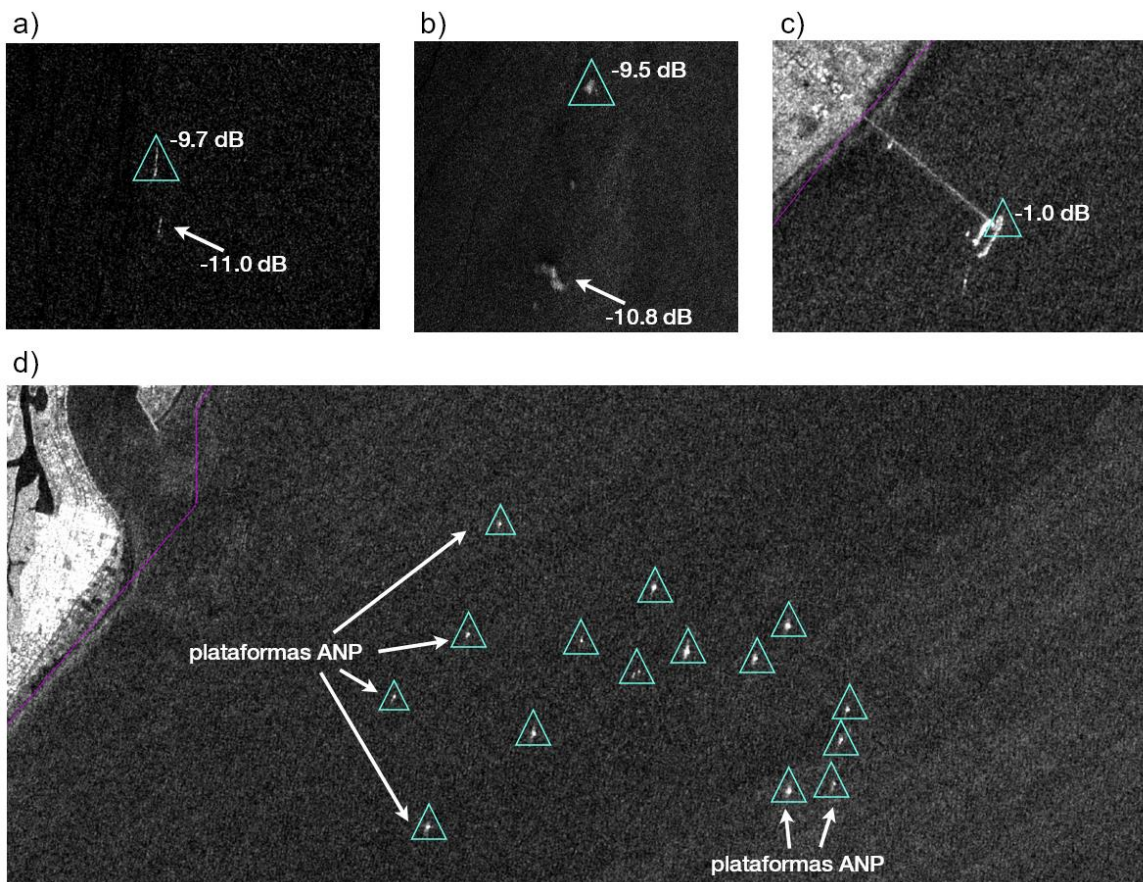


Fonte: Produção do autor.

Para as detecções nas imagens SAR não-correlacionadas, foi encontrado um total de 41 casos (46,6%) (triângulos azuis). Para estes, a seguinte quantidade foi observada como falso alarme: (i) dois são considerados ambiguidades azimutais; (ii) um se apresenta relacionado à estrutura portuária, a qual não foi removida com o mascaramento terrestre (250 m); (iii) três estão relacionados a feições oceânicas de alto brilho (células de chuva e recife de coral emerso). Na Figura 4.11a-b-c são demonstrados exemplos destes falsos alarmes. Das detecções restantes (35 de 41), 7 foram identificadas como alvos fixos ao confrontá-las com a localização de plataformas de petróleo da Agência Nacional de Petróleo (ANP). As 28 detecções restantes (28 de 41) foram inspecionadas visualmente e são consideradas como embarcações, pois o sinal encontra-se nitidamente acima do *clutter* local (exemplos em Figura 4.13d). Estes navios, na verdade, podem ser considerados como “navios negros” (*dark ships*), os quais não estavam transmitindo mensagens AIS.

Se aceitarmos estes números, a fração de navios não-reportantes nestas imagens é de $28/(28+47) = 37,3\%$. Este valor está abaixo dos encontrados em estudos como o de Greidanus et al. (2017) e Kurekin et al., (2019), que reportaram taxas de 67% e 75%, respectivamente. Um possível motivo é que o sistema AIS aqui utilizado (HisdeSat) é de maior frequência temporal, e portanto, favorece o confronto entre as detecções SAR e AIS. É notado que estes “navios negros” localizam-se majoritariamente próximos a costa (23 de 28 estão em menos de 20 km de distância), o que pode indicar que estes navios reportam para outro sistema de identificação que não seja o satelital. Não obstante, o fato da detecção destas 28 embarcações, as quais não estavam no AIS, evidencia que atividades de detecção como feitas neste estudo possuem um significativo potencial para a melhoria da consciência situacional dos mares brasileiros.

Figura 4.11 – Exemplos de detecções do CFAR não reportadas pelo AIS. (a) recife de coral emerso; (b) células de chuva; (c) terminal portuário que encontra-se fora da linha de costa (linha rosa); (d) “navios negros” e plataformas de óleo (apontadas pelas setas). Valores de retroespalhamento indicam o σ^0 máximo encontrado.



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral do trabalho consistiu em investigar os efeitos de condições ambientais (ventos e ondas) e geometria de aquisição (ângulo de incidência) sobre o algoritmo de detecção CFAR, por meio de imagens *single-pol* (polarização VV) do Sentinel-1. Utilizando informações de ventos, ondas e ângulo de incidência do radar, foi possível gerar um *dataset* representativo de diversas condições ambientais marinhas. Para isto, o parâmetro idade de onda *WA* se mostrou eficiente para categorizar as imagens SAR, pois não só permitiu a identificação de ambientes distintos, representantes de estágios de desenvolvimento de ondas, como também a avaliação da relativa influência de vagas e marulhos no CFAR.

Ao longo das análises, foi produzida uma base de informações que traz luz ao processo de detecção sob a ótica do ambiente marinho, podendo potencialmente ser usada em etapas da detecção de alvos no oceano. A metodologia do CFAR, baseada no modelo GFD, apresentou boa versatilidade em modelar o *clutter* marinho, especialmente frente às variações da geometria de aquisição. Já frente às variações do ambiente, o CFAR apresentou falhas no manutenção da quantidade de falsos alarmes, sobretudo em condições de marulhos (*swell*), podendo estar associadas à introdução de elementos espalhadores devido à modulação hidrodinâmica, que favorecem a refletividade do radar em regiões íngremes das onda. O tempo de processamento do CFAR empregado foi relativamente rápido, apresentando capacidade de processar uma subimagem (área de 20 × 20 km), em um computador *desktop* comum, em aproximadamente 30 s.

Para contornar a incorporação de excessivos falsos alarmes pelo CFAR, foi proposto um ajuste de limiar de detecção, baseado nas classes de idade de onda *WA*, em que foram sugeridos valores de ajuste do parâmetro f , otimizados levando-se em conta um conjunto de subimagens. O experimento de detecção revelou que o ajuste proposto trouxe benefícios para a detecção, através da

supressão dos falsos alarmes e não ocasionando a perda de alvos reais. Na verdade, os alvos que foram perdidos neste experimento foram decorrentes do pequeno tamanho das embarcações ou de falhas do CFAR (do método empregado), que podem ser contornadas a partir das modificações discutidas.

Os principais resultados encontrados podem ser sumarizados a seguir:

- O modelo GFD se molda bem às variações do ângulo de incidência, porém tende a sofrer distorções em condições de mares mais desenvolvidos. Estas distorções levam a uma subestimativa do *clutter* marítimo, resultando em uma quantidade de falsos alarmes maior que a esperada (maior que N_{FA} ideal);
- O ajuste de limiar apresentou uma redução de, em média, 26% nos falsos alarmes, não ocasionando perda de alvos. Este ajuste pode ser incorporado no CFAR, permitindo a correção dos limiares conforme o ambiente marinho apresentado;
- A probabilidade de falso alarme PFA indicada para esta configuração do SAR (banda C, imagens σ^0 , polarização VV e resolução espacial 30 m) é de 10^{-6} , a qual mostrou melhor desempenho em experimento ao suprimir maior quantidade de falsos alarmes;
- Ambiguidades azimutais relacionadas a embarcações de grande porte ocasionaram número considerável de falsos alarmes. Em condições de ventos fracos (ou na classe WA de marulhos), estas mostraram-se mais evidentes. Entretanto, a discriminação destas feições pode ser automatizada, em etapas posteriores ao CFAR, a partir do cálculo da sua distância em relação ao alvo;
- Embarcações de pequeno porte (comprimento < 20 m) podem ser detectadas, mesmo em médias resoluções espaciais (30m), dependendo das condições apresentadas. Nestes casos, como foi visto na análise do retroespalhamento dos falsos alarmes, a condição mais favorável de detecção se dá em condição de marulhos e faixa de alcance longo (*far-range*);

- Dos navios que estavam nas imagens utilizadas no experimento, 37,3% não estavam reportando AIS. Este exemplo indica o valor adicional, em relação ao AIS, que a metodologia desenvolvida nesta pesquisa possui para a vigilância marítima a partir de imagens SAR.

Por fim, o presente trabalho se limitou a configuração do Sentinel-1, em banda C e *single-pol* (polarização VV), que embora não ofereça informações adicionais de polarimetria, fornece no momento presente a maior quantidade de dados de livre acesso, o que favorece o monitoramento de extensas áreas. A seguir, sugere-se os seguintes pontos para abordagens em trabalhos futuros:

- Análise dos efeitos ambientais em dados *dual*, *full-pol* e polarimetria compacta, de forma que as informações polarimétricas dos alvos possam ser incorporadas adicionalmente no processo decisório de detecção. Também, vale a investigação de sensores em outras bandas, como as X, S e L;
- Desenvolvimento de modelos de aprendizagem profunda (*deep learning*) para detecção de alvos. Para isso, o esquema proposto de organização dos dados e incorporação de informações ambientais pode ser benéfico;
- Identificação de feições oceanográficas. As análises limitaram-se a subimagens homogêneas (sem grande variância do σ^0), e por isso seria interessante a exploração de técnicas de identificação de feições de alto brilho na imagem, como realizada em Wang et al. (2019), de modo a refinar os resultados do CFAR de forma inteligente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOV, S.; RUBEL, O.; LUKIN, V.; KOZHEMIKIN, R.; KUSSUL, N. Speckle reducing for sentinel-1 SAR data. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, p. 2353–2356, 2017.
- AI, J.; PEI, Z.; YAO, B.; WANG, Z.; XING, M. AIS Data aided rayleigh CFAR ship detection algorithm of multiple-target environment in SAR images. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 2021.
- ALEXANDROV, C.; TSVETKOV, M.; KOLEV, N.; SIVKOV, Y.; HRISTOV, A. Sentinel - 1 SAR image processing for target detection and evaluation by using bulgarian VTMS. In: CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES, DRIVES AND POWER SYSTEMS, 16., 2019. **Proceedings...** 2019. v. 2, p. 1–6.
- ALPERS, W.; ZHANG, B.; MOUCHE, A.; ZENGE, K.; CHAN, P. W. Rain footprints on C-Band Synthetic Aperture Radar images of the ocean - revisited. **Remote Sensing Of Environment**, v. 187, p. 169–185, 2016.
- AO, W.; XU, F.; LI, Y.; WANG, H. Detection and discrimination of ship targets in complex background from spaceborne ALOS-2 SAR images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 2, p. 536–550, 2018.
- ARDHUIN, F.; STOPA, J.; CHAPRON, B.; COLLARD, F.; SMITH, M.; THOMSON, J.; DOBLE, M.; BLOMQUIST, B.; PERSSON, O.; COLLINS, C. O.; WADHAMS, P. Measuring ocean waves in sea ice using SAR imagery: a quasi-deterministic approach evaluated with Sentinel-1 and in situ data. **Remote Sensing of Environment**, v. 189, p. 211–222, 2017.
- BLAKE, S. OS-CFAR theory for multiple targets and nonuniform clutter. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 24, n. 6, p. 785-790, 1988.
- BRAUN, N.; GADE, M. Multi-frequency scatterometer measurements on water surfaces agitated by artificial and natural rain. **International Journal Of Remote Sensing**, v. 27, n. 1, p. 27–39, 2006.
- CASTRO, B. M.; BRANDINI, F. P.; FORTES, J. F. A Amazônia azul : recursos e preservação. **Revista USP**, n. 113, p. 7–26, 2017.
- CICUENDEZ-PEREZ, J.; ALVAREZ ALVAREZ, M.; HEIKKONEN, J.; INDREGARD, M. Identification of bluefin tuna cages in Mediterranean Sea fishing grounds from SAR images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 16, p. 4461–4474, 2011.

COSTA, M. M. S. **Compact polarimetry reconstruction algorithm for a geophysical media With volumetric scattering using L-Band Quad-Pol data**. 153p. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologias Espaciais) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2019.

CRISP, D. J. The state-of-the-art in ship detection in Synthetic Aperture Radar imagery. **Information Sciences**, n. 0272, p. 115, 2004.

DE FARIAS, E. G. G.; LORENZZETTI, J. A.; CHAPRON, B. Swell and wind-sea distributions over the mid-latitude and Tropical North Atlantic for the period 2002–2008. **International Journal of Oceanography**, v. 2012, p. 1–8, 2012.

DE OLIVEIRA ESTEVO, M.; LOPES, P. F. M.; DE OLIVEIRA JÚNIOR, J. G. C.; JUNQUEIRA, A. B.; DE OLIVEIRA SANTOS, A. P.; DA SILVA LIMA, J. A.; MALHADO, A. C. M.; LADLE, R. J.; CAMPOS-SILVA, J. V. Immediate social and economic impacts of a major oil spill on Brazilian coastal fishing communities. **Marine Pollution Bulletin**, v. 164, p. 3–5, 2021.

DENG, Z.; SUN, H.; ZHOU, S.; ZHAO, J. Learning deep ship detector in SAR images from scratch. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 6, p. 4021–4039, 2019.

DEVORE, M. D.; O’SULLIVAN, J. A. Quantitative statistical assessment of conditional models for synthetic aperture radar. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 13, n. 2, p. 113–125, 2004.

EL-DARYMLI, K.; MCGUIRE, P.; POWER, D.; MOLONEY, C. Target detection in synthetic aperture radar imagery: a state-of-the-art survey. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, n. 1, p. 071598, 2013.

ELDHUSET, K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne sar images in coastal regions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 4, p. 1010–1019, 1996.

EMMENS, T.; AMRIT, C.; ABDI, A.; GHOSH, M. The promises and perils of Automatic Identification System data. **Expert Systems with Applications**, v. 178, e 114975, 2021.

EMERY, W.; CAMPS, A. Radar. In: _____ (Ed.). **Introduction to satellite remote sensing: atmosphere, ocean, land and cryosphere applications**. [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 291–320.

ESPESETH, M. M.; BREKKE, C.; JONES, C. E.; HOLT, B.; FREEMAN, A. The Impact of system noise in polarimetric SAR imagery on oil spill observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 58, n. 6, p. 4194–4214, 2020.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Sentinel-1 observation scenario**. 2019. Disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario>>. Acesso em: 9 mar. 2020

FELIPE JUNIOR, F. A dinâmica recente do transporte marítimo de cabotagem e longo curso no Brasil. **Revista Transporte y Territorio**, n. 20, p. 33, 2019.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15–28, 2005.

FICHE, A.; ANGELLIAUME, S.; ROSENBERG, L.; KHENCHAF, A. Analysis of X-Band SAR sea-clutter distributions at different grazing angles. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 53, n. 8, p. 4650–4660, 2015.

FILIPPONI, F. Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. In: INTERNATIONAL ELECTRONIC, 3., 2019. **Proceedings...** 2019.

FINGAS, M.; BROWN, C. E. A review of oil spill remote sensing. **Sensors (Switzerland)**, v. 18, n. 1, p. 1—18, 2018.

FOLLEY, M. The wave energy resource. In: PECHER, A.; KOFOED, J. P. (Ed.). **Handbook of ocean wave energy**. [S.l.]: Springer Nature, 2017.

FONSECA, L. C. M. **Consciência situacional marítima (maritime domain awareness): as perspectivas de aplicação pelo poder naval brasileiro**. 76p. Tese (Doutorado em Política e Estratégia Marítimas) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

GAMBARDELLA, A.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. A physical full-resolution SAR ship detection filter. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 4, p. 760–763, 2008.

GAO, G. Statistical modeling of SAR images: a survey. **Sensors**, v. 10, n. 1, p. 775–795, 2010.

GAO, G.; OUYANG, K.; LUO, Y.; LIANG, S.; ZHOU, S. Scheme of parameter estimation for generalized gamma distribution and its application to ship detection in SAR images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 3, p. 1812–1832, 2016.

GAO, G.; SHI, G.; LI, G.; CHENG, J. Performance comparison between reflection symmetry metric and product of multilook amplitudes for ship detection in dual-polarization SAR images. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 5026–5038, 2017.

GARRISON, T.; ELLIS, R. **Oceanography: an invitation to marine science**. [S.l.]: Cengage Learning, 2015.

GMV. **Sentinel 1 POD products performance**. [S.l.]: GMV, 2019.

GREIDANUS, H.; SANTAMARIA, C.; STASOLLA, M.; ALVAREZ, M.; FERNANDEZ ARGUEDAS, V.; ARGENTIERI, P. Sentinel-1 Maritime Surveillance. **Joint Research Centre, the European Commission**, 76 p, 2012.

GREIDANUS, H.; ALVAREZ, M.; SANTAMARIA, C.; THOORENS, F. X.; KOURTI, N.; ARGENTIERI, P. The SUMO ship detector algorithm for satellite radar images. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, 2017.

GREIDANUS, H.; SANTAMARIA, C. **First analyses of Sentinel-1 images for maritime surveillance**. [S.l.]: Joint Research Centre, 2014. 56p.

HASSELMANN, K. Theory of synthetic aperture radar ocean imaging: a MARSEN view. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. C3, p. 4659–4686, 1985.

HERSBACH, H. Comparison of C-Band scatterometer CMOD5.N equivalent neutral winds with ECMWF. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 27, n. 4, p. 721–736, 2010.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVIDA, M.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; DIAMANTAKIS, M.; DRAGANI, R.; FLEMMING, J.; FORBES, R.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; HÓLM, E.; JANISKOVÁ, M.; KEELEY, S.; LALOYLAUX, P.; LOPEZ, P.; LUPU, C.; RADNOTI, G.; DE ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

HOLT, B. SAR imaging of the ocean surface. In: JACKSON, C. R.; APEL, J. R. (Ed.). **SAR marine users manual**. [S.l.]: NOAA, 2004. p. 25–79.

HOLTHUIJSEN, I. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

HUANG, L.; LIU, B.; LI, B.; GUO, W.; YU, W.; ZHANG, Z.; YU, W. OpenSARShip: a dataset dedicated to Sentinel-1 ship interpretation. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 195–208, 2018.

IERVOLINO, P.; GUIDA, R. A Novel ship detector based on the generalized-likelihood ratio test for SAR imagery. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 3616–3630, 2017.

IERVOLINO, P.; GUIDA, R.; WHITTAKER, P. A novel ship-detection technique for Sentinel-1 SAR data. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON SYNTHETIC APERTURE RADAR (AP SAR), 5., 2015. **Proceedings...** IEEE, 2015. p. 797–801.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Solas consolidated edition 2014**. 6.ed.. London, Uk: [s.n.], 2014.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Amendments to the International Aeronautical and Maritime Search and Rescue (Iamsar) Manual**. London, Uk: [s.n.], 2012. Disponível Em: <https://Www.Mardep.Gov.Hk/En/Msnote/Pdf/Msin1242anx1.Pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

JANSSEN, P.; ALPERS, W. **Why SAR wave mode data of ERS and Envisat are inadequate for giving the probability of occurrence of freak waves**. [S.I.]: European Space Agency, 2006.

JATIAULT, R.; DHONT, D.; LONCKE, L.; DUBUCQ, D. Monitoring of natural oil seepage in the Lower Congo Basin using SAR observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 191, p. 258–272, 2017.

KANJIR, U.; GREIDANUS, H.; OŠTIR, K. Vessel detection and classification from spaceborne optical images: a literature survey. **Remote Sensing of Environment**, v. 207, p. 1–26, 2018.

KLEYNHANS, W.; SALMON, B.P.; SCHWEGMANN, C. P.; MDAKANE, L. Use of Sentinel-1 data for vessel detection in South African oceans: early results. In: IEEE RADAR CONFERENCE, 2015. **Proceedings...** IEEE, 2015.

KOMEN, G.J.; CAVALERI, L.; DONELAN, M.; HASSELMANN, K.; HASSELMANN, S.; JANSSEN, P. A. E. M. **Dynamics and modelling of ocean waves**. New York: Cambridge University Press, 1994.

KRAUSE, D.; SCHWARZ, E.; VOINOV, S.; DAMEROW, H.; TOMECKI, D. Sentinel-1 near real-time application for maritime situational awareness. **CEAS Space Journal**, v. 11, n. 1, p. 45–53, 2019.

KRYLOV, V. A.; MOSER, G.; SERPICO, S. B.; ZERUBIA, J. On the method of logarithmic cumulants for parametric probability density function estimation. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 22, n. 10, p. 3791–3806, 2013.

KUDRYAVTSEV, V.; KOZLOV, I.; CHAPRON, B.; JOHANNESSEN, J. A. Quad-polarization SAR features of ocean currents. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 9, p. 6046-6065, 2014.

KUREKIN, A. A.; LOVEDAY, B. R.; CLEMENTS, O.; QUARTLY, G. D.; MILLER, P. I.; WIAFE, G.; AGYEKUM, K. A. Operational monitoring of illegal fishing in Ghana through exploitation of satellite earth observation and AIS data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, 2019.

LEÃO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Tropical coast of Brazil. **Seas At The Millennium - An Environmental Evaluation**, v. 41, p. 719–729, 2000.

LEE, J. S. et al. Speckle filtering of Synthetic Aperture Radar images: a review. **Remote Sensing Reviews**, v. 8, n. 4, p. 313–340, 1994.

LEE, J.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. [S.I.]: Taylor & Francis, 2009.

LEFRÈVRE, J.-M.; COTTON, P. D. Ocean surface waves. In: FU, L. L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite altimetry and Earth sciences: a handbook of techniques and applications**. [S.I.]: Academic Press, 2001.

LEHNER, S. et al. Ship surveillance with high resolution Terrasar-X satellite in African waters. In: BARALE, V.; GADE, M. (Ed.). **Remote sensing of the African seas**. [S.I.]: Springer, 2014. p. 285–313.

LI, H. C.; HONG, W.; WU, Y. R.; FAN, P. Z. On the empirical-statistical modeling of SAR images with generalized gamma distribution. **IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing**, v. 5, n. 3, p. 386-397, 2011.

LI, J.; ZHANG, M.; FAN, W.; NIE, D. Facet-based investigation on microwave backscattering from sea surface with breaking waves: sea spikes and SAR imaging. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 4, p. 2313-2325, 2017a.

LI, B.; LIU, B.; HUANG, L.; GUO, W.; ZHANG, Z.; YU, W. OpenSARShip 2.0: a large-volume dataset for deeper interpretation of ship targets in Sentinel-1 imagery. In: SAR IN BIG DATA ERA: MODELS, METHODS AND APPLICATIONS (BIGSAR DATA), 2017. **Proceedings... IEEE**, 2017b.

LI, Y.; LAI, X.; ZHANG, X.; LIU, G. Comparative study of sea clutter distribution and ship detectors' performance for Sentinel-1 synthetic aperture radar image. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 044506, 2019.

LORENZZETTI, J. A.; PAES, R. L.; GHERARDI, D. F. M. A. Performance comparison of a Cfar ship detection algorithm using Envisat, Radarsat, Cosmo-Skymed, and Terrasar-X images. In: INTERNATIONAL WORKSHOP IN ADVANCES OF SAR OCEANOGRAPHY, 3., 2010. **Proceedings... 2010**. p. 7–10.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

MAGALHÃES, J. M.; ALPERS, W.; SANTOS-FERREIRA, A. M.; DA SILVA, J. C. Surface wave breaking caused by internal solitary waves: effects on radar backscattering measured by SAR and Radar Altimeter. **Oceanography**, v. 34, n. 2, 2021.

MALLAS, P.; GRABER, H. Imaging ships from satellites. **Oceanography**, v. 26, n. 2, p. 150–155, 2013.

MARINO, A.; SANJUAN-FERRER, M. J.; HAJNSEK, I.; OUCHI, K. Ship detection with spectral analysis of synthetic aperture radar: a comparison of new and well-known algorithms. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 5416–5439, 2015.

MARTIN-DE-NICOLAS, J.; JARABO-AMORES, P.; DEL-REY-MAESTRE, N.; GOMEZ-DEL-HOYO, P.; BARCENA-HUMANES, J. L. Robustness of a generalized gamma CFAR ship detector applied to TerraSAR-X and Sentinel-1 images. In: EUROCON, 2015. **Proceedings...** 2015.

MIGLIACCIO, M.; GAMBARDELLA, A.; TRANFAGLIA, M. SAR polarimetry to observe oil spills. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 2, p. 506–511, 2007.

MIGLIACCIO, M.; NUNZIATA, F.; BUONO, A. SAR polarimetry for sea oil slick observation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 12, p. 3243–3273, 2015.

MIGLIACCIO, M.; TRANFAGLIA, M.; ERMAKOV, S. A. A physical approach for the observation of oil spills in SAR images. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 30, n. 3, p. 496–507, 2005.

MILER, R. K.; BUJAK, A. Exact Earth Satellite – AIS as one of the most advanced shipping monitoring systems In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSPORT SYSTEMS TELEMATICS, 13., 2013. **Proceedings...** 2013.

MOREIRA, A.; PRATS-IRAOLA, P.; YOUNIS, M.; KRIEGER, G.; HAJNSEK, I.; PAPATHANASSIOU, K. P. A tutorial on synthetic aperture radar. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 1, n. 1, p. 6–43, 2013.

MURA, J. C.; MOREIRA, J. R. Processador Sar - Inpe/Dir. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996.

NICOLAS, J. M.; ANFINSEN, S. N. Introduction to second kind statistics: application of log-moments and log-cumulants to the analysis of radar image distributions. **Trait Signal**, v. 19, n. 3, p. 139-167, 2002.

NOBRE, P.; LEMOS, A.T.; GIAROLLA, E.; CAMAYO, R.; NAMIKAWA, L.; KAMPEL, M.; RUDORFF, N.; BEZERRA, D. X.; LORENZZETTI, J.; JORGE GOMES, J.; DA SILVA JR, M. B.; LAGE, C. P. M.; PAES, R. L.; BEISL, C.; LOBÃO, M. M.; BIGNELLI, P. A.; MOURA, N.; GALVÃO, W. S.; POLITO, P. S. The 2019 northeast Brazil oil spill: scenarios. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, 2021. Aceito.

NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M.; BROWN, C. E. Reflection symmetry for polarimetric observation of man-made metallic targets at sea. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 37, n. 3, p. 384–394, 2012.

NUNZIATA, F. ET AL. Dual-polarimetric C-And X-Band SAR data for coastline extraction. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 11, p. 4921–4928, 2016.

NUNZIATA, F.; MARINO, A.; VELOTTO, D. Editorial for the special issue “Remote sensing of target detection in marine environment”. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1–3, 2019.

OCAMPO-TORRES, F. Ocean-surface waves. In: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (Ed.). **Guide to wave analysis and forecasting**. [S.I.]: WMO, 2018.

PAES, R. L.; NUNZIATA, F.; MIGLIACCIO, M. On the capability of hybrid-polarity features to observe metallic targets at sea. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 41, n. 2, p. 346–361, 2016.

PAPPAS, O. A.; ANANTRASIRICHAJ, N.; ACHIM, A. M.; ADAMS, B. A. River planform extraction from high-resolution SAR images via generalized gamma distribution superpixel classification. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 59, n. 5, p. 3942–3955, 2021.

PARK, J. W.; KOROSOV, A. A.; BABIKER, M.; SANDVEN, S.; WON, J. S. Efficient thermal noise removal for Sentinel-1 TOPSAR cross-polarization channel. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 56, n. 3, p. 1555–1565, 2018.

PELICH, R.; LONGEPE, N.; MERCIER, G.; HAJDUCH, G.; GARELLO, R. Performance evaluation of Sentinel-1 data in SAR ship detection. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, v. 2015- Novem, p. 2103–2106, 2015a.

PELICH, R.; LONGÉPÉ, N.; MERCIER, G.; HAJDUCH, G.; GARELLO, R. AIS-based evaluation of target detectors and SAR sensors characteristics for maritime surveillance. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 3892–3901, 2015b.

PELICH, R. et al. Large-scale automatic vessel monitoring based on dual-polarization Sentinel-1 and Ais data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 9, p. 1–21, 2019.

PHILLIPS, O. M. Radar returns from the sea surface—Bragg scattering and breaking waves. **Journal of Physical Oceanography**, v. 18, n. 8, p. 1065–1074, 1988.

PICHEL, W. G. et al. Ship and wake detection. In: JACKSON, C. R.; APEL, J. R. (Ed.). **Synthetic Aperture Radar marine user's manual**. [S.l.]: NOAA, 2004. p. 277-303.

QIN, X.; ZHOU, S.; ZOU, H.; GAO, G. A CFAR detection algorithm for generalized gamma distributed background in high-resolution SAR images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 10, n. 4, p. 806–810, 2013.

QUINA, F.; NEVES, J.; MARQUES, P. A look on ships detection techniques using SAR Images. In: OCEANS, 2019, Marseille. **Proceedings...** 2019.

RANEY, K. Radar fundamentals: technical perspective. In: HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. (Ed.). **Principles and applications of imaging radar**. 3.ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1998. p. 9–130.

RODGER, M.; GUIDA, R. Classification-aided SAR and AIS data fusion for space-based maritime surveillance. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 1–26, 2021.

ROSSI, C.; BAYARAA, M.; JONES, T.; MINCHELLA, A.; AGASS, S. The NOVASAR UK background mission satellite applications catapult. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2019. **Proceedings...** IEEE, 2019. p. 8396–8399.

SANTAMARIA, C.; ALVAREZ, M.; GREIDANUS, H.; SYRRIS, V.; SOILLE, P.; ARGENTIERI, P. Mass processing of sentinel-1 images for maritime surveillance. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 1–20, 2017.

SCHWEGMANN, C. P. et al. Very deep learning for ship discrimination in Synthetic Aperture Radar imagery. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2016. **Proceedings...** 2016. p. 104–107.

SCHWEGMANN, C. P. **Advanced ship detection methods in Synthetic Aperture Radar imagery**. Tese (Doutorado) - University of Pretoria, Pretoria, 2018.

SHIRVANY, R.; CHABERT, M.; TOURNERET, J. Y. Ship and oil-spill detection using the degree of polarization in linear and hybrid/compact dual-pol SAR. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 5, n. 3, p. 885–892, 2012.

SILVA, A. C.; FAÇANHA, P.; BEZERRA, C.; ARAÚJO, A.; PITOMBEIRAS, E. Características das ondas "Sea" e "Swell" observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography**, v. 39, n. 2, 123-132, 2011.

SILVA, G. K.; DOS SANTOS, A. C. S.; DA SILVA, M. V. M.; BRABO ALVES, J. M.; BARROS BARBOSA, A. C.; DE OLIVEIRA FREIRE, C.; ALCÂNTARA, C. R.; SOMBRA, S. S. Estudo dos padrões de ventos offshore no litoral do Ceará utilizando dados estimados pelo produto de satélites BSW. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 679-690, 2017.

SKOLNIK, M. I. **Introduction to radar systems**. 3.ed. [S.I.]: Mcgran Hill, 2001. 785p.

SMITH, B. H. An analytic nonlinear approach to sidelobe reduction. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 10, n. 8, p. 1162–1168, 2001.

SNAPIR, BORIS; WAINE, TOBY W.; BIERMANN, LAUREN. Maritime vessel classification to monitor fisheries with SAR: demonstration in the north sea. **Remote Sensing**, v. 11, n. 3, p. 353, 2019.

SOARES, M. D. O.; LOTUFO, T.; VIEIRA, L. M.; SALANI, S. Brazilian marine animal forests: a new world to discover in the southwestern Atlantic. In: ROSSI, S.; BRAMANTI, L.; GORI, A.; SACO DEL VALLE, C. O. (Ed.). **Marine animal forests**. [S.I.]: Springer, 2016. p.1-38.

SOARES, M. O.; TEIXEIRA, C. E. P.; BEZERRA, L. E. A.; PAIVA, S. V.; TAVARES, T. C. L.; GARCIA, T. M.; DE ARAÚJO, J. T.; CAMPOS, C. C.; FERREIRA, S. M. C.; MATTHEWS-CASCON, H.; FROTA, A.; MONT'ALVERNE, T. C. F.; SILVA, S. T.; RABELO, E. F.; BARROSO, C. X.; FREITAS, J. E. P.; MELO JÚNIOR, M.; CAMPELO, R. P. S.; SANTANA, C. S.; CARNEIRO, P. B. M.; MEIRELLES, A. J.; SANTOS, B. A.; OLIVEIRA, A. H. B.; HORTA, P.; CAVALCANTE, R. M. Oil spill in South Atlantic (Brazil): environmental and governmental disaster. **Marine Policy**, v. 115, 2020.

STACY, E. W. A generalization of the gamma distribution. **The Annals of Mathematical Statistics**, p. 1187-1192, 1962.

STASOLLA, M.; MALLORQUI, J. J.; MARGARIT, G.; SANTAMARIA, C.; WALKER, N. A comparative study of operational vessel detectors for maritime surveillance using satellite-borne synthetic aperture radar. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 6, p. 2687–2701, 2016.

SUN, J.; WANG, X.; YUAN, X.; ZHANG, Q.; GUAN, C.; BABANIN, A. V. The dependence of sea SAR image distribution parameters on surface wave characteristics. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, p. 1–18, 2018.

TINGS, B.; BENTES, C.; VELOTTO, D.; VOINOV, S. Modelling ship detectability depending on TerraSAR-X-derived metocean parameters. **CEAS Space Journal**, vol. 11, n. 1, p. 81–94, 2019.

TOUZI, R.; VACHON, P. W.; WOLFE, J. Requirement on antenna cross-polarization isolation for the operational use of C-band SAR constellations in maritime surveillance. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 4, p. 861–865, 2010.

ULABY, F. T.; LONG, D. G. **Microwave radar and radiometric remote sensing**. [S.l.]: The University of Michigan Press, 2014.

UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT (UNCTAD). **Review of maritime transport 2019**. Geneva: United Nations, 2019. Disponível em: <https://unctad.org/en/Publicationslibrary/Rmt2019_En.Pdf>. Acesso em: 18 mar. 2020.

VACHON, P. W.; CAMPBELL, J. W. M.; BJERKELUND, C. A.; DOBSON, F. W.; REY, M. T. Ship detection by the RADARSAT SAR: validation of detection model predictions. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 1, p. 48–59, 1997.

VACHON, P. W. et al. **Ship signatures in Radarsat-1 Scansar narrow B imagery**: analysis with Aislive data. Ottawa: Defense R&D Canada, 2007.

VELOTTO, D.; SOCCORSI, M.; LEHNER, S. Azimuth ambiguities removal for ship detection using full polarimetric X-band SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 76–88, 2014.

VESPE, M.; GREIDANUS, H. SAR image quality assessment and indicators for vessel and oil spill detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 11 pt 2, p. 4726–4734, 2012.

WALBER. **Precision recall**. 22 nov. 2014. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Precisionrecall.svg>. Acesso em: 07 nov. 2021.

WANG, C.; JIANG, S.; ZHANG, H.; WU, F.; ZHANG, B. Ship detection for high-resolution SAR images based on feature analysis. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 1, p. 119–123, 2014.

WANG, C.; BI, F.; ZHANG, W.; CHEN, L. An intensity-space domain CFAR method for ship detection in HR SAR images. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 14, n. 4, p. 529–533, 2017.

WANG, C.; MOUCHE, A.; TANDEO, P.; STOPA, J. E.; LONGÉPÉ, N.; ERHARD, G.; FOSTER, R.; VANDEMARK, D.; CHAPRON, B. Labelled SAR imagery dataset of ten geophysical phenomena from Sentinel-1 wave mode (TenGeoP-SARww). **Geoscience Data Journal**, v. 6, p. 105–115, 2019.

WARD, K.; TOUGH, R.; WATTS, S. **Sea clutter**. 2.ed. London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2013.

WOODHOUSE, I. H. **Introduction to microwave remote sensing**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2006.

ZHANG, K.; HUANG, J.; MANSARAY, L. R.; GUO, Q.; WANG, X. Developing a Subswath-based wind speed retrieval model for Sentinel-1 VH-polarized SAR data over the ocean surface. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 3, p. 1561–1572, 2019.

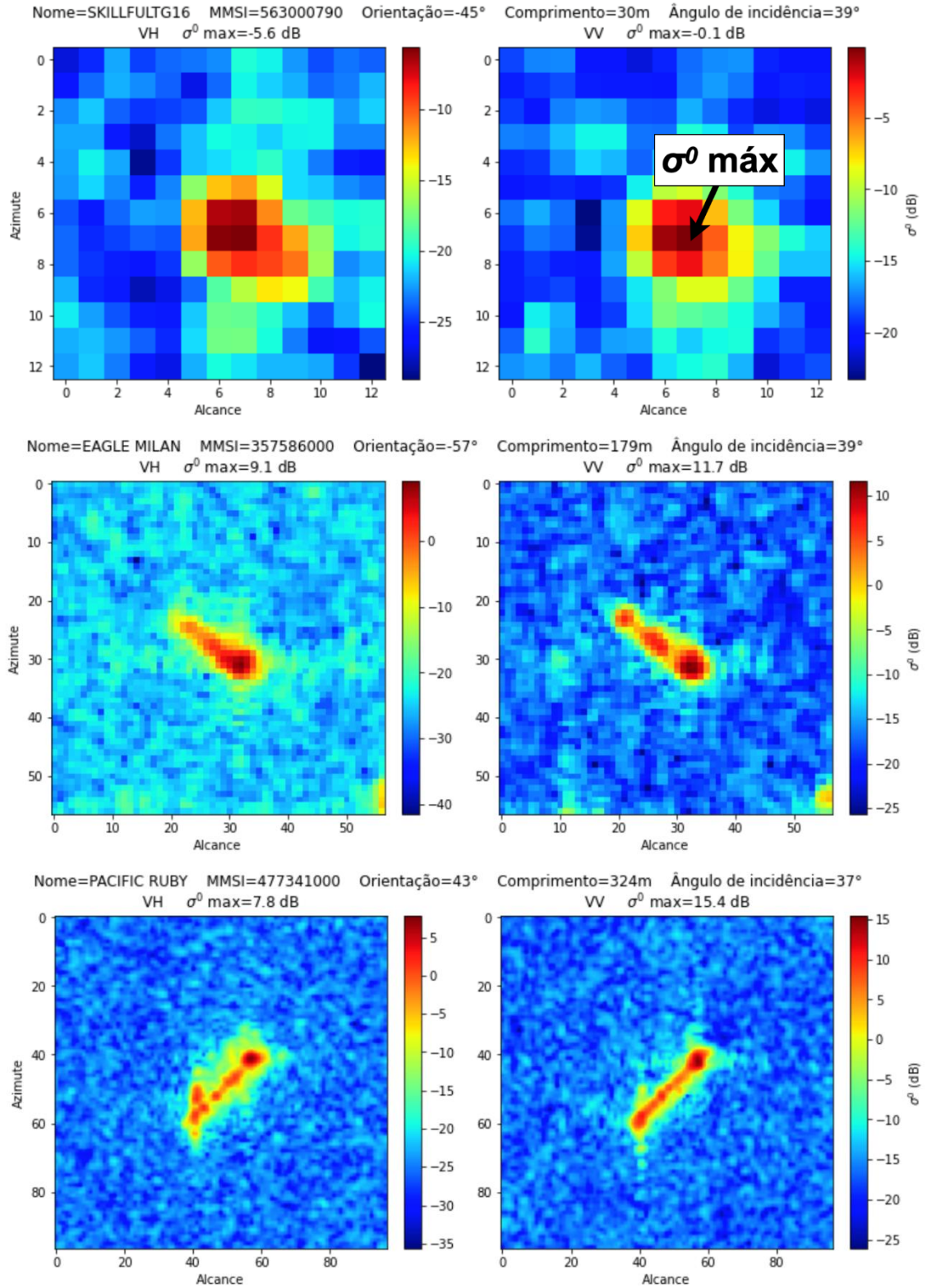
ZHANG, T.; ZHANG, X; SHI, J.; WEI, S. HyperLi-Net: A hyper-light deep learning network for high-accurate and high-speed ship detection from synthetic aperture radar imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 167, p. 123–153, 2020.

ZHAO, Y.; LI, X. M.; SHA, J. Sea surface wind streaks in spaceborne synthetic aperture radar imagery. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 121, n. 9, p. 6731-6741, 2016.

ZYL, J. V.; KIM, Y. **Synthetic Aperture Radar polarimetry**. Hoboken, NJ: Wiley, 2011. 327p.

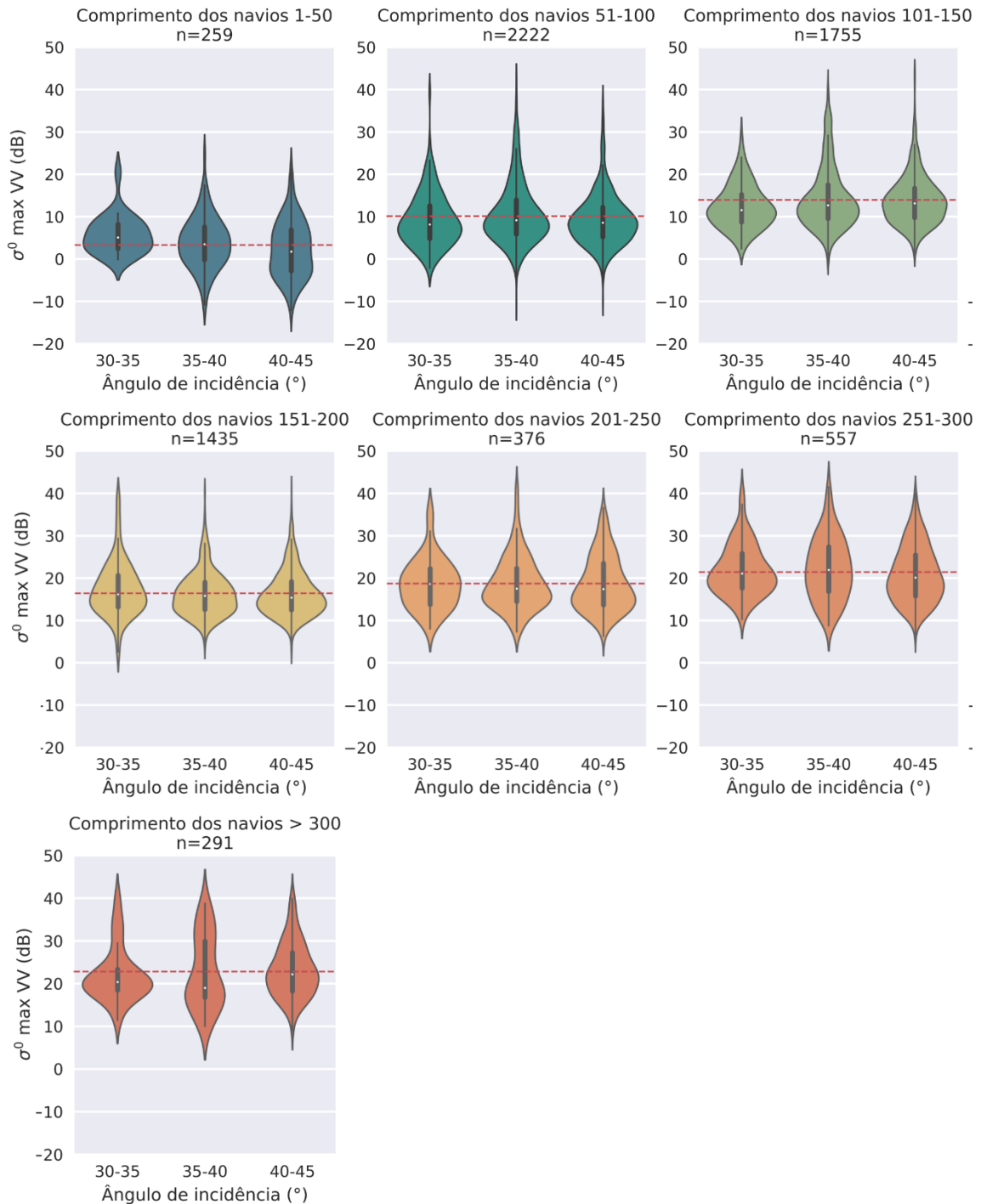
APÊNDICE A - DATASET DE EMBARCAÇÕES - OPENSARSHIP 2.0

Figura A.1 - Amostras de embarcações (*ship chips*) nas polarizações VH e VV.



Fonte: Produção do autor.

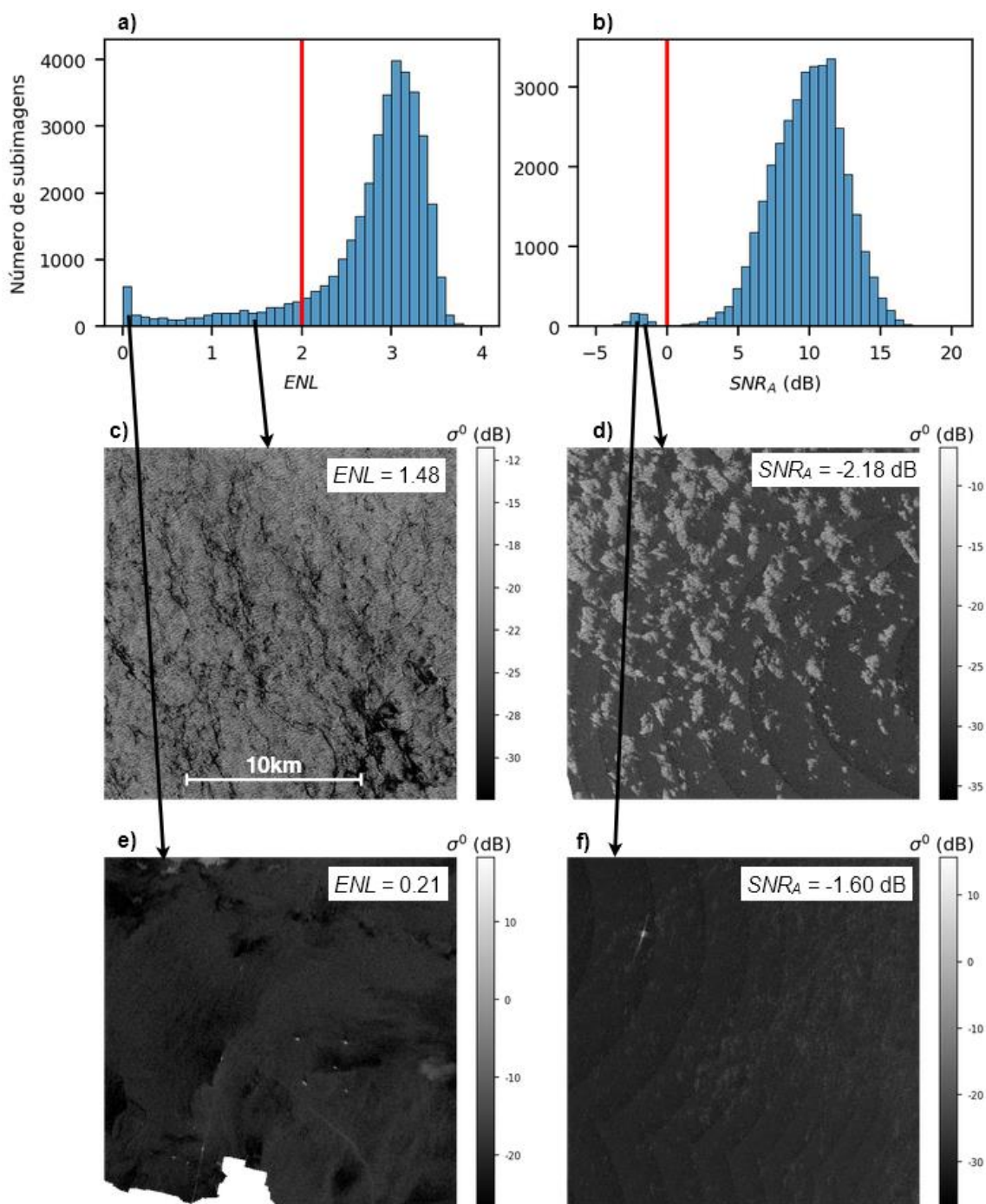
Figura A.2 - Retroespalhamento máximo (σ^0 máx), em polarização VV e escala dB, para diferentes faixas de comprimentos das embarcações (n=6895). A Linha pontilhada vermelha indica a média do conjunto.



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE B - SUBIMAGENS NÃO-SELECIONADAS

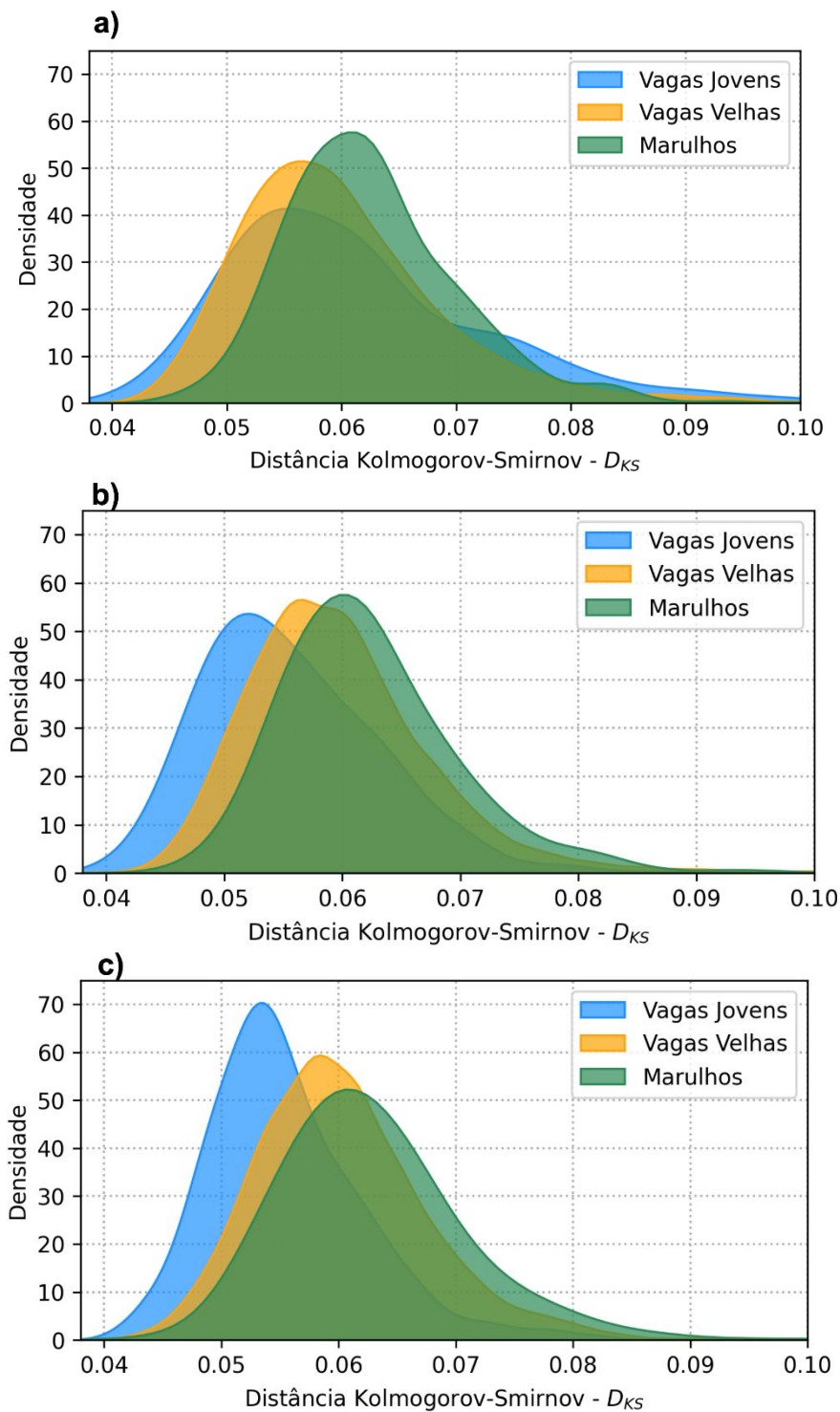
Figura B.1 - Exemplos de subimagens descartadas nas análises. (a) é o histograma do número equivalente de looks (ENL); (b) o histograma da relação sinal-ruído aditiva (SNR_A); (c) e (e) são imagens que apresentaram alta variância no σ^0 ; (d) e (f) são subimagens de baixo σ^0 compostas majoritariamente por ruído. A linha vertical vermelha indica a linha de corte utilizada para separar as subimagens.



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE C - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES D_{KS}

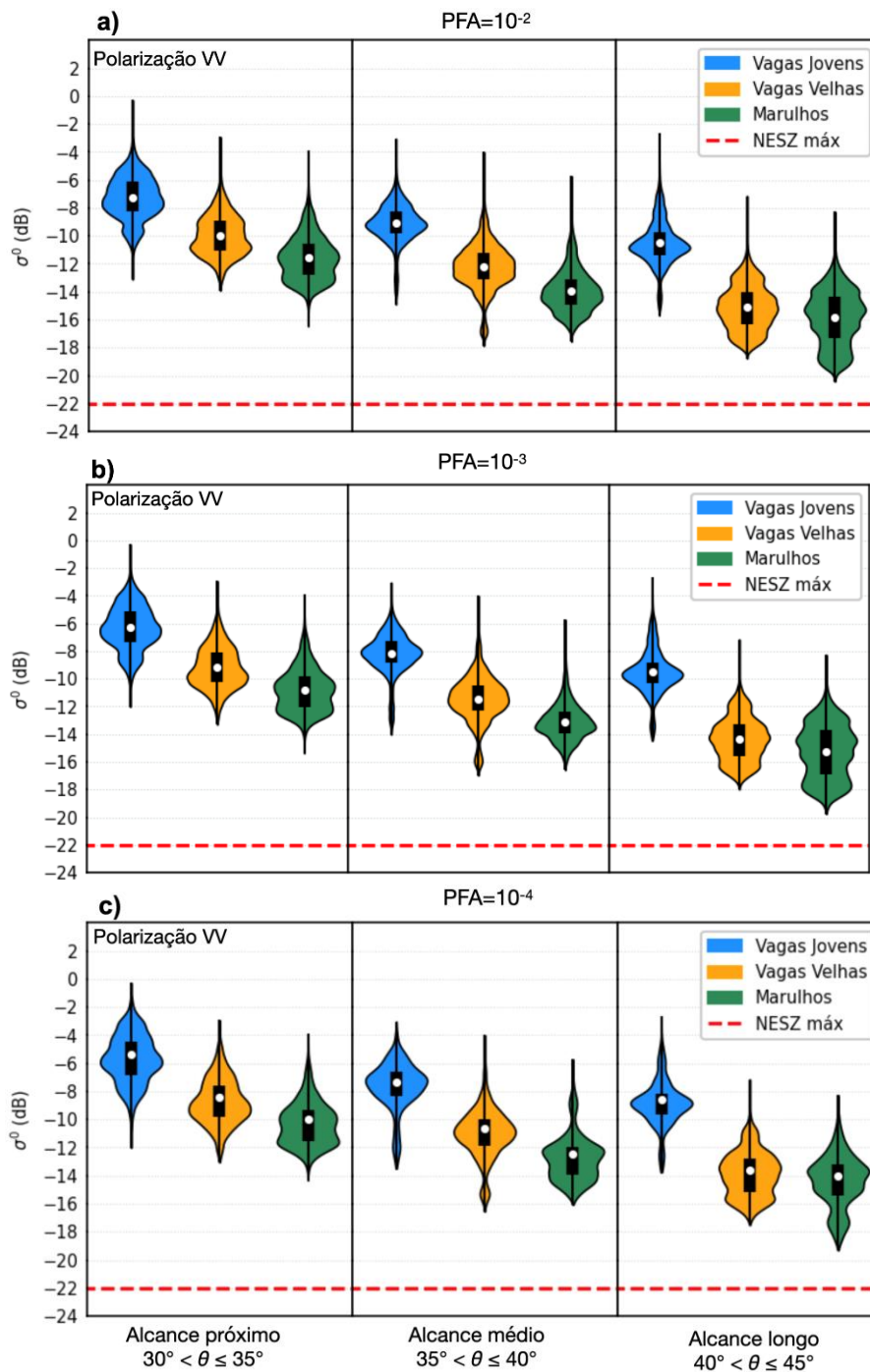
Figura C.1 - Densidade de kernel dos valores D_{KS} (Tabela 4.1) para as subimagens selecionadas ($n=26657$). (a) Alcance Próximo ($30^\circ < \theta \leq 35^\circ$), (b) Alcance Médio ($35^\circ < \theta \leq 40^\circ$) e (c) Alcance Longo ($40^\circ < \theta \leq 45^\circ$).



Fonte: Produção do autor.

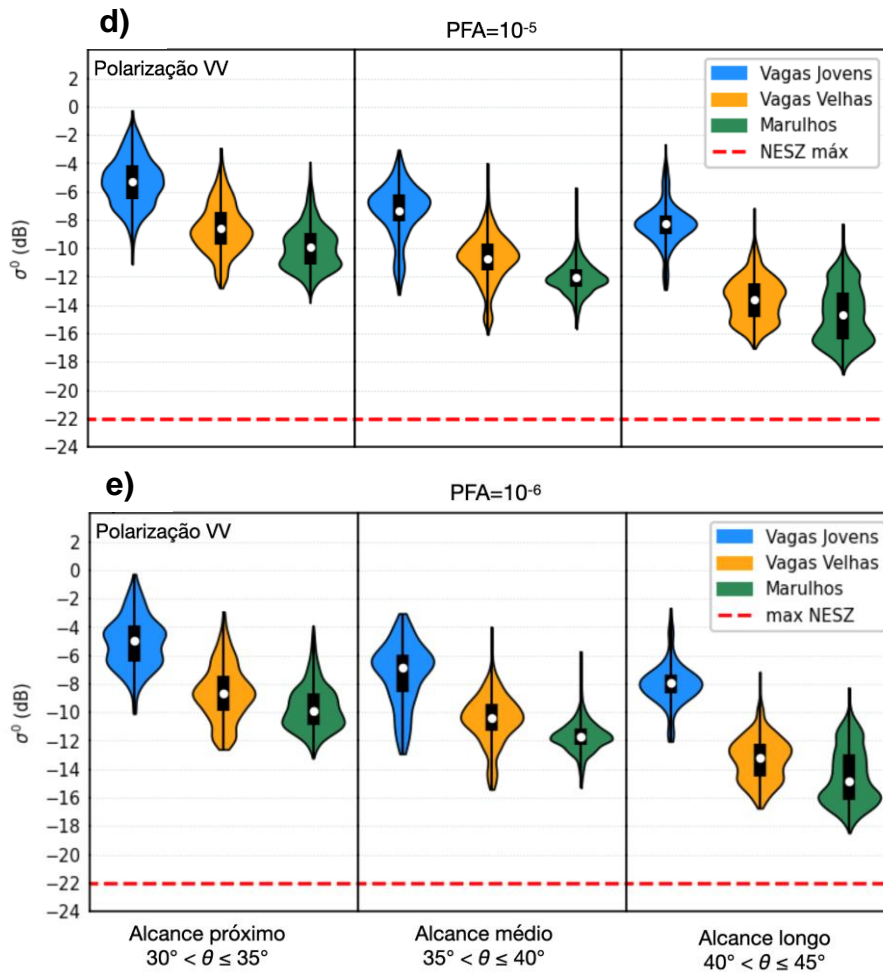
APÊNDICE D - RETROESPALHAMENTO DOS FALSOS ALARMES

Figura D.1 - *Violinplots* do σ^0 dos falsos alarmes para as PFAs utilizadas, em polarização VV e escala dB. De a) para e): PFA de 10^{-2} a 10^{-6} . Pontos em branco indicam valores de média reportados na Tabela 4.3. Retângulos pretos (*boxplots*) retratam os quartis.



(continua)

Figura D.1 - Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

APÊNDICE E - AMBIGUIDADES AZIMUTAIS EM IMAGENS SENTINEL-1

De acordo com Li e Johnson (1983), a distância de ambiguidades azimutais, Δ_A , pode ser estimada a partir da equação:

$$\Delta_A = \frac{i \cdot \lambda \cdot PRF \cdot R}{2V(1 - \frac{\cos(\phi)}{RPD})} \quad (E.1)$$

onde: i = ordem da ambiguidade (número inteiro positivo); λ = comprimento de onda do radar (m); PRF = frequência de repetição do pulso do radar (Hz); R = distância *slant range* entre o alvo e o sensor (m); V = velocidade do satélite (m/s); ϕ = inclinação de órbita do satélite (em radianos) e RPD = revoluções por dia do satélite.

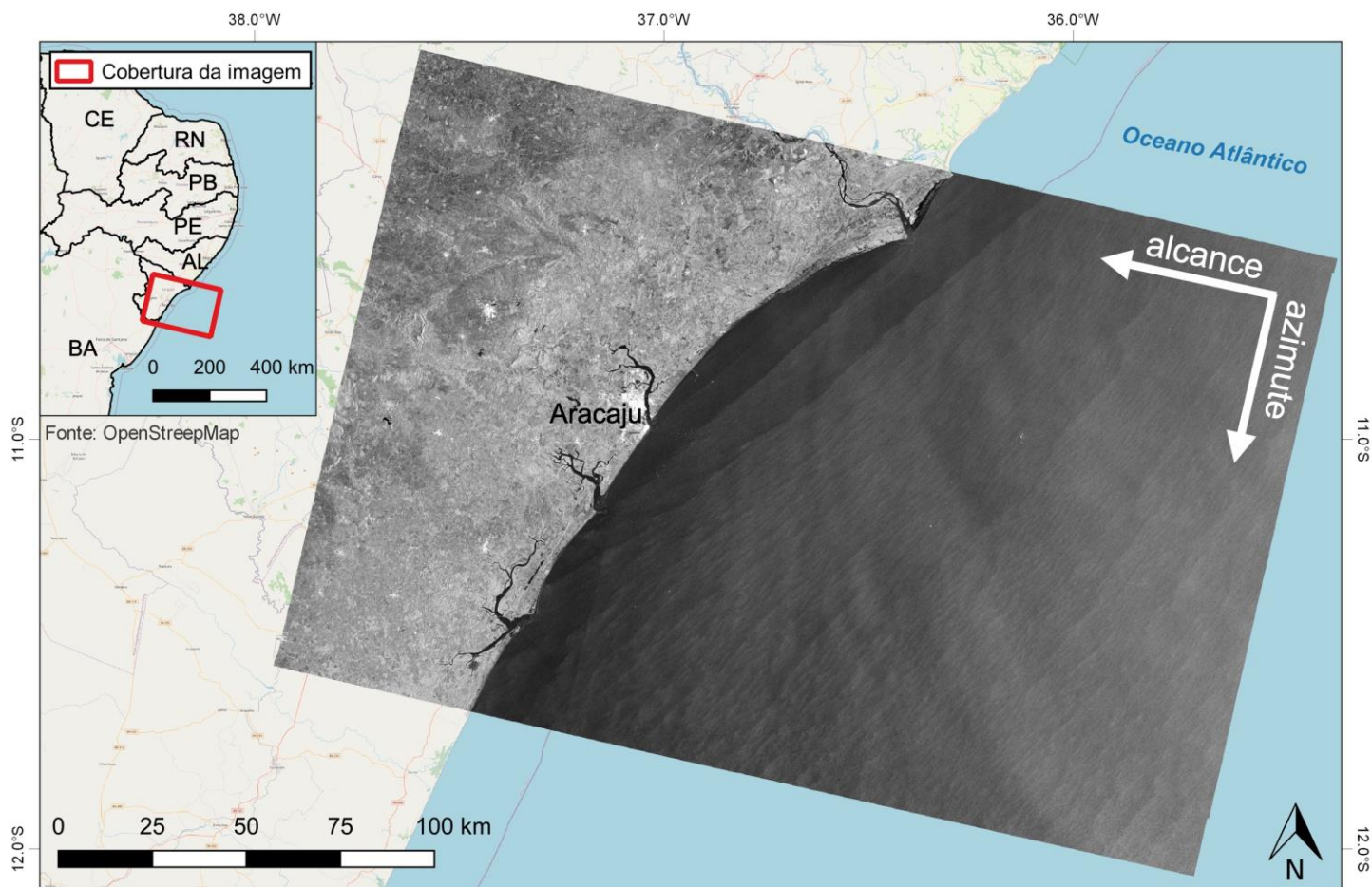
Considerando ambiguidades de primeira ordem ($i = 1$) em imagens Sentinel-1, parte dos elementos na equação acima pode ser obtida nos metadados das imagens: $\lambda=0,054$ m e PRF=1717,13 Hz. As informações das órbitas são disponibilizadas no portal da ESA⁸, e assim temos que $\phi=98,18^\circ$, RPD=14,59 e $V=7503,2$ m/s.

Então, para estimar Δ_A na região da Figura 4.9, que está em faixa de alcance médio, e sabendo que R varia entre ~800 a 950 km ao longo da imagem (alcance mais próximo até o mais longo), podemos assumir $R=875000$ m, o que equivale a $\Delta_A \approx 5350$ m.

⁸ <<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/orbit>>. Acesso em 28/10/2021.
<<https://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=41456>>. Acesso em 28/10/2021.

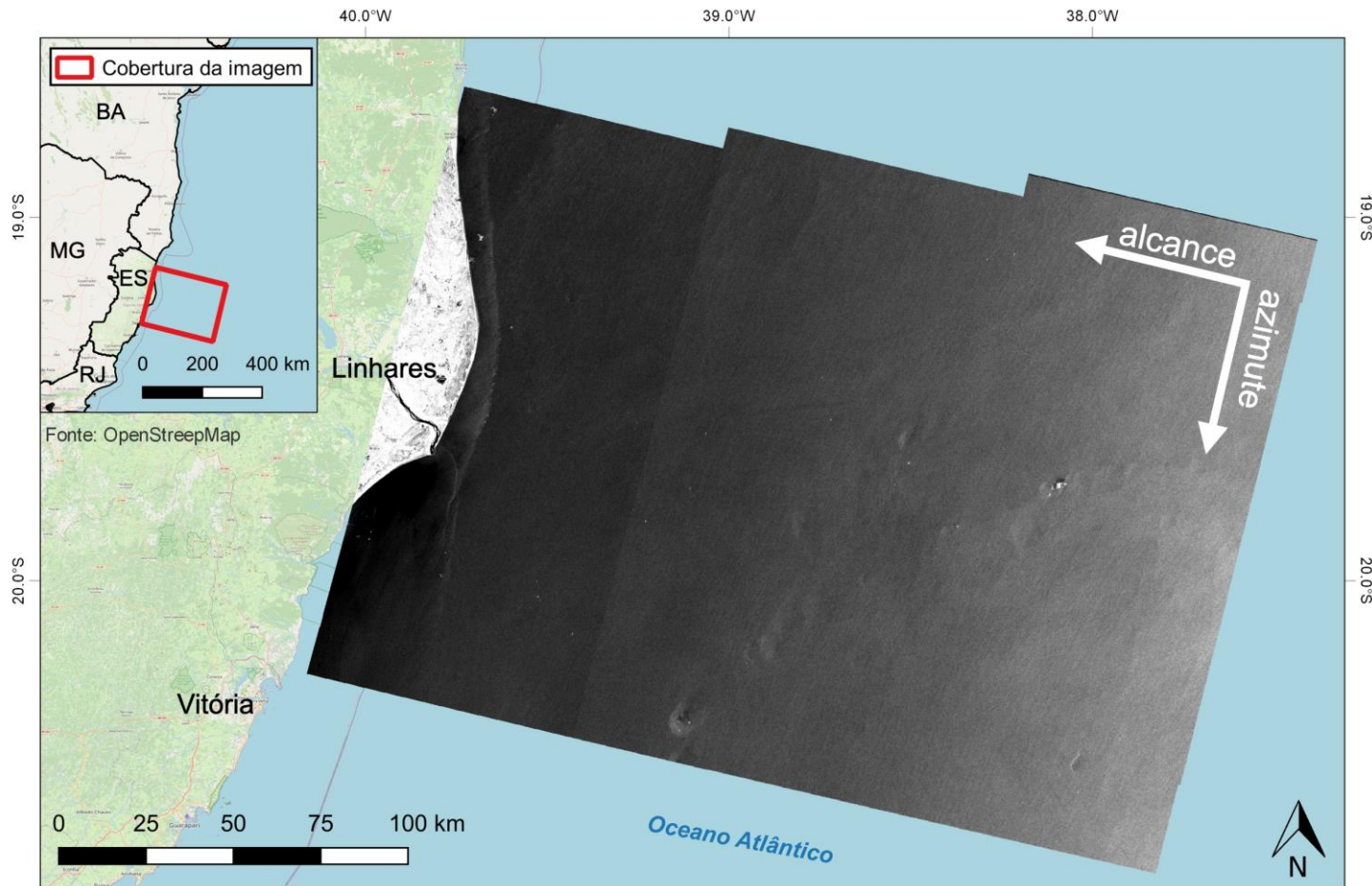
APÊNDICE F – IMAGENS SENTINEL-1 UTILIZADAS EM EXPERIMENTO

Figura F.1 – Imagem 1 (σ^0 e VV-pol). ID: S1A_IW_GRDH_1SDV_20191203T080251_20191203T080316_030181_0372F5_C031.



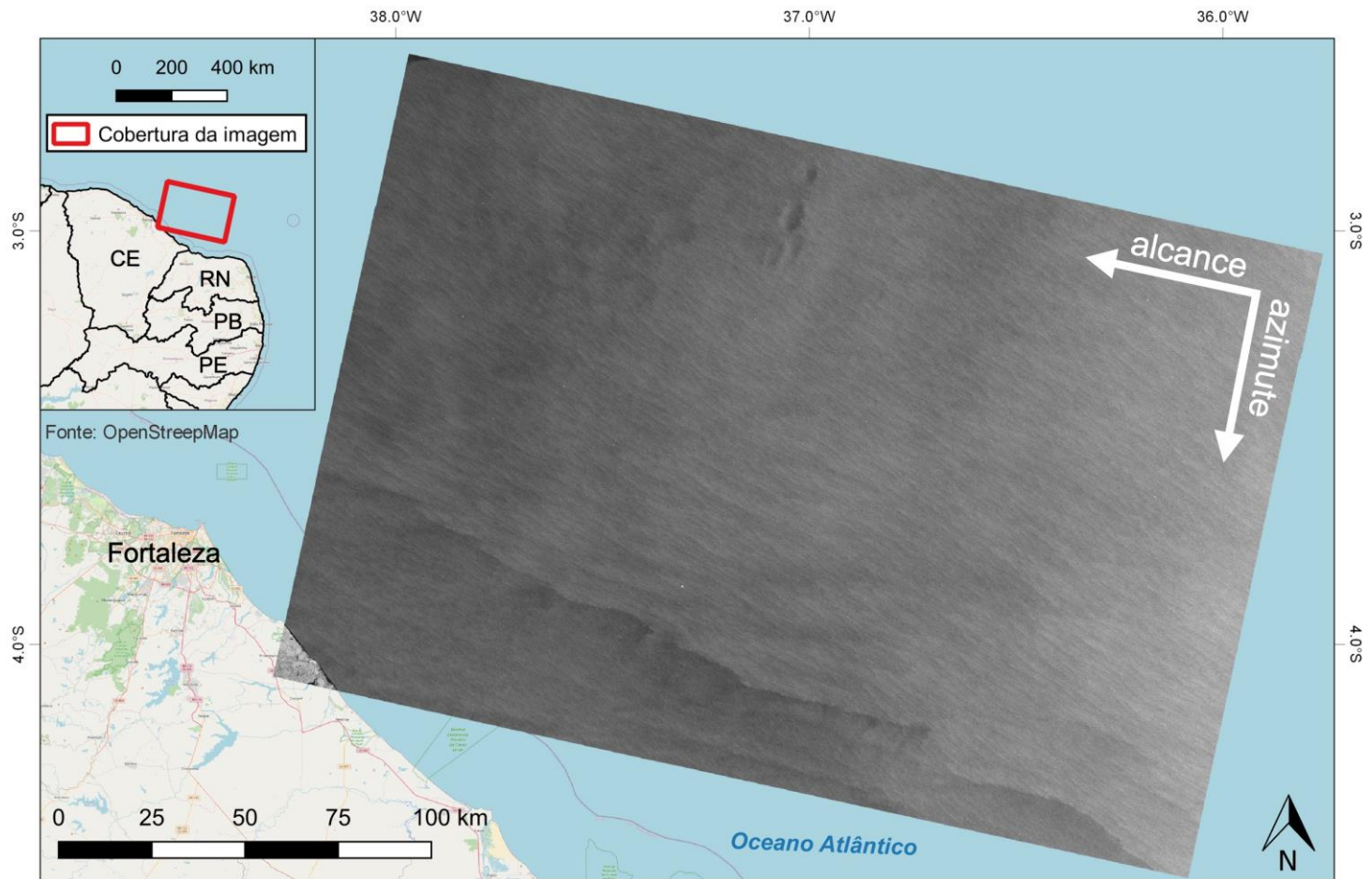
Fonte: Produção do autor.

Figura F.2 – Imagem 2 (σ^0 e VV-pol).: S1B_IW_GRDH_1SDV_20191221T080429_20191221T080458_019460_024C2D_61BF.



Fonte: Produção do autor.

Figura F.3 – Imagem 3 (σ^0 e VV-pol). ID: S1A_IW_GRDH_1SDV_20191220T080900_20191220T080925_030429_037B8A_6D15.



Fonte: Produção do autor.