



VALIDAÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DE CICLONES TROPICAIS E SUBTROPICAIS NA METAREA V, UTILIZANDO ESTIMATIVAS DE SATÉLITES

*Primeiro-Tenente (T) Fellipe Romão Sousa
Correia¹
Primeiro-Tenente Max Rodrigues Baptista²*

RESUMO

Ciclones tropicais e subtropicais são um tipo particular de centros de baixa pressão, que estão associados a ventos intensos e podem ocasionar mau tempo, principalmente em regiões marítimas, afetando, assim, a segurança da navegação. O presente estudo buscou validar as classificações destes eventos, realizadas pelo Serviço Meteorológico Marinho (SMM), compiladas por Correia et al. (2022), que afetaram a região da METAREA V, no oceano Atlântico Sul, entre os anos de 2011 e 2022. Uma aplicação prática direta, resultante desta pesquisa, foi o desenvolvimento de rotinas computacionais operacionais em *Python* que apresentassem a velocidade máxima do vento e as coordenadas geográficas associadas a cada evento e que podem ser aplicadas para casos futuros. De forma geral, identificou-se que há uma superestimação sistemática da velocidade do vento pelos produtos analisados visualmente

¹Oficial do Quadro Técnico graduado em Meteorologia (UFRJ). Mestre em Meteorologia (UFRJ), servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Email: romao@marinha.mil.br

²Oficial do Corpo da Armada graduado em Ciências Navais pela Escola Naval. Aperfeiçoado no Curso de Hidrografia para Oficiais (CAHO), servindo presentemente no NPqHo "Vital de Oliveira". Email: max.baptista@marinha.mil.br



no meio operacional, apresentando erros médios próximos a 4 nós, muitas das vezes, gerados por arredondamentos dos valores obtidos dos sensores satelitais.

Palavras-chave: Ciclone subtropical. Ciclone tropical. Escaterômetro. METAREA V.

ABSTRACT

Tropical and subtropical cyclones are a particular type of low pressure centers, which are associated with intense winds and can cause severe weather, especially in maritime regions, thus affecting navigation safety. The present study aimed to validate the classifications of these events, carried out by the Marine Meteorological Service (SMM), compiled by Correia et al. (2022), which affected the METAREA V region, in the South Atlantic Ocean, between the years 2011 and 2022. A direct practical application, resulting from this research, was the development of operational computational routines in Python that present the maximum wind speed and geographic coordinates associated with each event and that can be applied to future cases. In general, it was identified that there is a systematic overestimation of wind speed by products visually analyzed in the operational environment, leading to average errors close to 4 knots, often generated by rounding of values obtained from satellite sensors.

Keywords: Subtropical cyclone. Tropical cyclone. Scatterometer. METAREAV.

1. INTRODUÇÃO

Os ciclones subtropicais e tropicais são sistemas meteorológicos caracterizados por um centro de baixa pressão atmosférica que possui forte gradiente bórico, ventos intensos e ondas elevadas no seu entorno. Esses fenômenos, tipicamente marítimos,

são de baixa frequência no oceano Atlântico Sul, com média de 1,2 (0,1) ciclone subtropical (tropical) por ano na METAREA V (Correia et al., 2022). Além disso, a distinção entre sistemas pode ser feita levando-se em consideração seu perfil térmico vertical, intensidade dos ventos e localização geográfica (WMO 1194, 2017).

Em particular, a classificação dos ciclones é fundamental para a segurança das operações marítimas, principalmente da costa brasileira, pois permite uma melhor compreensão dos riscos envolvidos na navegação em áreas afetadas, a depender da intensidade do fenômeno. No Brasil, o Serviço Meteorológico Marinho (SMM), operado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), é responsável por identificar, classificar e monitorar ciclones subtropicais e tropicais que eventualmente afetam sua área de responsabilidade, conhecida como METAREA V.

O monitoramento desses ciclones é feito por meio do acompanhamento de variáveis meteoceanográficas, tais como a velocidade do vento, a pressão atmosférica e a Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Contudo, devido à escassez de dados observados, como os provenientes de boias meteoceanográficas, nas áreas de atuação desses eventos, recorre-se ao uso de métodos alternativos, como o uso de sensores satelitais, a exemplo do escaterômetro, que opera a bordo de satélites de órbita polar e fornece estimativas da direção e velocidade do vento sobre a superfície do mar.

No entanto, no âmbito operacional, os dados dos escaterômetros são conferidos em imagens que, por vezes, possuem baixa qualidade, limitando os usuários a uma análise visual e subjetiva para encontrar características específicas dos ciclones, a exemplo do vento máximo associado. A disposição das barbelas (representação gráfica da direção e da velocidade do vento), como é possível visualizar na Figura 1, não revela a real



resolução espacial dos dados originais, podendo inclusive mascarar valores decisivos, especialmente durante a classificação dos ciclones. As imagens pós-processadas obtidas junto ao STAR/NESDIS, conforme exemplo da Figura 1, constituem a fonte de informação operacional disponível para os previsores no momento da análise.

Com o intuito de automatizar o processo operacional de classificação de fenômenos, validando os prognósticos dos modelos numéricos atmosféricos, e baseando-se em informações de boa qualidade e que permitam a rápida tomada de decisão, é necessário obter informações mais precisas dos dados dos escaterômetros, inclusive processando-os nos próprios centros de previsão.

Desta forma, este trabalho se propôs a validar as classificações de tempestades tropicais e subtropicais realizadas pelo SMM, entre 2011 e 2022, na METAREA V. Para tal, procedeu-se com a comparação dos resultados compilados por Correia et al. (2022) com os obtidos diretamente dos escaterômetros, identificados por meio de rotinas computacionais em *Python*. Estas rotinas analisam os dados brutos dos sensores satelitais e identificam a velocidade máxima e sua localização geográfica na área de ocorrência de cada ciclone. Secundariamente, logra-se que a mesma rotina computacional seja útil para eventos futuros, de modo a otimizar o tempo ao entregar dados precisos e de confiança que subsidiarão tomada de decisões e elaboração de relatórios pós-eventos.

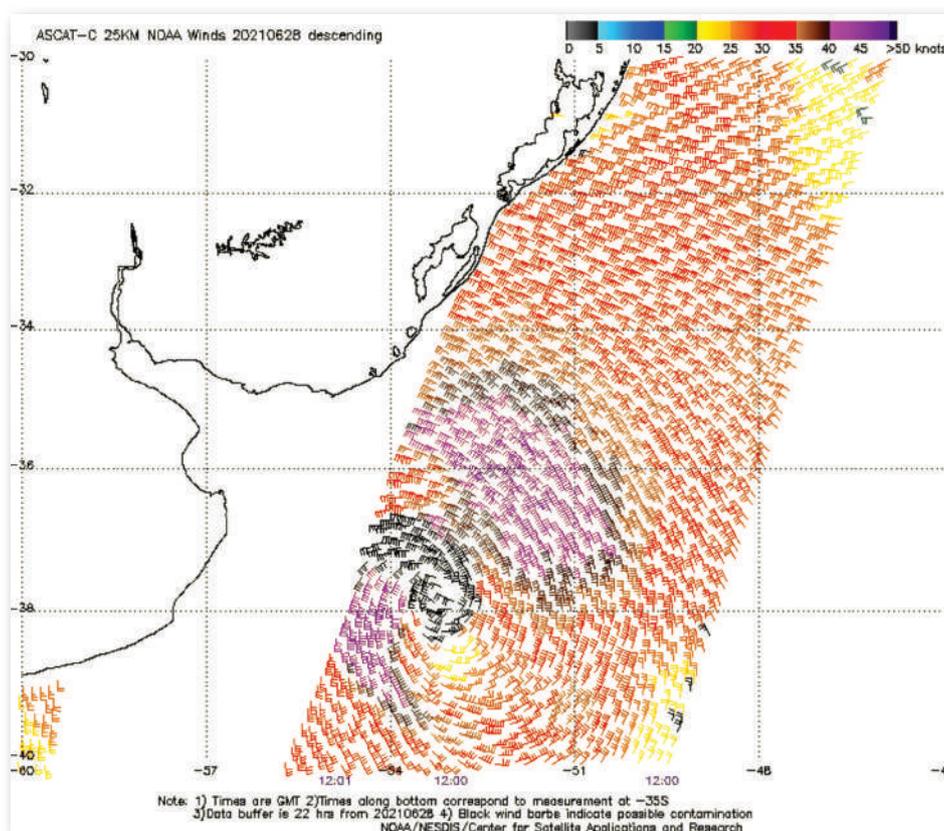


Figura 1 – Estimativa de direção e velocidade do vento realizadas pelo escaterômetro ASCAT a bordo do satélite METOP-C às 12:00Z do dia 28 de junho de 2021, durante a ocorrência da Tempestade Subtropical Raoni. Este tipo de produto é geralmente utilizado para classificar o ciclone. Fonte: Center for Satellite Applications and Research (STAR/NESDIS)



2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ciclones Tropicais e Subtropicais

2.1.1. Processos de formação, características e classificação

O Brasil está exposto a uma região marítima suscetível a ciclogêneses tropical e subtropical devido a alguns fatores específicos, da termodinâmica e dinâmica da atmosfera e do oceano. A formação desses ciclones sobre o mar é influenciada por fatores como a temperatura do ar e do mar, a umidade do ar, a circulação atmosférica e a presença de áreas de baixa pressão.

Durante o verão, a TSM é geralmente mais elevada e, quando combinada a uma região de fraco cisalhamento vertical do vento e algum gatilho dinâmico, cria um ambiente propício para a formação dos ciclones tropicais. No caso dos ciclones subtropicais, a TSM deixa de ser um fator preponderante, observando-se sua ocorrência ao longo de todo ano. Gozzo (2014) mostrou que ciclones subtropicais possuem características estruturais e de intensidade distintas para o verão, primavera e outono. Deve-se mencionar também que a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) favorece a formação de áreas de baixa pressão e a ocorrência de chuvas intensas (Reboita et al., 2012), contribuindo, assim, para ambos os casos de ciclogênese. Outros fatores de baixa frequência, a exemplo do sinal das anomalias de TSM do oceano Pacífico central, que caracterizam a fase do módulo de variabilidade climática conhecido como El Niño Oscilação Sul (ENOS), também podem interferir na formação destes tipos de ciclones, apesar de não ter sido constatada uma relação clara entre ambos (Correia et al., 2022). Além disso, a interação desses ciclones com as correntes oceânicas pode

afetar seu desenvolvimento e trajetória (Vianna et al., 2010), tornando ainda mais complexa a sua análise e previsão.

De acordo com Hart (2003), Mathias (2012) e a NORMAM-701 (2023), os ciclones subtropicais e tropicais diferem em sua natureza térmica e estrutural nos seguintes aspectos:

- Tropicais: centros de baixa pressão com núcleo quente e profundo, formados em águas tropicais ou subtropicais, não associados a sistemas frontais e com convecção profunda organizada, além da circulação de vento na superfície fechada em torno de um centro bem definido; e
- Subtropicais: centros de baixa pressão não associados a sistemas frontais, que podem apresentar características tanto de ciclones tropicais como de extratropicais, com núcleo quente em baixos e médios níveis da troposfera, seguido de um núcleo mais frio na alta troposfera e campo de ventos e a distribuição de convecção menos simétricos.

Por outro lado, os ciclones também podem ser classificados quanto à velocidade do vento observada em seu entorno. Originalmente classificados como Depressão, são elevados à categoria de Tempestade quando os ventos a 10 metros da superfície do mar ultrapassam o limiar de 34 nós, recebendo inclusive um nome de acordo com o centro meteorológico responsável por sua área de formação. Caso o vento continue intensificando-se e ultrapasse 64 nós, a Tempestade passa a ser chamada de Furacão, mantendo o nome já atribuído. A lista de nomes das tempestades subtropicais e tropicais na METAREA V consta na NORMAM-701 (2023).



2.1.2. Localização do vento máximo

Em termos de previsão meteorológica, é importante saber onde espera-se que determinado sistema apresente seus ventos máximos. Segundo Hart (2003), os ciclones subtropicais possuem ventos mais fortes afastados do centro do sistema e tais ventos máximos ocorrem a, pelo menos, 60 milhas náuticas do centro, o que se assemelha a um campo de vento mais próximo de um ciclone extratropical.

O ciclone tropical, por sua vez, por apresentar maior homogeneidade estrutural, possui os máximos próximos às zonas de convecção, ou seja, no entorno do centro do ciclone, devido ao acentuado gradiente de pressão existente na região. A Figura 2 ilustra a distribuição média da pressão e a componente do vento à superfície tangencial às isóbaras em um ciclone tropical intenso típico (VAREJÃO-SILVA,

2006). Nota-se que há uma redução gradual da intensidade do vento conforme se afasta do centro e o gradiente de pressão diminui.

2.1.3. Monitoramento pelo SMM

Apesar de sua baixa frequência de formação em comparação aos ciclones extratropicais e às frentes frias, a compreensão e prevenção dos impactos causados pelos ciclones tropicais e subtropicais, por intermédio dos ventos intensos e alturas de ondas elevadas, são de grande importância para a população, em especial para aquela que vive próxima à costa e utiliza o mar. Devido à complexidade desses fenômenos, foi necessário estabelecer normas e linguagens padronizadas para facilitar a comunicação entre os órgãos competentes e a população. Nesse contexto, a Marinha do Brasil normatizou processos e definiu terminologias relacionadas a esses eventos (NORMAM-701, 2023), com base nas diretrizes estabelecidas pela

Organização Meteorológica Mundial (OMM). Desta forma, contribuiu-se para que a mídia veicule as informações corretas e de qualidade.

Por sua vez, oriundo do comprometimento internacional do Brasil através de sua presença como signatário da Convenção para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (Safety of Life at Sea – SOLAS), coube ao CHM e ao SMM, dentre outras atividades, o papel de monitorar a formação de ciclones subtropicais e tropicais, analisando-os e divulgando suas características de forma

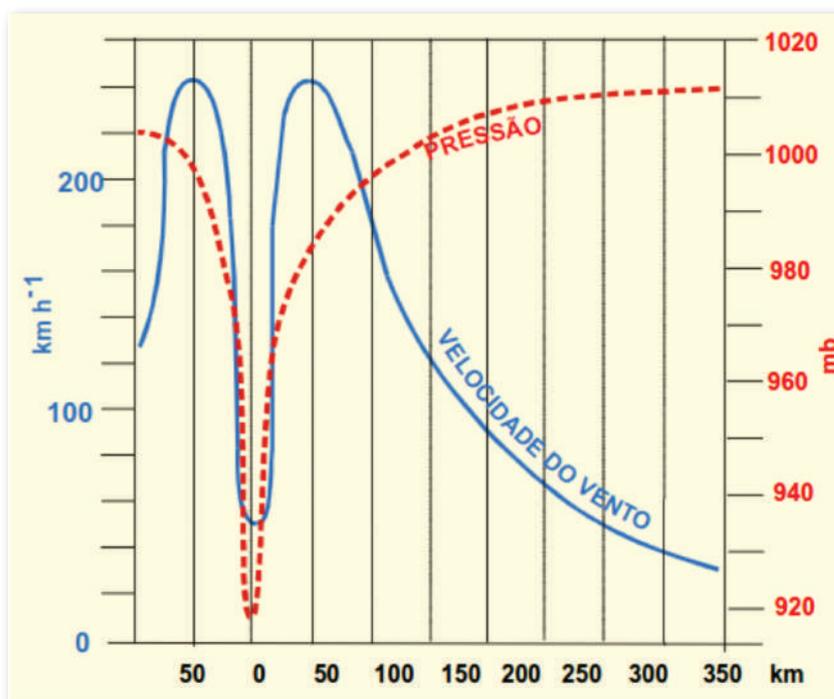


Figura 2 – Distribuição média da pressão e componente tangencial do vento em um ciclone tropical intenso típico. Fonte: Varejão-Silva (2006)



mais precisa e rápida possível, a fim de gerar uma sinalização de alerta e permitir que medidas preventivas sejam tomadas pelos órgãos responsáveis.

Atualmente, mediante iminência de formação de ciclones tropicais e subtropicais, o SMM adota protocolos específicos que permitem:

- a identificação do sistema com antecedência, com base na modelagem numérica;
- a avaliação da natureza do ciclone (tropical ou subtropical) com base no perfil térmico vertical e nas informações contidas nos diagramas de fase, de acordo com os critérios de Hart (2003);
- a divulgação de informações para toda a população, através da emissão de avisos de mau tempo, cartas sinóticas e notas oficiais à imprensa elaboradas em conjunto com outros órgãos nacionais de previsão do tempo; e
- o monitoramento e a atualização das informações relativas ao sistema, incluindo classificação e nomenclatura, trajetória estimada, direção e intensidade do vento e direção e altura das ondas associadas.

O CHM também mantém em seu site na internet um conjunto de relatórios pós-eventos, que consistem em um compilado de informações a respeito dos ciclones já ocorridos, sendo elas: ficha resumo, análise sinótica, avisos de mau tempo e notas à imprensa emitidas, trajetória e, por fim, dados observados e estimados.

2.2. Escaterômetros

Os satélites desempenham um papel crucial na coleta de dados meteorológicos e oceanográficos, especialmente em áreas

remotas e de difícil acesso, onde o uso de boias é impraticável ou inviável cuja instalação e manutenção requerem montantes significativos de tempo e dinheiro. Este papel se reflete na coleta de dados em grande escala, em tempo quase real e com frequência regular, sem a necessidade de intervenção humana constante. Os sensores instalados a bordo podem fornecer uma imagem panorâmica das condições ambientais, incluindo informações sobre a altura das ondas, a direção e intensidade do vento, TSM, distribuição de correntes oceânicas, cobertura de gelo marinho, dentre outros.

Particularmente em relação ao vento, pode-se contar com os dados obtidos por meio de escaterômetros, que são sensores a bordo de satélites de órbita polar, operando a uma altitude que pode variar de 800 a 1000 km. Estes aparelhos operam na frequência de micro-ondas, emitindo sinais e os recebendo de volta refletidos do planeta, o que permite a estimativa da velocidade e direção do vento próximo da superfície do oceano.

Entende-se que o vento que atua sobre a superfície do mar gera pequenas ondas, do comprimento de centímetros, conhecidas como ondas capilares. Quando o sinal emitido pelo radar do escaterômetro incide na superfície do mar sob ângulos específicos, ocorre uma interação especial entre as ondas eletromagnéticas e as ondas capilares, conhecida como ressonância de Bragg. Isto resulta em um aumento notável do sinal de retroespalhamento observado pelo radar. Em outras palavras, as pequenas ondas na superfície do mar agem como um refletor eficiente para o sinal de radar, fazendo com que ele retorne de forma mais intensa em direção ao sensor do satélite. A interação das ondas capilares com as ondas eletromagnéticas é mais intensa quando seus comprimentos de onda são próximos, pois, neste caso, ocorre ressonância, que intensifica o retroespalhamento (UCAR/COMET Program,



2015). As ondas capilares estão presentes tanto em mares calmos, quanto em agitados. Logo, quanto mais intenso o vento, maior é a quantidade de ondas capilares presentes e mais intenso será o sinal de retorno.

Em particular, os sensores Advanced Scatterometer (ASCAT), a bordo dos satélites da constelação METOP, emitem sinais que cobrem duas faixas do oceano com cerca de 550 km cada e separadas por uma distância de aproximadamente 680 km. Isso ocorre pois o satélite possui três antenas que são posicionadas com uma angulação variando de 25o a 65o, com azimutes distintos entre si. Essa configuração permite que a antena capte o sinal de retorno de forma mais precisa, realizando, assim, com o auxílio de modelos, o cálculo da direção e intensidade do vento a 10 metros acima da superfície do mar (UCAR/COMET Program, 2015).

Os dados dos escaterômetros estão sujeitos a ambiguidades geradas pelos métodos de cálculo, sendo perceptíveis em regiões de vento fraco e áreas de convergência ou divergência, e mais presentes nos cálculos de direção do que em intensidade (UCAR/COMET Program, 2015). Essas regiões podem aparecer com sinalização de dado contaminado, não sendo recomendado seu uso para análise operacional. Além disso, os dados de vento também podem ser afetados pela presença de chuva, já que as gotículas podem interagir com as ondas de radar, diminuindo a intensidade do sinal de retorno (Knaff et al., 2021). No caso do ASCAT, a tecnologia de banda C presente resulta em uma atenuação desses sinais nestas condições em comparação com satélites mais antigos que utilizavam banda Ku (Knaff et al., 2021). Isso faz com que os dados gerados pelo ASCAT sejam mais precisos e confiáveis para estimativas do vento em zonas oceânicas afetadas por chuva.

Cabe mencionar que apesar do amplo uso operacional, há uma faixa ótima de funcionamento do sensor. De forma geral,

os sensores fornecem medições confiáveis de velocidade do vento de até cerca de 65 nós, com erros médios em torno de 3 nós. No entanto, a detecção da velocidade do vento tem sensibilidade reduzida a partir de 50 nós, com saturação completa do sinal em aproximadamente 70 nós (Wentz e Smith, 1999; Verspeek et al., 2010; Ricciardulli e Wentz, 2015; Soisuvann et al., 2013; Stoffelen et al., 2017; Knaff et al., 2021). Os erros podem ser muito maiores em gradientes de velocidade do vento forte, como os encontrados próximos aos centros dos ciclones. Além disso, embora os sinais de saturação típica de escaterômetros apresentados anteriormente, os sensores ASCAT já registraram ventos de 85 nós (Knaff et al., 2021).

3. DADOS E METODOLOGIA

3.1. Dados

Foram utilizadas estimativas de escaterômetros que fornecem informações de posição, intensidade e direção dos ventos, com resolução espacial de 25 km e temporal de duas vezes por dia, por meio dos sensores ASCAT a bordo dos satélites METOP-A, METOP-B e METOP-C, obtidos junto ao Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC).

A área de interesse do estudo é a METAREA V, localizada no oceano Atlântico Sul, onde foram classificados e nomeados pelo SMM os ciclones tropicais e subtropicais no período entre 2011 e 2022. Não obstante, tomou-se por base os resultados obtidos por Correia et al. (2022) em complemento às informações obtidas nos relatórios pós-eventos disponibilizados pelo CHM.

Foram selecionados para este estudo os ciclones subtropicais e tropicais que atingiram a classificação de Tempestade, cujos nomes e períodos de atuação encontram-se resumidos no Quadro 1.

Tabela 1 – Tempestades que ocorreram na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: Correia et al. (2022)

Ciclone	Período	Ciclone	Período	Ciclone	Período
Arani	14 – 16MAR2011	Guará	09 – 10DEZ2017	Oquirá	27 – 30DEZ2020
Bapo	15 – 08FEV2015	Iba	23 – 27MAR2019	Potira	19 – 24ABR2021
Cari	10 – 12MAR2015	Jaguar	19 – 21MAI2019	Raoni	28JUN – 01JUL2021
Dani	15 – 16NOV2016	Kurumi	23 – 24JAN2020	Ubá	09 – 12DEZ2021
Eçaí	04 – 06DEZ2016	Mani	25 – 27OUT2020	Yakecan	16 – 19MAR2022

3.2. Metodologia

Após a aquisição dos dados, procedeu-se com os procedimentos da Figura 3. As rotinas computacionais tinham o propósito de obter o máximo de velocidade para cada passagem do satélite durante o período de vigência do ciclone para, em seguida, verificar-se qual foi o máximo dentre os maiores valores encontrados. É válido ressaltar que, durante este processo, por mais que a velocidade encontrada fosse máxima, os demais valores de direção ou posição atrelados a ela pode-

riam apresentar o código “NAN” (*not a number*), que naturalmente carregam consigo uma incerteza alta, podendo comprometer a confiabilidade do produto final. Deste modo, como critério de controle de qualidade, foram descartados os dados de vento máximo que possuíssem valores NAN de posição e direção.

Por fim, dado o conjunto de velocidade máxima do vento para cada ciclone, realizou-se a análise comparativa com as informações compiladas de Correia et al. (2022), de modo a validar ou não a classificação previamente atribuída pelo SMM aos ciclones.

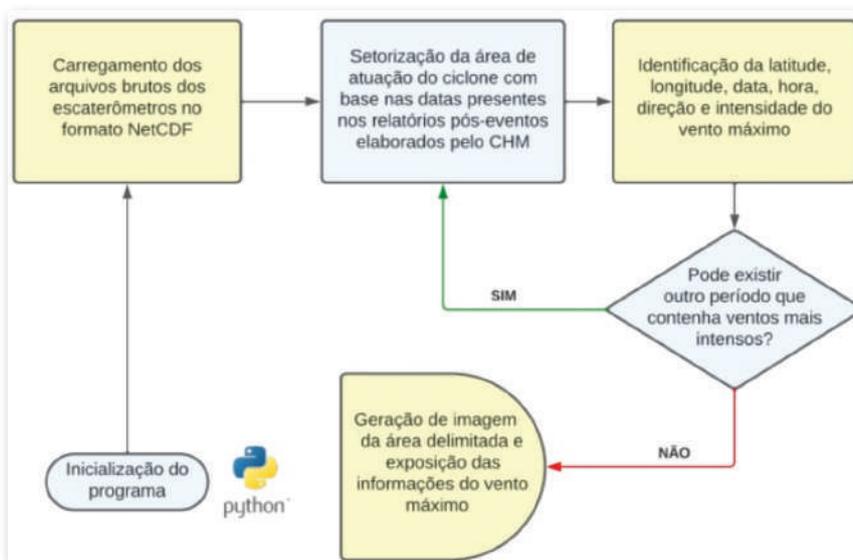


Figura 3 – Fluxograma da rotina em Python para tratamento dos dados de escaterômetro. Fonte: elaboração própria (2023)



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Velocidade máxima do vento

O Quadro 2 apresenta uma comparação dos máximos de velocidade do vento a partir da compilação realizada por Correia et al. (2022), com base nos relatórios pós-evento do CHM (coluna da esquerda); uma adaptação do mesmo trabalho, considerando apenas os máximos provenientes do ASCAT (coluna central); e os dados obtidos

por intermédio da rotina apresentada na Figura 3 (coluna da direita). Pode-se notar que há divergência entre as colunas da esquerda e central, tanto na intensidade do vento máximo quanto no momento de sua ocorrência. Esta diferença já era esperada, em parte, pois estão sendo levados em consideração diferentes sensores (anemômetros, radiômetros e escaterômetros). Por outro lado, a comparação direta entre os escaterômetros (colunas central e da direita) também apresenta diferenças entre valores e horários.

Quadro 2 – Velocidades máximas do vento para cada tempestade conforme constam nos relatórios pós-evento do CHM, considerando todos os sensores (esquerda), apenas o ASCAT (central) e as obtidas pelas rotinas computacionais em Python com base nos dados do PODAAC

Ciclone	Vento Máximo em nós (SMM)	Vento Máximo em nós (SMM - ASCAT)	Vento Máximo em nós (Python - ASCAT)
Arani	45 15MAR2011 (20:42Z) WindSAT	45 16MAR2011 (10:41Z) ASCAT (METOP-A)	40,14 16MAR2011 (10:41Z) ASCAT (METOP-A)
Bapo	50 06FEV2015 (16:28Z) GCOMW1 (AMSR-2)	40 06FEV2015 (12:38Z) ASCAT (METOP-B)	36,21 06FEV2015 (12:36Z) ASCAT (METOP-B)
Cari	35 10MAR2015 (16:28Z) GCOMW1 (AMSR-2)	30 11MAR2015 (12:53Z) ASCAT (METOP-B)	33,96 10MAR2015 (12:19Z) ASCAT (METOP-A)
Deni	40 16NOV2016 (00:54Z) ASCAT (METOP-B)	40 16NOV2016 (00:54Z) ASCAT (METOP-B)	37,67 15NOV2016 (23:59Z) ASCAT (METOP-A)
Eçai	40 05DEZ2016 (00:07Z) ASCAT (METOP-A)	40 05DEZ2016 (00:07Z) ASCAT (METOP-A)	43,83 05DEZ2016 (00:05Z) ASCAT (METOP-A)
Guará	45 10DEZ2017 (02:50Z) GCOMW1 (AMSR-2)	35 10DEZ2017 (12:01Z) ASCAT (METOP-A)	36,06 11DEZ2017 (00:27Z) ASCAT (METOP-A)
Iba	60 25MAR2019 (03:54Z) GCOMW1 (AMSR-2)	40 26MAR2019 (00:25Z) ASCAT (METOP-C)	33,92 26MAR2019 (00:26Z) ASCAT (METOP-C)
Jaguar	45 20MAI2019 (03:10Z) GCOMW1 (AMSR-2)	40 20MAI2019 (11:00Z) ASCAT (METOP-C)	38,68 19MAI2019 (23:07Z) ASCAT (METOP-A)
Kurumí	45 23JAN2020 (16:06Z) GCOMW1 (AMSR-2)	40 25JAN2020 (00:01Z) ASCAT (METOP-C)	35,49 24JAN2020 (01:09Z) ASCAT (METOP-B)
Mani	44 25OUT2020 (10:19Z) METAR (SBLB/REDEMET)	35 25OUT2020 (23:44Z) ASCAT (METOP-A)	33,59 25OUT2020 (11:16Z) ASCAT (METOP-A)
Oqira	40 28DEZ2020 (03:35Z) GCOMW1 (AMSR-2)	35 28DEZ2020 (11:25Z) ASCAT (METOP-C)	34,52 28DEZ2020 (00:06Z) ASCAT (METOP-C)
Potira	45 21ABR2021 (22:21Z) ASCAT (METOP-A)	45 21ABR2021 (22:21Z) ASCAT (METOP-A)	41,35 21ABR2021 (00:50Z) ASCAT (METOP-C)
Raoni	50 29JUN2021 (02:00Z) ASCAT (METOP-C)	50 29JUN2021 (02:00Z) ASCAT (METOP-C)	47,02 29JUN2021 (02:00Z) ASCAT (METOP-C)
Ubá	40 10DEZ2021 (01:14Z) ASCAT (METOP-B)	40 10DEZ2021 (01:14Z) ASCAT (METOP-B)	34,50 10DEZ2021 (01:15Z) ASCAT (METOP-B)
Yakecan	55 18MAI2022 (04:13Z) GCOMW1 (AMSR-2)	50 17MAI2022 (13:04Z) ASCAT (METOP-B)	45,76 17MAI2022 (13:01Z) ASCAT (METOP-B)

De modo a ilustrar os resultados do Quadro 2, apresentam-se os dados reprocessados do ASCAT para a passagem correspondente à ocorrência dos ventos máximos da Tempestade Subtropical “Raoni” (Figura 4) e da Tempestade Subtropical “Yakecan” (Figura 5). O ciclone Raoni apresentou o máximo de 47,02 nós no setor sudoeste às 02:00Z do dia 29JUN2021, conforme estimado pelo ASCAT na passagem do satélite

METOP-C, o que difere em cerca de 3 nós a menos do apresentado nas figuras constantes nos relatórios do CHM. Por sua vez, o ciclone “Yakecan” apresentou o máximo de 45,76 nós, também no setor sudoeste, às 13:01Z do dia 17MAI2022, conforme estimado pelo ASCAT na passagem do satélite METOP-B. Este valor é cerca de 9 nós menor que o obtido pelo radiômetro GCOMW1 (satélite ASMR-2).

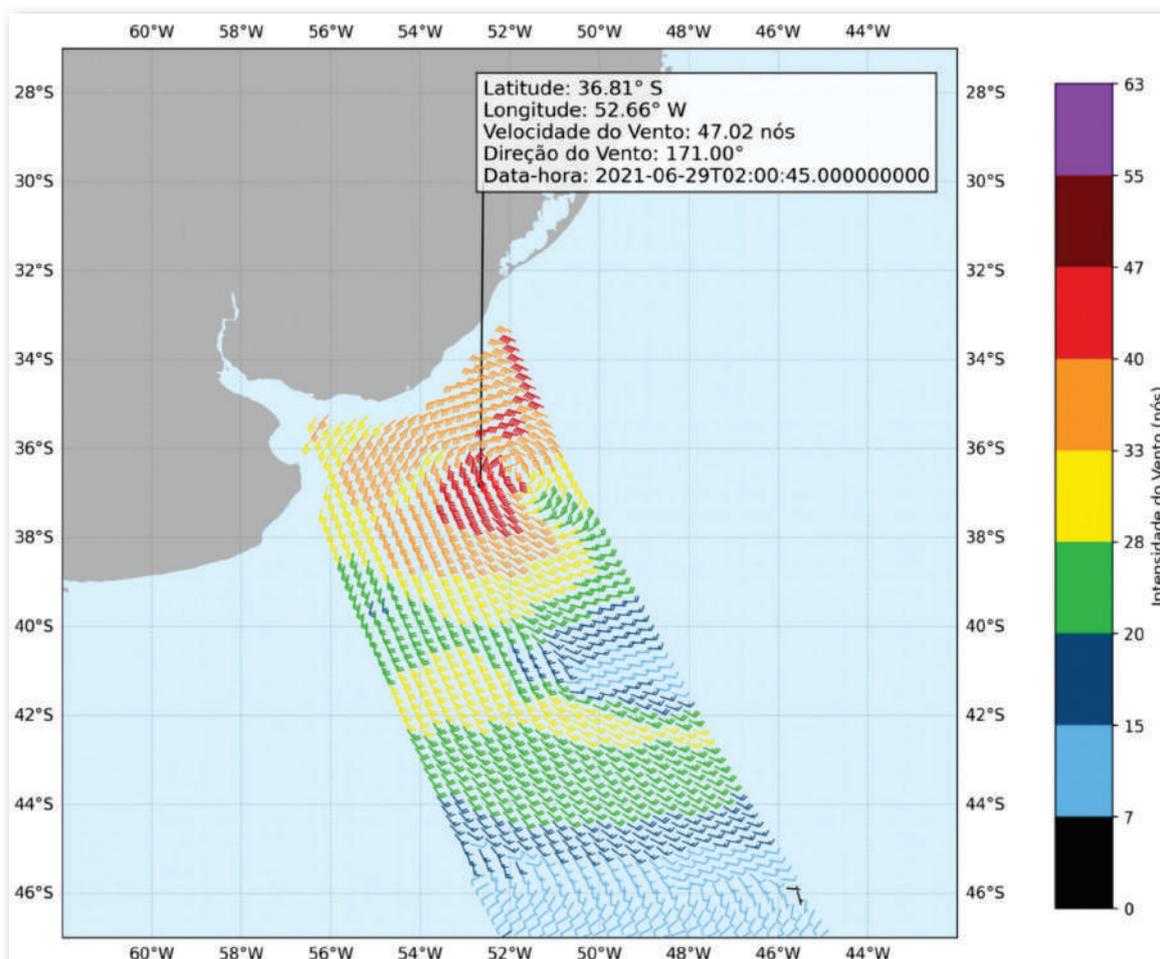


Figura 4 – Passagem do satélite METOP-C de 29JUN2021 (02:00Z) indicando a localização do vento máximo associado a Tempestade Subtropical “Raoni”, obtida pelo ASCAT. Fonte: Elaboração própria (2023)

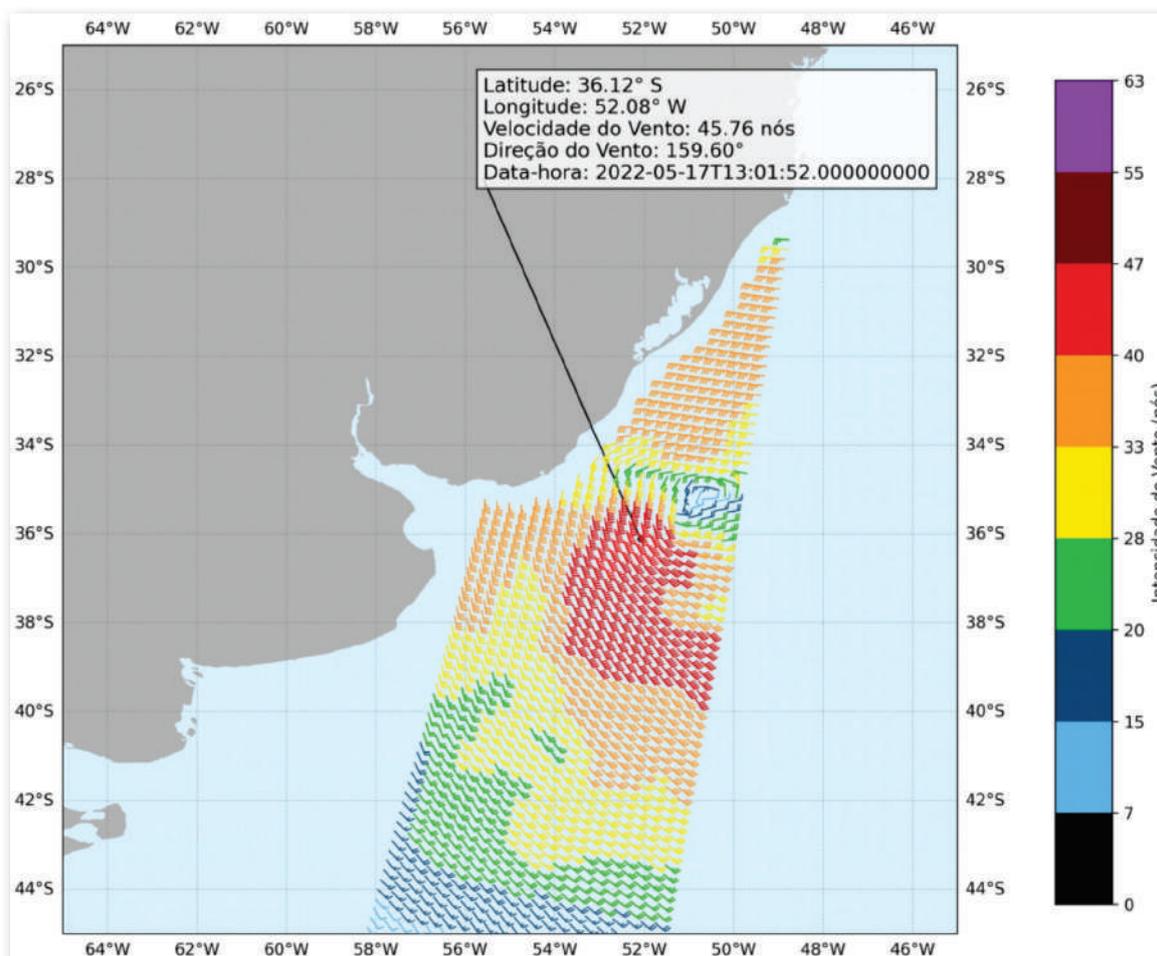


Figura 5 – Passagem do satélite METOP-B de 17MAI2022 (13:01Z) indicando a localização do vento máximo associado a Tempestade Subtropical “Yakecan”, obtida pelo ASCAT. Fonte: elaboração própria (2023)

De modo a ilustrar com maior ênfase as diferenças entre os máximos das velocidades do vento em cada tempestade apresentada no Quadro 2, propôs-se uma análise mais detalhada das informações que podem ser visualizadas no Quadro 3. Foram comparados os dados da rotina

computacional com os dados dos diferentes sensores (A) e com relação aos dados ASCAT (B), ambos dos relatórios do CHM. Além disso, foi verificado se o METOP analisado em B foi o mesmo do relatório e se a passagem do sensor satelital ocorreu no mesmo horário.

Quadro 3 – Comparação dos máximos de velocidade do vento obtidos para cada ciclone. A coluna A indica a diferença entre o valor obtido pela rotina computacional e o indicado nos relatórios do CHM. A coluna B indica a diferença entre o valor obtido pela rotina computacional e o indicado nos relatórios, porém considerando apenas os ASCAT. Referente ao cálculo apresentado em B, a penúltima e última coluna indicam, respectivamente, se houve coincidência entre o horário da passagem do METOP e se os máximos pertenciam ao mesmo satélite. Fonte: elaboração própria (2023)

Ciclone	A (nós)	B (nós)	Horário coincidente?	METOP coincidente?
Arani	-4,86	-4,86	Sim	Sim
Bapo	-13,76	-3,79	Sim	Sim
Cari	-1,04	3,96	Não	Não
Deni	-	-2,33	Não	Não
Eçaí	-	4,83	Sim	Sim
Guará	-8,94	1,06	Não	Sim
Iba	-26,08	-6,08	Sim	Sim
Jaguar	-6,32	-1,32	Não	Não
Kurumí	-9,51	-4,51	Não	Não
Mani	-10,41	-1,41	Não	Sim
Oquira	-5,48	-0,48	Não	Sim
Potira	-	-3,65	Não	Não
Raoni	-	-2,98	Sim	Sim
Ubá	-	-4,5	Sim	Sim
Yakecan	-9,24	-4,24	Sim	Sim

Em geral, observa-se que os valores de vento estimados pelas rotinas tendem a ser menores em comparação ao dos relatórios, apontando para uma superestimação sistemática dos produtos analisados no âmbito operacional, muitas das vezes, gerada por arredondamento nos resultados de escaterômetros. No entanto, essa tendência não é uma regra absoluta, já que há algumas exceções notáveis, como nos casos dos ciclones Cari, Eçaí e Guará, nos quais os valores das rotinas computacionais superaram os dos relatórios.

Além disso, dos 15 ciclones analisados, em 7 (Arani, Bapo, Eçaí, Iba, Raoni, Ubá

e Yakecan) houve coincidência tanto no horário quanto no satélite METOP que gerou o vento máximo. Nos outros casos, os valores comparados pertencem a outro sensor ou a passagens satelitais diferentes.

É importante ressaltar que houve oscilações entre -2,98 e -6,08 nós nas 7 situações em que o mesmo satélite foi usado no mesmo horário que consta em relatório. Para estes casos, construiu-se o Quadro 4, que apresenta o erro médio quadrático absoluto e percentual referente à diferença dos valores obtidos nos relatórios do CHM (coluna central do Quadro 2) e pelas rotinas computacionais do presente estudo.



Quadro 4 – Cálculo do erro médio quadrático e da porcentagem de erro médio entre os valores dos relatórios (R) e os valores das rotinas computacionais (S) para cada ciclone. Fonte: elaboração própria (2023)

Tempestade	R	S	$(R-S)^2$	$[(R-S /R)*100\%]/N$
Arani	45	40,14	23,45	10,80%
Bapo	40	36,21	14,25	9,47%
Eçaí	40	43,83	14,45	9,58%
Iba	40	33,92	40,29	14,20%
Raoni	50	47,02	8,85	5,96%
Ubá	40	34,5	30,25	11,25%
Yakecan	50	45,76	18,99	8,48%

O valor obtido da raiz do erro quadrático médio foi de aproximadamente 4,48 nós e indica o intervalo médio onde se encontram as diferenças entre as velocidades máximas informadas nos relatórios e as obtidas diretamente dos dados do ASCAT. Como os valores do relatório em sua maioria são maiores que os da rotina, acredita-se que o produto da STAR/NESDIS superestima os valores de vento. A porcentagem média de erro em relação aos relatórios para esses 7 ciclones é aproximadamente 9,82%. Isso significa que, em média, os valores dos relatórios têm um erro de cerca de quase 10% em relação aos valores das rotinas.

Dos 15 ciclones avaliados, em 7 situações houve vento máximo em período anterior ao que consta relatório, representando cerca de 46,7% dos casos.

Aplicando os cálculos anteriores para todos os ciclones e dados que constam no Quadro 2, os relatórios do CHM apresentaram ventos com erro médio de aproximadamente 7,85% e desvio médio quadrático de 3,32 nós em relação aos dados gerados por rotina computacional.

Uma das dificuldades operacionais que se pode destacar é a correta associação da velocidade do vento apresentada na barbela com a escala de cores atribuída. Cabe ressaltar que a OMM estabelece normas para as simbologias de barbelas, com uma variação na faixa de aproximadamente 2 nós.

Pela análise da Figura 6, apesar de o relatório apontar que há uma barbela de 45 nós na figura do ciclone Arani (esquerda), há dificuldade de leitura por superposição, logo, para efeitos de análise, será considerado a média de valores no entorno, que é de 40 nós. Nota-se que há barbelas de 40 nós representadas em cores diferentes em ambas as figuras, sendo que, na primeira, o valor máximo gerado por rotina computacional foi de 40,14 nós e, na segunda, foi de 36,21 nós, o que pode ser atenuado ou intensificado pela tolerância de aproximadamente 2 nós estabelecida pela OMM. Como a fonte de dados é a mesma tanto para o STAR/NESDIS quanto para esta pesquisa, a visualização espacial em barbelas não deveria ser discrepante.

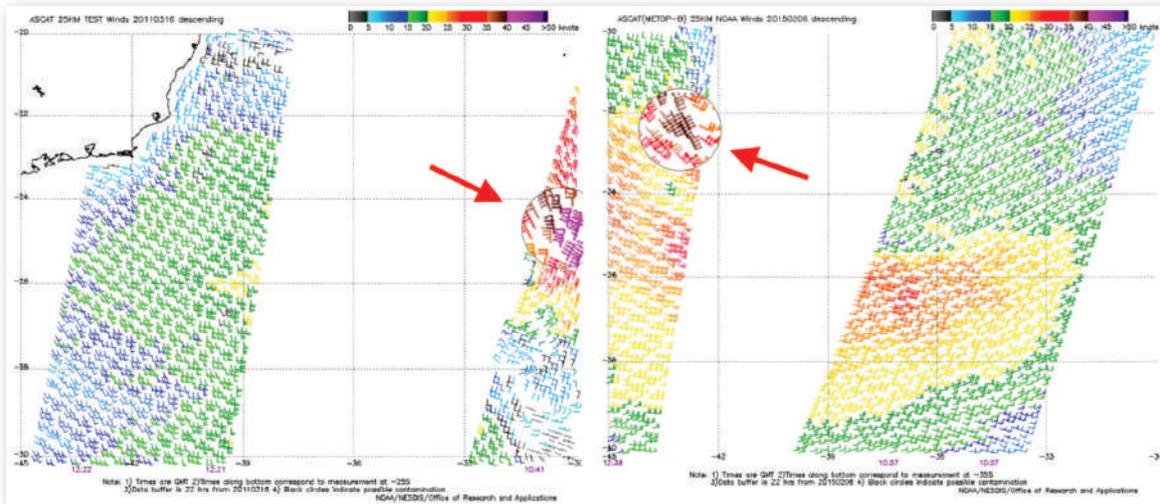


Figura 6 – Varreduras do ASCAT para as Tempestades Subtropicais Arani (esquerda) e Bapo (direita), evidenciando a presença de barbelas de que não correspondem aos valores obtidos após a análise dos dados brutos. Fonte: Adaptado de STAR/NESDIS

Em complemento, as Figuras 7 e 8 demonstram as dificuldades de leitura dos produtos devido à sobreposição de barbelas, como no caso dos ciclones Arani e Bapo (Figura 6). Além disso, é possível visualizar diferenças na maneira como as barbelas são arredondadas. Especificamente, na Figura 7, nota-se que os

máximos gerados por rotina computacional foram respectivamente 47,02 e 45,76 nós, no entanto, em ambos os produtos, foram plotadas barbelas de 50 nós, que é o valor que consta em relatório. Na Figura 8, referente ao ciclone Iba, destacou-se a região onde a representação das barbelas pode gerar análise incorreta.

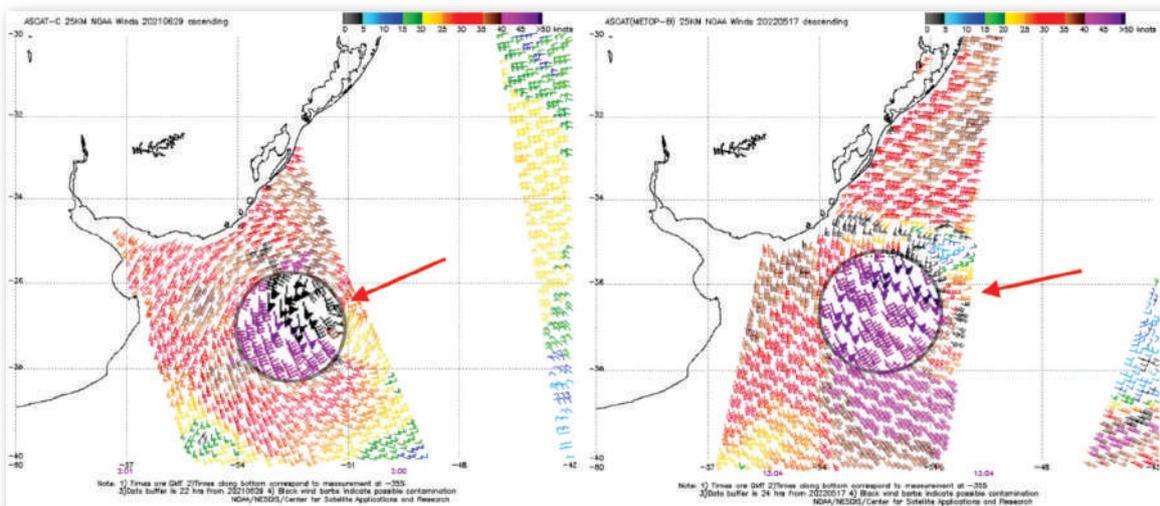


Figura 7 – Varreduras do ASCAT para as Tempestades Subtropicais Raoni (esquerda) e Yakecan (direita), evidenciando a presença de barbelas de que não correspondem aos valores obtidos após a análise dos dados brutos. Fonte: Adaptado de STAR/NESDIS

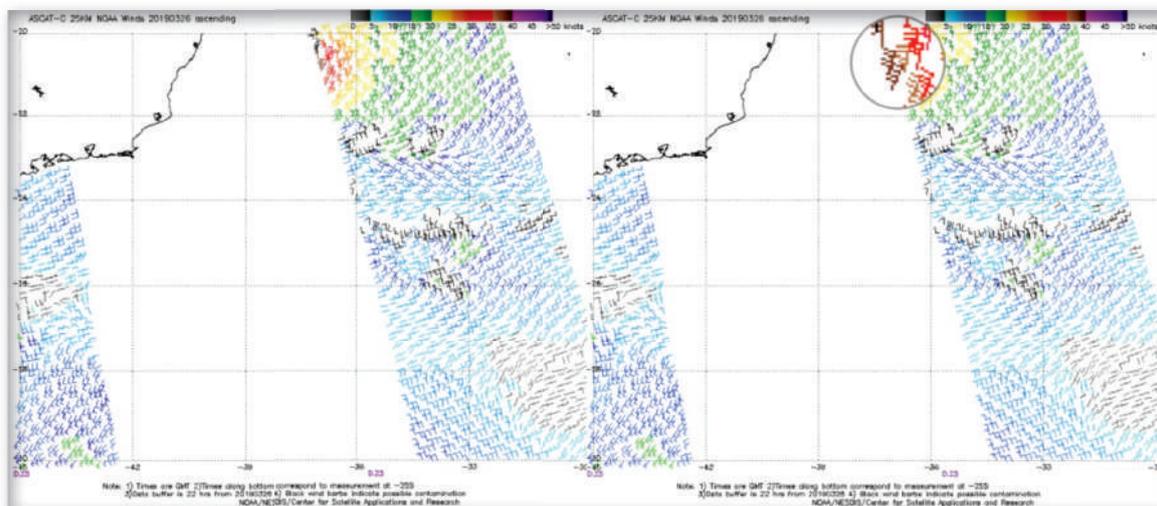


Figura 8 – Passagem do satélite METOP-C indicando os ventos associados a Tempestade Tropical Iba em 26MAR2019. Fonte: Adaptado de STAR/NESDIS

Com estes exemplos, fica evidente que não se deve basear unicamente no valor da barbela de imagens já processadas, como a do STAR/NESDIS, mas, sim, usá-la como base para obtenção de uma informação mais fiel, caso seja necessário ter um valor mais preciso, como é o caso da classificação de ciclones. A comparação das Figuras 4 e 5 com as Figuras 6, 7 e 8 evidencia que a utilização de rotinas computacionais operacionais, como as implementadas nesta pesquisa, torna-se uma fonte mais confiável e precisa do valor da velocidade do vento.

4.2. Raio de vento máximo

Entende-se como raio de vento máximo a distância entre o centro do ciclone e a posição do maior vento obtido associado a este sistema. O Quadro 5 apresenta as distâncias dos ventos máximos em relação ao centro de seus respectivos ciclones, obtidas com base na posição constante nos relatórios pós-evento do CHM e na localização

do vento máximo da passagem do satélite. Os horários extraídos dos relatórios foram selecionados com base na proximidade em relação aos ventos máximos, garantindo uma diferença máxima de duas horas. Considera-se que seja plausível que essas duas horas de diferença tenham influenciado no tamanho total medido.

A Tempestade Subtropical Raoni possuiu o menor raio de vento máximo entre os eventos subtropicais, com cerca de 52,15 milhas náuticas. Ao passo que o maior raio de vento máximo dentre os eventos foi observado durante a Tempestade Subtropical Cari, sendo de 243,48 milhas náuticas. O raio de vento máximo médio entre as tempestades subtropicais analisadas foi de 134,63 milhas náuticas. A Tempestade Tropical Iba apresentou um raio de vento máximo de 42,07 milhas náuticas, sendo inclusive menor que o de todas as tempestades subtropicais. Tal resultado era esperado, visto que ciclones tropicais apresentam máximos de vento próximos ao centro do sistema.

Quadro 5 – Raios de ventos máximos das tempestades classificadas pelo SMM entre 2011 e 2022. Fonte: elaboração própria (2023)

Ciclone	Tipo de Tempestade	Data	Posição do Centro da Tempestade (Relatório)	Hora Relatório	Posição do Vento Máximo encontrado (Python)	Distância Centro - Vento Máximo (Hora de ocorrência)
Arani	Subtropical	16/03/2011	Latitude: 26° S Longitude: 032° W	12Z	Latitude: 24.92° S Longitude: 030.27° W	114.1 MN (10:41Z)
Bapo	Subtropical	06/02/2015	Latitude: 30° S Longitude: 043° W	12Z	Latitude: 31.99° S Longitude: 043.26° W	120.23 MN (12:36Z)
Cari	Subtropical	10/03/2015	Latitude: 29° S Longitude: 45° W	12Z	Latitude: 27.10° S Longitude: 040.94° W	243.48 MN (12:19Z)
Deni	Subtropical	15/11/2015	Latitude: 26° S Longitude: 044° W	16 MAR 00Z	Latitude: 28.02° S Longitude: 041.61° W	176.21 MN (23:59Z)
Eçaí	Subtropical	05/12/2016	Latitude: 28° S Longitude: 044° W	00Z	Latitude: 30.31° S Longitude: 043.16° W	145.52 MN (00:05Z)
Guará	Subtropical	11/12/2017	Latitude: 26° S Longitude: 34° W	00Z	Latitude: 25.17° S Longitude: 032.60° W	90.72 MN (00:27Z)
Iba	Tropical	26/03/2019	Latitude: 20.7° S Longitude: 37.7° W	00Z	Latitude: 20.81° S Longitude: 036.96° W	42.07 MN (00:26Z)
Jaguar	Subtropical	19/05/2019	Latitude: 22° S Longitude: 039° W	20 MAI 00Z	Latitude: 21.96° S Longitude: 035.23° W	209.91 MN (23:07Z)
Kurumi	Subtropical	24/01/2020	Latitude: 28° S Longitude: 039° W	00Z	Latitude: 29.10° S Longitude: 040.58° W	106.33 MN (01:09Z)
Mani	Subtropical	25/10/2020	Latitude: 21° S Longitude: 039° W	12Z	Latitude: 22.31° S Longitude: 039.04° W	78.68 MN (11:16Z)
Oquirá	Subtropical	28/12/2020	Latitude: 32° S Longitude: 042° W	00Z	Latitude: 35.85° S Longitude: 041.98° W	231.16 MN (00:06Z)
Potira	Subtropical	21/04/2021	Latitude: 25.1° S Longitude: 39.1° W	00Z	Latitude: 26.62° S Longitude: 036.25° W	178.98 MN (00:50Z)
Raoni	Subtropical	29/06/2021	Latitude: 37° S Longitude: 51.6° W	00Z	Latitude: 36.81° S Longitude: 052.66° W	52.15 MN (02:00Z)
Ubá	Subtropical	10/12/2021	Latitude: 32° S Longitude: 41° W	00Z	Latitude: 33.73° S Longitude: 041.34° W	105.28 MN (01:15Z)
Yakecan	Subtropical	17/05/2022	Latitude: 37° S Longitude: 51° W	12Z	Latitude: 36.12° S Longitude: 052.08° W	74.19 MN (13:01Z)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, este estudo contribuiu para ampliar o conhecimento das tempestades subtropicais e da tempestade tropical que ocorreram no Brasil desde 2011 até 2022, bem como entender o papel do SMM e seus desafios em informar à população os dados a respeito de determinados fenômenos.

Verificou-se que as tempestades Cari, Eçaí e Guará foram as únicas que apresentaram valores de velocidade do vento superiores aos que constam nos relatórios do CHM quando se compara apenas os produtos dos ASCAT. O ciclone Iba, por outro lado, apresentou a maior discrepância de intensidade de vento máximo. Constatou-se, também, que a localização média do



vento máximo para os 14 ciclones subtropicais analisados foi de 134,63 milhas náuticas do centro das tempestades.

Com os dados obtidos, também foi possível mensurar o nível de acerto do CHM, uma vez que o valor máximo, anteriormente, se resumia à acuidade visual e capacidade de percepção das barbelas e escalas de cores. Ao analisar somente os produtos dos ASCAT, encontrou-se uma superestimação de 4,48 nós em relação ao dado real, representando um erro médio de 9,82%. Já ao analisar os relatórios do CHM, usando o resultado levantado por Correia et al. (2022), para todos os ciclones, houve uma superestimação de 3,32 nós e um erro médio de 7,85%.

Apesar de existirem tais valores de erro médio com relação ao vento obtido de forma objetiva utilizando a rotina computacional, a maioria das tempestades tropicais e subtropicais analisadas mantiveram suas classificações, com exceção de Cari (33,96 nós), Iba (33,92 nós) e Mani (33,59 nós), que apresentaram intensidades de Depressão Subtropical (< 34 nós). Vale destacar, contudo, que esses resultados estão bem próximos do limite de classificação entre tempestade e depressão, e possuem uma precisão maior que as dos produtos utilizados até então no âmbito operacional. Relembra-se que as classificações não são feitas unicamente com base nos dados de escaterômetros, mas, também, em dados observados e estimativas dos radiômetros e no aspecto da nebulosidade e da convecção.

É importante frisar que este estudo buscou estimar a velocidade máxima do vento com base em dados de escaterômetros, o que não implica que o fenômeno tenha se restringido a esses valores na natureza. Isso ocorre devido à limitação intrínseca à fonte de dados, como a baixa resolução temporal e a descontinuidade na distribuição espacial dos dados.

Outras perguntas podem surgir, por exemplo, se o ciclone já poderia ter sido classificado como Tempestade em momento anterior ou se deveria ter mantido a classificação de Tempestade por mais tempo ou ainda se deveria ter permanecido como Depressão por mais tempo inicialmente ou se deveria ter sido rebaixado tão logo à categoria de Depressão. Estas também são sugestões para trabalhos futuros, que podem utilizar o programa aqui proposto.

Considerando os limites e desvios apresentados, deve-se atentar, durante o monitoramento de ciclones ao erro médio do vento, que pode ser fundamental no momento da classificação do fenômeno, uma vez que velocidades superiores a 50 nós possuem sensibilidade instrumental reduzida. Para o caso da formação de furacões, deve-se levar em conta a saturação máxima no limiar de 70 nós.

Pode-se notar que a análise única dos produtos do STAR/NESDIS pode superestimar o valor de um ciclone gerando classificações incorretas. Apesar de o dado de origem ser o do PODAAC, pode ser que o STAR/NESDIS utilize uma metodologia de pós-processamento que implique necessariamente em uma representação distinta da velocidade do vento, gerando, assim, diferentes imagens das passagens dos escaterômetros. Com isso, a geração de rotinas computacionais em Python permite a atualização dos valores de vento máximo já fornecidos pelo CHM para valores mais precisos, bem como a atualização dos dados das tempestades, além de ser uma alternativa para implementação no dia a dia do serviço operacional. Resume-se a contribuição deste trabalho com a criação de uma importante ferramenta de análise e consequente classificação de ciclones pelo SMM, a partir dos dados do ASCAT.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORREIA, F. R. S. et al. ASPECTOS GERAIS DOS CICLONES TROPICAIS E SUBTROPICAIS OCORRIDOS NA METAREA V ENTRE 2011 E 2022. *Anais Hidrográficos*, [S. l.], p. 1-24, 28 set. 2022.

GOZZO, L. F. Ciclones Subtropicais sobre o Sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e Fontes de Umidade. 2014. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HART, ROBERT E. A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. *MONTHLY WEATHER REVIEW*, Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, p. 585-616, April 2003.

KNAFF, J. A. et al. Estimating tropical cyclone surface winds: Current status, emerging technologies, historical evolution, and a look to the future. *Tropical Cyclone Research and Review*, [S. l.], v. 10, p. 125-150, 17 set. 2021.

MATHIAS, R. S. B. Análise e Classificação de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceitos e Aplicação em Previsão de Tempo Operacional. 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MARINHA DO BRASIL. Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-701). 2023. Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dhn/normam/normam-701.html>>. Acesso em: 10 de março de 2024.

REBOITA, Michelle Simões et al. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *TERRÆ DIDÁTICA*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

RICCIARDULLI, L.; WENTZ, F. A scatterometer geophysical model function for climatequality winds: QuikSCAT Ku-2011. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 32, p. 1829-1846, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0008.1>>.

SOISUVARN, S. et al. CMOD5.Hda high wind geophysical model function for C-band vertically polarized satellite scatterometer measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, v. 51, p. 3744-3760, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2219871>>.

STOFFELEN, A. et al. The CMOD7 Geophysical Model Function for ASCAT and ERS Wind Retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 10, n. 5, p. 2123-2134, 2017. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2681806.

University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). COMET Program. Using Scatterometer Wind and Altimeter Wave Estimates in Marine Forecasting. MetEd website, 2015. Disponível em: <https://www.meted.ucar.edu/EUMETSAT/marine_forecasting/nav-menu.php?tab=1&page=4-11-0&type=flash>. Acesso em: 10 maio 2023.



VAREJÃO-SILVA, M.A. Meteorologia e Climatologia. Versão Digital 2. ed. Recife, Brasil: [s.n.], Março 2006. 449 p.

VERSPEEK, J. et al. Validation and calibration of ASCAT using CMOD5. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., v. 48, p. 386-395, 2010.

VIANNA, M.L. et al. Interactions between Hurricane Catarina (2004) and warm core rings in the South Atlantic Ocean. Oceans, Journal of Geophysical Research, 2010. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JC005974>>. Acesso em: 1 abr. 2023.

WENTZ, F. J.; SMITH, D. K. A model function for the ocean-normalized radar cross section at 14 GHz derived from NSCAT observations. J. Geophys. Res., v. 104, p. 11499-11514, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/98JC02148>>.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (org.). Global Guide To Tropical Cyclone Forecasting. WMO-1194. ed. Geneva, Switzerland: [s. n.], 2017, p.88. ISBN 978-92-63-11194-4.

