

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**MAIQUEL JANTSCH**

**CLIMATOLOGIA DE CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS NA COSTA  
SUL E SUDESTE DO BRASIL ENTRE 1979 E 2020**

**PORTO ALEGRE  
2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**

**CLIMATOLOGIA DE CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS NA COSTA  
SUL E SUDESTE DO BRASIL ENTRE 1979 E 2020**

**MAIQUEL JANTSCH**

Orientador: Prof. Dr. Francisco Eliseu Aquino

Coorientadora: Dra. Carolina Barnez Gramcianinov

Banca Examinadora:

Dra. Venisse Schossler - INCT Criosfera/CPC/UFRGS

Prof. Dr. Daniel Pires Bittencourt - Fundacentro

Prof. Dr. Mauro Michelena Andrade - UNIVALI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Geografia.

PORTO ALEGRE, 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Jantsch, Maiquel  
Climatologia de ciclones extratropicais e ressacas  
na costa sul e sudeste do Brasil entre 1979 e 2020 /  
Maiquel Jantsch. -- 2024.  
165 f.  
Orientador: Francisco Eliseu Aquino.

Coorientadora: Carolina Barnez Gramcianinov.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de  
Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. ciclogêneses. 2. ressacas marítimas. 3. altura  
de onda. 4. Rio Grande. 5. Itajaí. I. Aquino,  
Francisco Eliseu, orient. II. Gramcianinov, Carolina  
Barnez, coorient. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Ivone e Nido, pelo suporte, companheirismo, confiança e carinho de sempre, e ao restante da minha família.

Agradeço aos vários amigos e colegas que me ajudaram durante todos esses anos de graduação, no mestrado e doutorado. Não vou mencionar nomes, mas são muitas e muitos.

Ao meu orientador, Francisco, por todos esses anos de orientação, conhecimentos passados e dedicação pela Geografia e Climatologia.

À minha coorientadora, Carolina, pela disponibilização primordial de dados, pelas revisões, dicas, suporte e ajuda com seu conhecimento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pelos serviços prestados.

À UFRGS e aos professores, pela qualidade ensino, disciplinas e pelas amizades que me proporcionaram durante esses 11 anos. Menciono também os conhecimentos que adquiri na elaboração de mapas, que me proporcionaram trabalhar com isso hoje em dia.

Ao Centro Polar e Climático, pelo espaço de trabalho e laboratório.

Ao INCT da Criosfera, pelo apoio financeiro.

Preciso mencionar o suporte felino, seja com a “Mini”, na casa dos meus pais e durante toda a pandemia, ou com a “Dorinha”, depois de 2022, em Porto Alegre. Foram anos trabalhando sempre com uma das duas do meu lado.

Aos demais que não mencionei, fica a minha admiração e carinho por todas as vezes que se dispuseram a me ajudar de alguma forma.



## RESUMO

Este trabalho investigou a quantidade anual, sazonal e mensal de ressacas ocorridas na costa sul e sudeste do Brasil entre 1979 e 2020, bem como suas características. Também, foi realizada uma climatologia de ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul, no mesmo período, identificado posteriormente os sistemas associados às ressacas. Foram utilizados dados do ERA5, do ECMWF, para identificar as ressacas, utilizando as variáveis de altura significativa de onda, direção de onda, período de onda e vento. A identificação dos ciclones foi obtida através da variável de vorticidade, também com dados do ERA5. Quatro pontos foram selecionados para o estudo, localizados nos estados do Rio Grande do Sul (Rio Grande), Santa Catarina (Itajaí), São Paulo (Santos) e Rio de Janeiro (Cabo Frio). O parâmetro adotado como critério para identificação de uma ressaca foi o de altura significativa de onda de 2,5 m ou mais de elevação por, pelo menos, 24 horas. Um código em Python foi elaborado para automatizar o processo de identificação de todas as ressacas, seguido de análises temporais e a construção de gráficos e mapas. Com isso, foi possível identificar as ressacas mais intensas que ocorreram nos quatro pontos. Em um segundo momento, os dados de ciclones extratropicais (1979-2020) foram investigados. Na sequência, um novo código identificou quais ciclones estavam associados às ressacas utilizando critérios de distância geográfica, tempo e direção de onda. Assim, foram identificadas 1245 ressacas em Rio Grande, 736 em Itajaí, 770 em Santos e 533 em Cabo Frio. Identificou-se que quanto mais ao sul, maior a incidência destes eventos. Em Rio Grande, os anos com mais ressacas foram 2017, (38), 2010 e 2000 (37) e 1999 (36), sendo que o ano com mais eventos severos foi 2016. Foi verificada uma tendência estatística positiva de aumento de ressacas em cada um dos quatro pontos de estudo entre 1993 e 2020. Sazonalmente, a estação com mais ressacas foi o inverno, seguido da primavera, outono e verão. Porém, quando considerados os casos mais intensos, o outono registrou a mesma quantidade que a primavera em Rio Grande (24). Mensalmente, o período entre abril e outubro apresentou o maior número de ressacas. As ressacas mais intensas em Rio Grande ocorreram em abril de 1999 e outubro de 2016. A altura significativa máxima e média de ondas foi maior em latitudes maiores. A direção mediana de ondas das ressacas teve predominância de sul/sudeste, o mesmo ocorreu em eventos intensos. Em relação aos ciclones, as áreas mais ciclogênicas da América do Sul foram Argentina, La Plata e Sudeste do Brasil, respectivamente. Os ciclones extratropicais na área La Plata foram mais frequentes no inverno e as áreas Sudeste do Brasil e Argentina foram mais ativas no verão. A área predominante para ciclogênese que geram ressacas na costa sul e sudeste do Brasil é La Plata (média de 42,1 a-1). Três padrões principais de gênese e deslocamento de ciclones extratropicais associados às ressacas foram identificados: I) formação em La Plata e deslocamento entre sudeste ou leste; II) formação no norte da área Argentina e deslocamento para leste ou nordeste; III) formação na área Sudeste do Brasil e deslocamento para leste ou sudeste.

**Palavras-chave:** ciclogêneses, ressacas marítimas, altura de onda, Rio Grande, Itajaí, Santos, Cabo Frio.

## ABSTRACT

This work investigated annual, seasonal and monthly occurrences of storm surges on the south and southeast coast of Brazil between 1979 and 2020 and their characteristics. Also, a climatology of extratropical cyclones was made in the South Atlantic Ocean in the same period, later identifying the cyclones associated with storm surges. Data from ECMWF ERA5 were used to identify storm surges, using the variables of significant wave height, wave direction, wave period and wind. Identification of cyclones was obtained through the vorticity variable, also with ERA5 data. Four points in the states of Rio Grande do Sul (Rio Grande), Santa Catarina (Itajaí), São Paulo (Santos) and Rio de Janeiro (Cabo Frio) were selected for this study. The parameter adopted as a criterion for identifying a storm surge was a significant wave height of 2.5 m or higher for at least 24 hours. A Python code was developed to automate the process identifying all surges, followed by temporal analysis and the construction of graphs and maps. Thus, it was possible to identify the most intense storm surges occurring in the four points. Next, data from extratropical cyclones (1979-2020) were studied. Subsequently, a new code identified which cyclones were associated with storm surges using criteria of geographic distance, time and wave direction. A total of 1245 storm surges were identified in Rio Grande, 736 in Itajaí, 770 in Santos and 533 in Cabo Frio. We found that the further south, the greater the incidence of these events. In Rio Grande, years with the highest number of storm surges were 2017 (38), 2010 and 2000 (37) and 1999 (36), and the year with the most intense events was 2016. A statistical trend of increasing storm surges was observed at each of the four study points between 1993 and 2020. Seasonally, winter had more surges, followed by spring, autumn and summer. However, when considering the most intense cases, autumn recorded the same quantity as spring in Rio Grande (24). On a monthly basis, the period between April and October presented the highest number of storm surges. The most intense storm surges in Rio Grande occurred in April 1999 and October 2016. The maximum and mean significant wave height was greater at higher latitudes. Storm surges median wave direction was predominantly south/southeast, the same occurred in intense events. Regarding cyclones, the most cyclogenetic areas in South America were Argentina, La Plata and Southeast Brazil, respectively. The extratropical cyclones in the La Plata area were more frequent in winter, while the Southeast regions of Brazil and Argentina were more active in summer. The predominant area for cyclogenesis generating storm surges on the south and southeast coast of Brazil is La Plata (mean 42.1 a<sup>-1</sup>). Three main genesis and displacement patterns of extratropical cyclones associated with storm surges could be identified: I) formation in La Plata and displacement between southeast or east; II) formation in northern Argentine area and displacement to the east or northeast; III) formation in Southeast area of Brazil and displacement to the east or southeast.

**Keywords:** cyclogenesis, storm surges, wave height, Rio Grande, Itajaí, Santos, Cabo Frio.

## Lista de abreviaturas

BNOA - Baixa do Noroeste Argentino  
CFSR - Climate Forecast System Reanalysis  
CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono  
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
ECMWF - European Centre for Medium Range Weather Forecasts  
ENOS - El Niño - Oscilação Sul  
ENVISAT - Environmental Satellite  
ERS - European Remote Sensing  
FCS - Fluxo de Calor Sensível  
GEBCO - General Bathymetric Chart of the Ocean  
GLOSS Brasil - Global Sea Level Observing System  
hPa - Hectopascal  
Hs - Significant Wave Height  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change  
JMA - Japan Meteorological Agency  
MSLP - Mean Sea Level Pressure  
M s<sup>-1</sup> - Metros por segundo  
NCAR - National Center for Atmospheric Research  
NCEP - National Centers for Environmental Prediction  
NetCDF - Network Common Data Form  
NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration  
NORMAM-19 - Normas de Autoridade Marítima da Marinha do Brasil  
PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas  
PNBOIA - Programa Nacional de Boias  
SAM - Southern Annular Mode  
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission  
Swh - Significant Wave Height  
TNAc - Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central  
TSM - Temperatura da superfície do mar

## Lista de Figuras

Figura 1 - Impactos costeiros atuais e previstos (a) e dinâmica costeira em resposta às mudanças climáticas (b). .....	16
Figura 2 - Ciclo de vida dos ciclones extratropicais .....	19
Figura 3 - Estágios de modelos conceituais de evolução dos ciclones extratropicais. ....	21
Figura 4 - Tracking dos ciclones explosivos no Hemisfério Sul entre 1979-1999. ....	25
Figura 5 - Densidade de frequência de ciclogêneses na América do Sul e Oceano Atlântico Sul (1979-1988). ....	26
Figura 6 - Densidade de ciclones extratropicais na América do Sul e Oceano Atlântico Sul entre os anos de 1990 e 1999. ....	27
Figura 7 - Densidade de ciclones extratropicais na América do Sul e Oceano Atlântico Sul entre os anos de 1979 e 2010. ....	28
Figura 8 - Processo de formação de ondas no oceano. ....	32
Figura 9 - Quatro padrões sinóticos que geram ressacas na América do Sul. ....	36
Figura 10 - Área de estudo de ressacas (números) e de ciclones extratropicais (Oceano Atlântico Sul). Pontos de 1 a 4 representam: 1) Rio Grande; 2) Itajaí; 3) Santos e 4) Cabo Frio. ....	39
Figura 11 - Validação dos dados do swh do ERA5 e da boia Itajaí entre 2017 e 2018. ....	42
Figura 12 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020. ....	48
Figura 13 - Total sazonal de ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020. ....	49
Figura 14 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Rio Grande. ....	50
Figura 15 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020. ....	50
Figura 16 - Total sazonal de horas com ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020. ....	51
Figura 17 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período (1979 - 2020) no ponto da boia Rio Grande. ....	52
Figura 18 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Rio Grande. ....	53
Figura 19 - Média anual do swh durante todas as horas de cada ano no ponto da boia Rio Grande. ....	53
Figura 20 - Média sazonal do swh em Rio Grande entre 1979 e 2020. ....	54
Figura 21 - Média do swh em cada mês do ano no ponto da boia Rio Grande (metros).....	55
Figura 22 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020 com dados do ERA5 .....	56
Figura 23 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	58
Figura 24 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Rio Grande por mês baseado no swh máximo. ....	59
Figura 25 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Rio Grande por ano baseado no swh máximo. ....	60
Figura 26 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Itajaí entre 1979-2020. ....	61
Figura 27 - Total sazonal de ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020. ....	61
Figura 28 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Itajaí. ....	62
Figura 29 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Itajaí. ....	63
Figura 30 - Total sazonal de horas com ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020. ....	63
Figura 31 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Itajaí. ....	64
Figura 32 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Itajaí. ....	65
Figura 33 - Média sazonal do swh em Itajaí entre 1979 e 2020. ....	65
Figura 34 - Média do swh em cada mês do ano no ponto da boia Itajaí (metros). ....	66
Figura 35 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	67
Figura 36 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Itajaí entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	68
Figura 37 - Quantidade de ressacas 10% mais intensas em Itajaí por mês baseado no swh máximo. ....	70
Figura 38 - Quantidade de ressacas 10% mais intensas em Itajaí por ano baseado no swh máximo. ....	70
Figura 39 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Santos entre 1979-2020. ....	71
Figura 40 - Total sazonal de ressacas em Santos entre 1979 e 2020. ....	72

Figura 41 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Santos. ....	72
Figura 42 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Santos. ....	73
Figura 43 - Total sazonal de horas com ressacas em Santos entre 1979 e 2020. ....	74
Figura 44 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Santos. ....	75
Figura 45 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Santos. ....	75
Figura 46 - Média sazonal do swh em Santos entre 1979 e 2020. ....	76
Figura 47 - Média do swh em cada mês do ano no ponto da boia Santos (metros). ....	76
Figura 48 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	77
Figura 49 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	78
Figura 50 - Quantidade de ressacas 10% mais intensas em Santos por mês baseado no swh máximo. ....	80
Figura 51 - Quantidade de ressacas 10% mais intensas em Santos por ano baseado no swh máximo. ....	80
Figura 52 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020. ....	81
Figura 53 - Total sazonal de ressacas em Cabo Frio 1979 e 2020. ....	82
Figura 54 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Cabo Frio. A linha azul indica a média mensal. ....	82
Figura 55 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Cabo Frio. ....	83
Figura 56 - Total sazonal de horas com ressacas em Cabo Frio entre 1979 e 2020. ....	83
Figura 57 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Cabo Frio. ....	84
Figura 58 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Cabo Frio. ....	85
Figura 59 - Média sazonal do swh em Cabo Frio entre 1979 e 2020. ....	85
Figura 60 - Média do swh em cada mês do ano no ponto da boia Cabo Frio (metros). ....	86
Figura 61 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	87
Figura 62 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020 com dados do ERA5. ....	88
Figura 63 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Cabo Frio por mês baseado no swh máximo. ....	89
Figura 64 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Cabo Frio por ano baseado no swh máximo. ....	90
Figura 65 - Quantidade anual de ciclogêneses no Atlântico Sul com dados do ERA5. ....	100
Figura 66 - Quantidade anual de ciclogêneses identificadas com dados do ERA5 na áreas La Plata e Sudeste do Brasil. ....	102
Figura 67 - Total sazonal de ciclogêneses nas áreas La Plata e Sudeste do Brasil somadas entre 1979 e 2020. ....	103
Figura 68 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Rio Grande de 1979 a 2020. ....	105
Figura 69 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020. ....	106
Figura 70 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Rio Grande de 1979 a 2020 em cada estação do ano. ....	107
Figura 71 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020 nas estações do ano. ....	108
Figura 72 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Itajaí de 1979 a 2020. ....	109
Figura 73 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020. ....	110
Figura 74 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Itajaí de 1979 a 2020 em cada estação do ano. ....	111

Figura 75 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020 nas estações do ano.....	112
Figura 76 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Santos de 1979 a 2020.....	113
Figura 77 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020.....	114
Figura 78 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Santos de 1979 a 2020 em cada estação do ano.....	115
Figura 79 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020 nas estações do ano.....	116
Figura 80 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Cabo Frio de 1979 a 2020.....	117
Figura 81 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Cabo Frio entre 1979 e 2020.....	118
Figura 82 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Cabo Frio de 1979 a 2020 em cada estação do ano.....	119
Figura 83 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020 nas estações do ano.....	120
Figura 84 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas ao extrato de 10% de ressacas mais intensas em Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio.....	122
Figura 85 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas 10% mais intensas em Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio entre 1979 e 2020.....	123
Figura 86 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 15 e 24 de abril de 1999.....	125
Figura 87 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca de abril de 1999.....	126
Figura 88 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida em abril de 1999 em Rio Grande.....	127
Figura 89 - Mapas da ressaca ocorrida entre 16 e 20 de abril na costa brasileira.....	128
Figura 90 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil no final de outubro de 2016.....	129
Figura 91 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca no final de outubro de 2016.....	130
Figura 92 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida no final de outubro de 2016 em Rio Grande.....	131
Figura 93 - Mapas da ressaca ocorrida no final de outubro na costa brasileira.....	132
Figura 94 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 30 de julho e 01 de agosto de 1987.....	133
Figura 95 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca entre julho e agosto de 1987.....	134
Figura 96 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida entre julho e agosto de 1987 em Itajaí e Santos.....	135
Figura 97 - Mapas da ressaca ocorrida entre 30 de julho e 01 de agosto na costa brasileira.....	136
Figura 98 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 30 de maio e 02 de junho de 1999.....	137
Figura 99 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca entre maio e junho de 1999.....	138
Figura 100 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida entre maio e junho de 1999 em Cabo Frio... ..	139
Figura 101 - Mapas da ressaca ocorrida entre 30 de maio e 02 de junho na costa brasileira.....	140



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação da porcentagem de ciclones extratropicais com gênese em cada área ciclogênica na América do Sul associado com ressacas nos quatro pontos analisados na costa brasileira.....	121
Tabela 2 - Lista de 10% de ressacas do swl máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Rio Grande com dados do ERA5 (1979-2020).....	147
Tabela 3 - Lista de 10% de ressacas do swl máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Itajaí com dados do ERA5 (1979-2020).....	149
Tabela 4 - Lista de 10% de ressacas do swl máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Santos com dados do ERA5 (1979-2020).....	151
Tabela 5 - Lista de 10% de ressacas do swl máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Cabo Frio com dados do ERA5 (1979-2020) .....	152

## Lista de Esquemas

Esquema 1 - Três situações associadas entre ondas extremas e ciclones extratropicais.....	37
---	----

## Lista de Quadros

Quadro 1 - Pontos selecionados na costa brasileira para a identificação das ressacas ocorridas no período de 1979-2020. ....	38
--	----

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 HIPÓTESE .....	16
1.3 OBJETIVO.....	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 DEFINIÇÃO DE CICLONES EXTRATROPICAIS, SUBTROPICAIS E TROPICAIS.....	18
2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DOS CICLONES.....	18
2.2.1 TEORIAS DE DESENVOLVIMENTO DE CICLONES EXTRATROPICAIS .....	18
2.2.2 OROGRAFIA.....	22
2.2.3 INTERAÇÃO OCEANO-CONTINENTE .....	23
2.3 CICLONES EXPLOSIVOS.....	23
2.4 ÁREAS CICLOGENÉTICAS NA AMÉRICA DO SUL .....	25
2.5 CICLONES EXTRATROPICAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	28
2.5.1 FURACÃO CATARINA.....	29
2.6 O FENÔMENO DAS RESSACAS.....	29
2.6.1 DEFINIÇÃO DE RESSACA.....	29
2.6.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE ONDAS.....	31
2.6.3 TRANSPORTE DE EKMAN .....	33
2.6.4 RESSACAS E ONDAS EXTREMAS NA COSTA DO BRASIL.....	34
2.6.5 PADRÕES SINÓTICOS DE CICLONES EXTRATROPICAIS NA GERAÇÃO DE RESSACAS.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	38
3.2 REANÁLISE CLIMÁTICA DO ERA5 .....	39
3.3 DADOS DE CICLONES .....	40
3.4 DADOS DE BOIAS.....	41
3.5 DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE RESSACAS .....	42
3.6 ANÁLISE DO SWH E IDENTIFICAÇÃO DE RESSACAS .....	43
3.7 ASSOCIAÇÃO ENTRE RESSACAS E CICLONES EXTRATROPICAIS .....	44
3.8 ANÁLISE QUANTITATIVA E DE DENSIDADE .....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES: RESSACAS .....	48
4.1 PONTO 1 – RIO GRANDE.....	48
4.1.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL .....	48
4.1.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS.....	50
4.1.3 COMPORTAMENTO DO SWH EM RIO GRANDE .....	52
4.1.4 DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS EM RIO GRANDE .....	55
4.1.5 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS .....	58
4.2 PONTO 2 – ITAJAÍ.....	60
4.2.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL .....	60
4.2.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS.....	62



4.2.3	COMPORTAMENTO DO SWH EM ITAJAÍ .....	64
4.2.4	ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS .....	66
4.2.5	ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS .....	69
4.3	PONTO 3 – SANTOS .....	71
4.3.1	QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL .....	71
4.3.2	DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS .....	73
4.3.3	COMPORTAMENTO DO SWH EM SANTOS .....	75
4.3.4	ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS .....	77
4.3.5	ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS .....	79
4.4	PONTO 4 – CABO FRIO .....	80
4.4.1	QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL .....	80
4.4.2	DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS .....	82
4.4.3	COMPORTAMENTO DO SWH EM CABO FRIO .....	84
4.4.4	ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS .....	86
4.4.5	ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS .....	89
4.5	DETALHAMENTO DAS RESSACAS MAIS SEVERAS .....	90
4.6	DISCUSSÃO GERAL .....	96
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES: CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS .....	100
5.1	QUANTIFICAÇÃO DE CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL .....	100
5.2	CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS ASSOCIADAS .....	103
5.2.1	CICLONES EXTRATROPICAIS EM RIO GRANDE .....	104
5.2.2	CICLONES EXTRATROPICAIS EM ITAJAÍ .....	109
5.2.3	CICLONES EXTRATROPICAIS EM SANTOS .....	113
5.2.4	CICLONES EXTRATROPICAIS EM CABO FRIO .....	117
5.3	CICLONES EXTRATROPICAIS ASSOCIADOS COM RESSACAS INTENSAS .....	121
5.4	ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS INTENSAS EM CADA PONTO DE ESTUDO .....	124
5.4.1	RESSACA MAIS INTENSA EM RIO GRANDE: ABRIL DE 1999 .....	124
5.4.2	SEGUNDA RESSACA MAIS INTENSA EM RIO GRANDE: OUTUBRO DE 2016 .....	129
5.4.3	RESSACA MAIS INTENSA EM ITAJAÍ E SANTOS: JULHO DE 1987 .....	133
5.4.4	RESSACA MAIS INTENSA EM CABO FRIO: MAIO DE 1999 .....	137
5.5	DISCUSSÃO GERAL .....	141
6	CONCLUSÕES .....	143
	ANEXOS .....	147
	REFERÊNCIAS .....	154

## 1 INTRODUÇÃO

Os ciclones extratropicais são muito importantes quando estudamos o tempo e o clima. Eles contribuem diretamente para a variabilidade sinótica nas latitudes médias e altas, muitas vezes evoluindo para eventos extremos e consequentes impactos ambientais e socioeconômicos.

Estudos anteriores apontam a América do Sul como uma área ciclogênica, ou seja, propícia para a formação de ciclones extratropicais, sendo uma das regiões do planeta onde a ocorrência desses sistemas é mais frequente (TALJAARD, 1967; HOSKINS e HODGES, 2005). Os ciclones podem causar diversos impactos diferentes, como chuvas intensas, fortes ventos e quedas rápidas de temperatura, influenciando a formação de geadas (VERA *et al.*, 2002). Ademais, frequentemente causam agitação marítima, gerando ressacas que ocasionam diversos outros problemas e impactos, como erosão costeira e prejuízos para embarcações (PARISE *et al.*, 2009).

O processo de formação e desenvolvimento de ciclones na atmosfera é chamado de “ciclogênese”, estando esse processo relacionado com o desenvolvimento de uma onda frontal, com um centro de baixa pressão e frentes fria e quente associadas. Os ciclones extratropicais têm sido estudados desde o século XIX por se tratarem de sistemas com muita influência no transporte de calor e umidade na atmosfera, além das condições extremas que podem causar nas condições do tempo quando estão atuantes (GAN e SELUCHI, 2009).

Os ciclones extratropicais não devem ser confundidos com os tropicais, uma vez que eles têm um processo de formação diferente. Outro ponto importante é que a gênese dos ciclones extratropicais ocorre nas latitudes extratropicais do planeta, sendo também chamados de “ciclones de latitudes médias” ou de “ciclones frontais”, apresentando escala espacial que pode variar em alguns milhares de quilômetros de extensão (REBOITA *et al.* 2017).

Nesse contexto, a costa sul e sudeste do Brasil frequentemente sofre impactos causados por ciclones extratropicais, e como resultado, intensa agitação marítima e ressacas, que podem causar inundações nas áreas costeiras relacionadas com o aumento temporário do nível do mar e das ondas (BITENCOURT *et al.*, 2002). Além disso, as regiões costeiras ao redor do planeta concentram grande parte da população e das atividades econômicas mundiais e

algumas das maiores megalópoles, o que as torna altamente vulneráveis quando falamos de impactos das mudanças climáticas, de ressacas e erosão costeira (TURNER *et al.*, 1996). Metade da população brasileira reside em grandes cidades, e muitas em áreas costeiras. Elas podem ser expostas às mudanças climáticas, estando vulneráveis em maior e menor grau a impactos como o aumento do nível do mar, tempestades, inundações e ressacas (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC, 2016).

Fuentes *et al.* (2013) analisou as condições meteorológicas e oceânicas e sua relação com a ocorrência de naufrágios na costa brasileira, levando em consideração os valores históricos registrados de vento e altura significativa de ondas (Hs ou swh, sendo “swh” adotado neste trabalho). Os resultados revelaram que cerca de 54% dos naufrágios ocorreram em condições de vento acima da média e 46% em ondas com altura acima da normalidade, e maior incidência foi observada nas regiões sudeste e sul do Brasil, principalmente entre março e agosto e com embarcações de pequeno porte. Esses dados ressaltam a importância dos estudos meteorológicos e oceanográficos e sua relação com naufrágios na costa do Brasil.

Considerando que os ciclones extratropicais têm papel fundamental no tempo e no clima da América do Sul e que estão diretamente relacionados com as ressacas, é fundamental que sejam conhecidos os padrões climáticos e aprofundados os conhecimentos sobre como influenciam as condições marítimas, quais tendências podem ocorrer no futuro e de como podemos nos adaptar para essas mudanças.

Sendo assim, este trabalho investigou as ressacas ocorridas no Brasil nas últimas décadas e os ciclones extratropicais associados a esses eventos. Foi selecionado um banco de dados de ciclones e dados de reanálise climática com o parâmetro swh para identificar as ressacas. Esta análise resultou na criação de uma série climatológica para as áreas costeiras do sul e sudeste do Brasil, que pode auxiliar na compreensão das características dos ciclones extratropicais e ressacas ocorridas nas últimas décadas.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Os ciclones extratropicais, por serem sistemas de grandes dimensões espaciais que frequentemente causam impactos como ressacas e fortes ventos,

tornam o estudo de seus padrões climáticos e efeitos fundamentais para mitigar os prejuízos que podem causar. O estudo do tempo e do clima tem papel crucial no mundo atual para a elaboração de políticas sociais e ambientais. Considerando, também, as mudanças climáticas que estão sendo observadas mundialmente, é crucial que os estudos sobre os ciclones extratropicais e as ressacas continuem avançando para que possamos entender cada vez melhor quais alterações estão sendo percebidas e qual a frequência de eventos extremos.

O relatório do clima global de 2022 do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) indica que os anos mais quentes registrados desde o início das medições na América do Sul e no planeta ocorreram nas últimas décadas. Segundo o relatório apresentado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), na data, cada uma das três décadas anteriores a 2020 foi mais quente que a década anterior e é provável que o período 1983-2012 tenha sido o período de 30 anos mais quente dos últimos 1400 anos no Hemisfério Norte. Mais recentemente, os dados de temperatura média da superfície terrestre e oceânica apresentaram um aquecimento de 1,1°C acima de 1850-1900 entre 2011 e 2020, corroborando com o período de aumento das emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conforme o relatório do IPCC de 2023. Essas mudanças podem alterar também a frequência e intensidade dos ciclones extratropicais e ressacas na América do Sul.

A Figura 1 exemplifica detalhes sobre os impactos verificados em áreas costeiras na América Latina, sendo que a Figura 1a mostra como os impactos atuais em áreas costeiras poderão ocorrer futuramente baseados em tendências e projeções e a Figura 1b mostra informações baseadas em séries históricas sobre as dinâmicas costeiras, que foram obtidas através da combinação de reanálises, instrumentos locais e satélites.

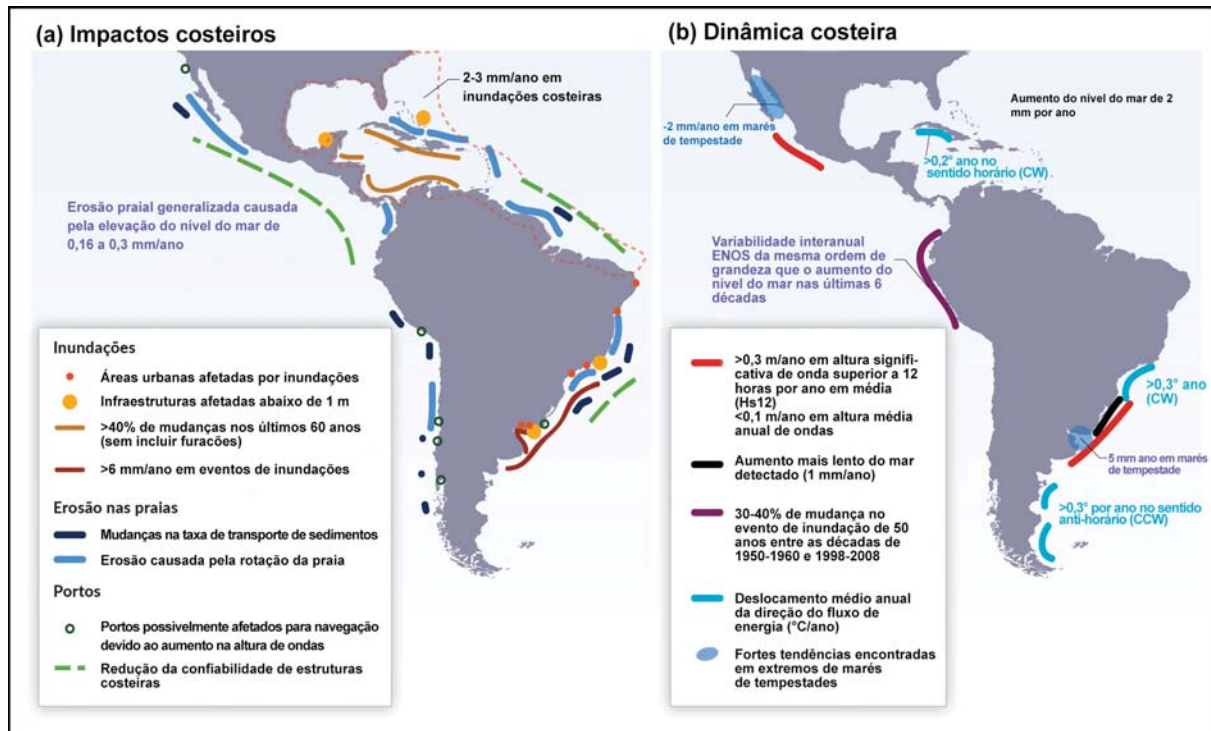


Figura 1 - Impactos costeiros atuais e previstos (a) e dinâmica costeira em resposta às mudanças climáticas (b).

Fonte: adaptado e traduzido de Magrin *et al.* (2014).

É possível observar que boa parte da costa brasileira tende a sofrer impactos causados pelas mudanças climáticas, como inundações e erosão costeira. Os maiores níveis de inundação na América do Sul devem ser encontrados na área do Rio da Prata, sendo que esses eventos extremos podem se tornar mais frequentes, assim como a erosão das praias no sul do Brasil e em áreas da costa do Pacífico.

Por isso, é importante verificar padrões de ciclones extratropicais e ressacas na costa do Brasil, procurando encontrar possíveis aumentos de tendências e de impactos. Esta análise aprimora os conhecimentos sobre esses sistemas, nos auxiliando no entendimento e prevenção mais facilmente como esses efeitos negativos podem estar mudando em um planeta cada vez mais quente.

## 1.2 HIPÓTESE

Este trabalho foi realizado com a hipótese de que há um aumento na frequência e intensidade dos ciclones extratropicais na costa sul e sudeste do Brasil, sugerindo que isso esteja influenciando diretamente o aumento das ressacas ao longo do período analisado.

### **1.3 OBJETIVO**

- Elaborar uma climatologia de ressacas na costa sul e sudeste do Brasil e de ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul entre 1979 e 2020.

### **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver uma série temporal de ressacas na costa sul e sudeste do Brasil, verificando variações do swh, buscando identificar suas características e eventos extremos;
- Elaborar uma climatologia anual e sazonal de ciclones extratropicais na América do Sul;
- Identificar quais as principais características dos ciclones que causam ocorrências de ressacas;
- Investigar fatores comuns associados a ciclones que geram ressacas costeiras severas na região de estudo.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 DEFINIÇÃO DE CICLONES EXTRATROPICAIS, SUBTROPICAIS E TROPICAIS**

Os ciclones podem ser caracterizados de três formas, sendo chamados de “tropicais”, “subtropicais” ou “extratropicais”, dependendo de onde e como se formam. Cada um deles possui suas próprias características dinâmicas e termodinâmicas, que podem ser parecidas ou completamente diferentes em alguns de seus estágios de vida (REBOITA *et al.*, 2017).

Os ciclones tropicais (também conhecidos como “furacões” ou “tufões”) são sistemas de núcleo quente e que ocorrem em áreas oceânicas tropicais ou subtropicais. São menores que os extratropicais, mas mais intensos, simétricos e com maior tempo de vida (ALLABY, 2009).

Os ciclones extratropicais geralmente ocorrem em uma área entre 1500 a 3000 km de diâmetro, e possuem duração de quatro a sete dias ou mais. São associados a uma frente fria e uma quente e sua formação acontece em latitudes médias (BARRY E CHORLEY, 2013; WALLACE e HOBBS, 2006). Mendes *et al.* (2009) definem os ciclones extratropicais como sistemas de baixa pressão atmosférica e que possuem como características grandes regiões com circulação ciclônica. Conforme os autores, a América do Sul é, principalmente se considerarmos sua porção sul e Oceano Atlântico Sul, um continente propício para a formação de ciclones extratropicais.

Os ciclones subtropicais são híbridos e possuem núcleo frio em altos níveis atmosféricos, como os extratropicais, e quentes em baixos níveis, como os tropicais (REBOITA *et al.*, 2017).

### **2.2 MECANISMOS DE FORMAÇÃO DOS CICLONES**

#### **2.2.1 TEORIAS DE DESENVOLVIMENTO DE CICLONES EXTRATROPICAIS**

Existem diversas formas de classificação de ciclones extratropicais, que podem evidenciar diferentes características. Segundo Catto (2016), várias dessas formas de classificação e identificação podem ser utilizadas atualmente, incluindo

modelos conceituais e características dos ciclos de vida dos ciclones, classificações por satélites, vorticidade, pressão atmosférica, análises de fluxo de ar e sinóticas, ciclones que fazem a transição de tropical para extratropical, baixas polares, baseadas em impactos, entre outros.

No início do século XX, Bjerknes (1919) e Bjerknes e Solberg (1922) elaboraram os primeiros estudos sobre os ciclones extratropicais, no intuito de conhecer mais sobre esses sistemas. Em 1922, desenvolveram a Teoria da Frente Polar, ou “Modelo Norueguês”, que é definido como uma espécie de linha separando o ar tropical do ar polar, onde ocorre uma ligeira perturbação dessa onda frontal, originando um sistema de baixa pressão. Conceituaram, ainda, um modelo (Figura 2) para demonstrar a evolução de uma ciclogênese, iniciando com uma pequena perturbação que evolui para uma perturbação ciclônica. Na fase seguinte, é observado o início da oclusão e, em seguida, o ciclone extratropical avança para a fase de maior intensidade. Na fase final, o sistema perde força e ocorre a dissipação.

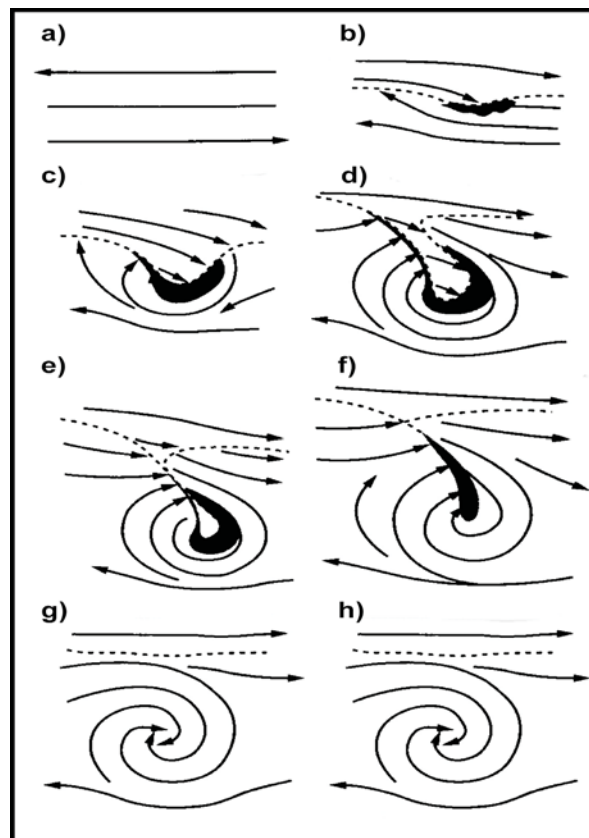


Figura 2 - Ciclo de vida dos ciclones extratropicais. A) Escoamento inicial; b) Perturbação inicial; c-d) Perturbação ciclônica; e) Início de oclusão; f) Máxima intensidade da oclusão; g) Ciclone ocluído e h) Ciclone em fase final.

Fonte: Bjerknes e Solberg, adaptado para o Hemisfério Sul (1922).



Posteriormente, Charney (1947) e Eady (1949) utilizaram modelos atmosféricos para desenvolver a teoria da instabilidade baroclínica, explicando distúrbios sinóticos em médias latitudes, colaborando para um melhor entendimento da teoria elaborada por Bjerknes e Solberg (1922). Considerando que a atmosfera pode variar suas propriedades em diferentes níveis, a instabilidade baroclínica é um importante mecanismo para a formação dos ciclones em latitudes médias, assim como, por outro lado, a barotropia é uma condição importante para a perda de energia dos ciclones extratropicais (HOLTON, 2004).

Em 1971, Petterssen e Smebye propuseram que os ciclones poderiam ser classificados em dois grupos fundamentais, chamados por eles de “A” e “B”, com cada grupo possuindo ciclogênese distinta. Sobre as características, propuseram que ciclones do tipo A têm desenvolvimento inicial sob uma corrente de ar superior em uma zona de máxima baroclinia e não possuem cavados em altos níveis observáveis em um primeiro momento, mas pode ocorrer uma intensificação do cavado com o desenvolvimento do ciclone em baixos níveis. Inicialmente, possuem pequena advecção de vorticidade negativa em altos níveis e o mesmo ocorre durante o desenvolvimento do ciclone, sendo que a principal contribuição para a intensificação vem da advecção termal. Posteriormente, observa-se uma diminuição da baroclinia na troposfera inferior com a oclusão da onda e, após isso, tem-se uma oclusão clássica. Já os ciclones do tipo B têm desenvolvimento inicial com um cavado de ar superior já existente que avança sobre uma área de advecção de ar quente em baixos níveis, sendo que uma frente fria pode ou não estar presente. A distância de separação entre o cavado de ar superior e o sistema de baixos níveis diminui rapidamente sua distância enquanto o ciclone se intensifica e o seu eixo tende a se posicionar na vertical enquanto o ciclone se aproxima do pico de intensidade. Inicialmente, a advecção de vorticidade negativa em altos níveis é grande e diminui quando o ciclone atinge máxima intensidade. A advecção termal e a baroclinia são pequenas inicialmente e aumentam conforme o sistema de baixa pressão se intensifica. O resultado é uma oclusão que se assemelha a uma oclusão clássica.

Dando sequência aos estudos de Petterssen e Smebye, Radinovic (1986) propôs um terceiro grupo de ciclones extratropicais, chamados por ele de “C”. Esses sistemas estão associados à orografia e são também conhecidos como “ciclones a sotavento das montanhas”. Estudando ciclones extratropicais que se formaram a

sotavento dos Alpes, Radinovic sugeriu que quando se formam a sotavento das montanhas têm formação diferente dos demais e devem ser considerados como um tipo específico.

Nas identificações por satélite, uma das primeiras foi feita por Stretten e Troup (1973) analisando vórtices de nuvens no Hemisfério Sul. Já Gan e Rao (1991), analisaram cartas sinóticas para identificar ciclogêneses através do campo de pressão atmosférica ao nível do mar.

Shapiro e Keyser (1990) propuseram um novo modelo conceitual mostrando que determinados ciclones que se desenvolvem sobre o oceano têm algumas características diferentes do modelo Norueguês, apesar de a formação ser semelhante. No modelo de Shapiro e Keyser acontece uma fratura da frente fria associada ao ciclone enquanto ele está se intensificando, se separando da frente quente. Nesse caso, a frente fria segue próxima da frente quente, mas sem rotacionar ao redor do centro do ciclone extratropical. Enquanto a frente fria se move pelo setor quente, ocorre a formação de uma seclusão quente. A Figura 3 mostra uma comparação conceitual entre o modelo Norueguês e o modelo Shapiro-Keyser. No modelo proposto por Shapiro e Keyser observa-se quatro fases (Figura 3B): (I) onda frontal incipiente, (II) fratura frontal, (III) estrutura T-Bone e bent-back front e (IV) estrutura T-Bone e seclusão quente.

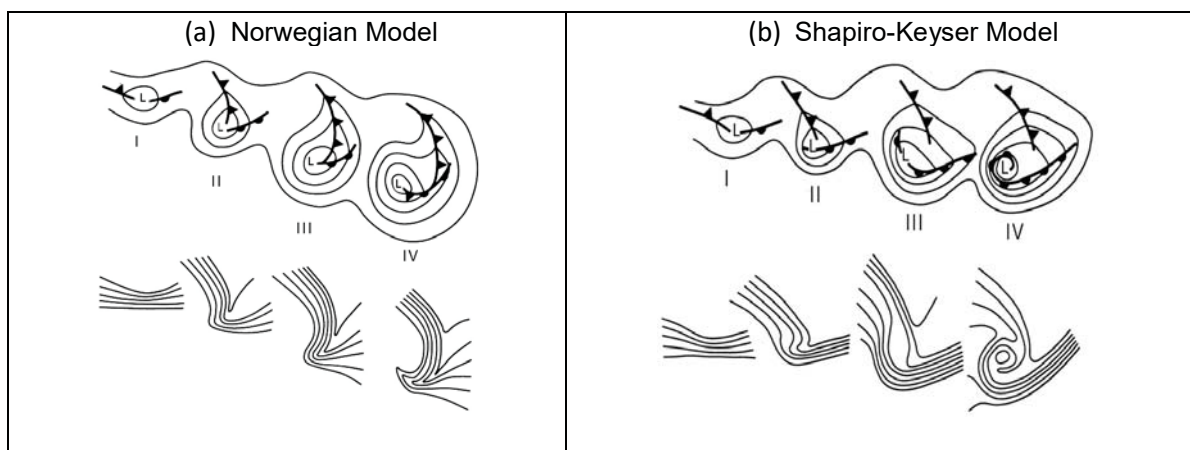


Figura 3 - Estágios de modelos conceituais de evolução dos ciclones extratropicais.  
 Fonte: Schultz *et al.* (1998), adaptado para o Hemisfério Sul de Wallace e Hobbs (2006).

Conforme Shimizu (2012), os ciclones extratropicais estão também associados às Ondas de Rossby, que possuem movimentos ondulatórios no plano horizontal em uma escala sinótica e alteram áreas de vorticidade anticiclônica e ciclônica, impulsionadas pela força de Coriolis, assim como com o Modo Anular do

Hemisfério Sul (SAM) (AQUINO, 2012; REBOITA *et al.*, 2009; SCHOSSLER *et al.*, 2020).

Os ciclones extratropicais são basicamente direcionados pelas Ondas de Rossby semiestacionárias nos ventos de oeste hemisféricos, enquanto que grandes barreiras orográficas podem influenciar diretamente suas posições (BARRY e CHORLEY, 2013). Além disso, os ciclones extratropicais estão relacionados com as correntes de jato, que são escoamentos de fortes intensidades em uma linha quase horizontal e sinuosa na troposfera superior e estratosfera (REITER, 1969).

### 2.2.2 OROGRAFIA

As montanhas e o contraste entre o oceano e o continente resultam em uma forte influência na circulação atmosférica. Com isso, a distribuição da frequência de ciclogêneses e suas trajetórias é afetada diretamente. As montanhas influenciam de forma direta a instabilidade baroclínica, pois modificam sua estrutura espacial e a taxa de crescimento e propagação dos distúrbios baroclínicos (GAN, 1992).

Segundo Satyamurty *et al.* (1980), a orografia da América do Sul, influenciada pelos Andes, pode perturbar o escoamento de oeste, já que as montanhas podem interagir com os sistemas que se deslocam de uma região para outra, modificando sua intensidade e deslocamento.

Isso acontece porque o escoamento permanente de oeste, ao cruzar os Andes, resulta em um padrão ciclônico a leste das montanhas, contribuindo para a formação de ciclones extratropicais (BITENCOURT *et al.*, 2013; HOSKINS e HODGES, 2005). Esse comportamento foi estudado por Gan e Rao (1991), analisando o deslocamento de distúrbios transientes e suas interações com os Andes. A presença dos Andes contribui para a perturbação do escoamento zonal e formação de uma crista a barlavento e um cavado a sotavento das montanhas. Os autores encontraram um padrão na propagação de ondas ao cruzarem os Andes que se assemelha com as anomalias observadas em baixos níveis. Considerando que essas distorções não são observadas na costa leste, concluíram que as ondulações ocorrem por causa da presença das montanhas e podem contribuir para a formação de ciclones extratropicais na América do Sul.

Cardoso *et al.* (2012) fizeram um estudo analisando o comportamento do vento em sete estações meteorológicas no setor leste de Santa Catarina durante a

presença de ciclones extratropicais próximos à costa entre 1998 e 2008. Os resultados mostraram que os ciclones têm uma influência estatisticamente significativa na ocorrência de ventos nessa região, e somente os mais intensos influenciam no comportamento dos ventos, com associações mais fortes observadas na estação de São Joaquim, devido à sua altitude e localização, além de o relevo e a diferenciação térmica entre terra e mar também desempenharem um papel importante nos padrões de vento.

### **2.2.3 INTERAÇÃO OCEANO-CONTINENTE**

Apesar de a instabilidade baroclínica ter um papel fundamental, a proximidade de ciclogêneses extremas a um ambiente marítimo sugere que a diferença de temperatura do ar e da superfície quente e úmida do oceano influenciam a formação de ciclones extratropicais (NEIMAN e SHAPIRO, 1993). De acordo com Sato (2005), a temperatura da superfície do mar (TSM) tem grande importância para a ciclogênese, considerando que ela influencia diretamente o fluxo de calor entre o oceano e a atmosfera. A diferença de temperatura das massas oceânicas contribui para um aumento dos fluxos turbulentos entre a atmosfera e o oceano, causando uma alteração na dinâmica e termodinâmica da atmosfera, sendo também um mecanismo importante para a formação e desenvolvimento de sistemas como os ciclones extratropicais.

Metaxas (1978), estudando a importância do aquecimento adiabático no Mediterrâneo, observou que o aquecimento por Fluxo de Calor Sensível (FCS) está diretamente relacionado com a modificação da convergência de massa próxima da superfície e que o aquecimento adiabático contribui indiretamente para a ocorrência de ciclogêneses, pois aumenta a instabilidade em baixos níveis.

Segundo Barry e Chorley (2013), a rápida intensificação de ciclones extratropicais explosivos geralmente é observada em áreas marítimas, acima de correntes quentes e em áreas próximas a fortes gradientes horizontais de TSM, e costumam estar associados a gradientes fortes de temperatura da superfície do mar.

## **2.3 CICLONES EXPLOSIVOS**

Os impactos causados por ciclones extratropicais têm potencial de ser maiores quando são classificados como ciclones “bomba” ou “explosivos” (BITENCOURT *et al.*, 2013). Conforme Gan e Seluchi (2009), eles podem ser diferenciados de acordo com sua intensidade, a partir da queda da pressão atmosférica central do sistema. Geralmente, ocorrem com mais frequência durante o inverno, estação em que a baroclinia é mais intensa. Podem ocorrer em áreas com forte contraste de temperatura, muitas vezes associados a um intenso cavado de onda curta.

Segundo Sanders e Gyakum (1980), um ciclone bomba é um ciclone extratropical com queda acentuada da pressão atmosférica central, com pelo menos 1 hectopascal (hPa) por hora ao longo de 24 horas. Considera-se isso para ciclones que ocorrem na faixa de 60° de longitude. Quando se analisa ciclones que ocorrem em outras latitudes, deve-se utilizar o método proposto pelos autores de calcular a Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central ( $TNA^c$ ). O resultado dessa taxa mostra se um determinado ciclone deve ser considerado bomba ou não em latitudes menores. Abaixo, é apresentada a fórmula e cálculo da  $TNA^c$ , onde  $\Delta p_c$  representa o quanto a pressão atmosférica variou em 24 h e  $\Phi$  a média latitudinal do centro do ciclone no mesmo período de horas:

$$TNA_c = \left( \frac{\Delta p_c}{24 hPa} \right) \cdot \left( \frac{\sin 60^\circ}{\sin \Phi} \right)$$

Lim e Simmonds (2002) construíram uma climatologia de ciclones extratropicais explosivos para o período 1979–1999 e identificaram que ocorrem cerca de 26 bombas por ano, em média, no Hemisfério Sul, principalmente no inverno, e a sazonalidade é menor do que no Hemisfério Norte. A Figura 4 apresenta a densidade de ciclones explosivos ocorridos no Hemisfério Sul no período estudado pelos autores.

Os ciclones explosivos podem causar ressacas intensas na costa brasileira pelos fortes ventos que geram. Schosler *et al.* (2020) identificaram dois ciclones extratropicais explosivos que causaram impactos no Brasil e na Austrália em 2016. Mostraram que o SAM negativo na Antártica e o padrão de onda influenciaram os ciclones explosivos ao favorecerem diretamente os processos de ciclogênese, relacionando os sistemas com anomalias de circulação atmosférica na região Antártica em 2016.

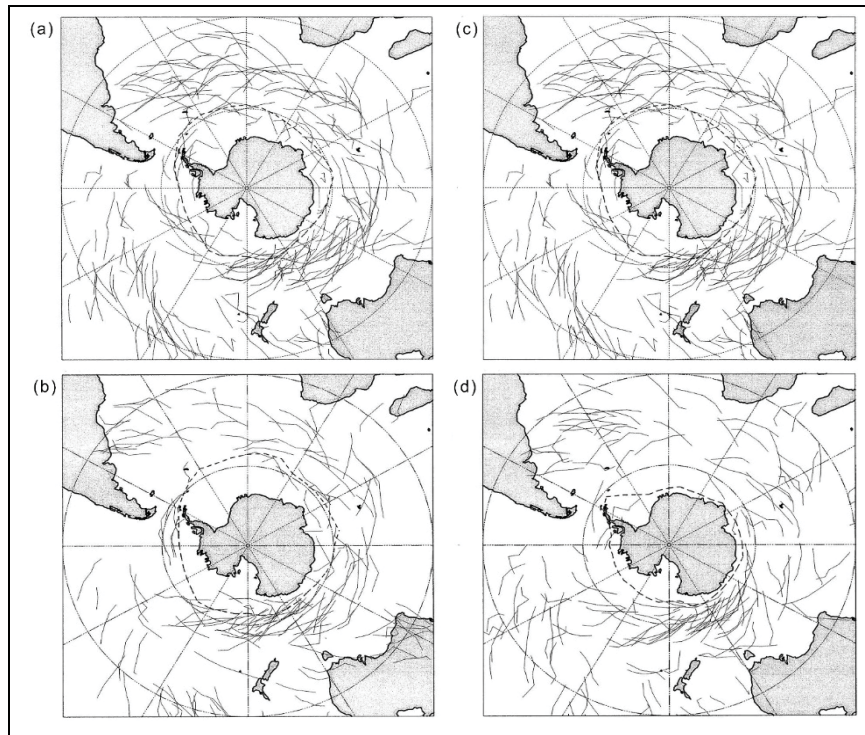


Figura 4 - Tracking dos ciclones explosivos no Hemisfério Sul entre 1979-1999. A) Dezembro - Fevereiro, b) Março - Maio, c) Junho - Agosto e d) Setembro - Novembro. Direção dos movimentos para leste (exceto alguns). As linhas pontilhadas indicam a borda média da cobertura marítima de gelo. Fonte: Lim e Simmonds (2002).

## 2.4 ÁREAS CICLOGENÉTICAS NA AMÉRICA DO SUL

A climatologia de ciclones extratropicais do Hemisfério Sul analisando cartas de pressão atmosférica de Taljaard (1967) identificou a frequência sazonal de ciclogêneses, constatando que elas ocorrem com mais frequência ao redor de 45°S em todas as estações e que ocorrem mais ciclones entre as latitudes 25°S e 40°S durante o inverno do que no verão, sendo que a maior variação significativa na média considerando todo o hemisfério foi verificada na região subtropical da América do Sul e Oceano Atlântico. Taljaard (1972) menciona ainda uma área ciclogenética próxima ao Paraguai. Uma área de baixa pressão no noroeste da Argentina foi denominada como Baixa do Noroeste Argentino (BNOA) por Lichtenstein (1980) e também foi estudada por Seluchi *et al.* (2003).

Gan e Rao (1991) realizaram um estudo avaliando quatro cartas sinóticas por dia da pressão atmosférica reduzida ao nível do mar para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 1988 na América do Sul. Os autores definiram como áreas ciclogenéticas duas áreas principais na América do Sul, sendo uma próxima da



região do Rio da Prata, também identificado por Jantsch e Aquino (2020), e outra na área leste da Patagônia Norte da Argentina (Figura 5), fato também identificado por Mendes *et al.* (2007). Além disso, identificaram que os meses com maior e menor quantidade de ciclogêneses foram maio (134) e dezembro (71), respectivamente.

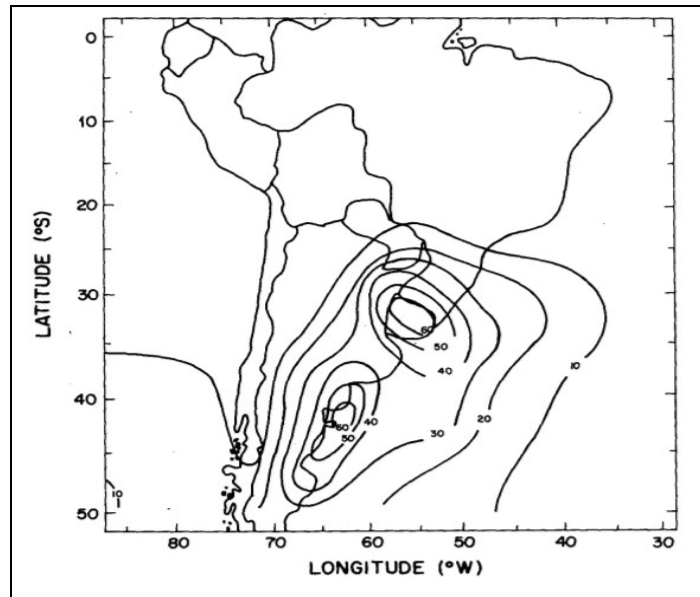


Figura 5 - Densidade de frequência de ciclogêneses na América do Sul e Oceano Atlântico Sul (1979-1988).

Fonte: Gan e Rao (1991).

Reboita *et al.* (2010), analisaram dados do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) referentes ao período de 1990 a 1999, identificando no estudo três regiões com maior densidade de ocorrência de ciclones extratropicais na América do Sul (Figura 6): uma no sul da Argentina ao leste da Patagônia (com maior frequência no verão); outra na região próxima ao rio da Prata e costa do estado brasileiro do Rio Grande do Sul (com maior ocorrência no inverno); e uma terceira região na costa da região Sudeste do Brasil (mais intenso no verão).

Hoskins e Hodges (2005) fizeram uma análise para o período de 1958 a 2002 das ciclogêneses ocorridas no Hemisfério Sul utilizando dados de reanálise do ERA-40 do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF) encontrando, também, três áreas ciclogênicas na América do Sul. Identificaram que a maioria das ciclogêneses na América do Sul ocorre entre os setores 30°S e 45°S, com maior frequência no inverno do que no verão, e que a sotavento dos Andes está relacionada com o jato subtropical. Já ao redor da latitude 45°S, foram influenciados pelos Andes.

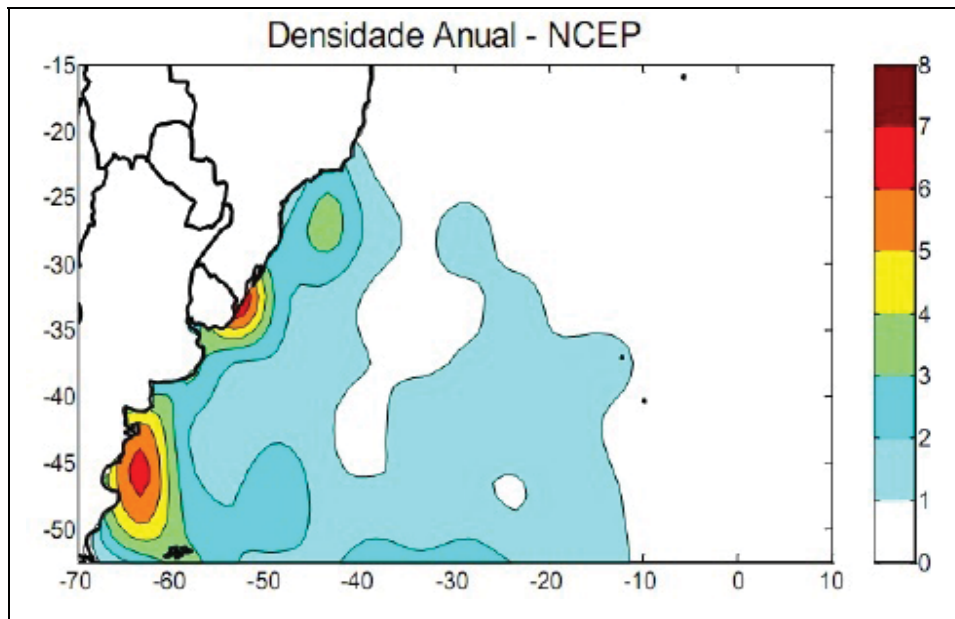


Figura 6 - Densidade de ciclones extratropicais na América do Sul e Oceano Atlântico Sul entre os anos de 1990 e 1999.  
Fonte: Reboita (2008).

Para Bitencourt et al. (2013), devido à instabilidade baroclínica que caracterizam essas regiões, elas podem ser consideradas ciclogenéticas. Esse fator é o principal motivo para a formação de ciclones extratropicais nessas áreas, onde ocorre uma troca significativa de energia entre a superfície e a atmosfera, influenciadas pelo Oceano Atlântico.

Gramcianinov et al. (2019) fizeram uma climatologia dos ciclones extratropicais no Atlântico Sul usando dados de vorticidade do *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) para o período de 1979-2010 (FIGURA 7). Encontraram quatro áreas ciclogenéticas principais: a costa sul do Brasil (SE-BR, 30°S), sobre o continente e próximo ao rio da Prata (La Plata, 35°S), na costa sudeste da Argentina (ARG, 40°S-55°S) e no Sudeste do Atlântico (SE-SAO, 55°S, 10°W). Ciclogêneses ao norte de 35°S ocorrem principalmente associadas ao transporte de umidade no verão. Já ao sul de 35°S, as ciclogêneses foram relacionadas a um ambiente baroclínico durante todo o ano.



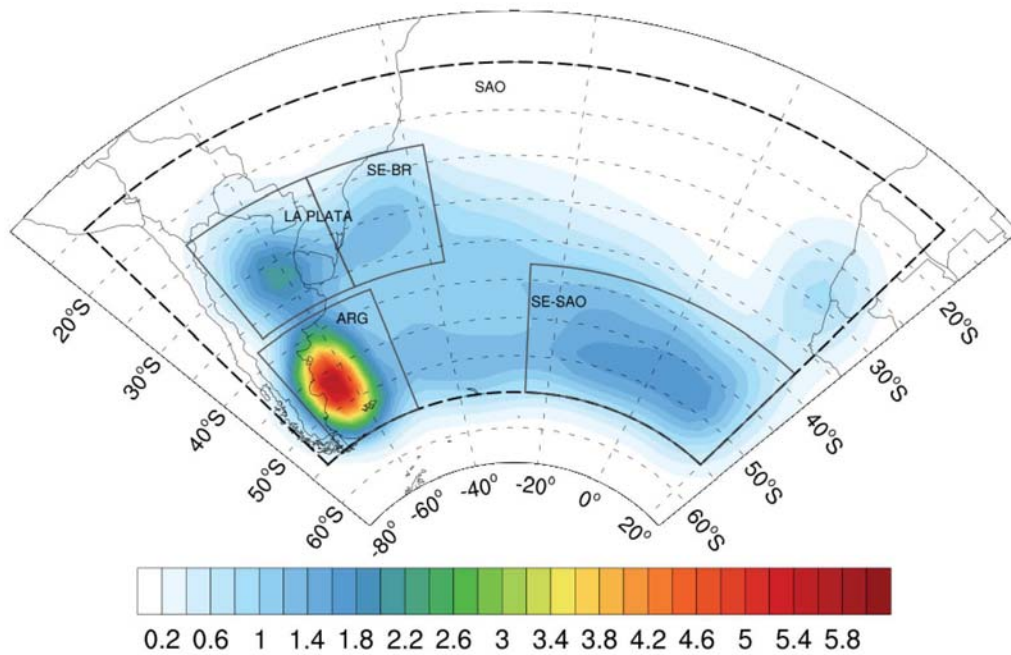


Figura 7 - Densidade de ciclones extratropicais na América do Sul e Oceano Atlântico Sul entre os anos de 1979 e 2010.

Fonte: Gramscianinov *et al.* (2019)

## 2.5 CICLONES EXTRATROPICAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Entender como e se os ciclones extratropicais podem ter diferentes características considerando as mudanças climáticas é de suma importância porque essas alterações podem modificar também os padrões dos impactos causados pelos sistemas, como aumento da frequência de precipitação, vento e ressacas, que estão relacionados com diversas questões sociais, ambientais e econômicos.

Bengtsson *et al.* (2008) investigaram como ciclones extratropicais podem mudar em um planeta com um clima mais quente avaliando dados de extremos de pressão, vorticidade, vento e precipitação associados aos ciclones. Os resultados mostraram uma provável redução no número de ciclones e um aumento de sistemas extremos. Por outro lado, os resultados não mostraram mudanças significativas em extremos de vento e vorticidade nos dois hemisférios, mas um aumento considerável em eventos de precipitação extrema e média.

Para investigar o possível impacto do aquecimento global na atividade de ciclones extratropicais, Geng e Sugi (2003) fizeram uma análise utilizando dados de alta resolução do *Japan Meteorological Agency* (JMA) e encontraram uma redução de 7% na ciclogênese nas latitudes médias do Hemisfério Sul no verão local e 10% no inverno, em uma projeção para 2050. Projetaram também um aumento na

densidade de ciclones com forte intensidade nas regiões circumpolares da Antártica e na costa da América do Sul nas duas estações. Segundo os autores, a principal causa disso seriam mudanças na baroclinia, relacionado com mudanças na distribuição horizontal e vertical da temperatura na atmosfera devido ao aumento de gases de efeito estufa.

Reis *et al.* (2020) estudaram as características sinóticas de um evento de precipitação que ocorreu no Rio Grande do Sul em 2016 associado a um ciclone extratropical explosivo, identificando uma origem isotópica amazônica da precipitação, mostrando que eventos como esse podem se tornar mais comuns em um planeta mais aquecido.

### **2.5.1 FURACÃO CATARINA**

Em março de 2004, um ciclone extratropical, que posteriormente adquiriu características de ciclone tropical, denominado "Catarina", ocorreu no sul do Brasil. Segundo Gan (2009), esse foi o primeiro ciclone a alcançar a categoria 1 de furacão no país, apresentando convecção bem organizada ao redor de um olho, semelhante ao que se observa em furacões. Para o autor, apesar de ter se desenvolvido inicialmente como um ciclone extratropical, Catarina passou por uma segunda intensificação associada a fluxos de calor na superfície (tanto sensível quanto latente). O estudo de Viana *et al.* (2010) identificou núcleos quentes isolados na temperatura do oceano durante a ocorrência do "Catarina", o que influenciou a formação do furacão, alterando a estrutura do ciclone extratropical e intensificando o sistema.

As consequências geradas por Catarina incluíram danos significativos causados pelos fortes ventos em diversas cidades litorâneas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Segundo Marcelino *et al.* (2005), 53.728 casas foram danificadas, e 2.194 foram completamente destruídas. À medida que o furacão se deslocava para o interior, sua intensidade diminuiu consideravelmente.

## **2.6 O FENÔMENO DAS RESSACAS**

### **2.6.1 DEFINIÇÃO DE RESSACA**

Apesar de os ciclones extratropicais poderem alterar diretamente a elevação do nível do mar, Barry e Chorley (2013) afirmam que os mecanismos que influenciam as oscilações na costa são complexos e dependem de vários fatores, como as marés astronômicas, marés meteorológicas e marés de tempestade.

As marés astronômicas são definidas como mudanças contínuas e regulares no nível do mar gerado por forças como a atração gravitacional da Lua e do Sol. As marés de tempestade são geradas por eventos meteorológicos, sendo que os ciclones extratropicais podem causar essas marés. Já as marés meteorológicas consistem na relação entre a maré registrada influenciada pelas condições do tempo e a maré que era prevista sem tais condições atmosféricas (PUGH, 1987).

As marés de tempestade (*storm surges*) são inundações que ocorrem nas regiões costeiras quando eventos de tempestade severa causam elevação do nível do mar e propagação de ondas até a costa. Esses efeitos são principalmente causados pela geração de ondas, pelo empilhamento de água, pelo cisalhamento do vento (transporte de Ekman) e pela diferença de pressão atmosférica entre áreas próximas (CARTER, 1988), sendo esse último elemento menos efetivo nos ciclones extratropicais (CAMPOS *et al.* 2012).

Apesar de estar associado às marés de tempestade, o termo "ressaca" pode ter diferentes definições, o que torna a compreensão do fenômeno difícil em algumas situações. Alguns autores incluem à definição de ressacas a elevação do nível do mar causada pela maré astronômica e maré meteorológica, enquanto outros consideram apenas ondas anômalas chegando à costa. Bitencourt *et al.* (2002) definiram ressacas como o aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré astronômica e/ou meteorológica, junto com ondas com altura maior do que o normal, sendo que o aumento da altura das ondas costuma ocorrer devido a atuação de ciclones extratropicais.

Segundo Melo Filho (2017), apesar do termo "ressaca" ser utilizado no Brasil para falar de qualquer condição de mar fora do normal, gerando muita confusão, deveria ser mantido apenas para representar a ação das ondas do mar na costa. Dessa forma, a detecção de ressacas se limitaria exclusivamente à identificação de eventos de ondas "grandes", sendo que essa identificação deve ser feita utilizando o swH como parâmetro. O autor também defende que, com essa definição, a palavra "ressaca" passaria a ser utilizada apenas quando falamos de condições de onda, sem a necessidade de uma relação direta com mau tempo, tempestades e variações

do nível do mar de qualquer tipo. Isso porque a zona de geração dessas ondas encontra-se, muitas vezes, distante da costa, e um evento de ondas grandes pode ocorrer com o nível do mar (astronômico ou não) elevado ou rebaixado, assim como condições de nível do mar fora do padrão podem acontecer com ou sem ondas grandes.

As Normas de Autoridade Marítima da Marinha do Brasil (NORMAM-19) definem as ressacas como "ondas com altura significativa de 2,5 m ou superior atingindo a costa" e geram um aviso de ressaca para essas situações. Os estudos de Sondermann *et al.* (2023) e de Machado *et al.* (2019) utilizaram a definição das NORMAM-19 para conduzir suas pesquisas sobre ressacas.

Portanto, neste trabalho, será considerado como "ressaca" as ondas com altura significativa de 2,5 m ou mais atingindo a costa, utilizando o parâmetro swh, sem considerar as marés astronômicas, de tempestade ou meteorológicas.

## 2.6.2 MECANISMOS DE GERAÇÃO DE ONDAS

As ondas em questão, usadas para a definição de ressacas segundo os itens expostos na seção anterior (NORMAM-19; MELO FILHO, 2017; MACHADO *et al.*, 2019), são ondas de gravidade geradas pelo vento que se propagam na superfície do oceano. Essas ondas são geradas em uma área definida como pista, que depende da intensidade e persistência direcional e temporal do vento. Dessa forma, seguindo a relação de Hasselman *et al.* (1973), o desenvolvimento de ondas grandes está relacionado a ocorrência de ventos intensos soprando em uma grande área por um certo tempo e prolongado. Uma vez formadas, essas ondas se propagam para fora da região de geração, ganhando o nome de *swell* ou vagas.

O atrito do vento sobre a superfície do mar resulta na transferência de *momentum* da atmosfera para o oceano. Com isso, o fator mais importante para a geração da ressaca é a pista de vento, próximo ao continente, que é o tamanho da área do oceano em que ocorre a troca de *momentum* entre o ar e o oceano. Logo, a ressaca pode ser mais intensa dependendo da amplitude e período das ondas (MARONE *et al.* 1994). A superfície do mar acaba recebendo essa energia do vento e, posteriormente, sofrendo ação da gravidade, que busca restaurar a superfície alterada pela ação do vento, e essa interação constante faz com que as ondas se propaguem para áreas distantes de onde foram geradas. Com isso, o campo de

ondas pode crescer em escalas de tempo de horas a dias quando o vento está soprando (ARDHUIN e ORFILA, 2018).

As ondas sempre iniciam como pequenas ondulações e aumentam de tamanho devido à transferência contínua de energia do vento (FIGURA 8). Com um vento constante, as ondas atingem um limite e não crescem mais devido à perda de energia e são então consideradas como totalmente desenvolvidas. Isso está diretamente relacionado com a intensidade do vento, duração e distância, ou pista de vento. Quando o vento para de soprar, as ondas continuam a existir, percorrendo grandes distâncias sem muita perda de energia, sendo chamadas então de "swell", uma vez que o vento que gerou o processo não está mais atuante. Nas regiões costeiras, essas ondulações aumentam de tamanho pela menor profundidade do oceano, formando ondas que atingem a costa (FOLLEY, 2017).

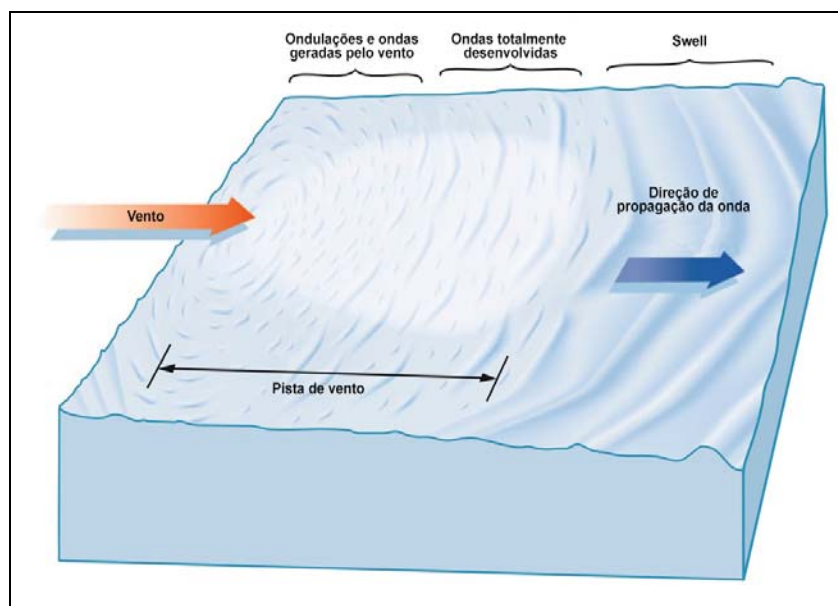


Figura 8 - Processo de formação de ondas no oceano.  
Fonte: adaptado para o português de Folley (2017).

Gramcianinov *et al.* (2020a) estudaram as características das ondas geradas por ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul, próximas ao Brasil, e contabilizaram 87 eventos extremos de ondas associadas a esses sistemas. No entanto, o estudo considerou apenas o período entre 1999 e 2004, diferentemente desta pesquisa, que abrange um período mais longo e utiliza outra metodologia. Identificaram que o vento, como esperado, e a velocidade de deslocamento dos ciclones foi importante para identificar os sistemas relacionados a ondas mais extremas. Além disso, mostraram que os ciclones que se deslocam lentamente e

são associados a eventos mais longos, que geram alturas médias de ondas maiores em uma grande área possuem maior capacidade de gerar impactos.

Harari e Camargo (2019) estudaram os padrões de sistemas frontais na costa sul e sudeste do Brasil e sua influência na circulação oceânica e no nível do mar, verificando que o nível da superfície do mar pode variar de -0.1 m antes da passagem das frentes para mais de 0.5 m depois, e que, em casos extremos, a intensidade e a duração das tempestades podem ser fundamentais para a ocorrência de elevações do nível do mar e inundações.

### 2.6.3 TRANSPORTE DE EKMAN

O transporte de Ekman também é considerado fator importante no estudo das ressacas. A teoria do movimento de Ekman foi nomeada assim em homenagem ao oceanógrafo sueco Vagn Walfrid Ekman, que foi o primeiro a derivar uma solução análoga para a corrente de deriva do vento na superfície do oceano (HOLTON, 2004). O cientista e explorador norueguês Fridtjof Nansen observou entre 1893 e 1896 que o gelo marinho no Ártico se movia para a direita do vento (no Hemisfério Norte) e não na direção do vento em si.

A solução de Ekman, elaborada no começo do século XX, mostra que o atrito do vento transfere *momentum* para o oceano, ocasionando correntes superficiais com o mesmo sentido. Após essa fase inicial, a força de Coriolis causa uma mudança de direção, sendo que essa camada superior transfere *momentum* para as camadas inferiores. Ou seja, Ekman explicou que a corrente influenciada pelo vento cria um perfil em espiral (Espiral de Ekman) e superficial (Camada de Ekman) e que o efeito líquido da tensão do vento é transportar as águas da camada superficial numa direção perpendicular à direção do vento (Transporte de Ekman), influenciada pela força de Coriolis. Sendo assim, um vento paralelo à costa resulta em um movimento à direita no Hemisfério Norte e à esquerda no Hemisfério Sul, ocasionando um empilhamento ou retirada de água da costa causado pelo transporte de Ekman (PUGH, 1987; MELO FILHO, 2017).

O transporte de Ekman tem relação direta com as ressacas no Brasil, agindo como um elemento agravante. Os ventos associados aos ciclones extratropicais cobrem uma área abrangente ao longo da costa, eventualmente forçando o acúmulo de água na costa (Marone *et al*, 1994; Melo Filho, 2017; Machado *et al.*, 2019). O

empilhamento de água gerado pelo ciclone eleva o nível do mar na costa e permite que as ondas atinjam áreas mais internas de terra que normalmente não seriam alcançadas sem essa elevação (e.g., GODOI *et al.* 2021).

#### **2.6.4 RESSACAS E ONDAS EXTREMAS NA COSTA DO BRASIL**

Ressacas e ondas extremas na costa do Brasil têm sido um tema amplamente estudado. O trabalho de Pianca *et al.* (2010) é bastante relevante nesse contexto. Ele apresenta uma climatologia de ondas extremas na costa brasileira entre 1997 e 2007, mostrando que os ventos associados à passagem de frentes frias são geralmente mais intensos durante os meses de outono e inverno devido à maior frequência de ciclogênese, podendo levar a mais eventos com alta energia de ondas. Além disso, quanto mais ao norte do Brasil, menor a frequência e intensidade. Estudos mais recentes também contribuem para o tema, como o de Gramcianinov *et al.* (2023a), que verificaram um aumento nos impactos costeiros no estado de São Paulo nas últimas décadas, e os de Machado e Calliari (2016), Parise *et al.* (2009) e Gramcianinov *et al.* (2023b), com análises estatísticas e padrões de eventos de ondas extremas no sul e sudeste do Brasil.

Campos *et al.* (2018) investigaram eventos extremos de onda no Oceano Atlântico Sul entre 2002 e 2009, fazendo uma análise dos 47 eventos mais intensos. Identificaram que as ciclogêneses que se formam ao redor da latitude 40° e têm deslocamento sudeste estão associados aos eventos. Machado *et al.* (2010) não encontraram diferenças importantes na quantidade de eventos extremos ocorridos entre 1979 e 2008.

O estudo de Sondermann *et al.* (2023) avaliou casos de ressacas em Santos, São Paulo, utilizando dados da reanálise climática do ERA5 nos meses de maio entre 1981 e 2010. Os autores utilizaram a definição da NORMAM-19 da Marinha, que define uma ressaca quando o swl atingindo a costa é igual ou superior a 2,5 m, encontrando 89 dias de ressaca. Machado *et al.* (2019) utilizaram a mesma norma para definir a ocorrência de uma ressaca, verificando condições atmosféricas durante o El Niño – Oscilação Sul (ENOS) de 2015/2016 associados a eventos de ressacas no litoral sul e sudeste do Brasil, identificando 53 eventos na área ALFA (A) e 39 na CHARLIE (C), sendo 25 episódios simultâneos em ambas (as duas áreas mencionadas são definidas pela Marinha do Brasil e compreendem,



aproximadamente, a área costeira entre o Rio Grande do Sul e o Rio de Janeiro) e relataram também que os meses com maior frequência de ressacas foram março, abril, maio e junho.

Simó e Horn Filho (2004) apontam que o crescente avanço das áreas urbanizadas no estado de Santa Catarina causa impactos no meio ambiente, e as modificações antrópicas nas áreas costeiras podem colocar em risco as populações locais. Esses processos podem ser agravados durante as ressacas, considerando também os processos erosivos associados. A construção de obras de engenharia costeira pode amplificar a exposição da linha costeira às ressacas, intensificando a erosão (Paula *et al.* 2015).

Vários outros fatores podem influenciar as ressacas, como a topografia local e do fundo do oceano, a presença de ilhas, a intensidade da tempestade e as características físicas das praias atingidas, como o recorte e posição geográfica (CARTER, 1988).

#### **2.6.5 PADRÕES SINÓTICOS DE CICLONES EXTRATROPICAIS NA GERAÇÃO DE RESSACAS**

Ressacas são frequentes no Brasil e geralmente estão relacionadas com tempestades e ciclones extratropicais (Machado *et al.*, 2019). Diversos outros estudos mostram que os ciclones extratropicais que atuam na costa brasileira podem gerar ressacas (MARONE e CAMARGO, 1994; PARISE *et al.*, 2009; CAMPOS *et al.*, 2010).

Segundo Machado *et al.* (2010), os ciclones extratropicais intensos que ocorrem na costa do Brasil podem gerar ondas de alta energia, sendo capazes de fazer um perfil de praia atingir um estágio máximo erodido em poucas horas. A análise dos autores (FIGURA 9) identificou que entre os 40 maiores eventos extremos de ondas (6 m de altura), 53,66% tiveram a trajetória do padrão II (mais relacionados com erosão) e 26,82% do padrão III (mais relacionados com ressacas).



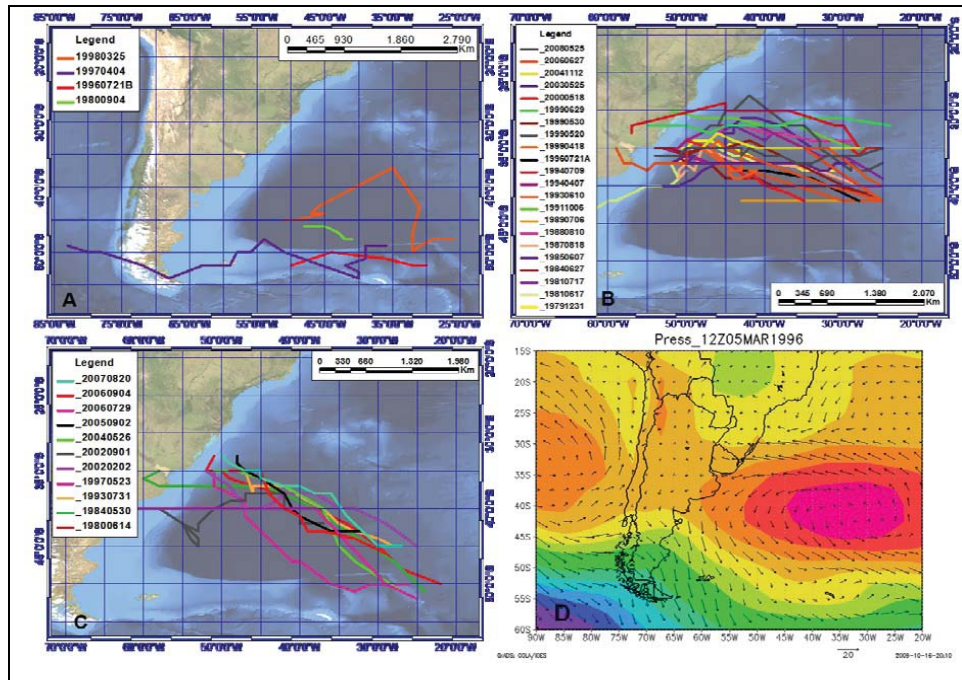
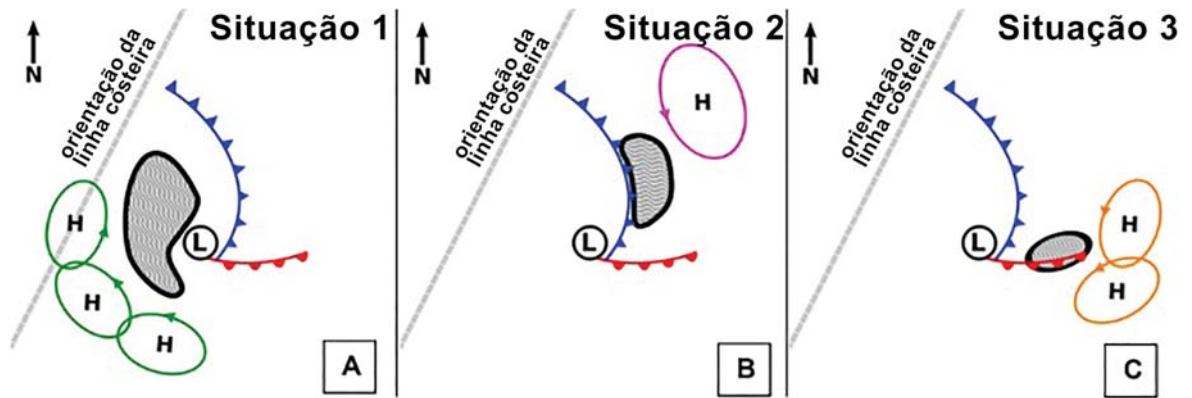


Figura 9 - Quatro padrões sinóticos que geram ressacas na América do Sul: (A) Padrão I, (B) Padrão II, (C) Padrão III e (D) Padrão IV.  
Fonte: Machado *et al.* (2010).

O padrão sinótico I representa ciclogêneses no sul da costa argentina com deslocamento para leste e trajetória entre  $47,5^{\circ}\text{S}$  e  $57,5^{\circ}\text{S}$ . O padrão II inclui ciclogêneses na costa sul do Uruguai com deslocamento para leste e trajetória entre  $28^{\circ}\text{S}$  e  $43^{\circ}\text{S}$ , e o padrão III representa ciclogêneses na costa sul uruguaia, mas com deslocamento para sudeste e trajetória entre  $32^{\circ}\text{S}$  e  $57,5^{\circ}\text{S}$ . Finalmente, o padrão IV apresenta um centro de alta pressão que gera ventos de leste.

Seis ciclones ocorridos em 1999 com intensos ventos e que causaram ressacas foram analisados por Da Rocha *et al.* (2003). Os resultados mostraram que houve uma forte velocidade de vento próximo à superfície durante a fase madura dos sistemas de baixa pressão. Isso causou eventos de ondas extremas que se propagaram em direção à costa sul e sudeste do Brasil, com altura significativa de onda acima de 5 m.

Além disso, o estudo realizado por Gramcianinov *et al.* (2020a) apontou padrões de ondas associadas aos ciclones, podendo ocorrer atrás de uma frente fria, à frente de uma frente fria ou ao longo de uma frente quente, como ilustrado no Esquema 1.



Esquema 1 - Três situações associadas entre ondas extremas e ciclones extratropicais. (A) Ondas atrás da frente fria; (B) à frente da frente fria e (C) ondas ao longo da frente quente no setor quente do ciclone.

Fonte: adaptado para o português de Gramcianinov *et al.* (2020a).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área considerada no levantamento das ressacas foi a costa sul e sudeste do Brasil, na América do Sul, com quatro pontos de verificação definidos nas mesmas coordenadas de boias do Programa Nacional de Boias (PNBOIA), como mostra a Figura 10. Essas regiões são de interesse para este estudo pela importância econômica para o país e por serem frequentemente influenciadas por ciclôgeneses. No Quadro 1, estão detalhadas informações de denominação e coordenadas desses pontos.

PONTOS		
Denominação adotada	Longitude (°O)	Latitude (°S)
(1) Rio Grande	-49.50	-31,34
(2) Itajaí	-47.15	-27,25
(3) Santos	-45.02	-25,27
(4) Cabo Frio	-42.11	-23,37

Quadro 1 - Pontos selecionados na costa brasileira para a identificação das ressacas ocorridas no período de 1979-2020.

Em relação aos ciclones extratropicais, Gramcianinov *et al.* (2019) definem duas áreas ciclogênicas próximas do Brasil: uma localizada na bacia do rio da Prata e denominada “La Plata”, estando situada no nordeste da Argentina e ao sul do Uruguai, ao redor da latitude 30°S; e outra denominada “SE-BR”, localizada na costa sul e sudeste do Brasil, entre a latitude 35°S no verão e 30°S no inverno. As duas regiões são potencialmente as que mais afetam o clima de ondas extremas na área de estudo deste projeto pela proximidade (CAMPOS *et al.*, 2018; GRAMCIANINOV *et al.* 2020a, 2021). Foram considerados os ciclones extratropicais que atuaram em todo o Atlântico Sul entre 25°S e 85°S e áreas continentais na análise da influência na ocorrência de ressacas. Foi considerada toda essa área porque as ressacas podem ocorrer no litoral brasileiro mesmo em condições de tempo bom, influenciadas por sistemas meteorológicos distantes da costa (MELO FILHO, 2017).

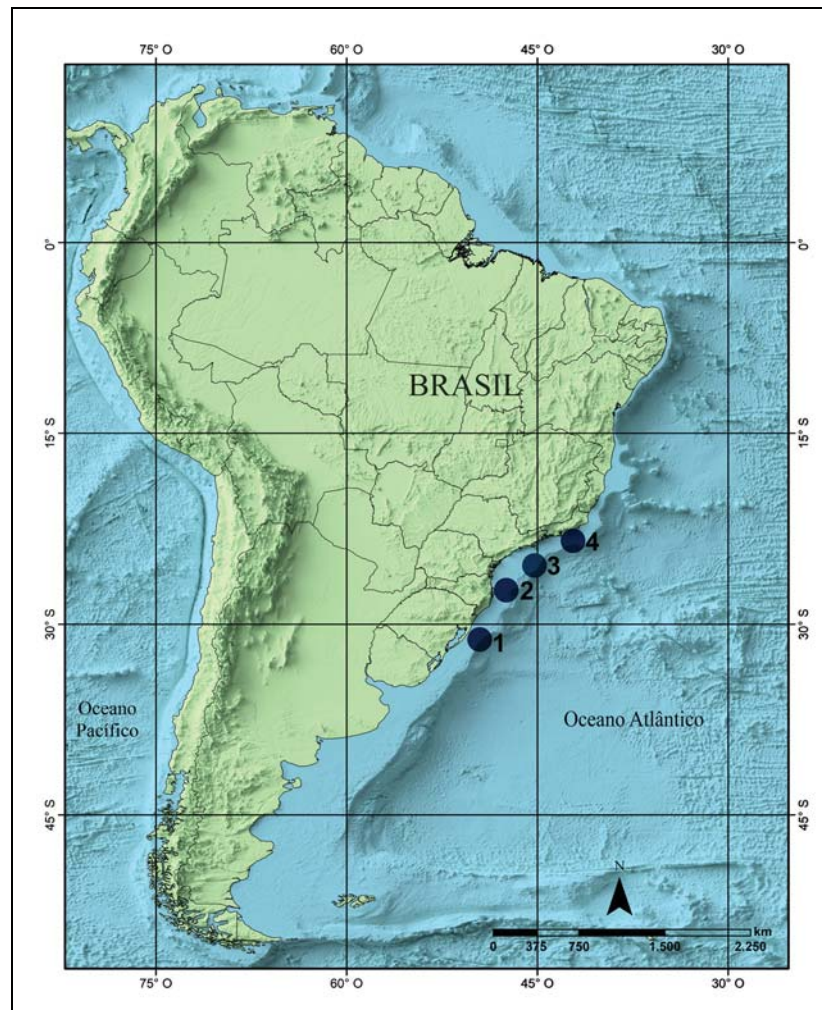


Figura 10 - Área de estudo de ressacas (números de 1 a 4) e de ciclones extratropicais (todo o Oceano Atlântico Sul). Pontos de 1 a 4 representam: 1) Rio Grande; 2) Itajaí; 3) Santos e 4) Cabo Frio.

### 3.2 REANÁLISE CLIMÁTICA DO ERA5

O ERA5 é uma reanálise climatológica do ECMWF, que faz uma avaliação das condições atmosféricas e da superfície, iniciando em 1979 e sendo atualizado constantemente (HERSBACH *et al.*, 2020). O ERA-INTERIM havia sido o substituto do ERA-40 e, mais recentemente, foi atualizado para o ERA5, incluindo uma larga variedade de parâmetros, descrevendo as condições climáticas passadas da atmosfera, da superfície e do oceano (DEE *et al.*, 2011).

O ERA5 tem o benefício de ter mais de uma década de desenvolvimento dos dados, além de uma resolução horizontal melhorada de 31 km, em relação aos 80 km do ERA-Interim, e possui um aprimoramento de hora em hora na resolução temporal. Outra evolução do produto é ter uma latência de 5 dias, enquanto que o do

ERA-Interim é de aproximadamente 2 a 3 meses (HERSBACH *et al.*, 2020). Segundo Espindola e Araújo (2016), as reanálises são uma alternativa à medição direta para caracterizar as condições de onda, além de satélites terem a vantagem de retratar áreas com grande abrangência espacial em comparação com as boias, que captam dados apenas em pontos específicos.

A altimetria de satélites mede o tempo que um pulso de radar leva para viajar da antena do satélite à superfície e de volta ao satélite. Combinando dados precisos de localização de satélite, essas medições fornecem dados sobre a superfície do mar e são utilizadas também em algumas reanálises climáticas (NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH - NCAR, 2016).

O uso das reanálises no desenvolvimento de pesquisas atmosféricas e climáticas oferece um grande leque de possibilidades, como a análise de padrões climáticos e modelagens, sendo hoje fundamentais para o aprimoramento dos estudos climatológicos (HERSBACH *et al.*, 2020). Além disso, o ERA5 possui fácil acesso e obteve-se bons resultados na sua utilização. Considerando que os dados dos ciclones extratropicais foram obtidos com o ERA5 (subcapítulo 3.3), esta mesma reanálise climática foi selecionada para o estudo de ressacas relacionadas aos ciclones através do parâmetro swl.

### **3.3 DADOS DE CICLONES**

Como mencionado, em relação aos ciclones extratropicais foram utilizados dados de reanálise da quinta geração do ECMWF (HERSBACH *et al.*, 2020), levantados por Gramcianinov *et al.* (2020b). As informações sobre o deslocamento dos ciclones, pressão atmosférica e vento dos sistemas foram gentilmente cedidas para esta pesquisa pelos autores na forma de tabelas por ano e mês. Por meio da metodologia proposta pelos pesquisadores, foram identificados todos os ciclones extratropicais que ocorreram no Atlântico Sul no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2020.

A identificação dos ciclones feita por Gramcianinov *et al.* (2020b) foi realizada através do algoritmo de Hodges (1994; 1995; 1999). A variável utilizada para a identificação e rastreamento foi a vorticidade em 850 hPa. Ela apresenta algumas vantagens em relação ao uso da variável de pressão atmosférica ao nível do mar (MSLP), já que alguns ciclones podem aparecer nessas análises sem uma isóbara



fechada, dificultando a identificação. Os rastreios estão disponíveis em repositório público (GRAMCIANINOV *et al.*, 2020b) na forma de tabelas por ano e mês e divididos por data de ocorrência e coordenadas geográficas. O intervalo temporal é de 1 hora. Sistemas que não foram considerados ciclones extratropicais foram removidos dos dados finais, excluindo-se aqueles que duraram menos de 24 horas e se deslocaram menos de 1000 km, como baixas térmicas e complexos convectivos de mesoescala. Não foi feita uma diferenciação entre ciclones subtropicais e extratropicais neste trabalho. Assim, os ciclones subtropicais podem estar incluídos nos dados.

Posteriormente, foram adicionados aos rastreios as informações de MSLP e máxima velocidade do vento em 10 m de altitude ( $m s^{-1}$ ). A associação desses valores é feita por meio da busca em um raio de 5° e 6° graus ao redor do centro do ciclone, considerando todos os passos de tempo nos quais o sistema existe (GRAMCIANINOV *et al.*, 2020b). As variáveis mencionadas foram utilizadas nesta pesquisa para análises de variações temporais.

### 3.4 DADOS DE BOIAS

O PNBOIA disponibiliza dados meteorológicos e oceanográficos, como direções de vento, onda e corrente, obtidos em áreas de interesse no Brasil. Os dados fazem parte do programa *Global Sea Level Observing System - Brasil* (GLOSS Brasil). O PNBOIA opera 21 boias fixas e 297 boias de deriva e duas boias na região nomeada “Santos”, em São Paulo, e quatro nas regiões nomeadas “Guanabara” e “Cabo Frio”, no Rio de Janeiro. Os dados históricos e operacionais das boias fixas podem ser encontrados em <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>.

Apesar das informações das boias serem fundamentais para a melhoria da previsão meteorológica e análise climatológica, ainda existe uma carência em relação ao número de boias existentes no Atlântico Sul e na área de pesquisa deste projeto, além da pequena cobertura temporal. Como os dados de boias disponíveis não preenchem o espaço temporal total da pesquisa, foram utilizados apenas para estudos de caso e para validação da correlação dos dados de onda do ERA5 (FIGURA 11). Os dados da boia Itajaí, medidos localmente em 2017 e 2018, foram comparados com os do parâmetro do swh do ERA5 nas mesmas coordenadas,

apresentando uma correlação de 90,57% no cálculo de correlação, o que demonstra que os dois dados possuem boa concordância, reproduzindo as condições reais de forma confiável. Utilizou-se apenas a boia de Itajaí para validação, pois seus dados abrangiam o período entre 2017 e 2018, permitindo uma análise anual, diferentemente dos outros pontos.

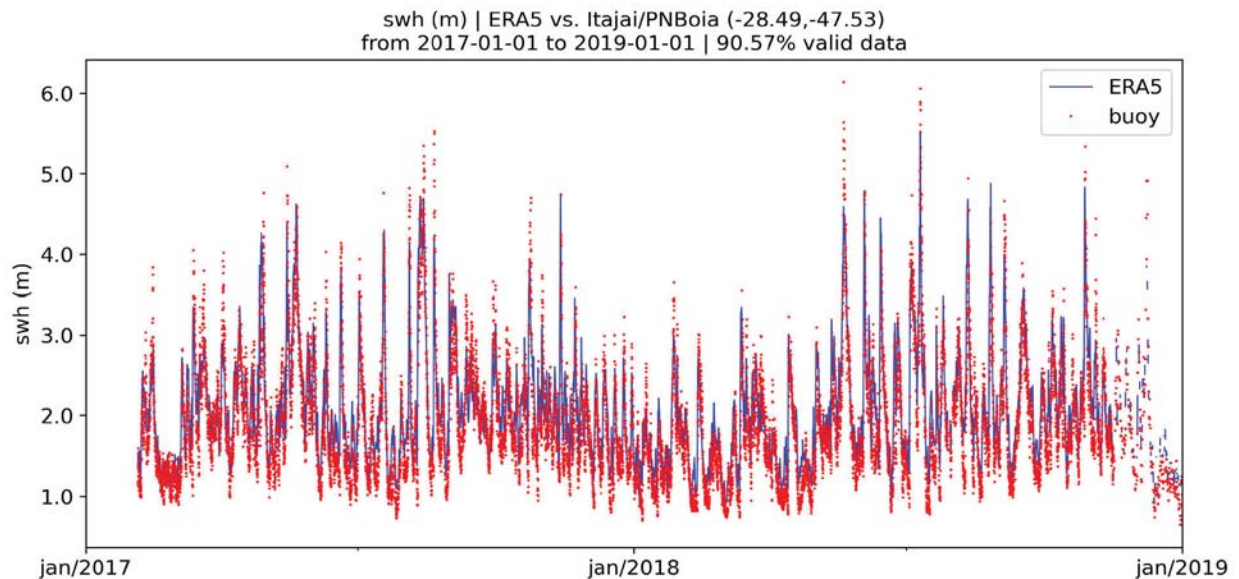


Figura 11 - Validação dos dados do swh do ERA5 e da boia Itajaí entre 2017 e 2018.

### 3.5 DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE RESSACAS

A definição de ressaca adotada foi a das Normas de Autoridade Marítima da Marinha do Brasil (NORMAM-19), que considera como ressaca as ondas com altura significativa de 2,5 m ou superior atingindo a costa. Os pontos escolhidos para análise estão distantes cerca de 100 a 200 km da costa.

Na avaliação da altura significativa de ondas foi utilizado o parâmetro swh, do ERA5. Ele assimila dados de radares de altimetria em satélites, como o *European Remote Sensing 1* (ERS1) e 2 (ERS2), *Environmental Satellite* (ENVISAT) e Jason-1 e Jason-2, além de ter controles de qualidade locais com observações de parâmetros de onda da superfície do mar e vento em 10 m obtidos por boias, plataformas e navios meteorológicos. Esses satélites modernos forneceram dados cruciais para entender melhor os efeitos das mudanças climáticas e o comportamento dos oceanos (DEE *et al.*, 2011).

O parâmetro *swh* caracteriza a altura média da superfície das ondas do oceano geradas pelo vento e *swell*, representando a distância vertical entre a crista e o ponto inferior. Esse parâmetro é apresentado em metros (C3S, 2021).

Os dados foram extraídos do ERA5 no formato *NetCDF (Network Common Data Form)* e convertidos para *csv* com um código em *Python*, que é uma linguagem de programação livre e que possui uma grande comunidade online onde é possível encontrar novas ferramentas para elaboração de mapas, por exemplo. A resolução horizontal selecionada foi de 0,5° de latitude por 0,5° de longitude, com resolução temporal de hora em hora, considerando os horários de 00 UTC, 01 UTC, 02 UTC e assim sucessivamente.

### 3.6 ANÁLISE DO SWH E IDENTIFICAÇÃO DE RESSACAS

Os dados do ERA5 foram obtidos diretamente do site do ECMWF e abrangeram os parâmetros de componente de vento U e V (10 m), direção média de onda (*mwd*), período médio de onda (*mwp*) e altura significativa de onda (*swh*), com dados horários entre 1979 e 2020. Quando necessário, foram utilizados vetores para análise de componentes U e V. Após isso, foi criado um banco de dados com essas informações para cada um dos quatro pontos selecionados na costa brasileira.

Utilizando outro código em *Python*, foram identificadas as ressacas com base nos dados da coluna “*swh*”. Cada vez que a altura atingia ou ultrapassava 2,5 m, uma nova ressaca era registrada, e esse registro se mantinha até que a altura retornasse a ser inferior a 2,5 m. Para identificar essas ressacas, foram atribuídos códigos únicos, como por exemplo: “79a01”, em que “79” representa o ano, “a” indica o ponto de análise e “01” é a contagem crescente dentro daquele ano. Cada ano possui uma contagem distinta. Os pontos de análise foram designados de “a” a “f”, sendo “a”: Rio Grande, “b”: Itajaí, “c”: Santos e “d”: Cabo Frio.

Posteriormente, verificou-se que a automação identificava erroneamente como duas ressacas distintas situações em que o valor do *swh* permanecia acima de 2,5 m por uma ou mais horas, seguido de uma queda abaixo desse limite e posterior retorno à condição acima do limiar. Para resolver esse problema, foi estabelecido o critério de que um intervalo superior a 24 horas entre a queda abaixo de 2,5 m e o subsequente retorno acima desse valor seria necessário para o registro de uma nova ressaca. A escolha de utilizar o intervalo de 24 horas baseou-se em



vários testes realizados para verificar qual condição apresentasse melhores resultados, considerando que posteriormente seria atribuído um ou mais ciclones a cada ressaca identificada. Além disso, seria impossível analisar cada situação individualmente devido à quantidade de dados. Foi feita, também, uma verificação manual dos dados gerados pelo código. As ressacas que ocorreram no final de dezembro e se estenderam até janeiro foram classificadas como pertencentes ao mês de dezembro.

Foi criado um banco de dados com essas informações, além de dados adicionais, como swh média e máxima, direção mediana (foi utilizada a mediana por esta ser menos sensível a valores extremos), período médio e vento. Os dados foram organizados de forma anual, sazonal e decenal, separados por cada um dos quatro pontos selecionados na costa brasileira.

O subcapítulo 5.4 aborda as ressacas mais intensas ocorridas em cada um dos quatro pontos selecionados. Esse filtro foi baseado no valor máximo do swh e foi selecionada uma amostra 10% das ressacas para análise mais aprofundada de eventos mais extremos.

### **3.7 ASSOCIAÇÃO ENTRE RESSACAS E CICLONES EXTRATROPICAIS**

Após a detecção das ressacas, foi realizada uma correlação entre esses eventos e os ciclones extratropicais identificados anteriormente. Essa etapa possibilitou identificar quais sistemas estavam atuando em uma distância determinada de cada um dos quatro pontos selecionados na costa brasileira durante a ocorrência das ressacas, visando uma análise posterior para responder aos objetivos específicos.

Em uma segunda fase, foi criado um banco de dados anual com as informações sobre os ciclones extratropicais e ressacas, e desenvolvido um código em *Python* para relacionar os eventos, utilizando como critério inicial a data de ocorrência das ressacas e identificando os ciclones ativos durante esse período. Estabeleceu-se que os sistemas de baixa pressão poderiam ter se formado ou estado ativos até 36 horas antes do início das ressacas, levando em consideração o tempo de resposta necessário para o vento causar agitações marítimas. Esse valor foi definido após uma série de testes e gerou melhores resultados do que 24 e 48

horas, principalmente para fazer o relacionamento com ressacas com swh acima de 4 m.

O segundo critério utilizado no código foi a distância entre as coordenadas dos pontos selecionados e as das boias e o centro dos ciclones extratropicais. Para isso, foi utilizada no código a fórmula de Haversine, que permite calcular a distância entre dois pontos em uma esfera, como a Terra, considerando as latitudes e longitudes. Essa fórmula é utilizada em aplicativos de geolocalização e navegação, fornecendo uma medida precisa da distância entre coordenadas geográficas (IVIS, 2006). A seguir, a representação da fórmula:

$$d = 2r \arcsin \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\partial 2 - \partial 1}{2} \right) + \cos(\partial 1) \cdot \cos(\partial 2) \cdot \sin^2 \left( \frac{\lambda 2 - \lambda 1}{2} \right)} \right)$$

onde:

$d$  representa a distância entre dois pontos em uma esfera;

$r$  é o raio médio da Terra;

$\partial 1$  e  $\partial 2$  são a latitude dos pontos;

$\lambda 1$  e  $\lambda 2$  são a longitude dos pontos.

Com essas informações, o código pôde calcular a distância entre as coordenadas fixas dos quatro pontos selecionados e dos ciclones, em intervalos de uma hora, e foi definido que esse valor deveria ser de até 1000 km. Uma série de testes com 500 km gerou bons resultados para ressacas intensas, mas não para a série toda. O trabalho de Gramcianinov *et al.* (2020a) utilizou uma distância de 1500 km para relacionar ondas extremas geradas por ciclones extratropicais entre 1999 e 2004, mas com uma metodologia diferente, utilizando pontos em uma grade ao longo da costa brasileira com profundidade maior que 610 m. Diante disso, a distância que gerou os melhores resultados e foi utilizada nesta pesquisa foi de 1000 km para Rio Grande. Em Itajaí, Santos e Cabo Frio, verificou-se posteriormente a necessidade de maior distância, utilizando 1250 km no litoral catarinense e paulista e 1500 km no fluminense.

Um terceiro critério de direção de onda e de ciclones extratropicais foi incluído, onde a direção de deslocamento dos ciclones deveria estar de acordo com o quadrante de direção das ressacas.

Por fim, a rodagem do algoritmo foi realizada separadamente por ano e com os critérios mencionados acima, gerando dados que relacionam cada ressaca com os ciclones que influenciaram sua ocorrência. Não foi possível fazer essa correspondência para alguns casos. Essa questão será abordada nas análises de resultados.

Considerando as áreas de formação dos ciclones extratropicais e dos valores de altura de onda de cada ressaca, foi possível verificar quais as áreas predominantes para a ocorrência de ciclones relacionados com as ressacas.

### **3.8 ANÁLISE QUANTITATIVA E DE DENSIDADE**

Com os dados de ciclones extratropicais associados aos eventos de ressaca, foi possível fazer uma análise sazonal da densidade dos sistemas, permitindo analisar tendências de quantidade e área de gênese. Os mapas de densidade dos ciclones extratropicais foram elaborados utilizando a “densidade de Kernel”, que permitiu determinar quais áreas são preferenciais para a formação de ciclogêneses, assim como a observação de alterações sazonais. Para uma avaliação sazonal, foram considerados como estações do ano os meses de dezembro a fevereiro para o verão, março a maio para o outono, junho a agosto para o inverno e setembro a novembro para a primavera.

Destaca-se que a quantidade de ressacas e ciclones extratropicais são eventos quantificados considerando os parâmetros apresentados na metodologia, não significando a real ocorrência desse evento de forma severa.

Os ciclones foram verificados pela área de gênese considerando as áreas RG1 (La Plata), RG2 (Sudeste do Brasil) e RG3 (Argentina), representados por Gramcianinov *et al.* (2019) na Figura 7, uma vez que aqueles que se formam próximo ao continente tendem a gerar maiores impactos localizados, enquanto os que se formam em alto-mar tendem a gerar impactos mais baixos, mas amplamente distribuídos ao longo da costa (TOZZI E CALLIARI, 1999). Essa verificação foi realizada utilizando as coordenadas do momento da gênese do ciclone.

Os mapas dos parâmetros de ondas e pressão atmosférica, dados estatísticos, imagens de direção mediana de onda e tabelas de resultados foram elaborados utilizando os *softwares ArcGIS, Excel, Photoshop* e em *Python*. Os

arquivos csv de ressacas somaram 2.209.110 linhas e o de ciclones 2.842.697, que foram analisados e resumidos nos capítulos de resultados e discussões.

O relevo sombreado apresentado no mapa da área de estudo foi gerado utilizando o *ArcGIS* e o software de modelamento 3D do *Blender*, com base em dados do *Shutter Radar Topography Mission* (SRTM), que possui 90 m de resolução vertical, e de batimetria do *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO).

Testes de correlação entre a quantidade de ciclones e de ressacas foi realizada utilizando a correlação de Pearson. Tendências temporais positivas ou negativas foram calculadas utilizando linhas de tendência. Os valores são calculados a partir do coeficiente angular, que indica a inclinação da reta e representa a taxa de variação da variável dependente em relação à variável independente. Um valor positivo, por exemplo, sugere que a variável dependente está aumentando conforme a variável independente cresce ao longo do tempo (AZEVEDO, 2016). Os valores observados estão sujeitos a variações anuais, e as tendências podem ser influenciadas pelas quantidades anuais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES: RESSACAS

Neste capítulo, será apresentada uma análise das ressacas identificadas na costa sul e sudeste do Brasil entre 1979 e 2020. Os subcapítulos estão divididos pelos quatro pontos da área de estudo.

### 4.1 PONTO 1 – RIO GRANDE

#### 4.1.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL

A Figura 12 exibe a distribuição anual das 1245 ressacas identificadas no ponto de Rio Grande no período analisado. As colunas vermelhas representam as quantidades anuais, enquanto a linha horizontal azul indica a média do período (29). Essa análise proporciona uma visão geral da variabilidade das ressacas ao longo dos anos, que totalizou 1245 casos. Nesse caso, “ressaca” refere-se a um evento quantificado a partir do parâmetro de swH, conforme descrito na metodologia, e não, necessariamente, a real ocorrência desse evento na costa.

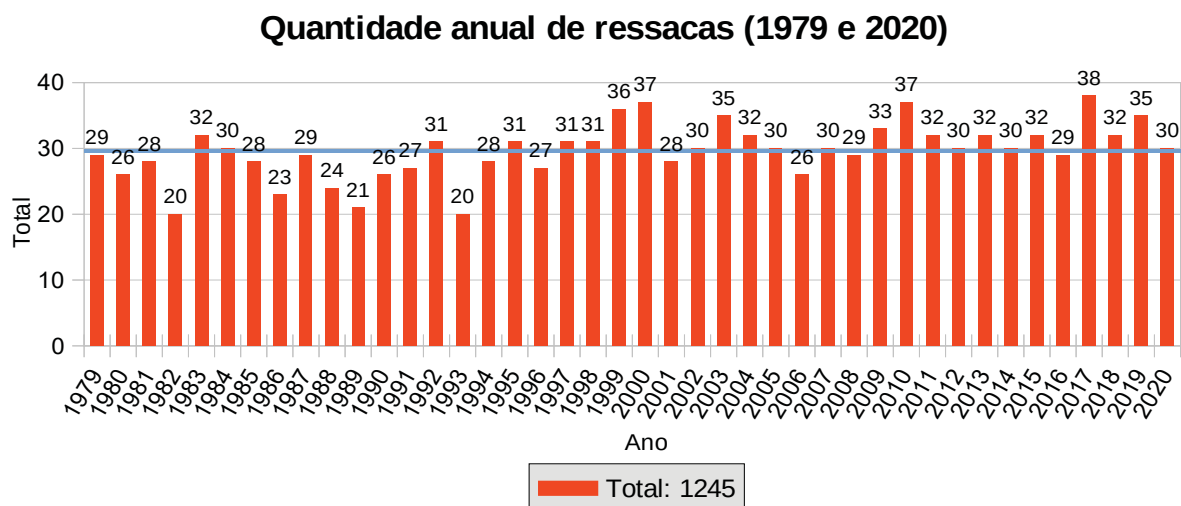


Figura 12 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020. A linha azul exibe a média anual.

O ano de 2017 registrou o valor mais elevado, com 38 ressacas, seguido por 2010 e 2000, com 37 cada, e 1999, com 36 casos. Os anos com menor quantidade foram 1982 e 1993, ambos com 20.

A linha de tendência temporal entre 1979 e 2020 indica que os dados anteriores a 1992 são subestimados, o que levou à decisão de não realizar análises

incluindo esse período (1979 a 1992). A partir da década de 90, a disponibilidade de dados de satélites altimétricos melhorou a precisão e cobertura dos dados nos produtos de reanálise, como o ERA5 (TIMMERMANS *et al.*, 2020; BARLIER E LEFEBVRE, 2001; ESCUDIER e FELLOUS, 2009). Como exemplo, a média anual de ressacas entre 1979 e 2020 foi de 29, entre 1993 e 2020 foi de 31 e entre 1979 e 1992 foi de 26. Assim, optou-se por analisar a tendência de aumento no período de 1993 a 2020. Embora o gráfico não esteja incluído no texto, os valores anuais podem ser consultados na Figura 12. O valor do coeficiente angular foi de 0,16, o que indica uma variação anual média de 0,16 ressacas na variável dependente para cada acréscimo na variável independente (anos). Isso sugere que, em média, houve um aumento de 0,16 ressacas por ano, uma tendência de crescimento ao longo do tempo. Dessa forma, a tendência positiva foi de 4,94 ressacas entre 1993 e 2020.

Em relação à quantidade sazonal de ressacas (FIGURA 13), 186 ressacas ocorreram no verão (15% do total), 283 no outono (22,7%), 397 no inverno (31,9%) e 379 na primavera (30,4%). A média anual de casos foi de 4,4 no verão, 6,7 no outono, 9,5 no inverno e 9 na primavera.

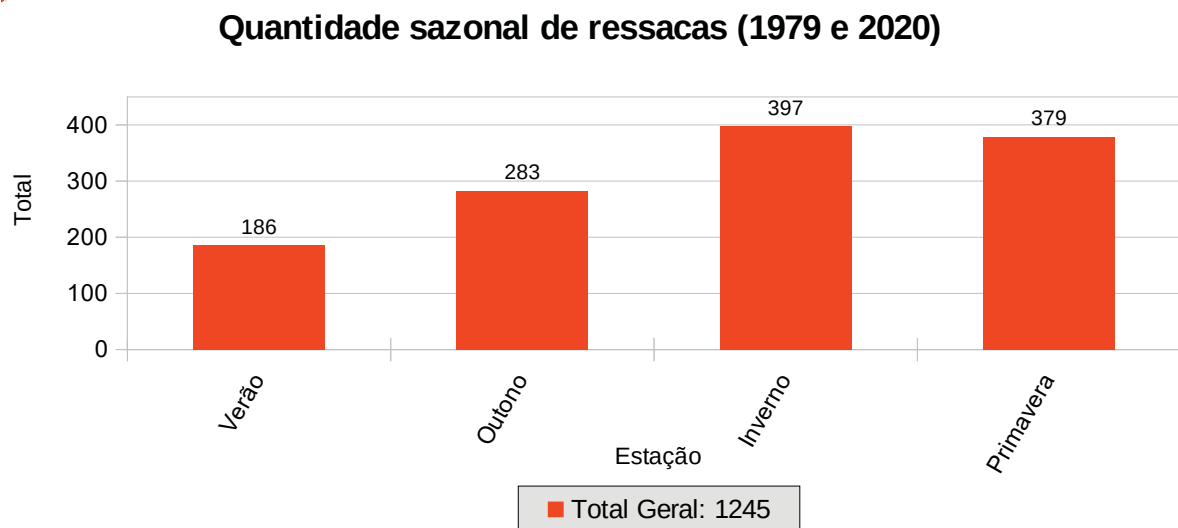


Figura 13 - Total sazonal de ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020.

A Figura 14 exibe o total de ressacas por mês. Apesar do inverno ter sido a estação com mais eventos, o mês de setembro apresentou o maior total, com 146 casos. Julho e agosto registraram números relativamente próximos de setembro, com 135 e 136, respectivamente. Os demais meses da primavera, outubro (119) e novembro (114), apresentaram um total similar ao mês de maio (111). O restante

dos meses do outono mostraram valores abaixo disso, e os meses do verão menos ressacas, como esperado. A média por mês foi de 104, indicada pela linha azul.

### Total de ressacas por mês (1979 e 2020)

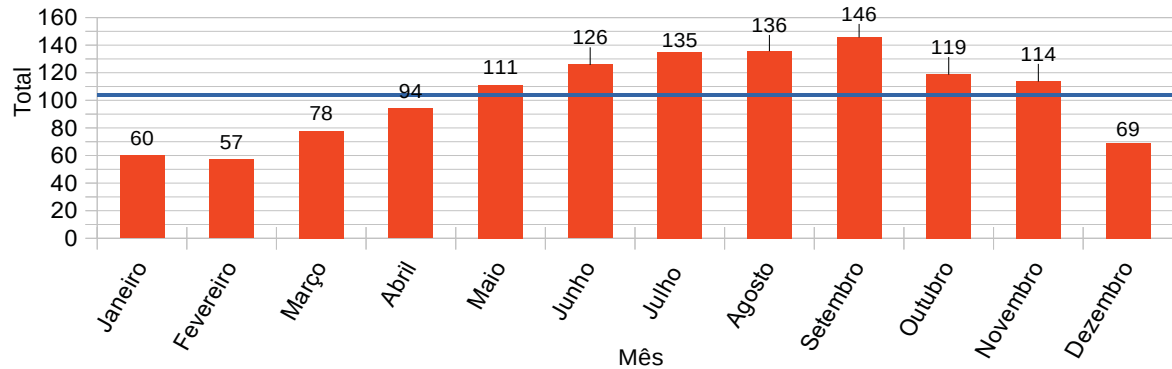


Figura 14 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Rio Grande. A linha azul exibe a média mensal.

### 4.1.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS

A Figura 15 exibe a quantidade de horas com ressacas em cada ano no período de análise. Ou seja: foi calculada a duração total, em horas, de todas as ressacas ocorridas em cada ano.

O ano de maior valor foi 2010, com 2896 horas, seguido de 2017, com 2746. Destacam-se ainda os anos 1999 (2672 horas) e 1998 (2573 horas). Por outro lado, os anos com a menor quantidade de horas foram 1988 (1321 horas), 1989 (1386 horas) e 1990 (1810 horas).

### Total de horas por ano com ressacas

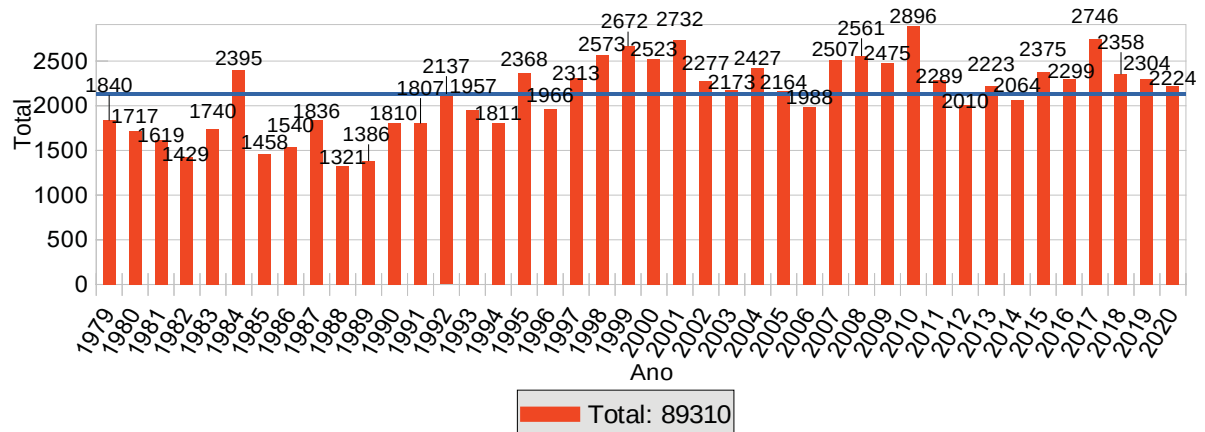


Figura 15 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020. A linha azul exibe a média anual.

horas) e 1982 (1429 horas). O ano de 1993 apresentou apenas 20 ressacas, mas a soma das horas (1957) não foi tão baixa em comparação com anos próximos.

Nota-se uma semelhança entre os anos com maior quantidade de horas totais e de eventos de ressacas, como esperado, apesar de isso não ter sido registrado em todos os anos. No geral, houve um aumento na quantidade de horas de ressacas ativas e eventos de ressacas ao longo dos anos, com um pico em torno dos anos 2000, 2010 e 2017, anos em que ocorreu La Niña. O estudo de Pereira *et al.* (2012) mostrou que mais ciclones extratropicais ocorrerem em anos de La Niña do que em anos de El Niño no Atlântico Sul, o que pode contribuir para uma maior quantidade de ressacas na costa brasileira.

A análise sazonal da quantidade de horas com ressacas, apresentado na Figura 16, mostra que os anos de verão tiveram total de 10607 horas (11,9%, com média de 252 horas em cada verão anual), o outono de 20252 horas (22,7%, média de 482 horas), o inverno de 30289 horas (33,9%, média de 721,2 horas) e a primavera de 28162 horas (31,5%, média de 670,5 horas). O total geral foi de 89130 horas.

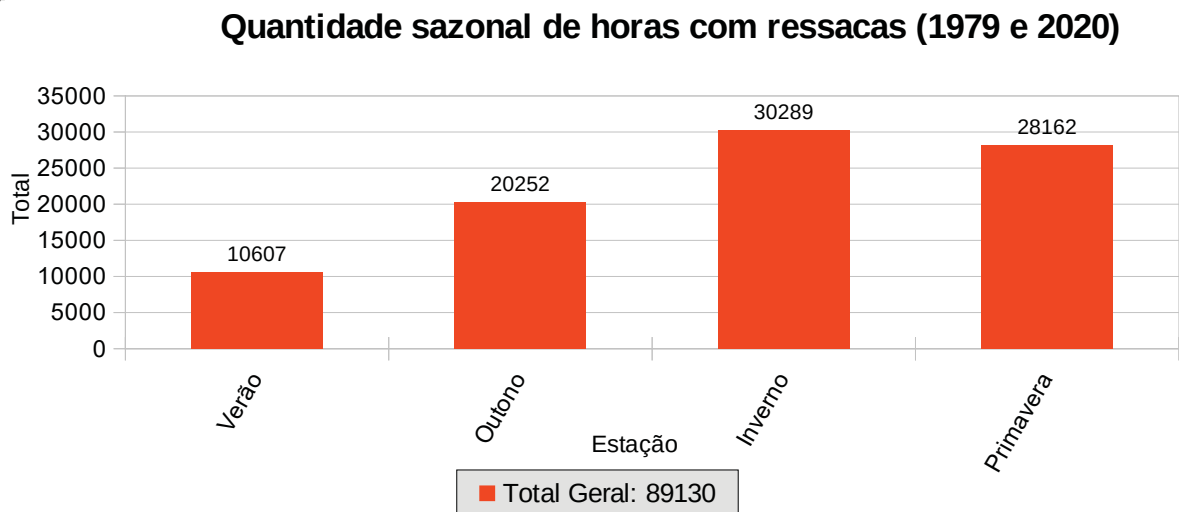


Figura 16 - Total sazonal de horas com ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020.

A distribuição mensal da quantidade de horas entre 1979 e 2020 é apresentada na Figura 17. Assim como na Figura 14, setembro foi o mês com a maior quantidade de horas com ressacas (12546). Julho e agosto tiveram valor próximo (10434 e 10207 horas, respectivamente). O gráfico exibe um crescimento durante o outono, que culmina em meses de inverno bastante elevados, pico em



setembro e posterior queda durante a primavera, com os meses de verão registrando os menores números. A média mensal foi de 7443 horas.

### Horas com ressacas por mês (1979 e 2020)

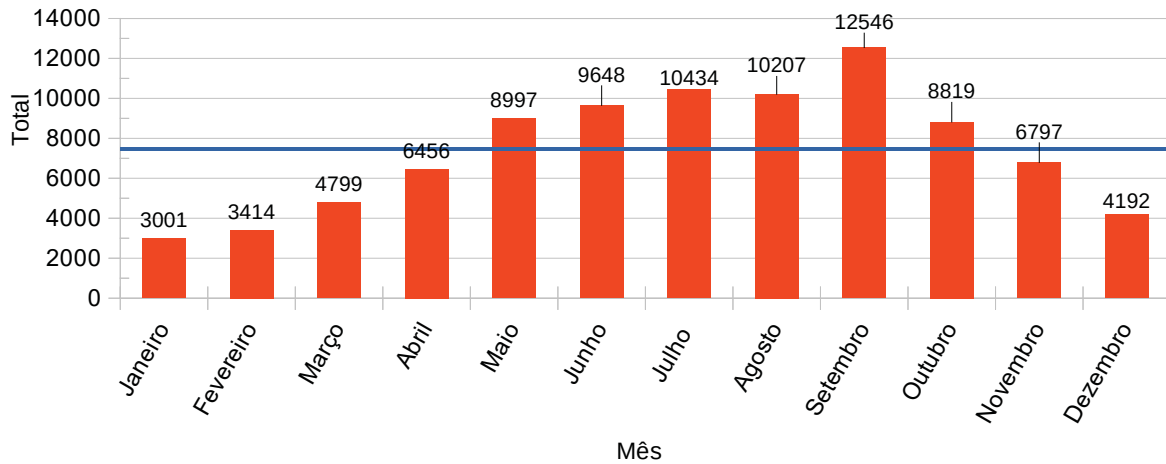


Figura 17 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período (1979 - 2020) no ponto da boia Rio Grande. A linha azul exibe a média mensal.

#### 4.1.3 COMPORTAMENTO DO SWH EM RIO GRANDE

Inicialmente, foi realizada uma observação sobre a média do swh em cada ano (FIGURA 18). A média do swh considerando todos os anos foi de 3,12 m (linha azul). Os dados anuais indicam valores que variam entre 2,94 e 3,36 m.

Apesar disso, pode-se verificar que alguns anos recentes tiveram valores mais elevados, como 2016 (3,36 m) e 2020 (3,31 m), e também os menores, como 2012 e 2013 (3,01 m), 2014 (2,94 m) e 2015 (3,02 m). Considerando a quantidade de ressacas, os quatro anos mencionados com médias baixas apresentaram totais próximos da média (Figura 12), mas 2016 apresentou um registro elevado de ressacas mais intensas (abordado na Figura 25). Os anos de 2017, 2010, 2000 e 1999 registraram as maiores quantidades de ressacas anuais, mas a média do swh não acompanhou essa elevação. Em 1993, foram identificadas apenas 20 ressacas e a média foi a terceira mais elevada, com 3,27 m.

### Média anual de swh das ressacas (m)

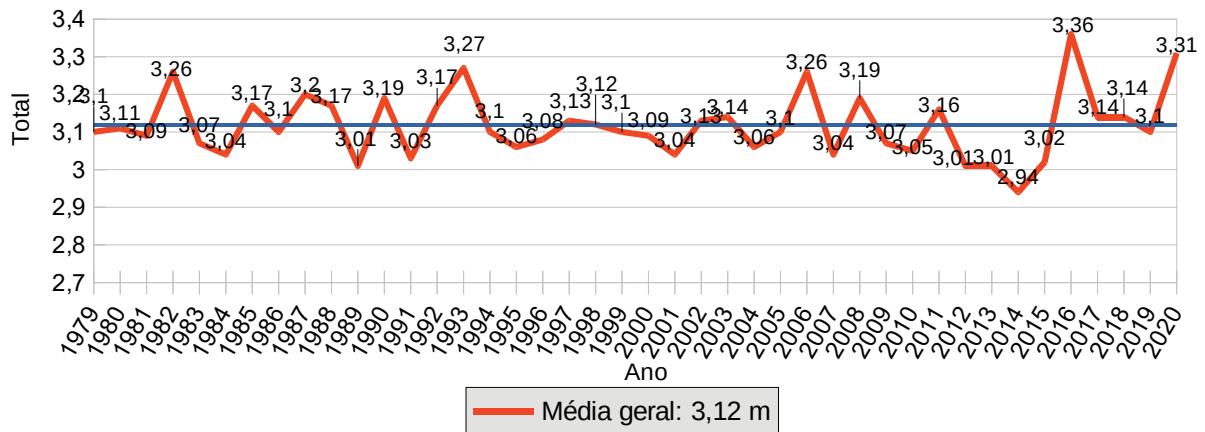


Figura 18 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Rio Grande. A linha azul exibe a média anual.

Para comparação, a Figura 19 exibe a média do swh anual considerando todas as horas do ano e não apenas durante os períodos de ressaca. Nota-se uma subestimação dos dados antes de 1992. Esse fato ocorreu devido ao aperfeiçoamento dos dados após esse período, com a introdução dos satélites de altimetria, conforme discutido na página 49. Dessa forma, optou-se por não realizar análises de tendências temporais do swh. Diversos estudos apontam essa questão, como Timmermans *et al.* (2020), Barlier e Lefebvre (2001) e Escudier e Fellous (2009). Com isso, este dado não será apresentado nos próximos pontos de estudo.

### Swh média em todas as horas do ano (m)

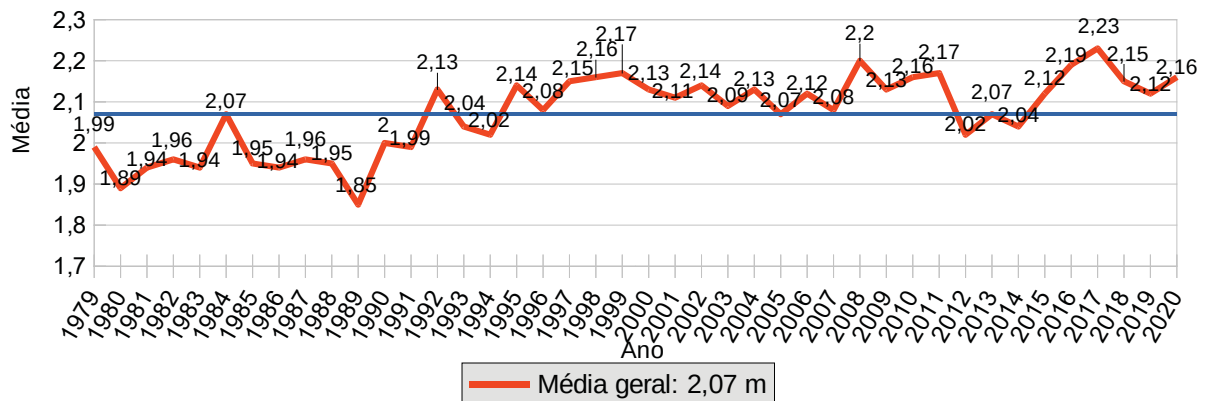


Figura 19 - Média anual do swh durante todas as horas de cada ano no ponto da boia Rio Grande. A linha azul exibe a média anual.

Sazonalmente, os dados de média do swh indicam que, como esperado, o inverno tem o valor mais elevado, com 3,22 m (FIGURA 20). Apesar de ter apresentado menos registros de ressacas, o outono tem uma média maior que a da primavera, com 3,12 m e 3,06 m, respectivamente. O estudo de Reis (2022) identificou uma maior quantidade de ciclones explosivos na primavera, mas proporcionalmente casos mais intensos no outono. Uma maior quantidade de ressacas não elevadas na primavera pode ter diluído a média. Durante os meses de verão, a média foi de 2,94 m, indicando que essa realmente é a estação com menores índices de ressacas e de altura de onda. Analisando os maiores e menores valores sazonais, nota-se que médias acima de 3 m são quase unânimes no inverno. Em comparação, a maioria dos anos do verão não superaram a marca de 3 m.

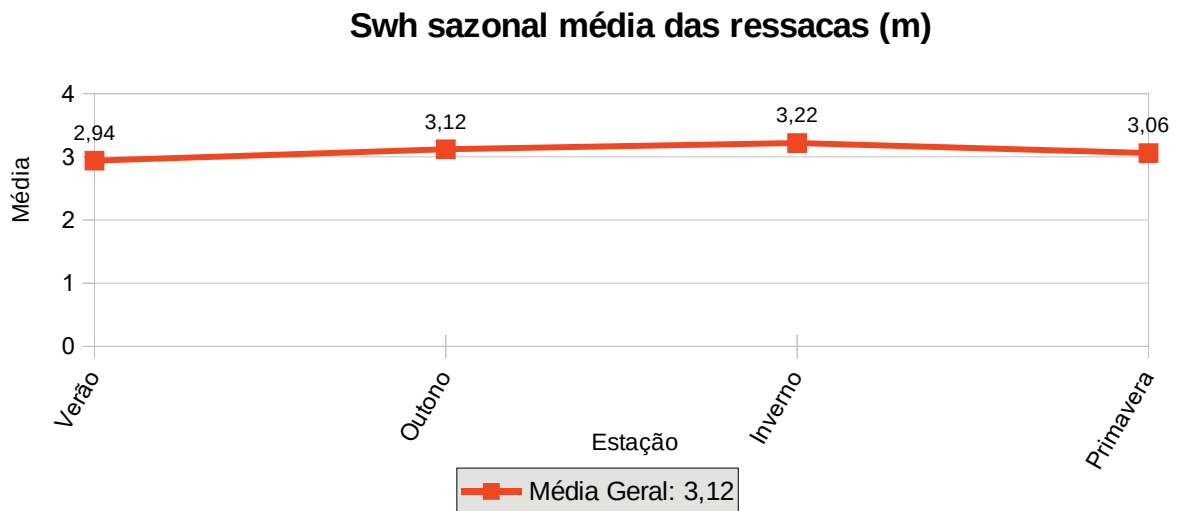


Figura 20 - Média sazonal do swh em Rio Grande entre 1979 e 2020.

Seguindo para a análise das médias mensais do swh (FIGURA 21), entre 1979 e 2020 o mês de valor mais alto foi junho, com 3,26 m. Isso diferiu do que foi verificado na análise das quantidades anuais de ressacas e de horas com ressacas por mês, que apresentaram setembro com as quantidades levemente maiores, mas próximo dos meses de inverno. Maio registrou a segunda maior média (3,23 m), seguido de julho (3,21 m), abril (3,18 m) e agosto (3,15 m). Como esperado, as menores médias ocorreram no verão, em janeiro (2,92 m) e fevereiro (2,91 m).

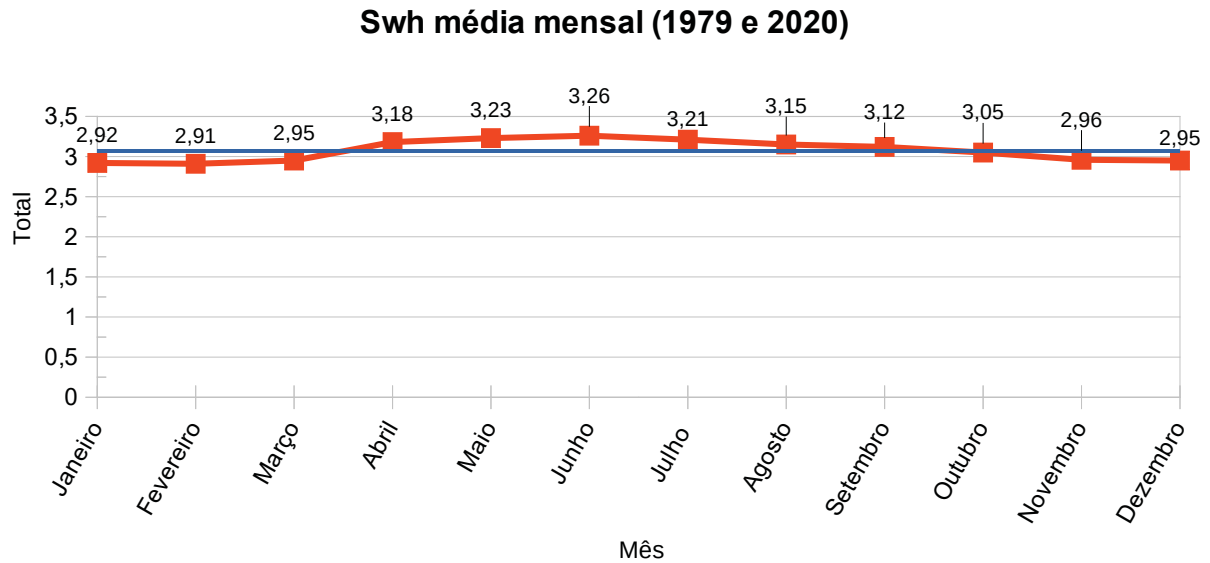


Figura 21 - Média do swH em cada mês do ano no ponto da boia Rio Grande (metros). A linha azul exhibe a média mensal.

#### 4.1.4 DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS EM RIO GRANDE

A direção mediana das ondas das ressacas, com base nos dados do ERA5, foi utilizada por ser menos sensível a valores extremos que a direção média, o que proporciona uma análise mais robusta e apresentada de forma mais precisa a tendência central da direção das ondas durante os eventos de ressaca.

A mediana da direção de ondas de todas as ressacas identificadas no ponto da boia Rio Grande foi analisada juntamente com o valor máximo do swH em cada evento através de uma rosa de ondas (FIGURA 22). As letras indicam os pontos cardeais, os numerais nos círculos polares a quantidade de ressacas na mesma direção aproximada e as cores nas legendas indicam o swH de cada ressaca.

Os dados indicam uma predominância de direção Sul, entre sudeste e sudoeste, de acordo com resultados obtidos por Pianca *et al.* (2010) e Gramcianinov *et al.* (2023a). A preponderância de ressacas no setor S-SW deve-se ao relevo da costa e arredondamento de ressacas com direção similar no gráfico, além, claro, da quantidade elevada de ciclones que se formam na região do Rio da Prata. Nota-se também uma quantidade elevada de ressacas de mediana leste e nordeste, sendo relacionadas com ciclones que atuam ao norte deste ponto de análise.

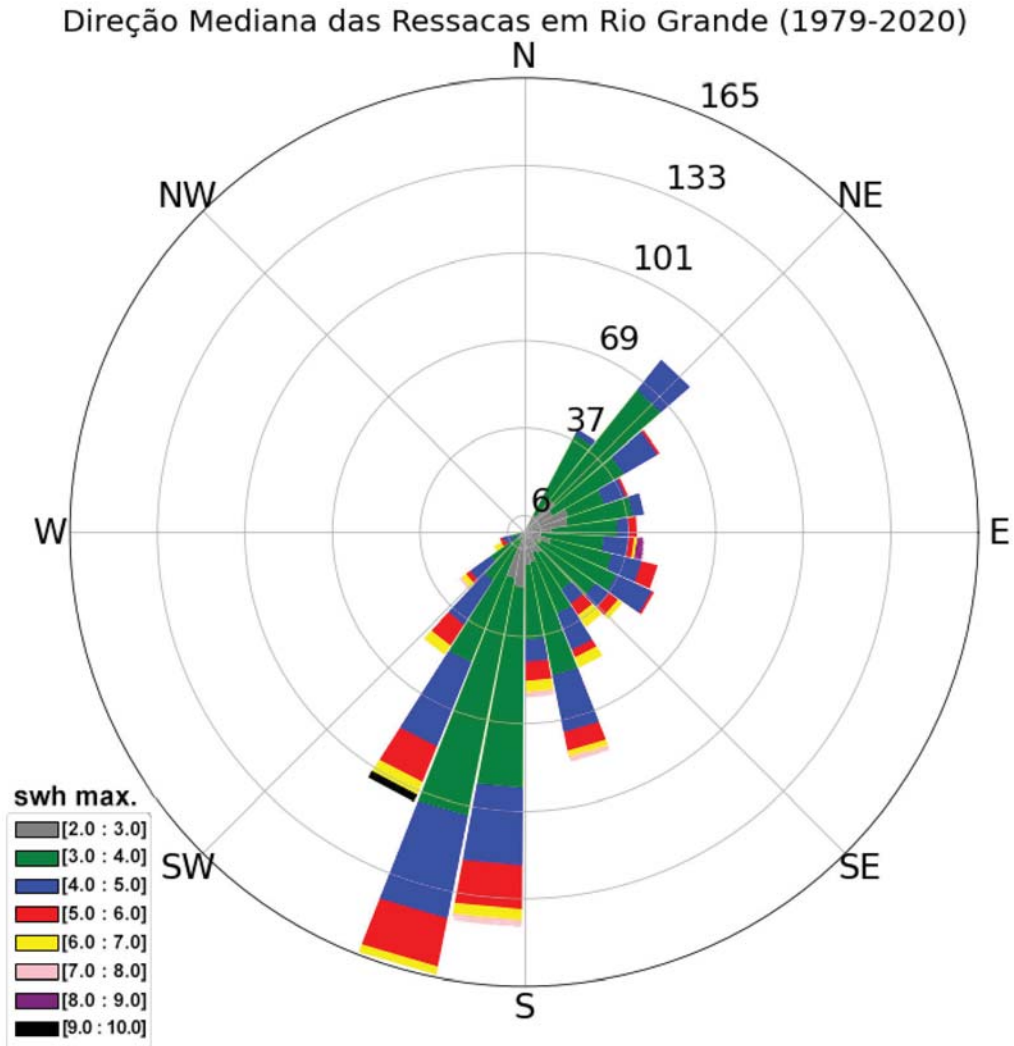


Figura 22 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

Em relação à altura, observa-se que quanto mais ao norte, menores as alturas máximas do swh, sendo que nenhuma ressaca entre 6 e 7 m de máxima foi registrada entre o Leste e o Norte. Porém, o segundo maior valor encontrado teve direção mediana de  $103^\circ$  (em roxo, na primeira coluna ao sul do Leste), com 8,23 m. Trata-se da ressaca que atingiu o Rio Grande do Sul em outubro de 2016. Uma ressaca ocorrida entre 16 e 20 de abril de 1999 registrou o maior valor do swh, com 9,24 m. A direção mediana foi de  $205^\circ$  e está apresentada no gráfico na cor preta. Estas duas ressacas serão abordadas com mais detalhes no próximo subcapítulo (4.1.5) e no capítulo sobre ciclones (5). As quatro ressacas com máxima entre 7 e 8 m tiveram direção mediana sul, entre  $164^\circ$  e  $229^\circ$ .

As ressacas com altura máxima de onda entre 2,5 e 3 m representaram 15,1% do total. Já a predominância vermelha no gráfico indica que 51,3% tiveram máxima entre 3 e 4 m. As máximas entre 4 a 5 m representaram 21,9%, de 5 a 6 m de 8,3%, de 6 a 7 m de 3,0%, de 7 a 8 m de 0,3% e acima de 9 m apenas 0,1%.

A Figura 23 apresenta os dados de direção mediana sazonais. No verão, estação com menos ressacas, a predominância foi de sul/sudeste e de nordeste em menor escala. Nota-se a baixa quantidade de ressacas acima de 5 m do swh máximo, com uma ressaca que atingiu 7 m em 1979. Durante o outono, as direções mais evidentes foram sudoeste e sudeste, com algumas poucas ressacas de leste e nordeste e um foco mais alto próximo de 180°. Houve uma similaridade com as direções do inverno mas em menor quantidade. A ressaca com maior elevação entre todos os registros aparece na cor preta, como mencionado anteriormente. Os dados do inverno indicam muitas ressacas oriundas de sul, entre sudoeste e sudeste, e um pequeno foco mais ao nordeste, inclusive na cor azul. Com uma frequência elevada acima de 4 m, foi nesta estação que as ressacas intensas aconteceram com mais frequência. As direções medianas da primavera mostraram mais casos entre o sudeste e nordeste, se diferenciando levemente do inverno e outono. Porém, em termos de elevação máxima das ondas, as mais intensas tiveram direção mais ao sul.

A porcentagem por swh máximo no verão foi a seguinte: de 2,5 a 3 m de 24,4%, 3 a 4 m de 61,1%, 4 a 5 m de 10,4%, 5 a 6 m de 3,6% e de 7 a 8 m de 0,5%. Alturas não mencionadas tiveram 0%. No outono, ressacas entre 2,5 e 3 m de máxima representaram 13,94% do total, 3 a 4 m foram 50,51%, 4 a 5 m foram 23,00%, 5 a 6 m foram 9,06%, 6 a 7 m foram 2,79%, 7 a 8 m foram 0,35% e acima de 9 foram 0,35%. Dados do inverno: de 2,5 a 3 m a porcentagem foi de 11,78%, 3 a 4 m de 44,47%, 4 a 5 m de 25,96%, 5 a 6 de 12,02%, 6 a 7 de 5,29% e de 7 a 8 m de 0,48%. Durante a primavera: de 2,5 a 3 m teve porcentagem de 18,69%, 3 a 4 m de 53,03%, 4 a 5 m de 20,45%, 5 a 6 m de 5,30%, 6 a 7 m de 2,27% e de 8 a 9 m de 0,26%.

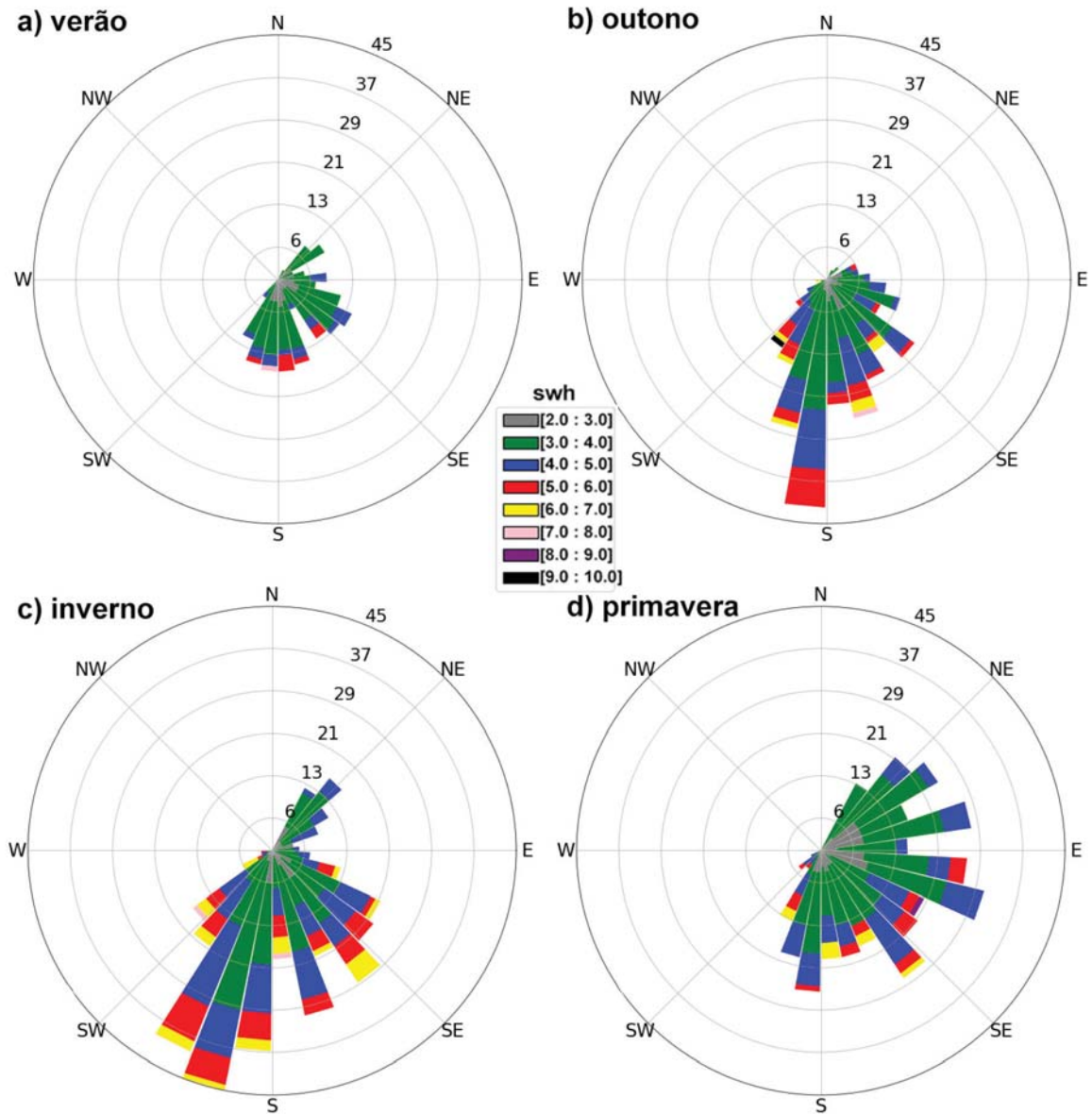


Figura 23 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Rio Grande entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

#### 4.1.5 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS

Os eventos de ressaca mais severos foram selecionados através do 90º percentil do valor máximo do swh de todos os eventos no período analisado, ou seja, 10% dos casos mais intensos em cada ponto analisado. No ponto de Rio Grande, as 124 ressacas, de um total de 1245, são apresentadas na Tabela 2, em Anexos. Essa amostra foi selecionada em virtude da grande quantidade de dados e ressacas, motivada a fazer uma análise mais aprofundada de casos extremos.

O furacão “Catarina”, ocorrido em março de 2004, não gerou uma ressaca de forte intensidade, tendo impactos mais localizados pelo vento. O swH máximo foi de 2,80 m, no dia 28 de março. Porém, o período de elevação acima de 2,5 m foi de 17 horas, sendo desconsiderado esse evento da lista final de ressacas por não ter atingido 24 horas. Também não foram verificadas alterações consideráveis nos outros três pontos de análise na costa brasileira.

Em relação ao tempo de duração das ressacas, duas tiveram mais de 300 horas. Uma ocorreu entre setembro e outubro de 2001, com swH máximo de 5,39 m e 351 horas de duração (01b31). Foi um período de longa duração acima do limiar de 2,5 m estabelecido pela Marinha, relacionado com mais de um ciclone em sequência. A segunda foi registrada em setembro de 2007, com swH máximo de 5,63 m e duração de 349 horas (07b28). Outras 12 ressacas duraram mais de 200 horas, distribuídos da seguinte forma: 1990 (1), 1993 (1), 1997 (1), 1999 (1), 2002 (1), 2004 (1), 2006 (2), 2011 (1), 2016 (1), 2017 (1) e 2020 (1).

A direção mediana das ressacas apresentadas na Tabela 2 é semelhante ao gráfico de direções do inverno e outono (FIGURA 23). O período médio de onda oscilou, apresentando variações sem padrões claros. O mínimo foi de 7,4 segundos e máxima de 10,7 segundos. O vento máximo foi de 25,20 m s<sup>-1</sup> e o mínimo de 12,93 m s<sup>-1</sup>.

A Figura 24 ilustra a quantidade de ressacas mais intensas por mês. Foram 69 nos meses de inverno, 24 no outono e também na primavera e 7 durante o verão. Ou seja, isso significa que 55,6% das ressacas mais intensas ocorreram no inverno.

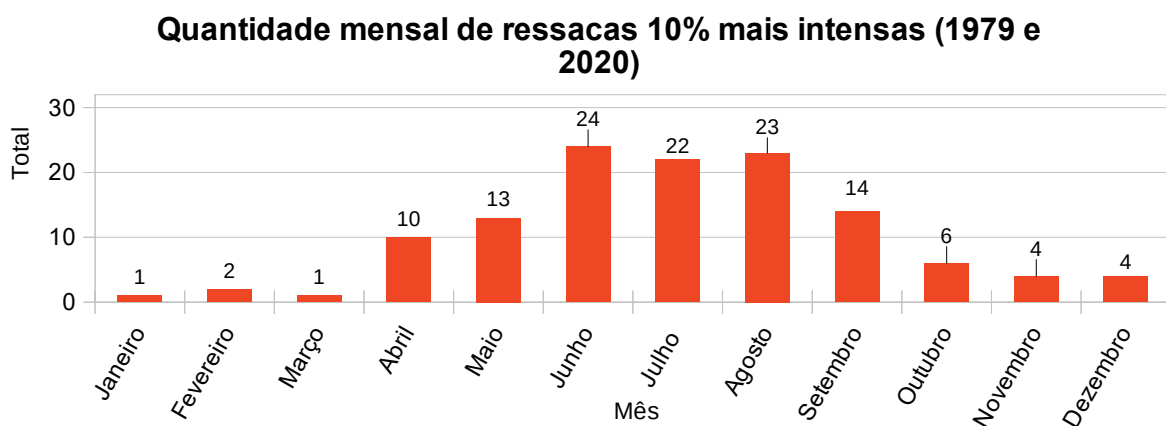


Figura 24 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Rio Grande por mês baseado no swH máximo.



A Figura 25 exibe quantas dessas ressacas ocorreram por ano. A média anual foi de 3. Os anos com mais registros foram 2016 (7) e 2008 (6). Este primeiro ano aparece em todos os gráficos já apresentados entre os anos mais intensos. No ano de 1999 foram 5 ressacas, sendo novamente um ano acima da média. Assim como nos gráficos de quantidade anual considerando todas as ressacas e média do swH, o período entre 2013 e 2015 apresentou poucos registros.

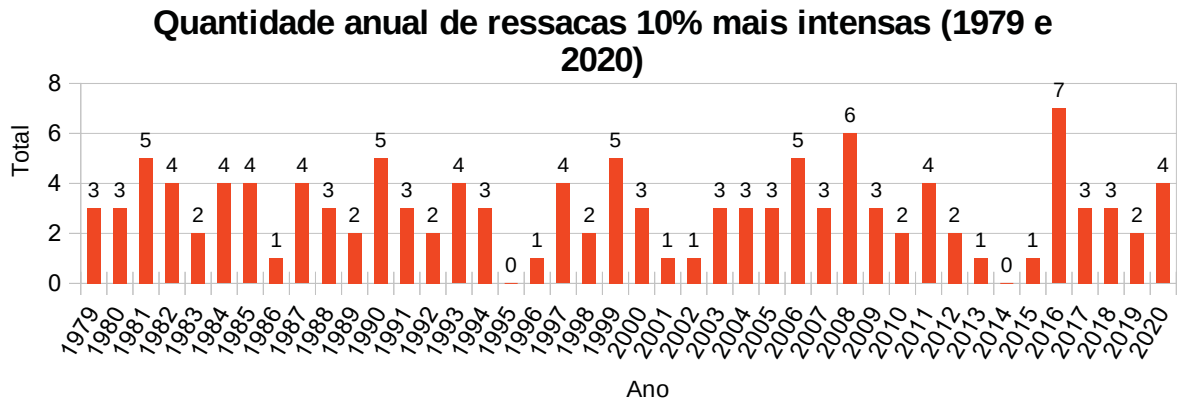


Figura 25 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Rio Grande por ano baseado no swH máximo.

## 4.2 PONTO 2 – ITAJAÍ

### 4.2.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL

A Figura 26 apresenta a quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Itajaí. As colunas vermelhas indicam a quantidade anual e a linha horizontal azul indica a média (17,5 ressacas por ano). O total de ressacas foi de 736, o que representa 59% do total de ressacas identificadas em Rio Grande.

Assim como no gráfico de Rio Grande (Figura 12), os anos próximos a 1998/1999 e 2010/2011 tiveram as maiores quantidades, com 23 ressacas. Porém, 2016 e 2017 não mostram essa máxima e se mantiveram na mesma média de anos anteriores e posteriores. Os anos com a menor quantidade foram 1985 (10), 1983 (12), 1988 (12) e 1989 (12). Os últimos anos do gráfico exibiram valores ao redor de 20 ressacas, com poucas variações.

O valor do coeficiente angular foi de 0,05, o que indica uma variação anual média de 0,05 ressacas. Assim, a tendência positiva foi de 1,52 ressacas entre 1993 a 2020.

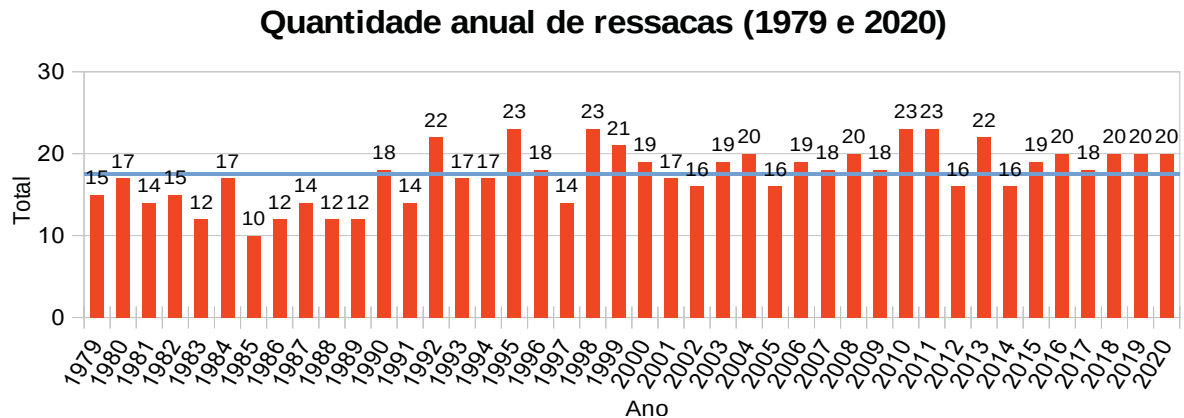


Figura 26 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Itajaí entre 1979-2020. A linha azul exibe a média anual.

A análise da quantidade sazonal de ressacas (FIGURA 27) indicou que 12,2% ocorreram no verão (90 ressacas), 24,9% no outono (183), 34,9% no inverno (257) e 28% na primavera (206). Com isso, a porcentagem no outono e inverno foi levemente mais elevada que em Rio Grande, e ligeiramente mais baixa no verão e na primavera. A média foi de 2,1 ressacas no verão, 4,3 no outono, 6,1 no inverno e 4,9 durante a primavera. Houve uma redução de 140 ressacas no inverno na comparação com Rio Grande, 173 na primavera, 100 no outono e 96 no verão.

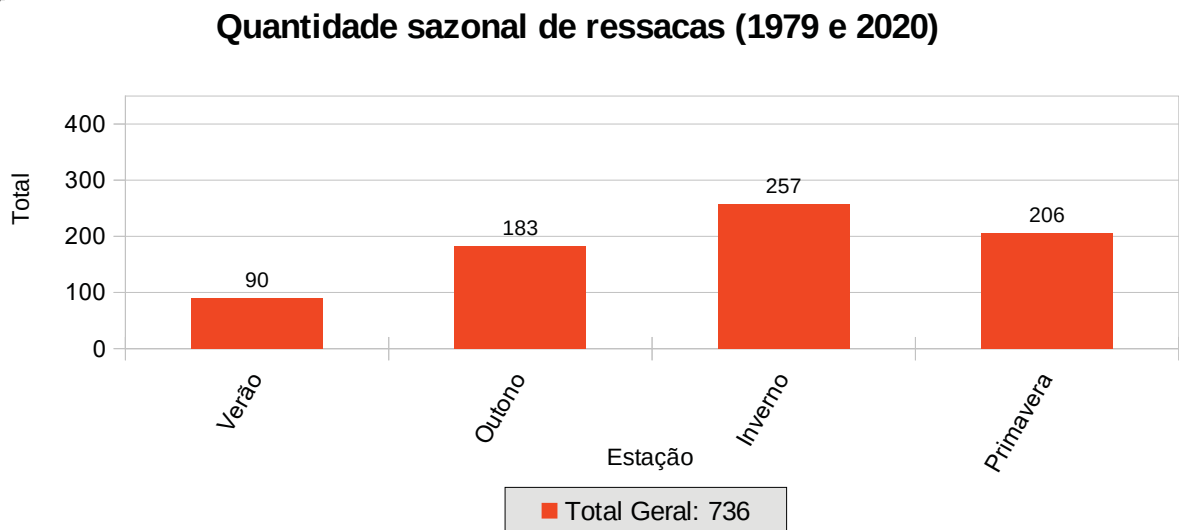


Figura 27 - Total sazonal de ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020.

Analisando a quantidade de ressacas ocorridas em cada mês durante os 42 anos (FIGURA 28), setembro foi o mês mais elevado, com 96, fato também registrado em Rio Grande. Em julho, foram 93 ressacas, seguido de maio (85) e junho (83). Diferentemente de Rio Grande, onde agosto teve a segunda maior quantidade, em Itajaí, este mês teve a quarta maior quantidade (81). Outubro (60) e novembro (50) haviam registrado média similar a maio em Rio Grande mas em Itajaí ficaram visivelmente abaixo. Como esperado, os meses de verão contaram menos ressacas que nas demais estações. A média foi de 61 casos por mês.

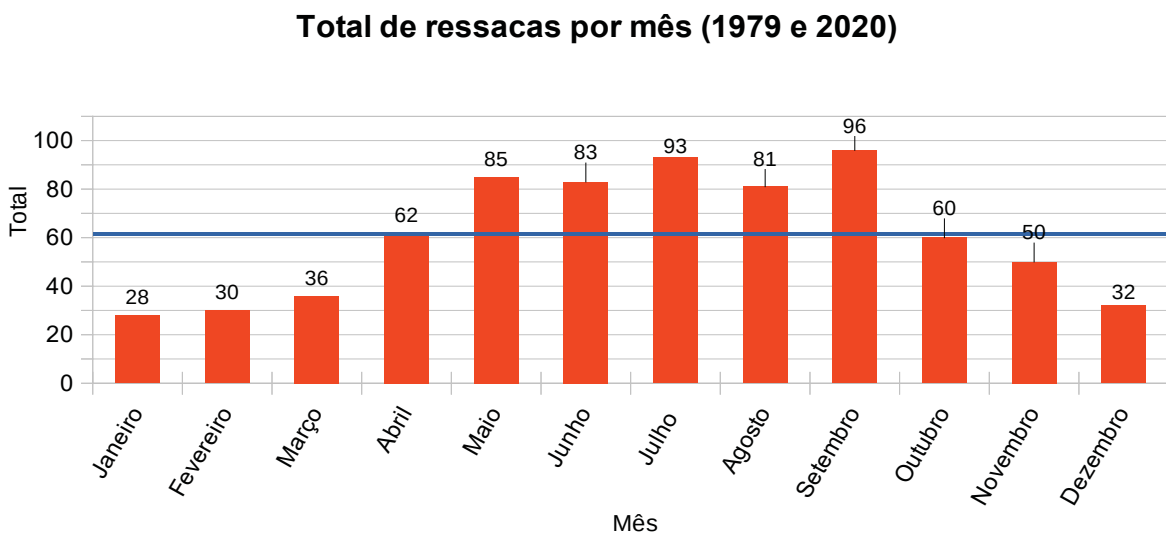


Figura 28 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Itajaí. A linha azul exhibe a média mensal.

#### 4.2.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS

A Figura 29 apresenta o total anual de horas com ressacas entre 1979 e 2020. O ano de 2010, marcado por um evento La Niña, registrou o maior número de horas, com 1.653, destacando-se significativamente em relação aos outros anos, assim como evidenciado na Figura 26, que mostra o total de ressacas. Esse também foi o ano com o maior número de registros em Rio Grande. Outros anos de destaque incluem 1995, com 1.423 horas, seguido por 1998 (1.364), 2011 (1.336) e 2009 (1.332).

Com isso, os anos com mais ressacas foram também os com mais horas de ressacas, com exceção de 2009. As menores quantidades ocorreram em 1985 (468 horas) e 1986 (584). O ano de 1984 não apresentou valores elevados em Itajaí como havia ocorrido em Rio Grande. Novamente, fica clara uma subestimação

anterior a 1992. O total de horas foi de 43094, o que representa 48% do total verificado no ponto 1.

### Total de horas por ano com ressacas

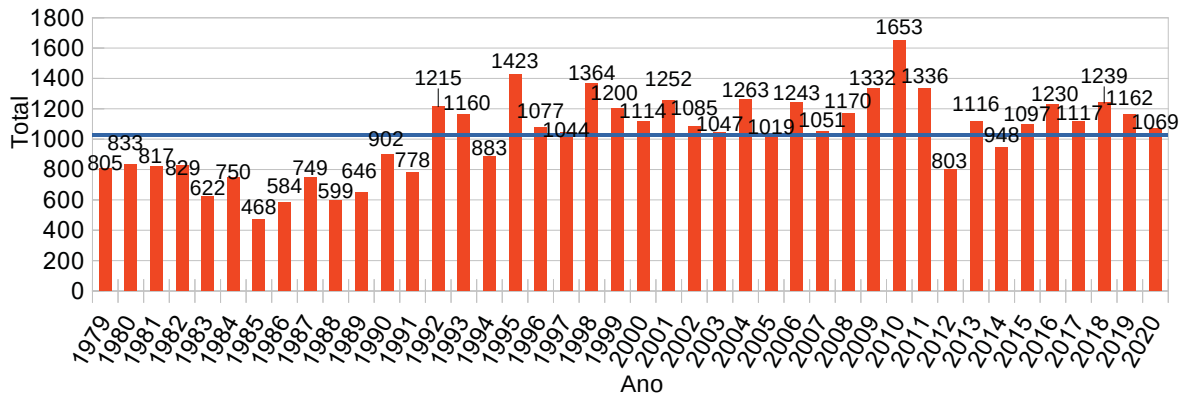


Figura 29 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Itajaí. A linha azul exibe a média anual.

Sazonalmente (FIGURA 30), o verão registrou 4055 horas no total (9,4%) e média anual de 96 horas, o outono registrou 11001 horas (25,5%) e média de 261,9, o inverno registrou 15727 horas (36,5%) e média de 374,5, e a primavera registrou 12311 horas (28,6%) e média de 293,1. Os dados mostraram variação anual semelhante ao gráfico de total de ressacas.

### Quantidade sazonal de horas com ressacas (1979 e 2020)

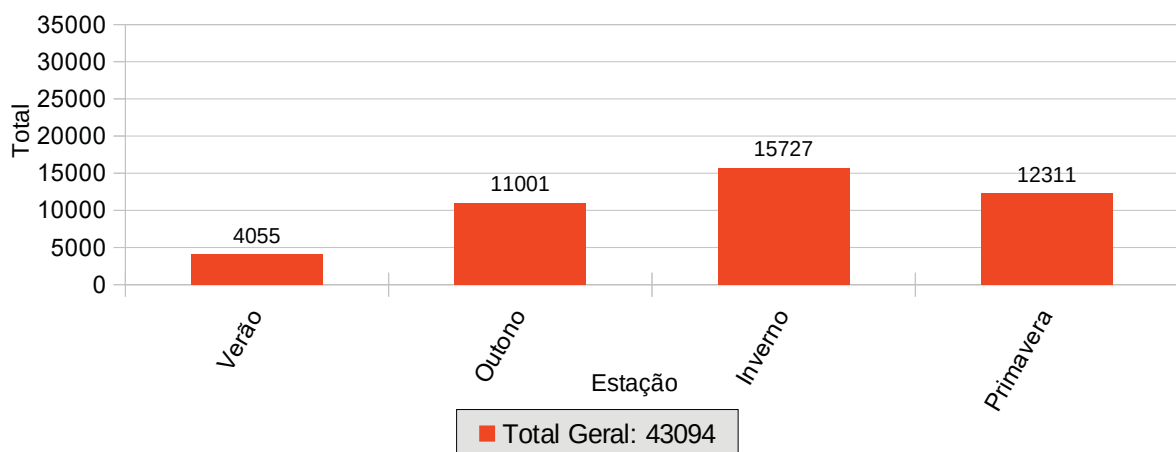


Figura 30 - Total sazonal de horas com ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020.

A análise mensal (FIGURA 31) mostrou que setembro também registrou mais horas com ressaca, como ocorreu em Rio Grande. O gráfico foi similar ao que mostra o total de ressacas por mês, da Figura 28.

### Horas com ressacas por mês (1979 e 2020)

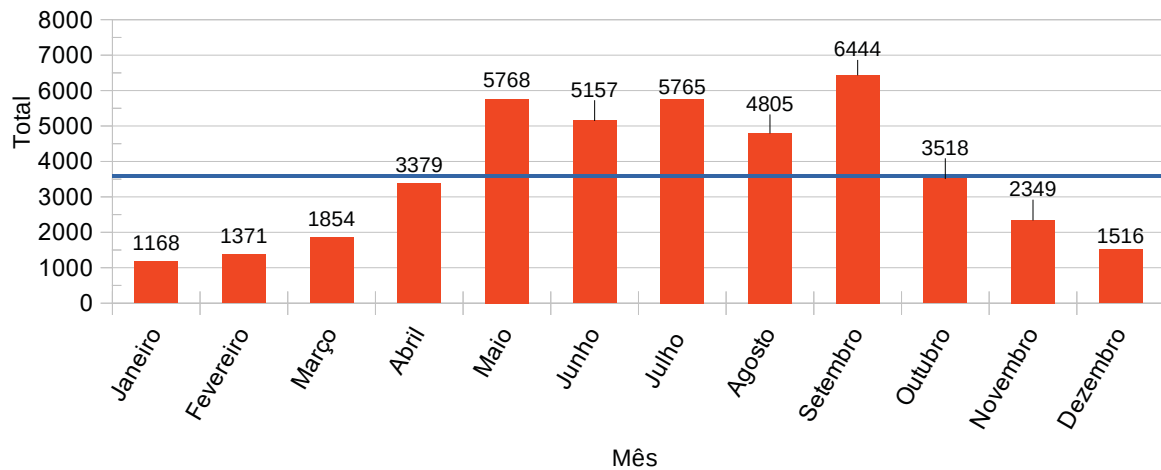


Figura 31 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Itajaí. A linha azul exibe a média mensal.

### 4.2.3 COMPORTAMENTO DO SWH EM ITAJAÍ

A média do swh considerando todos os anos em Itajaí foi de 3,05 m (linha azul), presente na Figura 32. Essa média ficou 0,07 m abaixo de Rio Grande (Figura 18). Os dados variam entre 2,88 m e 3,60 m. Após isso, há um período de queda com elevação em anos recentes, principalmente 2016, que fica evidente como ano atípico em todos os gráficos. A média em 1982 não foi mais alta que em anos próximos, como ocorreu em Rio Grande.

O maior valor médio foi verificado em 1985, com 3,60 m, mas este foi o ano com menos ressacas em Itajaí, fazendo com que a média geral se sobressaísse. O ano com menor valor foi 2012, com 2,84 m. Em Rio Grande, havia sido 2014, com 2,94 m. Ou seja: apesar de similares, os gráficos apresentam valores máximos e mínimos em anos próximos, mas nem sempre os mesmos.

### Média anual de swh das ressacas (m)

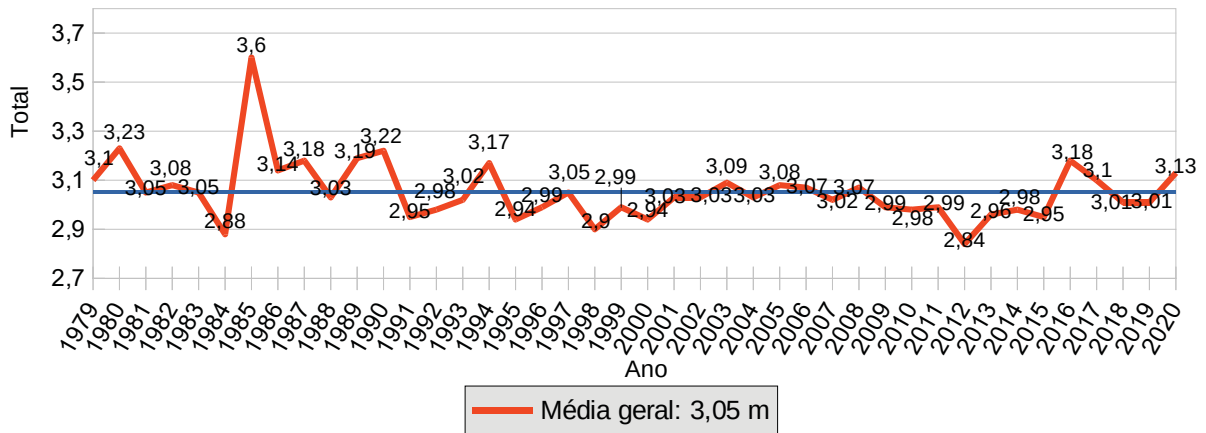


Figura 32 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Itajaí. A linha azul exhibe a média anual.

Os dados sazonais do swh mostram que a média geral no inverno foi a mais elevada (FIGURA 33), com 3,10 m. O outono aparece em segundo, com 3,06 m, seguido da primavera, com 2,93 m, e do verão, com 2,92 m. Assim como em Rio Grande, a primavera registrou mais ressacas que o outono mas teve um swh médio menor.

### Swh sazonal média das ressacas (m)

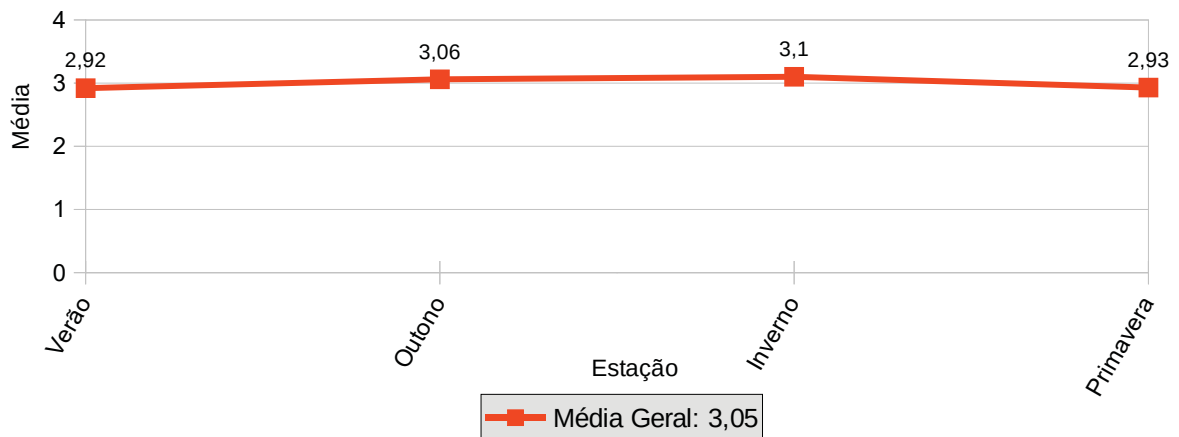


Figura 33 - Média sazonal do swh em Itajaí entre 1979 e 2020.

Considerando que a quantidade de ressacas, mesmo no verão, é mais significativa em Rio Grande, os dados sazonais de Itajaí, Santos e Cabo Frio são mais sujeitos a variações extremas causadas por poucas ressacas em um

determinado ano. Durante o inverno, a maioria dos anos teve média acima de 3 m, com alguns picos acima e abaixo disso. O outono de 2004, estação do furacão Catarina, não apresentou média acima dos demais anos próximos (mas a quantidade de ressacas e de horas de ressacas esteve entre as mais elevadas nesta estação).

Analisando a média do swh por mês (FIGURA 34), observa-se uma maior média em agosto (3,15 m), seguindo por maio (3,12 m), julho (3,07 m) e abril (3,06 m). Novamente, apesar da maior quantidade na primavera, o outono tem médias ligeiramente mais elevadas (com exceção de março nesta análise mensal). Portanto, o período entre abril e setembro apresenta as maiores médias de altura significativa de onda em Itajaí.

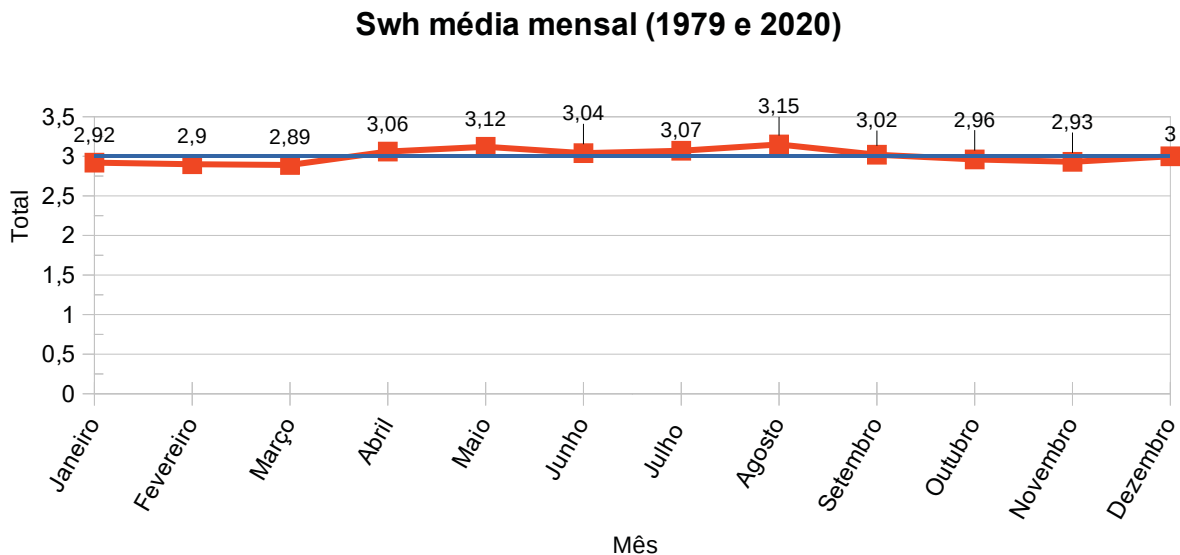


Figura 34 - Média do swH em cada mês do ano no ponto da boia Itajaí (metros). A linha azul exibe a média mensal.

#### 4.2.4 ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS

A figura 35 exibe o gráfico de direção mediana de ondas. Os pontos cardeais são representados pelas letras, os círculos polares exibem números indicando a quantidade aproximada de ressacas naquela direção e as legendas mostram cores representando o swH máximo de cada ressaca. Os dados indicam predominância entre sudoeste e sul e, em menor quantidade, entre sul e sudeste, estando também de acordo com resultados verificados por Pianca *et al.* (2010). Em comparação com Rio Grande, na costa gaúcha foi verificado uma quantidade de ressacas de direção

mediana leste/nordeste mais elevada que em Itajaí, fato ocorrido em virtude da menor quantidade de ciclones ao norte de Santa Catarina em comparação com Rio Grande.

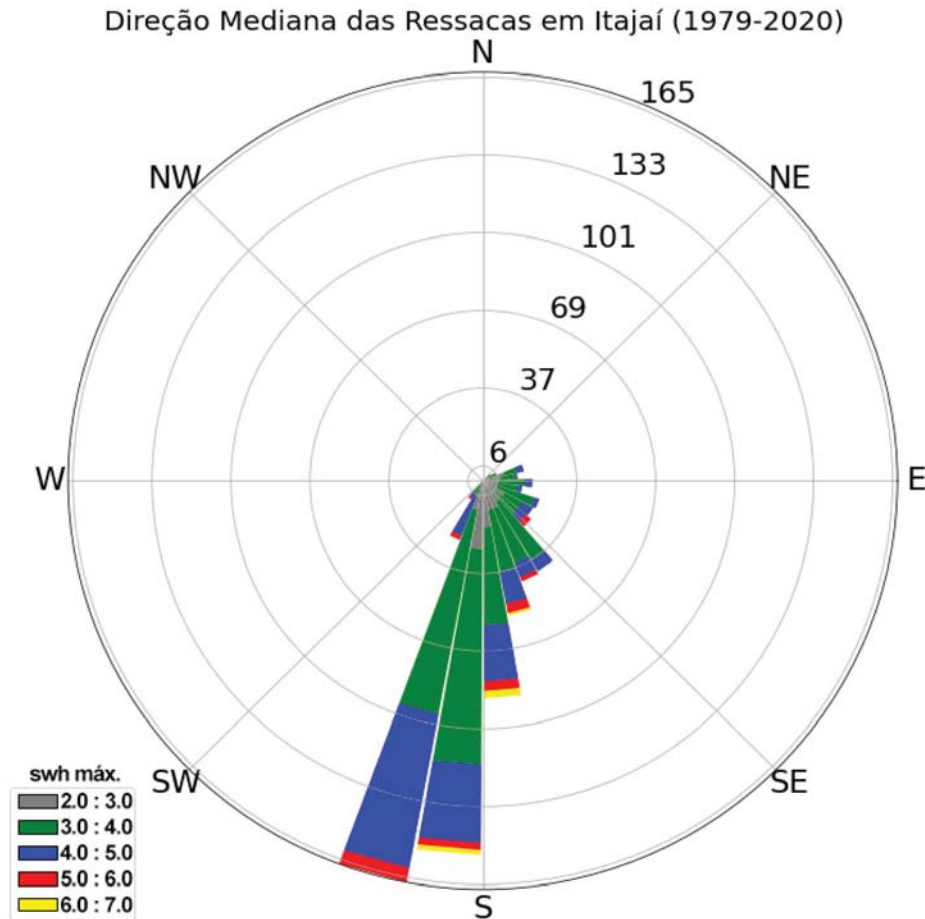


Figura 35 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. AS cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

Analisando o swh máximo das ressacas, os maiores valores tiveram direção oriunda de sul. Seis tiveram máxima entre 6 e 7 m, e a direção de todas elas esteve entre  $159^\circ$  e  $187^\circ$ . Outras 25 ressacas tiveram máxima entre 5 e 6 m, com direção mediana entre  $130^\circ$  e  $215^\circ$ . Ou seja, nenhuma ressaca acima de 5 m teve direção leste/nordeste. Ressacas de leste e nordeste têm predominância de 3 a 4 m. A ressaca com maior elevação teve 6,96 m e direção de  $159^\circ$ , em 1987. A máxima em Rio Grande nesta mesma ressaca foi de 5,25 m e direção mediana de  $145^\circ$ .

As ressacas com altura máxima entre 2,5 e 3 m representaram 19,6% do total. A maior constância de vermelho (3 a 4 m) e azul (4 a 5 m) no gráfico indicam



uma porcentagem de 51,3% e 24,9%, respectivamente. Máximas entre 5 e 6 m equivaleram a 3,4% e acima de 6 m a 0,8%.

A Figura 36 mostra os dados sazonais de direção mediana em Itajaí. Durante o verão, o predomínio foi de ressacas de sul, com apenas 3 superando os 5 m do swh máximo. No outono, a direção mais comum foi sul/sudoeste, com sudeste em menor escala, e 2 ressacas atingiram máxima acima de 6 m. Como em Rio Grande, houve similaridade com o gráfico do inverno. Verifica-se um aumento de quantidade total em relação ao verão e de ressacas acima de 3 a 4 m nesta estação.

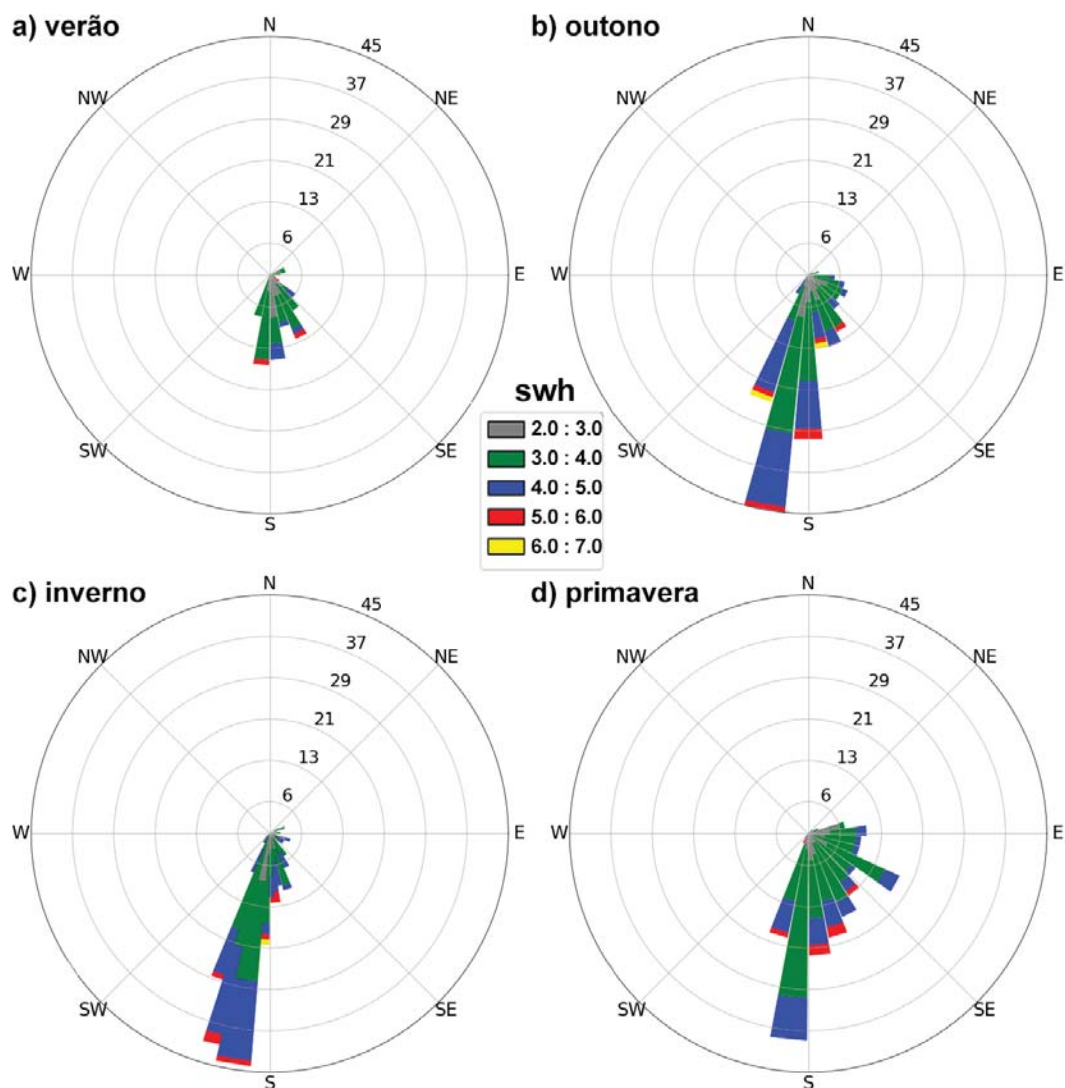


Figura 36 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Itajaí entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardinais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

O gráfico referente ao inverno apresenta uma influência semelhante das ressacas provenientes do sul e sudoeste, porém com ainda menos ocorrências de outras direções em comparação ao outono, devido à maior quantidade de ressacas do sul. Além disso, observa-se um aumento significativo no número de eventos com alturas superiores a 5 e 6 metros. Na primavera, os dados indicam um crescimento nas ressacas oriundas do sudeste e leste, embora o predomínio das ressacas do sul ainda se mantenha.

Comparando com Rio Grande (Figura 23), o gráfico do verão foi semelhante nas direções medianas, o outono e o inverno apresentaram menos ressacas de sudeste/leste/nordeste em Itajaí, e a primavera indicou também um deslocamento médio para sudeste/leste.

A porcentagem por swh máximo no verão foi: 2,5 a 3 m: 32,2%, 3 a 4 m: 56,7%, 4 a 5 m: 7,8% e 5 a 6 m: 3,3%. Valores não mencionados tiveram 0%. No outono: 2,5 a 3 m: 20,8%, 3 a 4 m: 45,9%, 4 a 5 m: 28,9%, 5 a 6 m: 3,3% e 6 a 7 m: 1,1%. Durante o inverno: 2,5 a 3 m: 16,3%, 3 a 4 m: 46,7%, 4 a 5 m: 31,9%, 5 a 6 m: 3,5% e 6 a 7 m: 1,6%. Na primavera: 2,5 a 3 m: 18%, 3 a 4 m: 60,2%, 4 a 5 m: 18,4% e 5 a 6 m: 3,4%. Como já observado, apesar da maior quantidade de ressacas na primavera do que no outono, esta última estação mencionada tende a ter eventos de maior swh.

#### **4.2.5 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS**

O filtro de 10% de ressacas mais severas resultou em 73 ressacas. A Tabela 3 apresenta as informações completas. O extrato mostra 6 ressacas acima de 6 m do swh máximo, 25 acima de 5 m e 42 acima de 4 m. Em comparação, o filtro de 10% gerou 124 ressacas em Rio Grande, todas acima de 5 m.

Em relação às ressacas de maior tempo de duração, duas tiveram mais de 200 horas. Uma ocorreu em setembro de 1998, com 222 horas e swh máximo de 4,06 m. A outra, entre setembro e outubro de 2009, com 214 horas e máxima de 3,85 m. Outras 44 ressacas tiveram mais de 100 horas de duração.

A direção mediana das ressacas apresentadas na Tabela 3 foi bastante similar ao gráfico do inverno (Figura 36). O período médio de ondas teve variação entre as ressacas, com a maior média em 10,7 e a menor em 7,9 segundos. O vento máximo foi de 21,58 m s<sup>-1</sup> e o mínimo de 13,47 m s<sup>-1</sup>.

Analisando a quantidade de ressacas mais intensas ocorridas em cada mês (Figura 37), 35 ocorreram nos meses de inverno, 17 na primavera, 16 no outono e cinco no verão, com julho sendo o mês com mais registros (15). As ressacas mais intensas ocorreram em 48% dos casos no inverno.

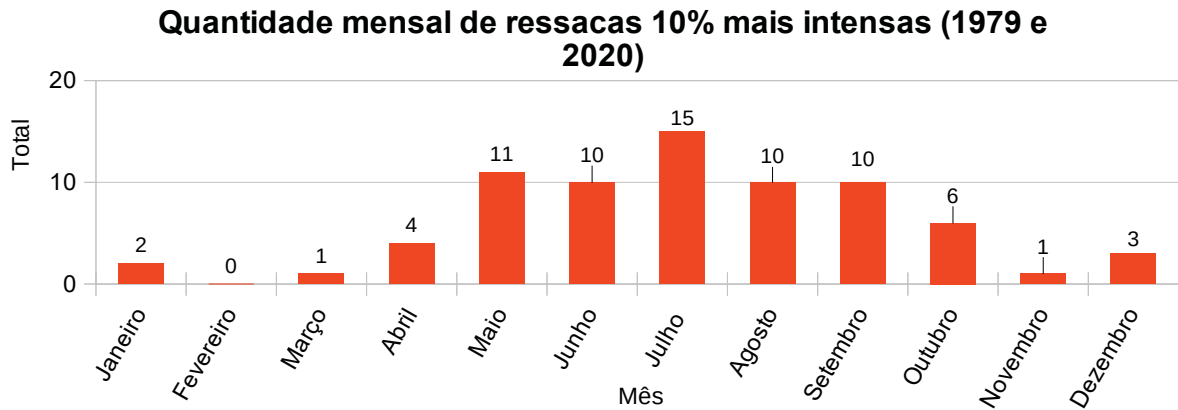


Figura 37 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Itajaí por mês baseado no swH máximo.

A Figura 38 exibe a quantidade destas ressacas por ano durante o período analisado. A média anual foi de 1,7 casos. Os anos com mais ressacas foram 1985, 1990 e 2016 (neste ano, assim como em Rio Grande), cada uma com 5. O ano de 1998 registrou 23 ressacas no total, mas zero delas esteve na amostra de 10%. Ao contrário, 1985 teve 10 ressacas no total e cinco estiveram nas mais intensas. O período entre 1999 e 2001 também obteve marcas de destaque.

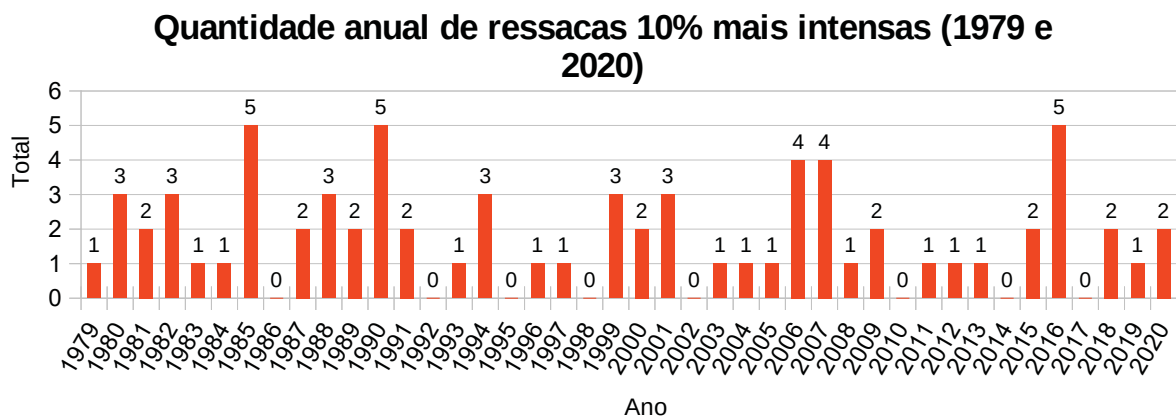


Figura 38 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Itajaí por ano baseado no swH máximo.

### 4.3 PONTO 3 – SANTOS

#### 4.3.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL

Os dados de Santos (Figura 39) mostram que o total de ressacas foi de 770, 34 a mais do que em Itajaí (Figura 26), com os anos de máximas tendo valores similares (valor que se refere a um evento quantificado com base na metodologia, que não necessariamente ocorreu na costa). A distância entre as coordenadas das duas é de algumas centenas de quilômetros, o que fez com que os dados fossem relativamente similares em alguns casos. A máxima em Santos ocorreu em 2007, com 24 ressacas, seguido de 2004, 2008 e 2019, com 23. A média anual foi de 18,3 (linha azul). O ano com menos ressacas foi 1983, com 9, e nos últimos 20 anos, 2005, com 17. Como ocorreu em Itajaí, o ano de 2016 apresentou uma leve elevação a anos próximos, mas não ao ponto de se tornar o ano com mais ressacas.

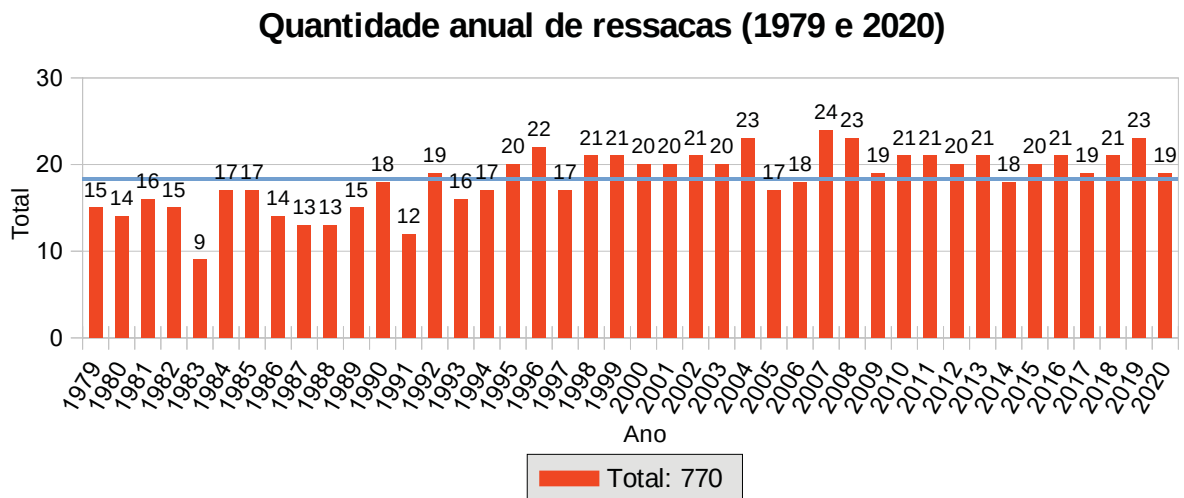


Figura 39 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Santos entre 1979-2020. A linha azul exibe a média anual.

O valor do coeficiente angular foi de 0,06, o que indica uma variação anual média de 0,06 ressacas. Dessa forma, a tendência positiva foi de 1,95 ressacas entre 1993 e 2020.

Contabilizando as ressacas sazonalmente (Figura 40), 11,5% ocorreram no verão (89 ressacas), 24,3% no outono (187), 34,3% no inverno (264) e 29,9% na primavera (230). Os dados foram bastante similares a Itajaí mas houve uma elevação na primavera. Ocorreu uma ressaca a menos no verão, quatro a mais no outono, sete a mais no inverno e 24 a mais na primavera. A média foi de 2,2 ressacas anuais no verão, 4,5 no outono, 6,3 no inverno e 5,5 na primavera.

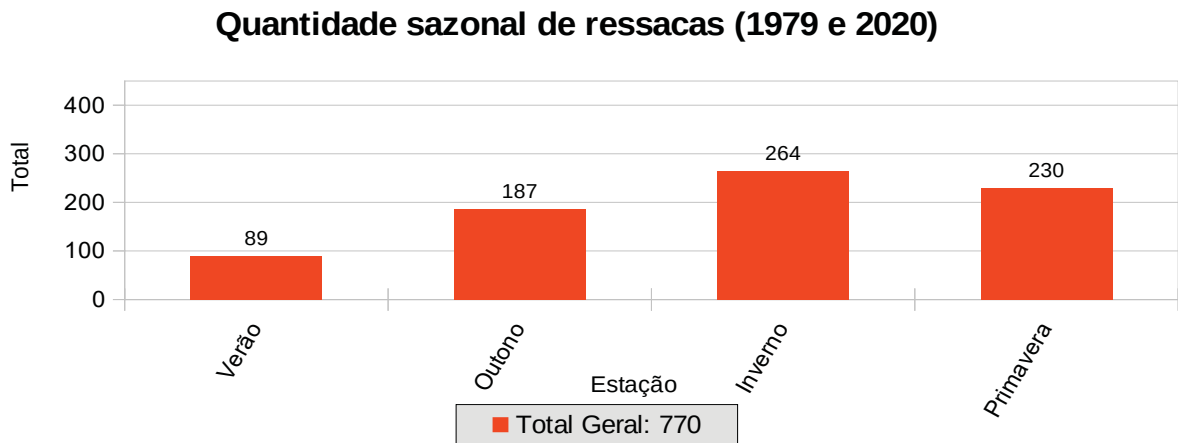


Figura 40 - Total sazonal de ressacas em Santos entre 1979 e 2020.

A primavera foi a estação com o maior aumento de ressacas comparando com Itajaí. Verificou-se nos dados apresentados na Figura 41, que exibe a quantidade de ressacas ocorridas em cada mês, uma maior diferença em relação aos dados de Itajaí no mês de setembro. Foram 18 ressacas a mais, totalizando 114. É evidente a similaridade entre os dados dos dois pontos nos demais meses, como julho, o segundo mês com mais eventos (95). A média foi de 64,2 ressacas.

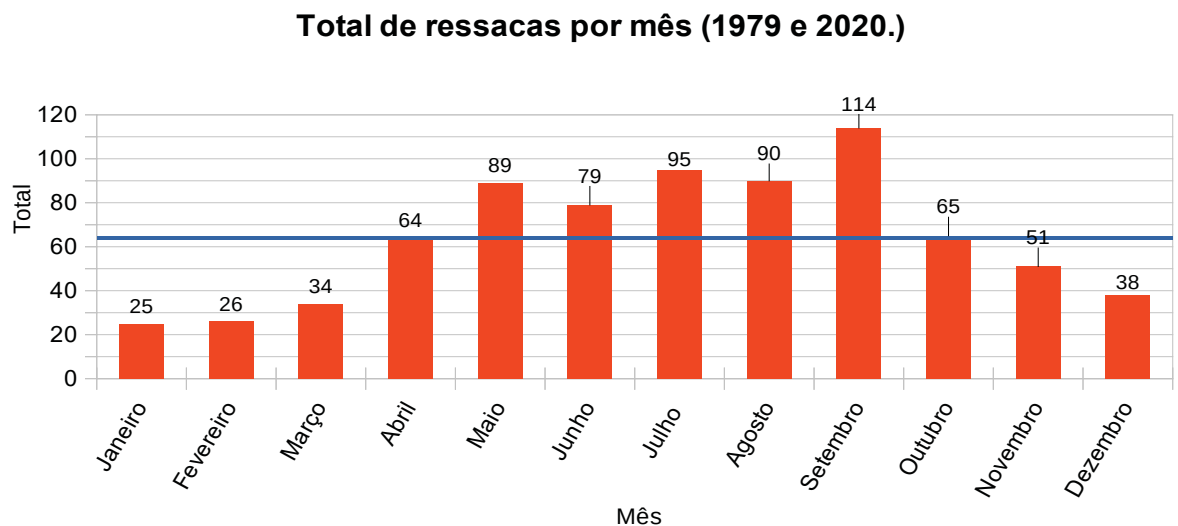


Figura 41 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Santos. A linha azul exibe a média mensal.

### 4.3.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS

A Figura 42 exibe a quantidade anual de horas com ressacas durante os anos analisados, em Santos. Assim como em Itajaí e Rio Grande, o ano de 2010 teve número bastante elevado, com 1603 horas. Em sequência, os anos de 2007 (1396 horas), 2011 (1359), 2016 (1326) e 2019 (1292), sendo quase todos esses anos recentes. Em 1995, foram 1423 horas com ressacas em Itajaí, mas em Santos este valor foi inferior, de 1213 horas. Os menores valores ocorreram em 1983 (530) e 1980 (694). O total geral foi de 44472 horas, com média de 1058 horas por ano. Esse valor foi pouco superior a Itajaí e a metade do verificado em Rio Grande.

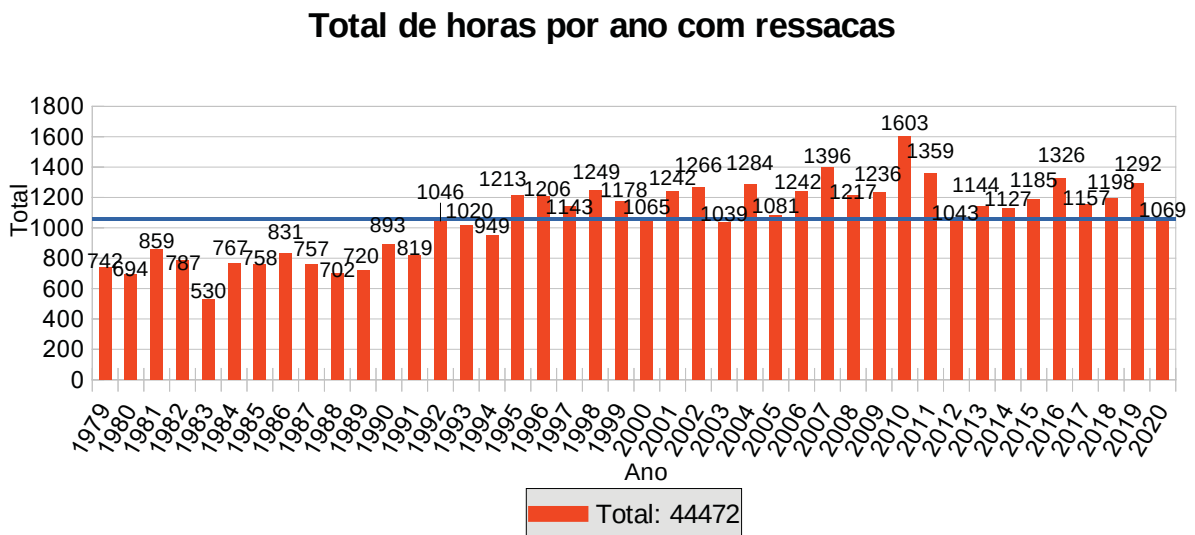


Figura 42 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Santos. A linha azul exibe a média anual.

Em termos sazonais (FIGURA 43), foram 3828 horas totais no verão (8,6% do total) e média anual de 91 horas, 10522 horas no outono (23,7%) e média de 250,5, 15934 horas no inverno (35,8%) e média de 379,9 e 14188 horas na primavera (31,9%) e média de 337,8 horas. Analisando os dados por estação ano a ano em Santos, o verão foi similar a Itajaí. No outono, os anos com mais horas de ressacas foram os mesmos de Itajaí, mas menos elevados em comparação aos outros anos.

### Quantidade sazonal de horas com ressacas (1979 e 2020)

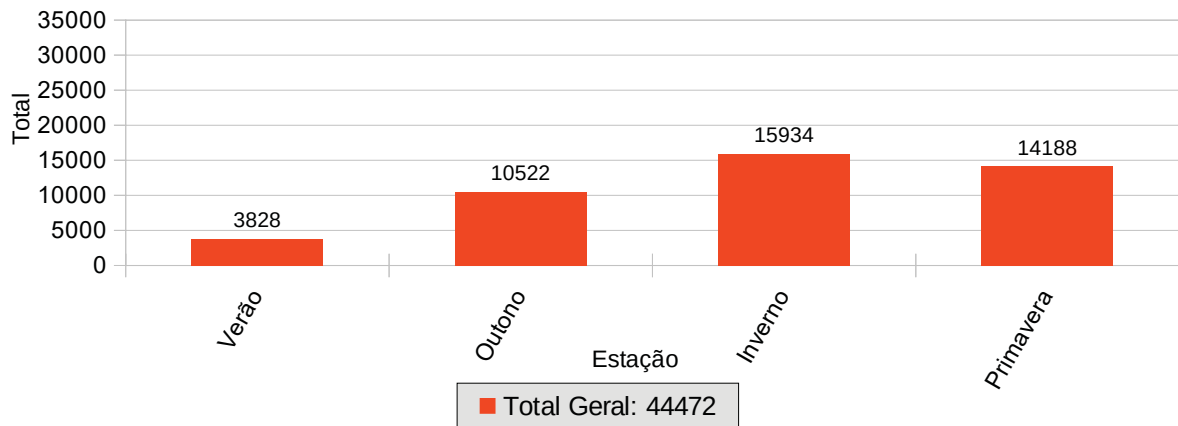


Figura 43 - Total sazonal de horas com ressacas em Santos entre 1979 e 2020.

Os gráficos da estação nos dois pontos até apresentam similaridades entre anos de pico positivo e negativo, mas a quantidade de horas em Santos é mais elevada na maioria destes anos. A maior diferença ocorreu em 2007, com 477 horas em Santos e 224 em Itajaí. O ano com mais horas na primavera em Santos ocorreu em 2001, com 574.

A Figura 44 apresenta a quantidade de horas separadas por mês. O gráfico apresenta os mesmos máximos e mínimos que o gráfico da quantidade de ressacas por mês (Figura 39). Em comparação com a quantidade mensal de Itajaí, os meses com menos horas totais em Santos foram janeiro (-183 horas), fevereiro (-220), março (-262), abril (-3), maio (-214), junho (-274) e julho (-193), e com mais horas foram agosto (+664), setembro (+1061), outubro (+391), novembro (+425) e dezembro (+176). Ou seja, o primeiro semestre foi mais elevado em Itajaí do que em Santos e no segundo semestre ocorreu o contrário (com exceção de julho).

### Horas com ressacas por mês (1979 e 2020)

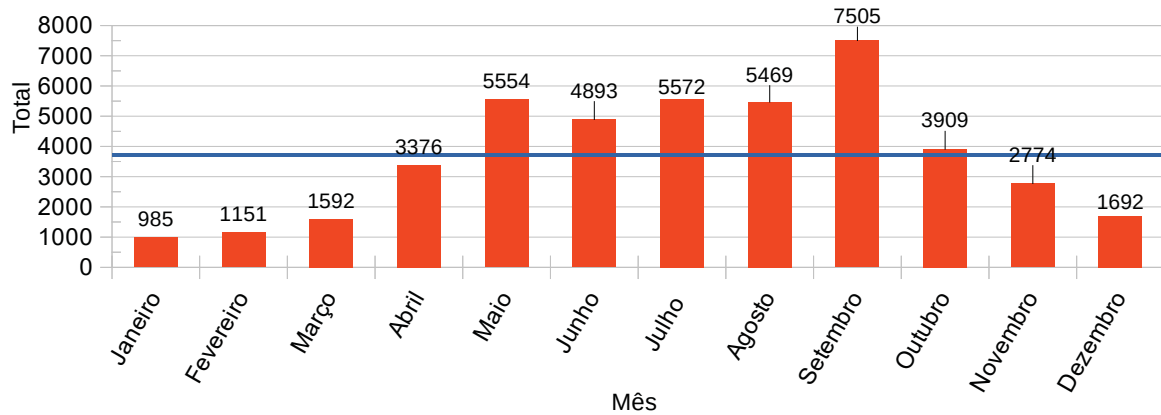


Figura 44 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Santos. A linha azul exibe a média mensal.

### 4.3.3 COMPORTAMENTO DO SWH EM SANTOS

A média do swh em Santos, considerando todos os anos, foi de 2,96 m (FIGURA 45). A média máxima e mínima foi de 3,09 m (em 1997) e 2,81 m (em 2012), respectivamente. Houve altos e baixos em Santos do que no litoral catarinense, principalmente na década de 2000. Novamente, deve-se comentar que anos com poucas ressacas podem elevar a média. Os dados dos últimos 20 anos demonstram ser menos elevados do que o período anterior.

### Média anual de swh das ressacas (m)

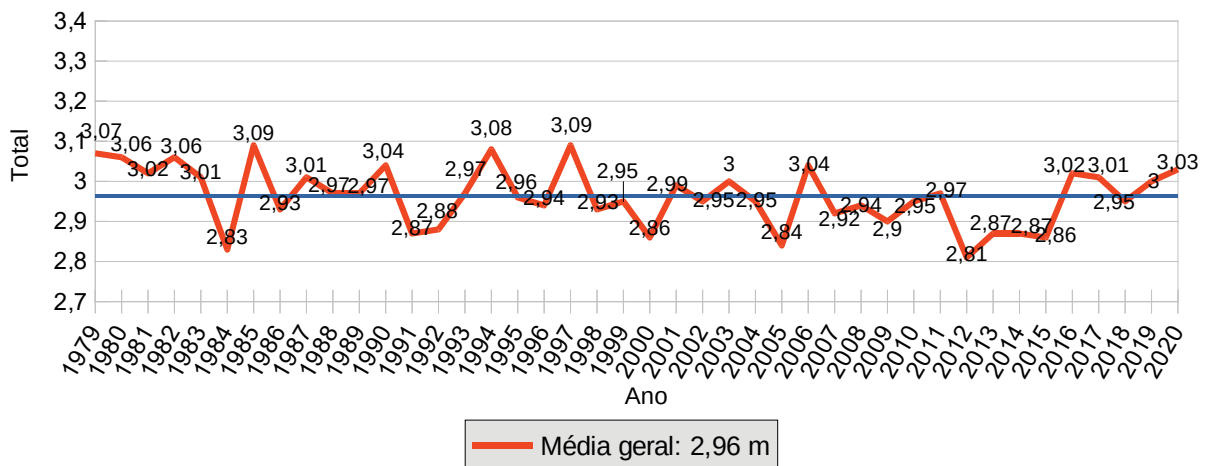


Figura 45 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Santos. A linha azul exibe a média anual.



Na análise sazonal do swh (FIGURA 46), o verão teve média geral durante as ressacas de 2,84 m, o outono de 2,99 m, o inverno de 3,01 m e a primavera de 2,90 m. Novamente, o outono teve média consideravelmente maior que a primavera e aproximou-se da média do inverno.

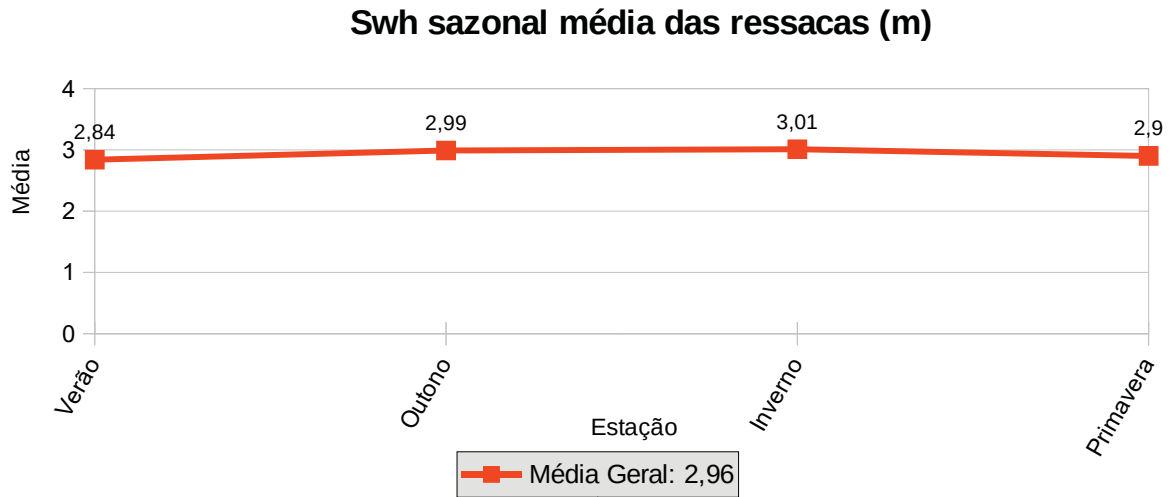


Figura 46 - Média sazonal do swh em Santos entre 1979 e 2020.

As médias mensais (FIGURA 47) mostram maior elevação em maio (3,04 m), junho e julho (3,02 m) e agosto (3,00 m), e as menores no verão. Setembro não teve média tão elevada quanto os meses do inverno (2,92 m), apesar da maior quantidade de ressacas. Todas as médias são mais baixas que em Rio Grande e Itajaí.

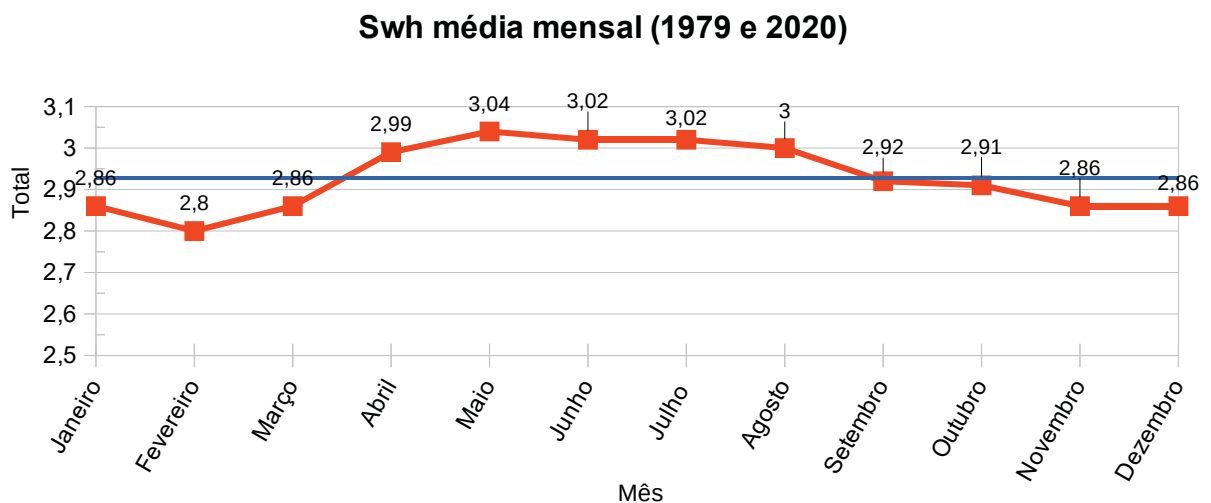


Figura 47 - Média do swh em cada mês do ano no ponto da boia Santos (metros). A linha azul exhibe a média mensal.

#### 4.3.4 ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS

A direção mediana de ondas em Santos (FIGURA 48) mostrou uma predominância de sul, sudeste e sudoeste. Em comparação com Itajaí, a quantidade de ressacas com swh máximo acima de 4 m diminuiu. Porém, há um aumento de ressacas de leste/nordeste, que geralmente atingem até 4 m de máxima. Foram 73 ressacas entre 0° e 90°, cerca de 10% do total de Santos, e a altura máxima nestes eventos foi de 3,97 m. Deste total, 40 ressacas ocorreram em setembro e outubro, cerca de 55%.

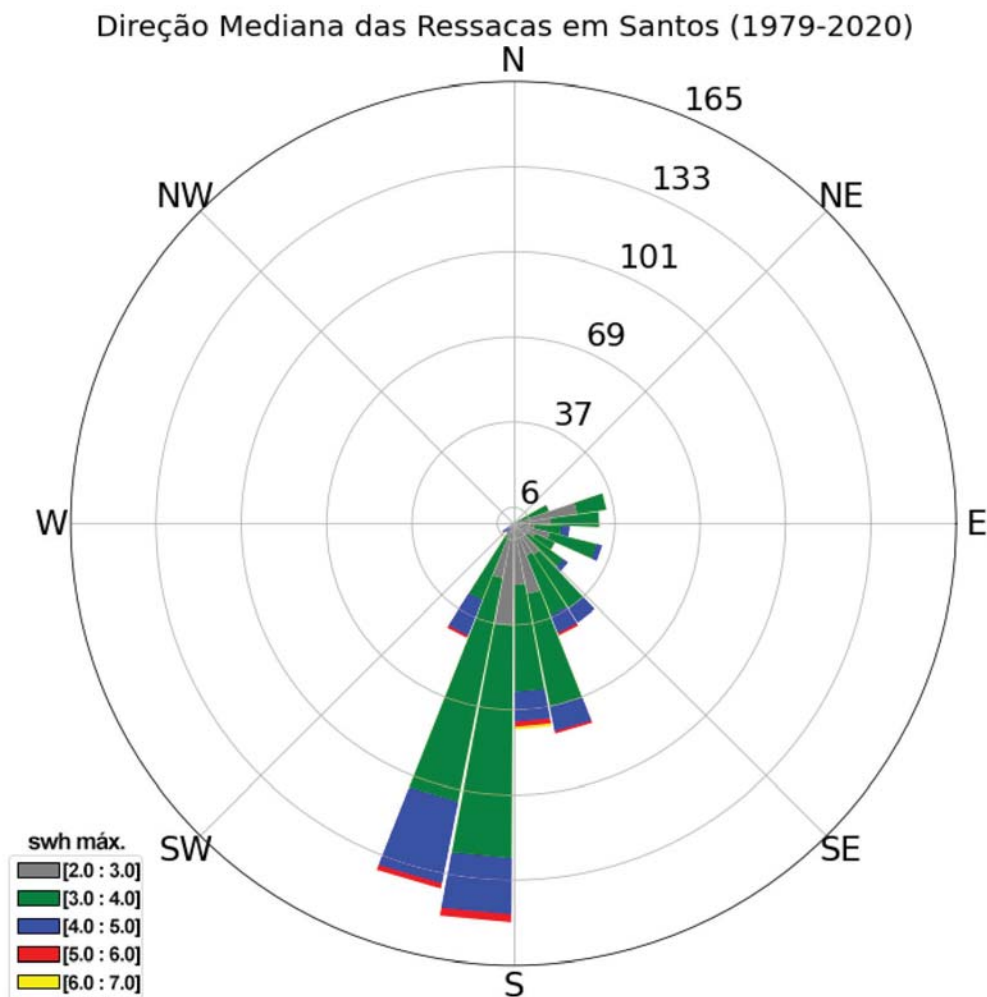


Figura 48 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

A ressaca com maior swh máximo em Santos, ocorrida em 1987, está presente no gráfico na cor amarela. A direção mediana foi de  $175^\circ$ . As ressacas que atingiram máxima acima de 5 m tiveram direção mediana entre  $148^\circ$  e  $210^\circ$ , apresentadas no gráfico na cor vermelha. Ressacas com altura máxima entre 2,5 e 3 m representaram 28,3%, entre 3 e 4 m de 55,7%, entre 4 e 5 m de 14,6%, entre 5 e 6 m de 1,3% e acima de 6 m 0,1%.

A Figura 49 exibe os dados de direção mediana de ondas em cada estação do ano de Santos no período de análise. O predomínio durante o verão foi de sul, bastante similar a Itajaí. Apenas quatro eventos superaram os 4 m de altura máxima.

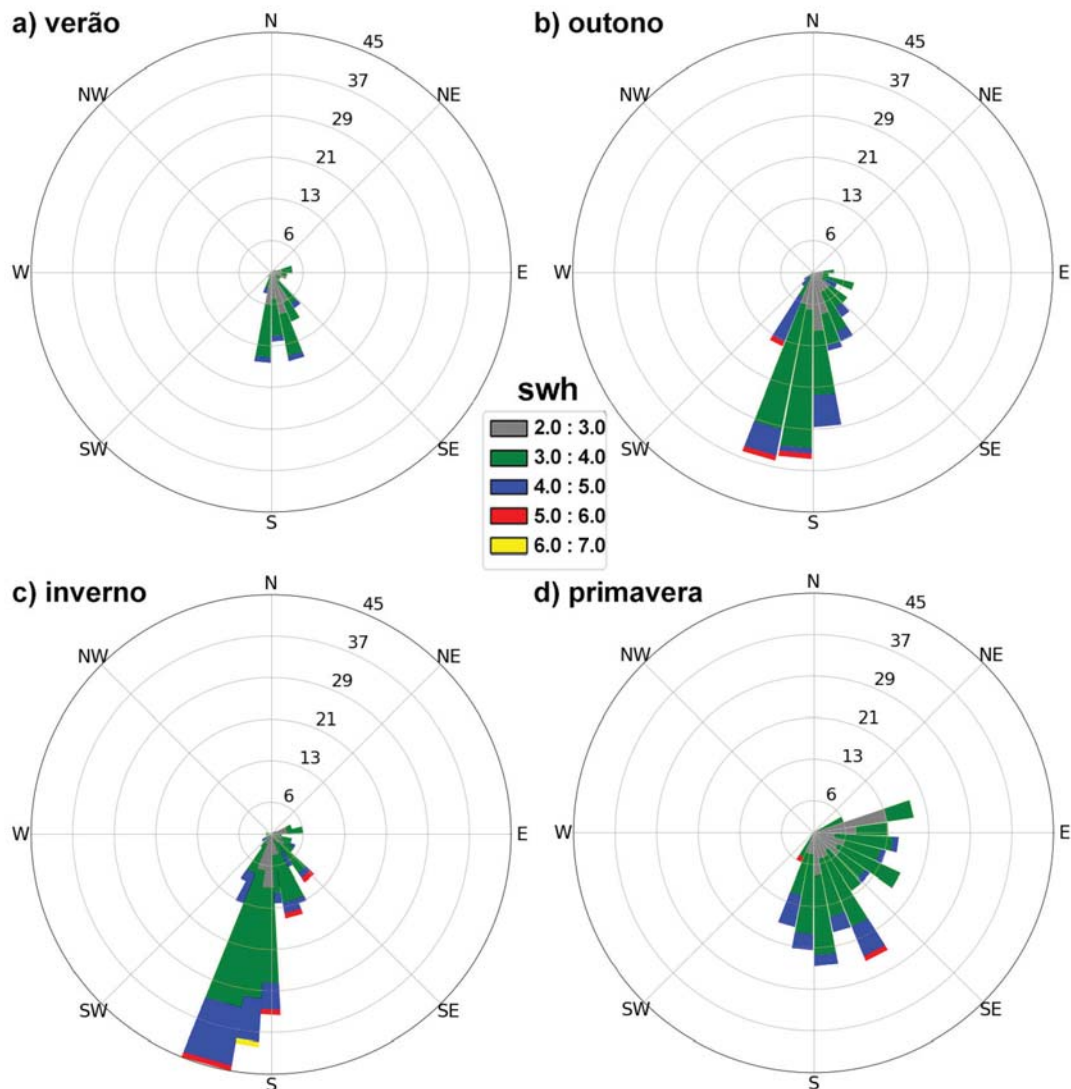


Figura 49 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Santos entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor na roda de ondas.

Nos meses de outono, nota-se também uma similaridade com o inverno e com os resultados de Itajaí. Porém, é visível a diminuição de ressacas acima de 4 m de máxima nesta estação em Santos. Três ressacas ultrapassaram a máxima de 5 m (em Itajaí foram oito). O gráfico do inverno mostra um aumento de ressacas de sul e de eventos acima de 4 e 5 m de máxima. Na primavera, assim como em Rio Grande e Itajaí, ocorreu um aumento de casos de direção leste.

A relação entre o swh máximo e a porcentagem no verão foi de 2,5 a 3 m de 42,7%, de 3 a 4 m de 51,7% e de 4 a 5 m de 5,6%. Outono: de 2,5 a 3 m de 27,8%, de 3 a 4 m de 54%, de 4 a 5 m de 16,6% e de 5 a 6 m de 1,6%. Inverno: de 2,5 a 3 m de 22%, de 3 a 4 m de 56,8%, de 4 a 5 m de 19,3%, de 5 a 6 m de 1,5% e de 6 a 7 m de 0,4%. Primavera: de 2,5 a 3 m de 32,1%, de 3 a 4 m de 57%, de 4 a 5 m de 10% e de 5 a 6 m de 0,9%.

#### **4.3.5 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS**

Em Santos, o extrato de 10% de ressacas mais severas contabilizou 77 eventos. Os dados mostram o total de 1 ressaca acima de 6 m de swh máximo, dez acima de 5 m e o restante entre 4 e 5, com o menor valor sendo de 4,25 m. Para comparação, o mínimo em Itajaí foi de 4,59 m.

Em se tratando do tempo de duração, duas ressacas tiveram mais de 200 horas, sendo uma em 1998 (com 284 horas e swh máximo de 3,86 m, não presente na Tabela 4) e outra em 2017 (com 247 horas e swh máximo de 4,31 m, 17d10 na Tabela 4). Outras 46 ressacas tiveram mais de 100 horas.

A direção mediana das ressacas presentes na Tabela 4 foi similar à do gráfico do inverno (presente na Figura 49). O período médio de onda variou entre 7,44 s e 11,37 s, com as mais intensas entre 9 e 11 s. O vento máximo foi de  $18,93 \text{ m s}^{-1}$  e o mínimo de  $7,54 \text{ m s}^{-1}$ .

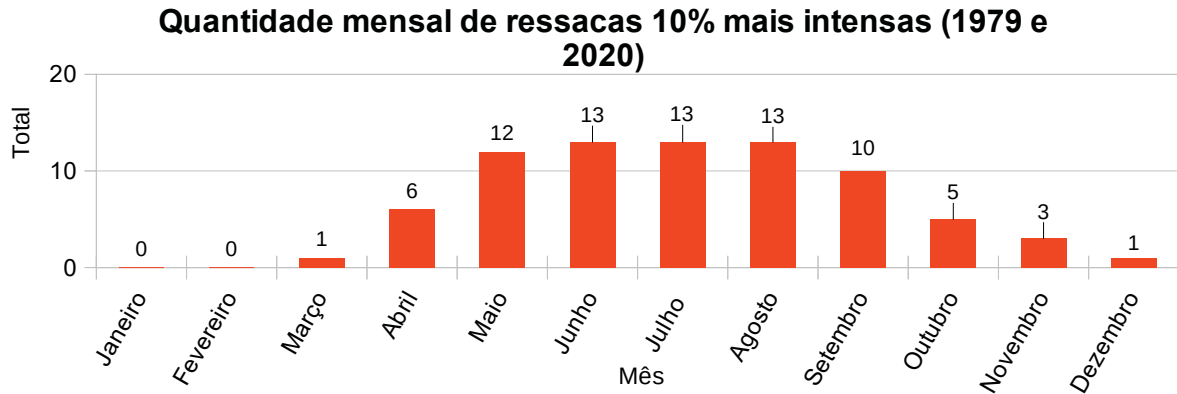


Figura 50 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Santos por mês baseado no swh máximo.

Abordando a quantidade de ressacas apontadas como as 10% mais intensas em cada mês (FIGURA 50), 39 ocorreram nos meses de inverno, 19 no outono, 18 na primavera e uma no verão. Sendo assim, 50,6% das ressacas mais intensas ocorrem no inverno.

Na Figura 51, observa-se a quantidade de ressacas mais intensas por ano. A média foi de 1,8 anuais. Os anos com mais eventos foram 1985, 1994, 1997, 2006, 2007, 2016 e 2018, todos com 4. Os dados foram similares a Itajaí mas com variações em alguns anos, como 2011, que registrou 3 no litoral paulista e apenas 1 no catarinense, e 1997, com 4 registros em Santos contra 1 em Itajaí.

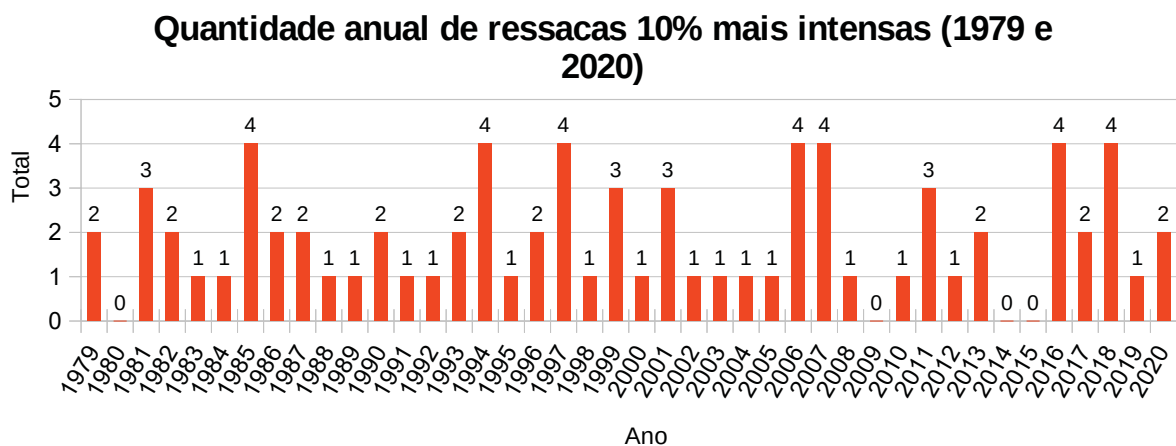


Figura 51 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Santos por ano baseado no swh máximo.

#### 4.4 PONTO 4 – CABO FRIO

##### 4.4.1 QUANTIFICAÇÃO ANUAL, SAZONAL E MENSAL

Os dados da Figura 52 mostram que o total de ressacas em Cabo Frio entre 1979 e 2020 foi de 533. Isso representa cerca de 30% e 28% a menos que em Santos e Itajaí, respectivamente. Como abordado nos capítulos anteriores, essa quantidade não necessariamente ocorreu na costa, pois os pontos de análise estão a certa distância no oceano. A média anual foi de 12,7 ressacas (linha azul). A máxima ocorreu em 2010, com 19, seguido de 2008 (18) e 2007, 2009, 2019 e 2020 (17). A mínima ocorreu em 1983, com 5. Em anos recentes, o valor mínimo ocorreu em 2017, com 11 (8 a menos que em Santos no mesmo ano). O período entre 2007 e 2011 mostrou uma elevação em relação aos demais, assim como de 2015 a 2020 (com exceção de 2017).

O valor do coeficiente angular foi de 0,10, o que indica uma variação anual média de 0,10 ressacas. Desse modo, a tendência positiva foi de 3,21 ressacas entre 1993 e 2020.

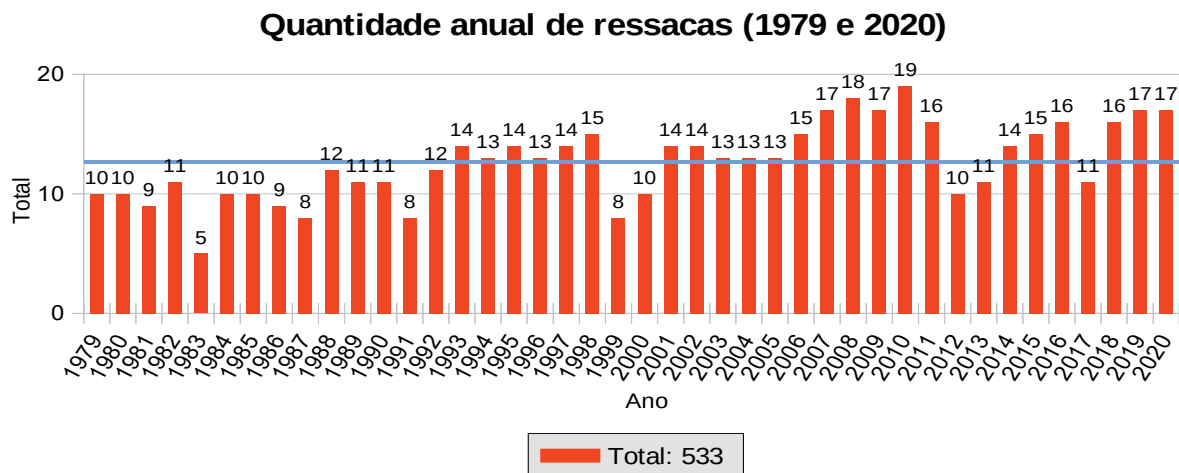


Figura 52 - Quantidade anual de ressacas identificadas no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020. A linha azul exibe a média anual.

Sazonalmente, a Figura 53 mostra que 31 ressacas ocorreram no verão (5,8%), 138 no outono (25,9%), 210 no inverno (39,4%) e 154 na primavera (28,9%). A porcentagem do inverno foi a mais alta entre os quatro pontos analisados. A média anual foi de 0,7 ressacas no verão, 3,3 no outono, 5 no inverno e 3,7 na primavera. Diversos anos do verão tiveram zero ressacas. Os anos do inverno entre 2007 e 2011 foram mais elevados que os anos anteriores.

### Quantidade sazonal de ressacas (1979 e 2020)

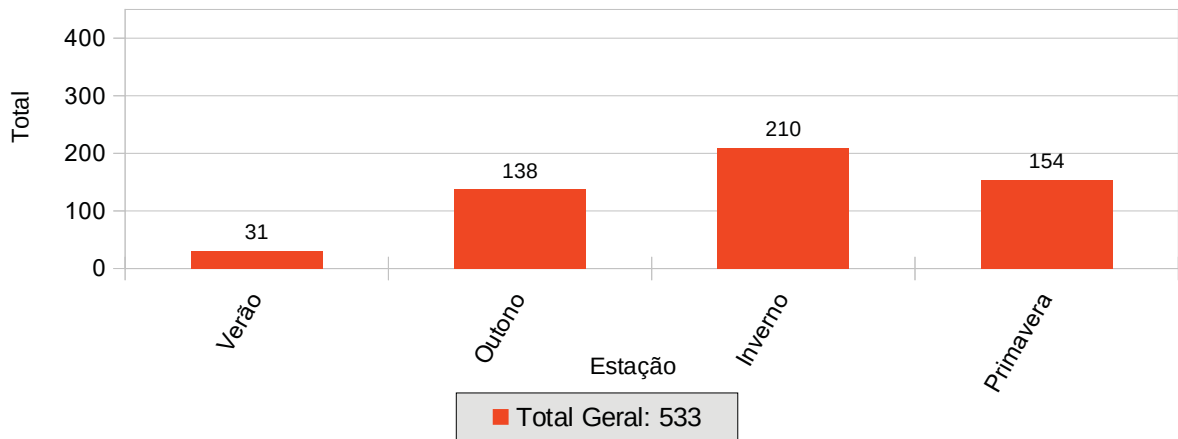


Figura 53 - Total sazonal de ressacas em Cabo Frio 1979 e 2020.

Mensalmente (FIGURA 54), o mês com mais ressacas foi, também, setembro, com 85 casos. O gráfico apresentou similaridades na linha temporal com o de Itajaí e o de Santos. A média mensal foi de 44,4 ressacas.

### Total de ressacas por mês (1979 e 2020)

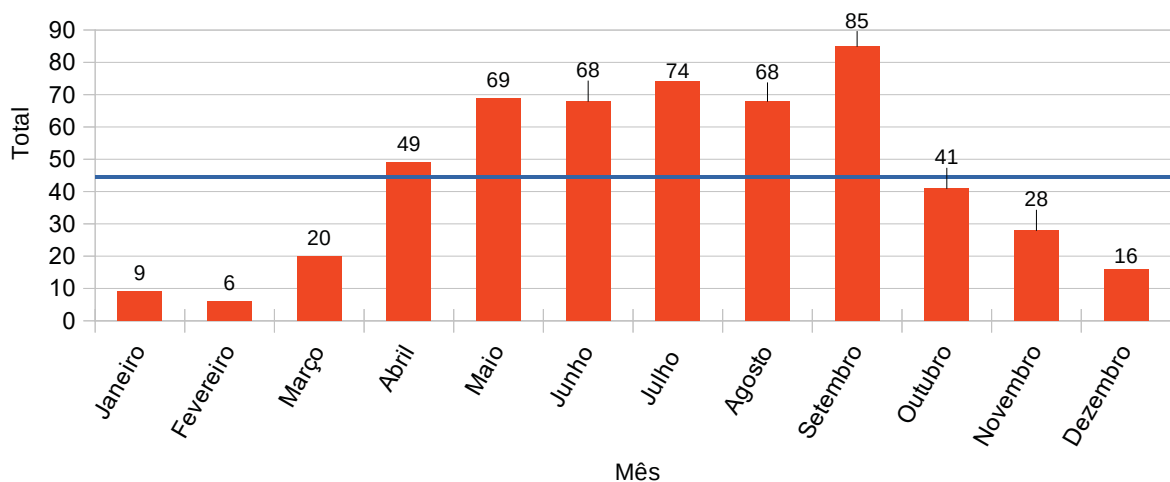


Figura 54 - Quantidade total de ressacas identificadas por mês no ponto da boia Cabo Frio. A linha azul indica a média mensal. A linha azul exibe a média mensal.

#### 4.4.2 DURAÇÃO EM HORAS DAS RESSACAS

A Figura 55 exibe a quantidade anual de horas com ressacas em Cabo Frio. O maior valor foi notado em 2016, com 1054 horas, seguido de 2010, com 1005. Esses dois anos aparecem com destaque nos gráficos pela quantidade anual de

ressacas ou de horas com ressacas nos quatro pontos deste estudo. O ano com o menor valor foi 1983, com 339 horas.

### Total de horas por ano com ressacas

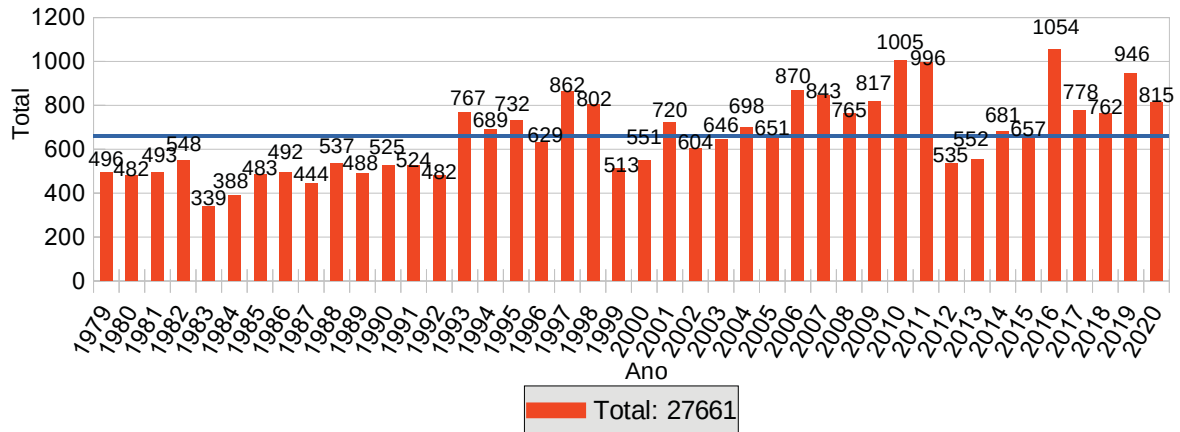


Figura 55 - Quantidade de horas considerando todas as ressacas ocorridas entre 1979 e 2020 em Cabo Frio. A linha azul exibe a média anual.

Os dados sazonais da Figura 56 mostram que o verão teve 1165 horas com ressacas (4,2% do total e média de 27,3 horas anuais), 6872 no outono (24,9% e média de 163,6 horas), 11491 no inverno (41,5% e média de 273,6 horas) e 8133 na primavera (29,4% e média de 193,6 horas). O período entre 2006 e 2011 foi o que registrou as maiores marcas no inverno durante todo o período analisado. A primavera de 2016 teve duas ressacas na lista de mais intensas da Tabela 5, o que aumentou o total de horas do ano.

### Quantidade sazonal de horas com ressacas (1979 e 2020)

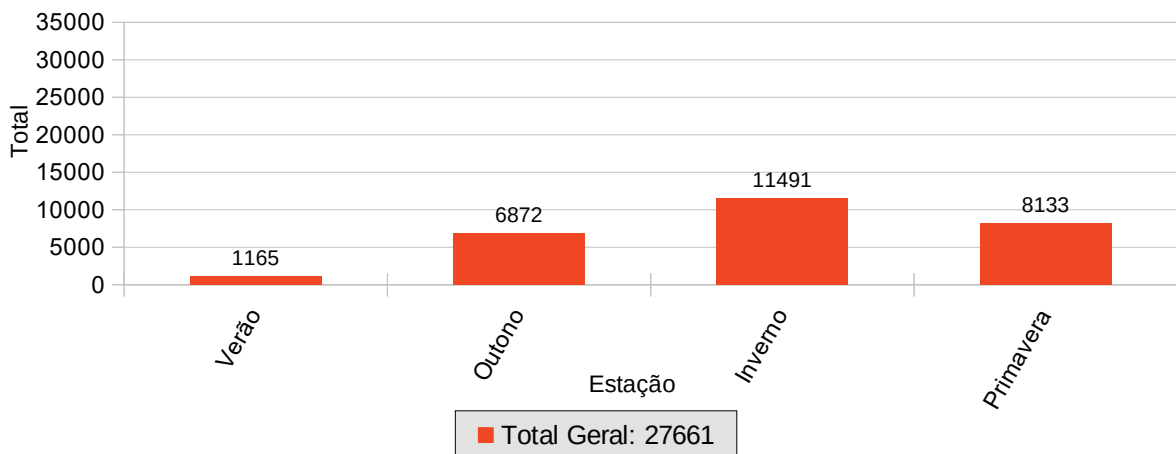


Figura 56 - Total sazonal de horas com ressacas em Cabo Frio entre 1979 e 2020.



A quantidade de horas por mês na Figura 57 exibe novamente setembro com o maior dado (4604 horas). Na comparação com Santos, o gráfico é similar, mas com notável redução no total de horas em cada mês (37,8% menos horas na soma de todos os meses).

### Horas com ressacas por mês (1979 e 2020)

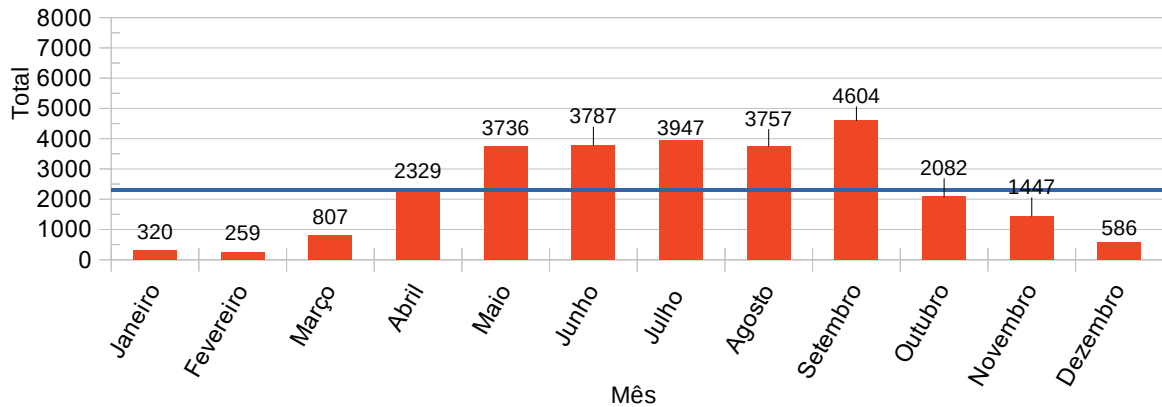


Figura 57 - Total de horas por mês com ressacas considerando todo o período entre 1979 e 2020 no ponto da boia Cabo Frio. A linha azul exibe a média mensal.

#### 4.4.3 COMPORTAMENTO DO SWH EM CABO FRIO

A média anual do swh em Cabo Frio (FIGURA 58) exibe um valor mais elevado em 1999, com 3,14 m, seguido de 2006, com 3,08 m, e 1994 e 1997, com 3,04 m. A mínima ocorreu em 1991, com 2,75 m, ano em que 8 ressacas ocorreram. A média considerando todos os anos foi de 2,92 m. O gráfico tem uma variação grande até os anos 2000 e menor após isso, com poucos anos ultrapassando os 3 m de média.

### Média anual de swh das ressacas (m)

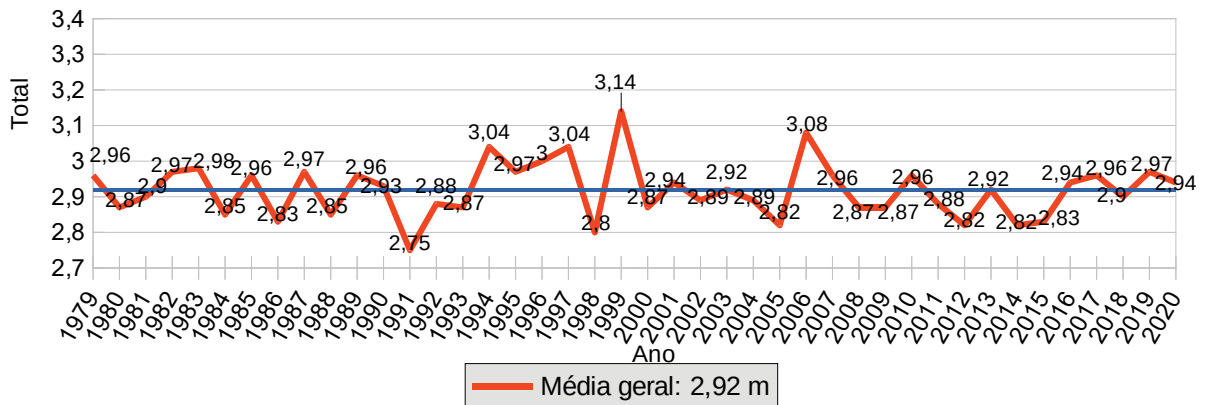


Figura 58 - Média anual do swh durante a ocorrência de ressacas no ponto da boia Cabo Frio. A linha azul exibe a média anual.

Sazonalmente, a média do verão foi de 2,83 m, do outono e do inverno de 2,95 m, e da primavera de 2,85 m (FIGURA 59). O verão apresentou 21 anos sem ressacas em Cabo Frio e outros 21 com ressacas. Durante o outono, apenas 1980 e 1983 não tiveram registros. No inverno, a média mais elevada foi verificada em 1983, com 3,36 m. A primavera apresentou média pouco mais elevada que o verão, enquanto o outono teve média igual ao inverno.

### SwH sazonal média das ressacas (m)

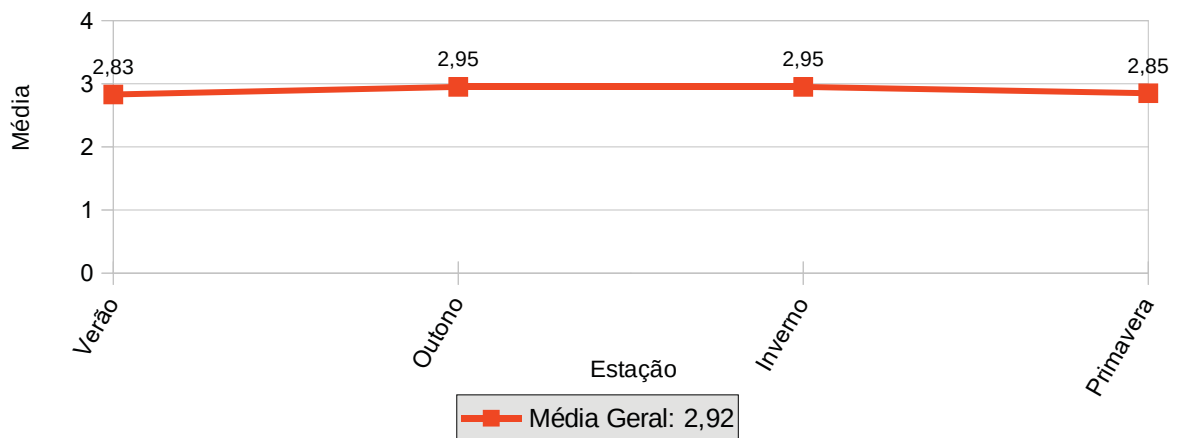


Figura 59 - Média sazonal do swH em Cabo Frio entre 1979 e 2020.

Observa-se que as médias anuais de todas as estações em Cabo Frio são menos elevadas que em Rio Grande, Itajaí e em Santos. A média geral do outono é mais elevada do que a da primavera, apesar de registrar ligeiramente menos casos de ressacas.

As médias mensais estão apresentadas na Figura 60, que mostra um maior valor em maio (2,99 m), assim como os dados de Santos. Os demais meses também apresentam a mesma linha de tendência do litoral paulista. Em Itajaí e Rio Grande, maio teve a segunda maior média geral.

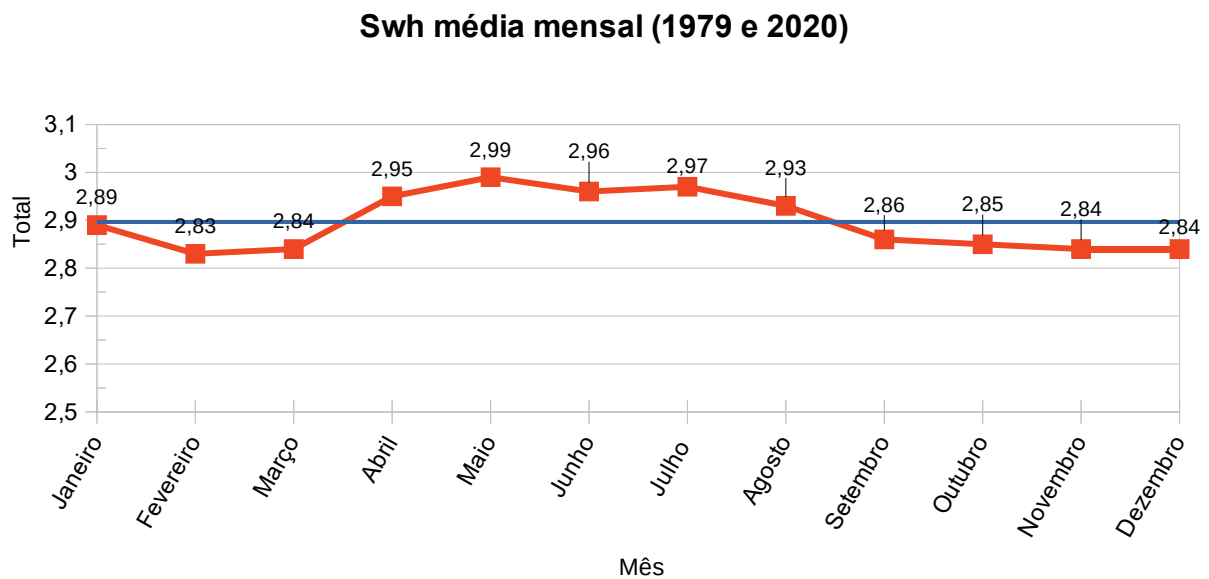


Figura 60 - Média do swH em cada mês do ano no ponto da boia Cabo Frio (metros). A linha azul exibe a média mensal.

#### 4.4.4 ANÁLISE ANUAL E SAZONAL DA DIREÇÃO MEDIANA DE ONDAS

A direção mediana de ondas em Cabo Frio entre 1979 e 2020 (Figura 61) apresenta uma predominância de sul e sudoeste, como já havia ocorrido nos demais pontos. Neste caso, e pela geografia local e pelas áreas ciclogênicas mais ao sul do Brasil, poucas ressacas foram encontradas em outros quadrantes, como leste e nordeste.

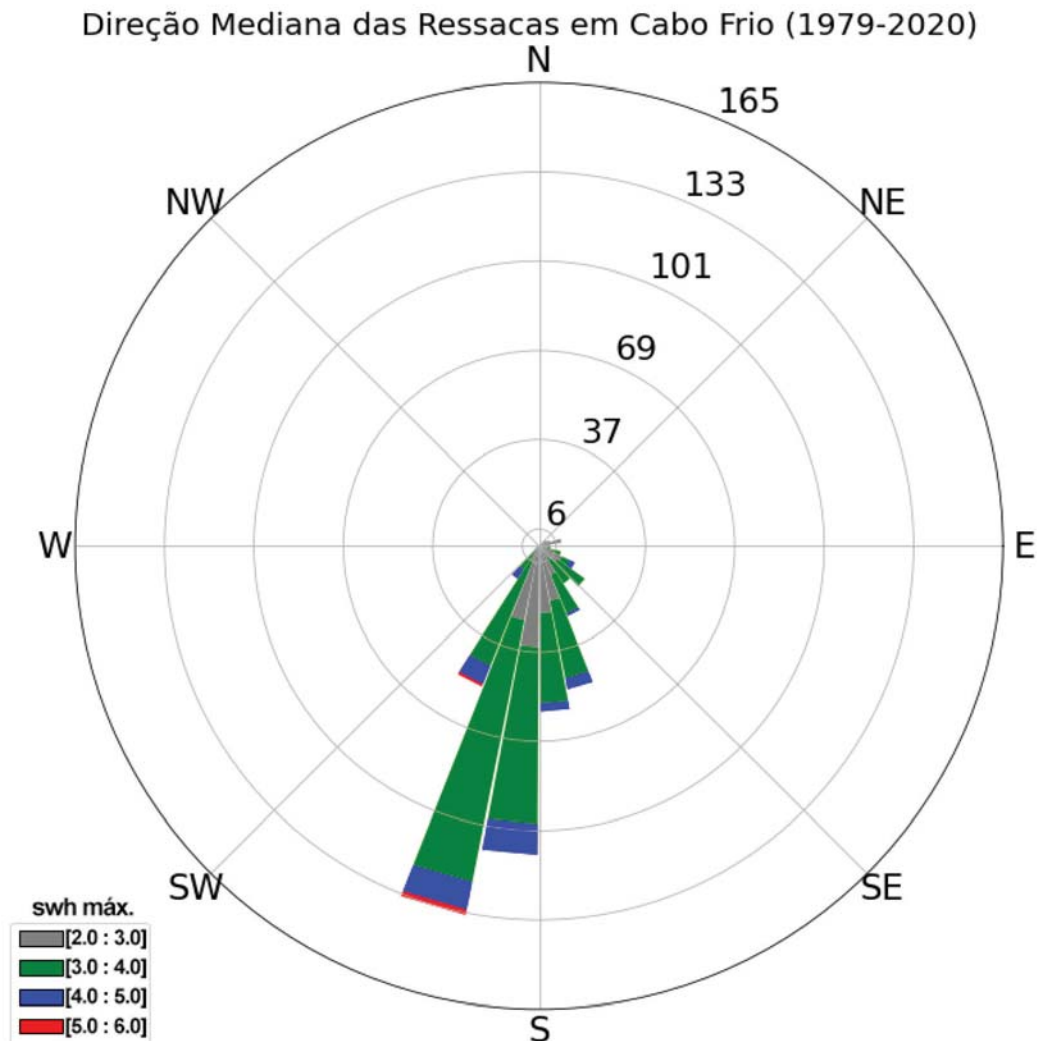


Figura 61 - Direção mediana de cada ressaca ocorrida no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

Percebe-se a grande diminuição de ressacas acima de 4 e 5 m de máxima, comparando com os outros pontos. Foram apenas 3 casos acima de 5 m, presentes no gráfico na cor vermelha e com direção mediana entre  $192^\circ$  e  $205^\circ$ .

As ressacas com swh máximo entre 2,5 e 3 m representaram 32% do total, entre 3 a 4 m um total de 59,3%, entre 4 a 5 m um total 8,1% e acima de 5 m um total de 0,6%.

As direções medianas sazonais constam na Figura 62. No verão, as ressacas tiveram direção sul, com apenas 1 fora deste quadrante, que foi de  $107^\circ$ . Durante o outono, a predominância foi de sul/sudoeste e menos ressacas de sudeste

ocorreram em Cabo Frio nesta estação em comparação com Santos. Nos meses de Inverno, os casos mais intensos aumentam, com um registro um pouco mais visível de direções de sudeste e, em menor escala, no leste. Na primavera, eventos de sudoeste diminuem e aumentam no sudeste, assim como ocorreu nos demais quatro pontos analisados na costa brasileira.

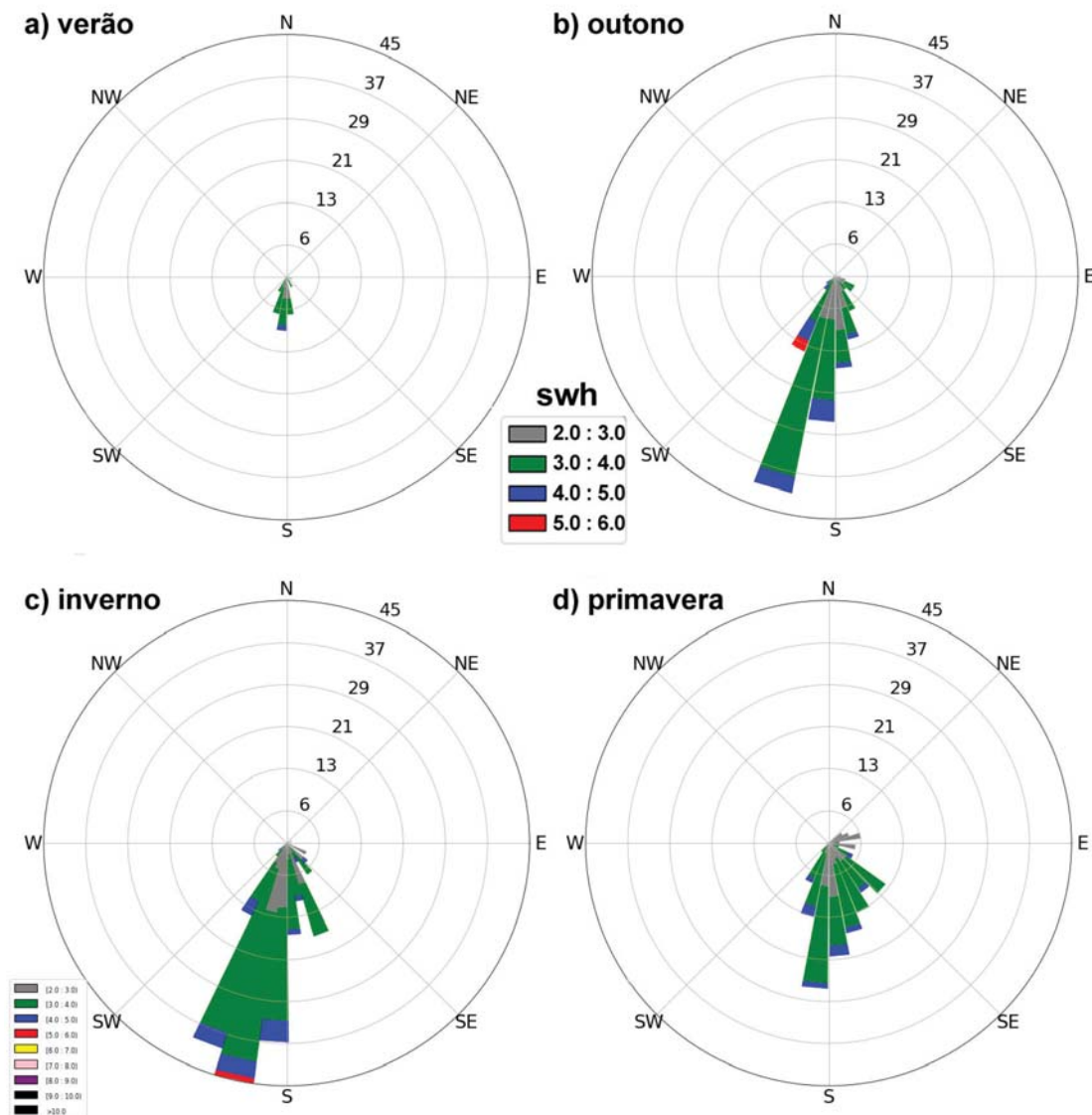


Figura 62 - Direção mediana sazonal das ressacas ocorridas no ponto da boia Cabo Frio entre 1979-2020 com dados do ERA5. As letras indicam os pontos cardeais. Os numerais nos círculos polares indicam a quantidade. Os valores na legenda indicam o valor máximo do swh de cada ressaca. As cores da legenda mostram esse valor aplicado na rosa de ondas.

No verão, ressacas entre 2,5 e 3 m representaram 38,7% do total, entre 3 e 4 m de 58,1% e entre 4 e 5 m de 3,2%. No outono, entre 2,5 e 3 m de 32,6%, entre 3 e 4 m de 55,1%, entre 4 e 5 m de 10,9% e entre 5 e 6 m de 1,4%. No inverno, de 2,5 e 3 m foi de 28,5%, de 3 e 4 m de 62,4%, de 4 e 5 m de 8,6% e de 5 e 6 m de 0,5%. Na primavera, de 2,5 e 3 m de 36,4%, de 3 e 4 m de 57,8% e de 4 e 5 m de 5,8%.

#### 4.4.5 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS SEVERAS

A amostra de 10% de ressacas com swh máximo em Cabo Frio calculou 53 eventos, incluindo 3 ressacas acima de 5 m, 43 acima de 4 m e 7 acima de 3 m, sendo a menor de 3,96 m (TABELA 5). Para comparação, o mínimo dentro desses 10% em Rio Grande foi de 5,10 m, em Itajaí de 4,59 m e em Santos de 4,25m.

A direção mediana das ressacas mais intensas em Cabo Frio mostrou um predomínio entre sudoeste e sul. O período médio de ondas variou entre 8,2 s e 12,3 s, e as dez primeiras da Tabela 5 entre 9,3 s e 11,4 s. O vento máximo foi de 16,34 m s<sup>-1</sup> e o mínimo de 6,65 m s<sup>-1</sup>.

A distribuição mensal de ressacas mais intensas em Cabo Frio é mostrada na Figura 63. O mês de maio registrou a maior quantidade, com 14, diferentemente dos outros quatro pontos avaliados na costa brasileira, onde as máximas ocorreram em meses de inverno. Porém, no total considerando todos os meses, foram 23 ressacas no inverno, 19 no outono, 10 na primavera e 1 no verão. Em outros números, 78,9% das ressacas mais intensas em Cabo Frio ocorrem no outono e no inverno. A diferença entre outono e primavera foi considerável em Cabo Frio mas foi mínima em Rio Grande, Itajaí e Santos.

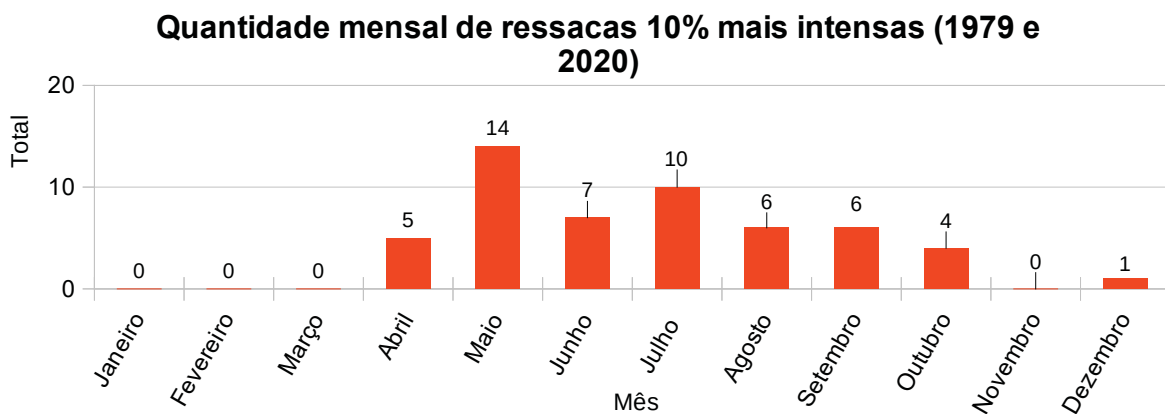


Figura 63 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Cabo Frio por mês baseado no swh máximo.

A distribuição anual de ressacas mais intensas mostra uma média de 1,3 (FIGURA 64). Os anos com mais casos foram 1982, 1997, 1999, 2016 e 2019, todos com 3. Assim como em Santos, o gráfico apresenta mais quantidades após 2016 do que em anos anteriores próximos.

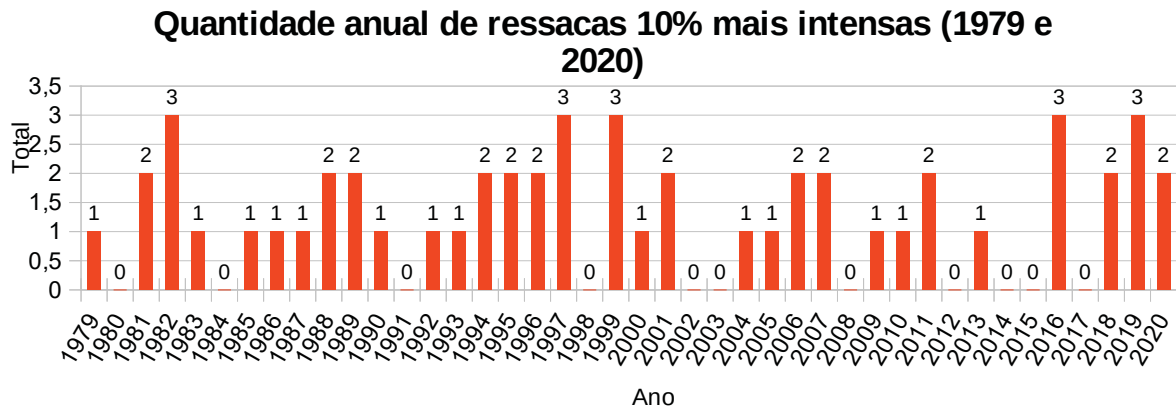


Figura 64 - Quantidade das ressacas 10% mais intensas em Cabo Frio por ano baseado no swl máximo.

#### 4.5 DETALHAMENTO DAS RESSACAS MAIS SEVERAS

Este subcapítulo apresenta mais detalhes das ressacas mais severas identificadas em Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio, incluindo comentários sobre artigos científicos e reportagens que tratam dessas ressacas. No capítulo 5.4, foram incluídas informações dos ciclones extratropicais relacionados com algumas dessas ressacas mais intensas em cada ponto.

Em Rio Grande, a ressaca de maior swl máximo (9,24 m) ocorreu em abril de 1999, com 107 horas de duração, como já mencionado. A máxima acima de 9 m perdurou por cinco horas e acima de 8 m por oito horas. Durante as primeiras 21 horas da ressaca, o valor se manteve abaixo de 5 m e, posteriormente, acima de 5 m por 34 horas. Durante mais dois dias, se manteve abaixo desse valor, fazendo com que a swl média fosse mais baixa do que outras ressacas mais curtas. O vento máximo registrado na região da boia Rio Grande foi de  $25,20 \text{ m s}^{-1}$ . Gramcianinov *et al.* (2020a) analisaram a ressaca em seu estudo, mostrando que o ciclone relacionado teve lento deslocamento ( $5,93 \text{ m s}^{-1}$ ), com vento máximo de  $31,05 \text{ m s}^{-1}$ .

A segunda ressaca mais intensa em Rio Grande ocorreu em outubro de 2016. Causou grandes estragos na costa do RS, principalmente no Balneário do Hermenegildo, relacionada com um ciclone explosivo que se formou na bacia do rio

da Prata (SCHOSSLER *et al.*, 2020). O swh máximo foi de 8,23 m nas primeiras horas do dia 28 de outubro de 2016. A máxima esteve acima de 8 m por cinco horas e acima de 7 m por 17 horas, no total. A duração foi de 237 horas, influenciada por condições meteorológicas que mantiveram o swh acima de 2,5 m mesmo após o distanciamento do ciclone explosivo, caindo para abaixo de 4 m após o final do dia 30 de outubro. O vento máximo foi de 22,09 m s<sup>-1</sup> na região da boia Rio Grande.

No início de junho de 1985, houve uma onda de frio histórica e de grande abrangência no Brasil, que causou dias consecutivos de frio intenso em todo o Centro-Sul do país e friagem no Norte. Um fato histórico desse momento foi a neve forte que caiu no Parque Nacional de Itatiaia, entre os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro (CAPUCIN *et al.*, 2022). A terceira ressaca com maior swh aconteceu nesta mesma semana, associada a um ciclone extratropical próximo da costa gaúcha. O swh máximo foi de 7,62 m, atingindo o pico na tarde do dia 06 de junho. Durante oito horas o valor esteve acima de 7 m. A duração total foi de 134 horas, sendo o vento máximo de 19,78 m s<sup>-1</sup>. O período médio de ondas foi similar aos outros dois casos citados acima, entre 9,5 e 8,7 segundos.

A quarta ressaca da lista em Rio Grande, ocorrida entre 23 e 29 de junho de 2004, foi associada a um ciclone extratropical na costa do Rio Grande do Sul. Não foram encontrados artigos científicos para esse evento, mas houve um alerta de forte ressaca emitida pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, 2023). O swh máximo verificado foi de 7,21 m, com duração de 141 horas e um vento máximo de 22,11 m s<sup>-1</sup>.

Outras duas ressacas tiveram valores acima de 7 m, uma ocorrendo em 2008 e a outra em 1979 (7,19 e 7,09 m do swh máximo, respectivamente). O evento de 2008 foi citado pelo jornal “Diário do Grande ABC”, de Santo André, relacionando-o com um ciclone extratropical, com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), causando estragos pelo vento e chuva. A ressaca de 2008 teve duração de 45 horas, entre 9 e 11 de junho, e o vento máximo foi de 22,11 m s<sup>-1</sup>. O boletim “Climanálise” do CPTEC/INPE (2008), também relata o ciclone, que gerou vento de 72 km/h em Porto Alegre, com destelhamento de casas e quedas de árvores. Não foram encontrados artigos científicos ou reportagens na Internet sobre a ressaca de 1979, a sexta da lista. Porém, o ciclone se formou em 29 de dezembro de 1979 em área continental, na Argentina, e a pressão atmosférica mínima foi registrada em 1



de janeiro de 1980, com 987 hPa. Neste momento, encontrava-se a leste da boia Rio Grande, a cerca de 700 km. A ressaca atingiu seu ponto mais alto à meia-noite do dia 01 de janeiro e se manteve acima de 7 m por cinco horas, com vento máximo de  $19,53 \text{ m s}^{-1}$ .

Pode-se encontrar informações sobre diversas ressacas da lista sobre Rio Grande, como é o caso do ciclone que atingiu o sul do Brasil no início de maio de 2008 (METSUL, 2022). Essa ressaca teve swl máximo de 5,61 m e duração de 177 horas. Os efeitos foram generalizados, com acumulados de chuva, enchentes de rios e rajadas de vento acima de 100 km/h em Porto Alegre e Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Outro exemplo é a ressaca ocorrida entre 29 de junho e 03 de julho de 2020 (20b17), a décima da lista. Ela está relacionada com um ciclone explosivo, ocorrido entre 29 de junho e 01 de julho, que causou diversos problemas, principalmente pelo vento intenso e acumulados de precipitação (INMET, 2020). A altura máxima de onda foi de 6,78 m, a duração de 98 horas e o vento foi de  $23,32 \text{ m s}^{-1}$ . A trigésima primeira da lista, ocorrida entre 24 de julho e 03 de agosto de 1993, foi fotografada por Tozzi e Calliari (2000), apontando o caso como impactante para as características geomorfológicas da praia, assim como outros. O swl máximo foi de 6,27 m e o vento de  $19,22 \text{ m s}^{-1}$ . A duração foi de 233 horas.

Em Itajaí, uma ressaca em 1987 entre 30 de julho e 01 de agosto, com 51 horas de duração, teve o maior swl máximo registrado, 6,96 m. A máxima acima de 6 m durou oito horas, e acima de 5 m, cinco horas. Ou seja, não foi um evento de longa duração mas os dados do ERA5 mostraram um pico de máxima elevada para Itajaí. Além disso, esta ressaca esteve entre os 10% mais intensos em Rio Grande (87b22), com máxima de 5,25 m. Em Santos, esta foi também a ressaca mais intensa, com 6,23 m. Em Cabo Frio, a máxima foi de 4,95 m. O vento máximo em Itajaí foi de  $21,58 \text{ m s}^{-1}$ .

A segunda ressaca com maior elevação foi registrada em junho de 1981, com 75 horas de duração e swl máximo de 6,37 m. Em Rio Grande, a máxima foi de 5,27 m, presente na Tabela 2. Em Itajaí, o valor acima de 6 m durou dez horas, e acima de 5 m, por oito horas. O vento máximo foi de  $21,28 \text{ m s}^{-1}$ .

A ressaca mencionada no parágrafo acima ocorreu no mês anterior ao forte evento de geada no centro-sul do Brasil no mesmo ano, em julho, que afetou culturas de café e foi relacionada por Fortune e Kousky (1983) com um ciclone

extratropical. Em relação à ressaca, a altura máxima de ondas foi de 4,14 m em Itajaí (não presente na Tabela 3) e 5,88 m em Rio Grande (Tabela 2, id. 81b21).

Em 2001, ocorreu a terceira ressaca da Tabela 3, na primeira metade de maio. A duração foi de 127 horas e o swH máximo de 6,27 m. Esta foi uma intensa ressaca, que gerou estragos desde o litoral de Santa Catarina até o Rio de Janeiro. O vento máximo foi de  $17,43 \text{ m s}^{-1}$ . A ressaca esteve relacionada com um intenso ciclone ao sul do Brasil, distante da costa, e outro que formou no litoral de São Paulo e amplificou o impacto do primeiro (INNOCENTINI *et al.*, 2003). O swH máximo em Rio Grande foi de 4,93 m, em Santos de 5,91 m e em Cabo Frio de 5,18 m.

A ressaca de 2005, quarta da lista de mais severas, teve duração de 98 horas e swH máximo de 6,21 m. Melo Filho *et al.* (2006) fizeram um estudo desta ressaca com dados medidos por ondógrafo e apontaram que o swH máximo foi de 7,2 m, considerada muito atípica pelos autores. Foi relacionada com um anticiclone ao sul do continente e um ciclone extratropical entre os estados do Paraná e São Paulo, causando grande destruição em diversas cidades. O swH máximo apresentado pelo ERA5 foi de 4,28 em Rio Grande, 4,09 m em Santos e 3,00 m em Cabo Frio. O vento máximo em Itajaí foi de  $18,91 \text{ m s}^{-1}$ .

Entre maio e junho de 1999, a quinta ressaca da Tabela 3 teve duração de 66 horas e swH máximo de 6,16 m em Itajaí. Esta foi a décima primeira ressaca mais intensa em Rio Grande, com 6,74 m, a mais intensa em Cabo Frio, com 5,40 m, e a terceira mais intensa em Santos, com 5,87 m. O vento máximo em Itajaí foi de  $17,82 \text{ m s}^{-1}$ . A ressaca ocorreu apenas um mês após a ressaca de maior máxima em Rio Grande.

Podem ser encontradas informações sobre diversas outras ressacas da Tabela 3 em artigos científicos e jornalísticos. Em 2010, a praia da Armação do Pântano do Sul, em Florianópolis/Santa Catarina, sofreu com ressacas constantes, que destruíram diversas casas e causaram perda na faixa de areia das praias (VANZ e RODRIGUES, 2012). Foram seis ressacas entre o começo de abril e junho. Quatro se formaram em maio, entre os dias 08 e 03 de junho. A primeira teve 138 horas de duração, a segunda 193, a terceira 26 e a quarta 81. Nenhuma dessas ressacas está incluída no filtro de 10% das mais intensas. Nesse caso, a destruição não está relacionada com uma ressaca intensa ou ciclone, mas sim com a proximidade de sistemas de baixa pressão com a costa, duração e repetição dos eventos, ciclones que geraram uma direção de ondas favorável para tais problemas

ocorrerem e maré alta. Além disso, o fator principal foi a ocupação humana, que fragilizou a área de diversas formas ao longo do tempo, causando erosão costeira (RUDORFF E BONETTI, 2010). O swH máximo durante todas essas ressacas foi de 4,39 m. Em relação aos ciclones, foram relacionados 6 sistemas com as 6 ressacas. Desse total, 4 tiveram origem no norte da Argentina/Sul do Paraguai e deslocamento em direção ao litoral através de Santa Catarina ou áreas muito próximas.

Em Santos, a ressaca do swH máximo mais elevado (6,23 m) ocorreu em 1987, entre os dias 31 de julho e 01 de agosto, com duração de 52 horas. Na cidade de Santos, a ressaca teve swH acima de 6 m por três horas e acima de 5 m por outras nove horas. O período médio de onda foi quase o mesmo em Itajaí e Santos, com 9,4 s e 9,3 s, respectivamente. O vento máximo em Santos foi de 18,93 m s<sup>-1</sup>.

A segunda ressaca de maior swH máximo em Santos ocorreu em 2001, com 110 horas de duração e máxima de 5,91 m. Esta foi a terceira maior ressaca em Itajaí (6,27 m) e a segunda maior em Cabo Frio (5,18 m). O vento máximo em Santos foi de 16,93 m s<sup>-1</sup>.

A terceira ressaca da lista de Santos teve duração de 68 horas e máxima de 5,87 m. Ocorrida em 1999, entre 30 de maio e 02 de junho, foi também a quinta ressaca mais intensa em Itajaí (6,16 m) e a mais intensa em Cabo Frio (5,40 m). O estudo de Santos *et al.* (2004) mostra que essa foi uma intensa ressaca, que causou diversos estragos no estado do Rio de Janeiro, mas o estudo foi focado na cidade de Niterói. A máxima de vento no ponto da boia de Santos foi de 14,97 m s<sup>-1</sup>.

Em 1996, ocorreu a quarta ressaca com maior máxima de swH em Santos, com 5,77 m e duração de 84 horas. O vento máximo foi de 13,79 m s<sup>-1</sup>. Em Itajaí, esta foi a sexta ressaca mais intensa, com máxima de 6,05 m. A ressaca foi mencionada online pelo jornal Folha de São Paulo em setembro de 1996 (TORRES, 1996), destacando que o evento havia sido forte e causado muitos estragos.

A quinta ressaca da Tabela 4, ocorrida entre 28 de outubro e 02 de novembro de 2016, foi o mesmo evento que causou a segunda ressaca mais intensa de Rio Grande. O swH máximo em Santos foi de 5,62 m e a duração de 121 horas. Foi relacionado com uma ciclogênese explosiva na Bacia do Prata (SCHOSSLER, 2018). O vento máximo em Santos foi de 12,20 m s<sup>-1</sup>.

Posteriormente, aparecem duas ressacas ocorridas em 1981, nos meses de agosto e junho, com máximas de 5,49 e 5,3 m, respectivamente, e uma em 2020,

com máxima de 5,21 m em Santos, 5,64 m em Itajaí, 6,64 m em Rio Grande e 4,30 m em Cabo Frio.

Em Cabo Frio, o valor mais elevado foi de 5,40 m. Esta ressaca ocorreu em 1999, entre os dias 30 de maio e 02 de junho, com 65 horas de duração. O swl máximo esteve acima de 5 m por nove horas e acima de 4 m por outras 22 horas. O vento máximo foi de  $13,79 \text{ m s}^{-1}$ . Essa foi a terceira ressaca de maior swl máximo em Santos, a quinta em Itajaí e a décima primeira em Rio Grande. Santos *et al.* (2004) mencionam que essa ressaca causou estragos em Niterói, no Rio de Janeiro, notadamente a destruição do calçadão de Gragoatá, da tubulação de esgoto na praia de Icaraí e do calçadão da praia de Piratininga. A maior ressaca em Rio Grande também ocorreu em 1999 mas no mês anterior, em abril.

A segunda ressaca da Tabela 5 ocorreu em 2001, com 96 horas de duração e swl máximo de 5,18 m. O vento máximo foi de  $14,63 \text{ m s}^{-1}$ . Como já mencionado, esta foi a segunda ressaca da lista em Santos e a terceira em Itajaí.

Em 1996, a terceira ressaca mais severa de Cabo Frio teve máxima de 5,16 m em Cabo Frio e duração de 76 horas, com vento máximo de  $13,33 \text{ m s}^{-1}$ . Esta foi a quarta colocada em Santos, a sexta em Itajaí e a oitava em Rio Grande.

Uma ressaca ocorrida em 1983, entre 02 e 06 de agosto, com 89 horas, teve máxima de 4,82 m e foi classificada com a quarta de maior severidade em Cabo Frio. O vento máximo foi de  $16,32 \text{ m s}^{-1}$ . Esta ressaca está presente na lista de Santos *et al.* (2004), onde foi a trigésima sétima colocada (83d11), com 4,50 m de máxima. Os autores apontam que a ressaca causou estragos na praia de Boa Viagem, Flexas e São Francisco, em Niterói, com elevadas ondas.

A quinta ressaca da lista ocorreu entre 26 de junho e 01 de julho de 1996, com máxima de 4,79 m em Cabo Frio e duração de 116 horas, com vento máximo de  $14,77 \text{ m s}^{-1}$ . Em Santos, a máxima foi de 4,34 m.

O estudo já mencionado de Santos *et al.* (2004), que verificaram os efeitos de ressacas ocorridas em Niterói entre 1892 e 1999, apresenta uma lista de ressacas registradas no litoral fluminense. Entre 1979 e 1999 (espaço temporal do artigo que está coberto por esta tese), os autores mencionam 14 ressacas relevantes, com dados obtidos através de jornais e na Fundação Biblioteca Nacional. Desse total, 7 estão presentes na Tabela 5 das mais intensas identificadas em Cabo Frio com os dados do ERA5, sendo 1 em 1982, 1983, 1988, 1992, 1999 e 2 em 1997. As outras 7 aparecem na lista de ressacas gerais (não as 10% mais intensas) ou mostram uma

elevação do swh nos mesmos períodos, mas que não foram incluídas como ressacas pela metodologia deste trabalho. A máxima entre esses eventos foi de 3,95 m, em 1999.

#### 4.6 DISCUSSÃO GERAL

Este subcapítulo visa abordar mais detalhadamente os dados de ressacas considerando toda a costa sul e sudeste do Brasil, e não apenas pontos específicos, como feito até o momento.

Dado que a quantidade de ressacas foi apresentada de forma individual, tentou-se descobrir a quantidade real de eventos únicos, considerando que uma ressaca que ocorre em Rio Grande possivelmente também ocorre em Itajaí, Santos e/ou Cabo Frio. Porém, a análise não obteve sucesso em virtude das ondas não atingirem os quatro pontos ao mesmo tempo e, tampouco, na mesma ordem espacial, dependendo da localização do ciclone extratropical. Isto fez com que a automação atribuisse, erroneamente, em alguns casos, uma mesma ressaca ocorrida em Itajaí a uma em Rio Grande, por exemplo. O problema ocorreu principalmente no inverno, pela maior quantidade de ressacas em datas próximas. Diante disso, estimou-se subjetivamente que ocorreram de 2 a 3 ressacas anuais em Itajaí, Santos ou Cabo Frio que não foram registradas em Rio Grande (onde foram contabilizadas 1245 eventos), totalizando entre 1329 e 1371 ressacas na costa brasileira durante o período analisado.

A análise quantitativa mostrou que ocorreram mais ressacas em Rio Grande do que nos demais três pontos, como esperado. Isso ocorreu por causa da proximidade do ponto com áreas ciclogênicas já mencionadas em outros estudos (Gan e Rao, 1991; Reboita *et al.*, 2010; Gramcianinov *et al.* 2019). Além disso, o limiar fixo usado para a identificação de casos (2,5 m) faz com que mais casos sejam naturalmente detectados em regiões mais ao sul da costa brasileira, onde swh é maior em média quando comparado a pontos mais ao norte. Esse gradiente do swh ao longo da costa do Brasil é reportado em outros trabalhos (e.g., Pianca *et al.*, 2010; Gramcianinov *et al.*, 2023b) e também observado através da diminuição na direção norte da swh média durante as ressacas calculada em cada ponto.

Em termos sazonais, durante todo o período analisado, o inverno foi a estação com mais ressacas nos quatro pontos, seguido da primavera e do outono, e

com o verão sendo menos numeroso. Esse mesmo padrão de distribuição sazonal foi encontrado por Gramscianinov *et al.* (2020a) em sua análise de extremos de onda associados a ciclones na região. Apesar da ligeira maior quantidade de ressacas na primavera do que no outono, esta última estação apresentou médias do swh maiores que a primeira em Rio Grande, Itajaí e Santos. Além disso, quando considerada apenas a amostra de 10% de ressacas com maior swh máximo, apenas em Itajaí a quantidade de casos foi ligeiramente maior na primavera do que no outono (17 e 16, respectivamente), com a maior diferença ocorrendo em Cabo Frio (19 no outono e 10 na primavera).

Setembro registrou o maior número de ressacas em todos os quatro pontos da costa brasileira, com valores geralmente próximos aos observados nos meses de inverno e em maio, enquanto abril e outubro apresentaram dados ligeiramente inferiores. Setembro não é o mês preferencial para a ocorrência de ressacas na costa brasileira em outros estudos (Bitencourt *et al.*, 2002; Campos *et al.*, 2010; Barros *et al.*, 2018), que apontam o outono e inverno como os meses mais propícios. Porém, os autores destacam que as ressacas podem ocorrer em qualquer período do ano. Bulhões *et al.* (2014) destacam que cerca de 80% das ressacas na região do estado do Rio de Janeiro ocorrem entre abril e setembro, o que corrobora com este estudo. Quando considerado apenas a amostra de 10% de ressacas mais intensas em Rio Grande, os meses de abril, maio e setembro tiveram quantidades similares, mas abaixo dos meses de inverno. Em Itajaí, maio e julho foram os mais elevados. Em Santos, maio foi o quarto mês com mais casos, atrás dos meses inverniais. Já em Cabo Frio, maio registrou mais casos, seguido dos meses do inverno e setembro. Ou seja, apesar da maior quantidade geral de ressacas em setembro no geral, os meses de maio, junho, julho e agosto tiveram mais casos intensos. Tanto a análise sazonal quanto mensal revelam que, apesar do inverno apresentar eventos mais intensos e em maior número, outros meses se destacam em ocorrência e não devem ser negligenciados em estudos e monitoramento de ressacas. Ressacas com intensidades moderadas, mas subsequentes, podem causar danos tão ou mais severos que ressacas extremas (de CAMARGO e HARARI, 1994).

As médias anuais do swh das ressacas foram mais elevadas em Rio Grande, seguindo com Itajaí, Santos e Cabo Frio, como já discutido acima. As maiores médias sazonais ocorreram no inverno, seguido de outono, primavera e verão, em

acordo com Araujo *et al.* (2003). Apenas em Cabo Frio a média da primavera foi ligeiramente mais elevada que o outono. A maior média mensal ocorreu em maio tanto em Santos quanto em Cabo Frio, em agosto em Itajaí, e em junho em Rio Grande. Como aconteceu com as quantidades de ressacas, as maiores médias gerais ocorreram nos meses de inverno, final do outono e início da primavera.

Dados de vento máximo da amostra de 10% de ressacas mais intensas mostram que os valores mais elevados foram encontrados em Rio Grande. A média geral na costa gaúcha dentro da amostra foi de  $18,81 \text{ m s}^{-1}$  (a média do valor máximo de vento em cada ressaca das 10% mais intensas). Em Itajaí, foi de  $16,30 \text{ m s}^{-1}$ , em Santos de  $13,95 \text{ m s}^{-1}$  e em Cabo Frio de  $13,14 \text{ m s}^{-1}$ .

A direção mediana de ondas das ressacas teve predominância de sudeste/sul/sudoeste em todos os quatro pontos, tanto quando considerando todas as ressacas quanto apenas as de maior swh máximo, em concordância com Pianca *et al.* (2010) e Gramcianinov *et al.* (2023c). Em Rio Grande, foi observado, ainda, uma quantidade relevante de ressacas com direção mediana de nordeste.

Sazonalmente, as ressacas no outono e inverno tiveram direção, principalmente, de quadrantes de sudeste/sudoeste, assim como o verão, em menor quantidade. Durante a primavera observou-se um deslocamento mediano para leste/nordeste. Resultados similares foram encontrados por Pianca *et al.* (2010), por Klumb-Oliveira *et al.* (2015) e Krueger (2011) no estado do Rio de Janeiro. Parise *et al.* (2009) afirmam que na primavera os ventos de nordeste são mais frequentes, o que se relaciona com o aumento de ressacas dessa direção mediana na estação. Além disso, é possível que ventos desse quadrante causem um aumento na quantidade de casos identificados na primavera nos dados do ERA5 mas com swh médio não tão elevado quanto no outono e inverno.

Os períodos médios mostraram valores mais baixos em Rio Grande, seguido de Itajaí, Santos e Cabo Frio. Isso ocorreu na análise de todas as ressacas e também quando considerado apenas as 10% de maiores swh máximos.

A análise das ressacas mais severas pode proporcionar um maior detalhamento dos eventos que podem causar impactos significativos na costa, como erosão, inundações e danos à infraestrutura, além de permitir futuros estudos sobre sua relação com fenômenos como El Niño e La Niña. Esses dados podem ser usados para aprimorar modelos de previsão, gerando conhecimento mais preciso sobre a ocorrência de ressacas severas e auxiliando na mitigação de seus efeitos.

As linhas de tendências temporais do swl entre 1979 e 2020 mostraram influência do período anterior a 1992, antes da era aprimorada dos satélites de altimetria, como apresentado na Figura 18. Nesse período anterior a 1992, os satélites de altimetria eram limitados em precisão e cobertura global. Eles permitiam medições das variações de altura da superfície dos oceanos, mas com uma resolução e acurácia relativamente limitadas. Com isso, optou-se por não realizar essas análises durante todo o período pois os dados demonstraram ser subestimados de 1979 a 1992, apenas após 1992. Diversos estudos abordam a evolução dos satélites na década de 1990, como o lançamento do satélite TOPEX/Poseidon, que marcou significativamente a era de satélites de altimetria (TIMMERMANS *et al.*, 2020; BARLIER e LEFEBVRE, 2001; ESCUDIER e FELLOUS, 2009).

Dessa forma, identificou-se tendência positiva nos quatro pontos de análise: Rio Grande ( $0,16 \text{ a}^{-1}$ ), Itajaí ( $0,05 \text{ a}^{-1}$ ), Santos ( $0,06 \text{ a}^{-1}$ ) e Cabo Frio ( $0,10 \text{ a}^{-1}$ ).



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES: CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS

Este capítulo inicia com a quantificação, anual e sazonal, de ciclones extratropicais no Atlântico Sul e no Brasil durante o período analisado. Em seguida, foi realizada uma análise dos ciclones relacionados com as ressacas identificadas no capítulo 4. Ao final, um subcapítulo abordará a ressaca mais intensa em cada um dos quatro pontos da costa brasileira estudados.

### 5.1 QUANTIFICAÇÃO DE CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL

A Figura 65 exibe a quantidade anual de ciclogêneses identificadas utilizando os dados de Gramcianinov *et al.* (2020b) no Atlântico Sul entre 1979 e 2020, considerando todo o Atlântico Sul, não apenas áreas próximas ao Brasil. Deve-se destacar que, assim como as ressacas, o termo "ciclogênese" se refere a um evento quantificado com base nos parâmetros apresentados na metodologia, utilizando vorticidade, e não necessariamente a ocorrência de um ciclone extratropical de grande impacto. Dessa forma, o ano com mais registros foi 2016 (745), seguido por 2017 (742) e 2015 (740), com outros anos apresentando valores semelhantes, como 1999 (737), 2001 (736) e 2018 (736). Os anos com a menor quantidade de eventos foram 1979 (665), 1982 (674) e 1996 (682). Alguns desses anos, como 2017, 2016 e 1999, também apresentaram maior ocorrência de ressacas.

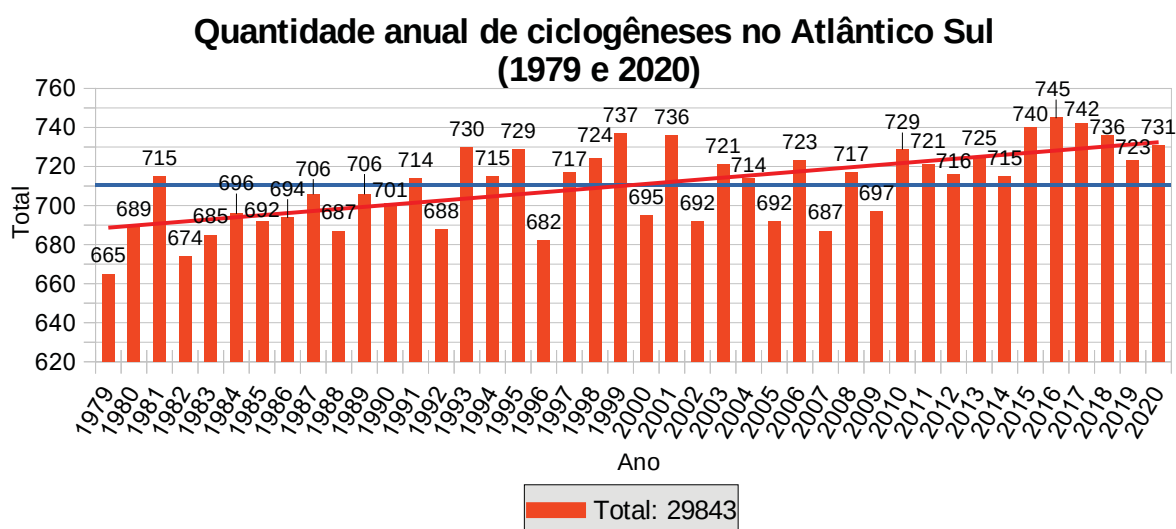


Figura 65 - Quantidade anual de ciclogêneses no Atlântico Sul com dados do ERA5. A linha azul exibe a média anual e a vermelha a tendência.

O total geral foi de 29843 ciclones e a média anual de 711 (linha horizontal azul). É observável uma grande variação anual mas com dois padrões principais de quantidade: uma abaixo de 700 e outra atingindo valores bem mais elevados, acima de 720. Nota-se também um padrão elevado e que se manteve após 2014, diferindo de períodos anteriores.

Durante o período analisado, a correlação de Pearson mostrou um valor de R de 0,3529 entre a quantidade de ciclones por ano e a de ressacas em Rio Grande. Em Itajaí, o valor de R foi de 0,5039, em Santos de 0,4141 e em Cabo Frio o valor de R foi de 0,3873. Ou seja, apesar de positiva, a correlação variou entre fraca a moderada. A linha de tendência mostrou uma variação positiva de 1979 a 2020.

É sabido que as ressacas estão diretamente relacionadas aos ciclones extratropicais, e que uma maior incidência de ciclogêneses, mesmo que distantes da costa, pode aumentar o número de casos de ressacas. Como já mencionado, é importante destacar que as ressacas podem ocorrer mesmo em condições de tempo bom, com ciclones afastados da costa, conforme apontado por Melo Filho (2017). No entanto, uma maior quantidade de ciclones em um determinado ano não implicou, necessariamente, um aumento nas ressacas, pois estas dependem de diversos fatores para ocorrer no Brasil e serem mais intensas, como a direção do vento, a proximidade com a costa e a intensidade do ciclone.

Foi realizada, ainda, uma quantificação de ciclones nas áreas definidas por Gramscianinov *et al.* (2020b) como La Plata (RG1) e Sudeste do Brasil (RG2). A definição dessas áreas pode ser visualizado no mapa da Figura 7. A área próxima da Argentina (RG3), entre 38°S e 55°S e 50°W e 70°W, foi descartada da contagem do gráfico abaixo (FIGURA 66) por incluir uma quantidade considerável a mais de ciclogêneses do que as áreas La Plata e Sudeste do Brasil, e, proporcionalmente, estarem menos associadas com ressacas na costa do Brasil. A área La Plata compreende o noroeste da Argentina e Uruguai, entre 23°S e 37°S e 68°W e 52°W e a Sudeste do Brasil envolve o sul e sudeste do Brasil, entre 23°S e 37°S e 52°W e 38°W. Segundo os autores, as ciclogêneses na área La Plata são mais frequentes no inverno, a Sudeste do Brasil não possui estação mais intensa e a área Argentina é a mais intensa entre todas, sendo ainda mais ativa no verão.

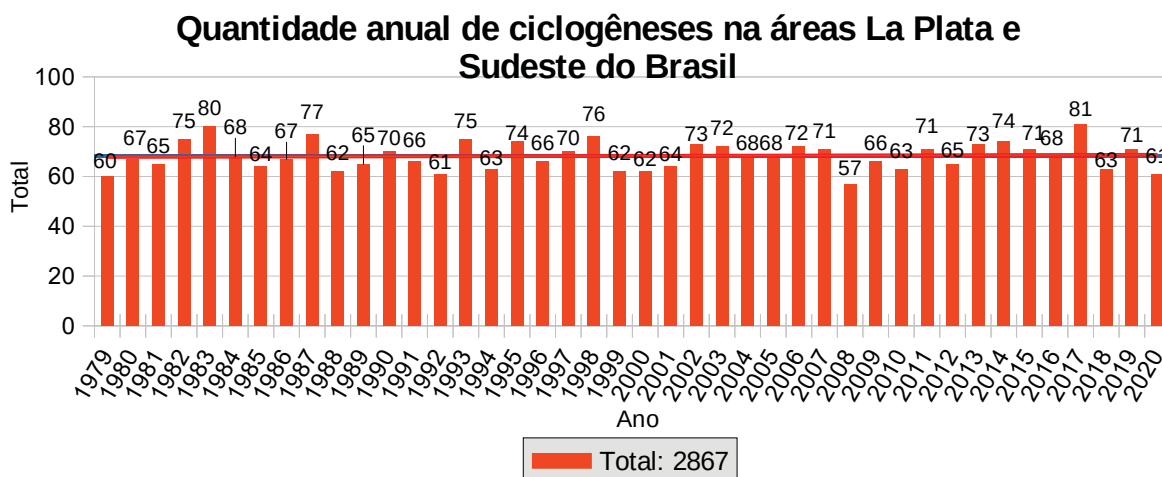


Figura 66 - Quantidade anual de ciclogêneses identificadas com dados do ERA5 nas áreas La Plata e Sudeste do Brasil. A linha horizontal vermelha indica a tendência.

A média anual de ciclogêneses foi de 68,3 ciclones. Alguns anos apresentaram totais visivelmente mais elevados, como 2017 (81), 1983 (80), 1987 (77) e 1998 (76). Alguns anos com mais ciclones apresentaram também mais ressacas, como 2017, que, com 38 casos, registrou o valor mais elevado em Rio Grande (Figura 12). Por outro lado, o ano de 2010 (37) foi um dos anos com a maior quantidade de ressacas em Rio Grande mas o total de ciclones esteve dentro da média. A linha de tendência de ciclones na áreas La Plata e Sudeste do Brasil juntas foi levemente positiva, mas não significativa para indicar elevação no período. O que percebe-se é uma elevação em alguns anos. Considerando apenas as ciclogêneses ocorridas em La Plata, a tendência foi positiva. Já na área Sudeste do Brasil foi negativa.

Em relação aos ciclones explosivos, Reis (2022) identificou 109 casos com dados do ERA5, sem que houvesse tendência positiva ou negativa de aumento entre 1980 e 2019. O autor apontou que os ciclones explosivos representam 0,2% do total nas áreas Sudeste do Brasil e La Plata, e 6,4% quando considerada apenas a La Plata. Do total de casos, 14 foram encontrados no verão, 22 no outono, 44 no inverno e 29 na primavera.

A análise sazonal (FIGURA 67) mostrou que ocorreram 599 ciclogêneses no verão, 629 no outono, 881 no inverno e 758 na primavera, não apresentando uma grande sazonalidade, como relatado anteriormente (e.g., Crespo *et al.*, 2020). Estes autores apontaram que na área Sudeste do Brasil a corrente de jato é perturbada pela alta altitude dos Andes tanto no inverno quanto no verão, gerando uma

ondulação e deslocamento em direção aos polos ao cruzar as montanhas andinas durante o inverno, e um deslocamento mais leve em direção ao Equador durante o verão. A área La Plata apresenta características distintas no inverno e no verão, estando as ciclogêneses mais relacionadas com as correntes de jato no inverno, e com gradientes de temperatura e umidade no verão. Já na área Argentina, as ciclogêneses ocorrem sob influência de um jato equatorial em alta altitude durante o verão, enquanto que no inverno a região de gênese está localizada na saída polar desse jato.

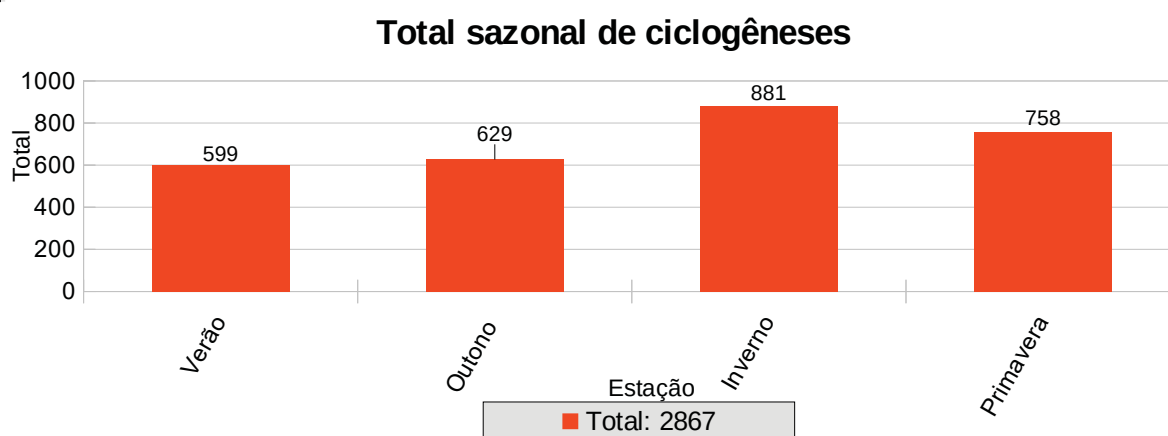


Figura 67 - Total sazonal de ciclogêneses nas áreas La Plata e Sudeste do Brasil somadas entre 1979 e 2020.

A média anual no verão foi de 14,3 ciclones, de 14,8 no outono, de 20,8 no inverno e de 18,1 na primavera. É importante destacar que a área La Plata concentra uma quantidade maior de ciclones do que a área Sudeste do Brasil, e não necessariamente as ciclogêneses que ocorrem na primeira área atuam próximo da costa brasileira, podendo ter deslocamento para sudeste após a formação. A correlação de Pearson não mostrou valor de R significativo entre a quantidade de ciclones e de ressacas nas estações, analisando cada um dos quatro pontos na costa brasileira de forma individual. A linha de tendência de ciclones no período de análise em La Plata e Sudeste do Brasil foi levemente positiva no verão e inverno, levemente negativa no outono e linear na primavera.

## 5.2 CICLONES EXTRATROPICAIS E RESSACAS ASSOCIADAS

Detalha-se na sequência as ciclogêneses que foram relacionadas com as ressacas apresentadas no capítulo 4. Após a identificação de todas as ressacas, foi

rodado um código para verificar quais ciclones extratropicais, dentro de determinadas condições, seriam relacionados. Os critérios foram os estabelecidos na metodologia de distância, intervalo temporal e quadrante igual de vento e onda. A metodologia foi considerada competente, principalmente para ressacas intensas (abordado no subcapítulo 5.3). No entanto, não foi capaz de fazer essa identificação em todos os casos. Isso ocorreu porque o limiar de 2,5 m de altura significativa de onda da NORMAM-19, usado para definir uma ressaca, incluiu uma quantidade significativa de eventos entre 2,5 e 3 m causados por anticiclones, além de agitações marítimas relacionadas com ciclones mais distantes da costa brasileira. Outro ponto foi o filtro de distância, tempo e direção de onda utilizado, que evitou relacionamentos equivocados. Apesar disso, considerou-se satisfatória a amostra obtida é capaz de proporcionar uma análise geral dos ciclones.

### 5.2.1 CICLONES EXTRATROPICAIS EM RIO GRANDE

Das 1245 ressacas identificadas na área da boia Rio Grande e no período analisado, o código foi capaz de encontrar um ciclone dentro das condições especificadas em 70,36% dos casos. O mapa da Figura 68 apresenta o local de gênese (pontos pretos) e o deslocamento (linhas roxas) de todos os ciclones extratropicais relacionados com ressacas em Rio Grande. Deste total, 53,2% tiveram gênese dentro do quadrante La Plata (ver quadrantes na Figura 7, pg. 20), 9,1% no quadrante Sudeste do Brasil e 20,6% no quadrante Argentina. Em 17,1% dos casos, a gênese ocorreu fora dos quadrantes, em áreas próximas, ou, até mesmo, mais distantes. É importante notar que a identificação dos ciclones extratropicais por Gramscianinov *et al.* (2020b) utilizou parâmetros de vorticidade, que identifica a gênese dos sistemas em ponto bastante inicial.

Nota-se um padrão mais evidente de deslocamento com origem na área La Plata e trajetória para sudeste e leste, de acordo com os padrões mais comuns que causam ressacas no sul do Brasil identificados por Machado *et al.* (2010). Ciclones de forte intensidade com origem no norte da área Argentina e deslocamento para nordeste também foram capazes de gerar ressacas em Rio Grande. Parte dos ciclones se formaram na costa brasileira, com trajetórias variando entre sudeste e leste. Apesar da área Sudeste do Brasil ter uma maior proximidade com o ponto da boia Rio Grande, a quantidade de ciclones com gênese nesta área é menor do que

na La Plata, o que se replica na Figura 68. Outro ponto a ser considerado é que ciclones com gênese na costa brasileira têm deslocamento sudeste/leste e, geralmente, não possuem tempo de se intensificarem quando ainda estão próximos da costa para gerar uma forte ressaca. Já os ciclones que se formam em La Plata podem se intensificar até alcançar o oceano, atingindo maturidade em uma área já propícia para gerar fortes ventos com uma pista de vento grande e, conseqüentemente, ressacas.

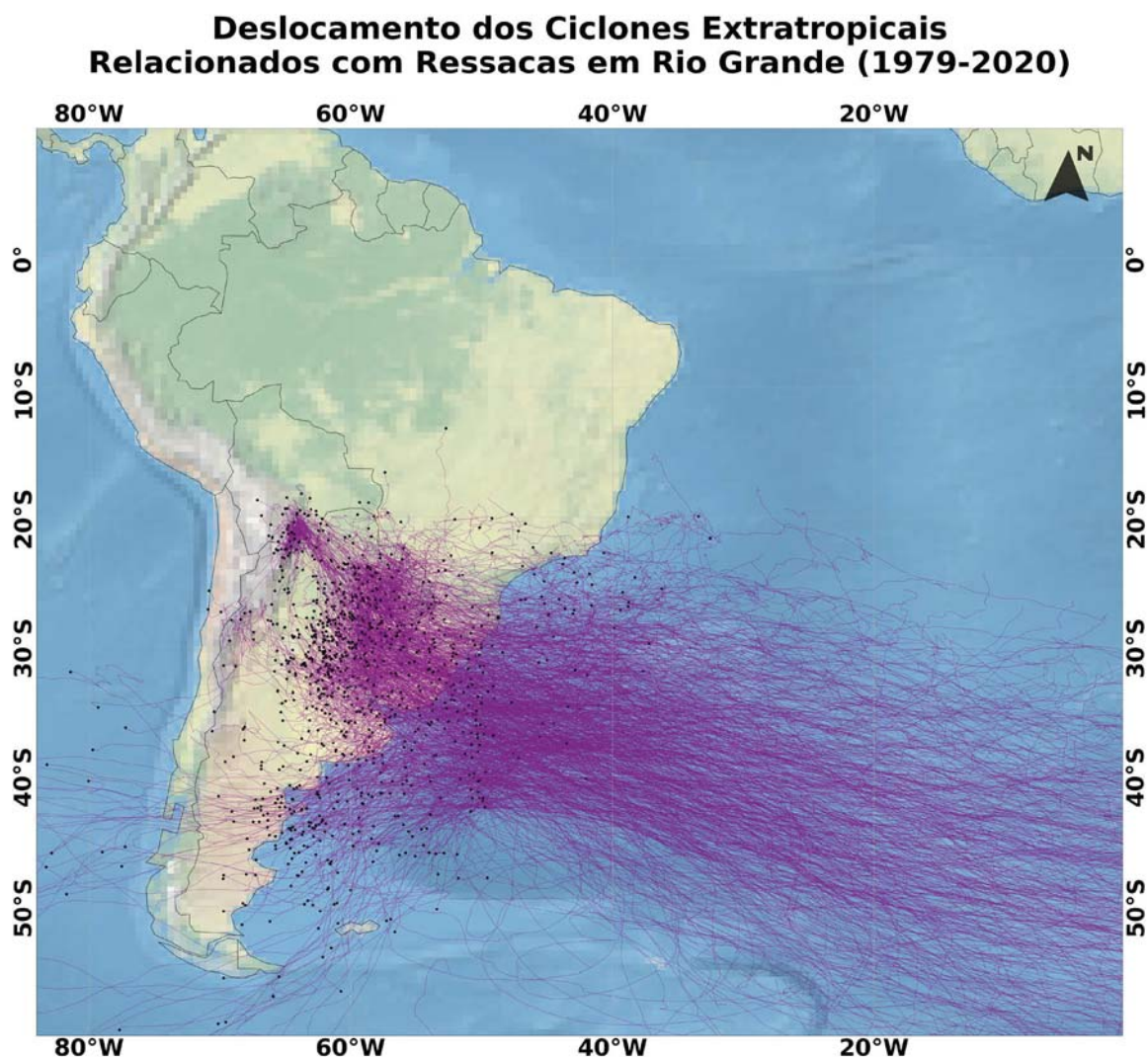


Figura 68 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Rio Grande de 1979 a 2020.

O mapa de calor da Figura 69 utiliza a densidade de Kernel para identificar quais as áreas preferenciais para a gênese de ciclones que causam ressacas em Rio Grande. A cor mais intensa indica que a área La Plata, entre o norte da Argentina e o oeste do Rio Grande do Sul, foi mais destacada. A densidade se



expande para as costas gaúcha e uruguaia. Uma mancha na zona leste central da Argentina também se fez presente. Considerando a abrangência de toda a área colorida, entende-se que as ressacas em Rio Grande podem ser geradas por ciclones em toda essa área, com maior destaque para as três áreas mencionadas. Ressalta-se que a metodologia para a identificação de ciclogêneses detecta a vorticidade em um estágio bastante inicial. Com isso, observa-se uma densidade significativa em áreas continentais. Em relação às ressacas, após o ponto de gênese, os ciclones geralmente atingem suas fases maduras em áreas oceânicas, embora possam se intensificar também em regiões continentais.

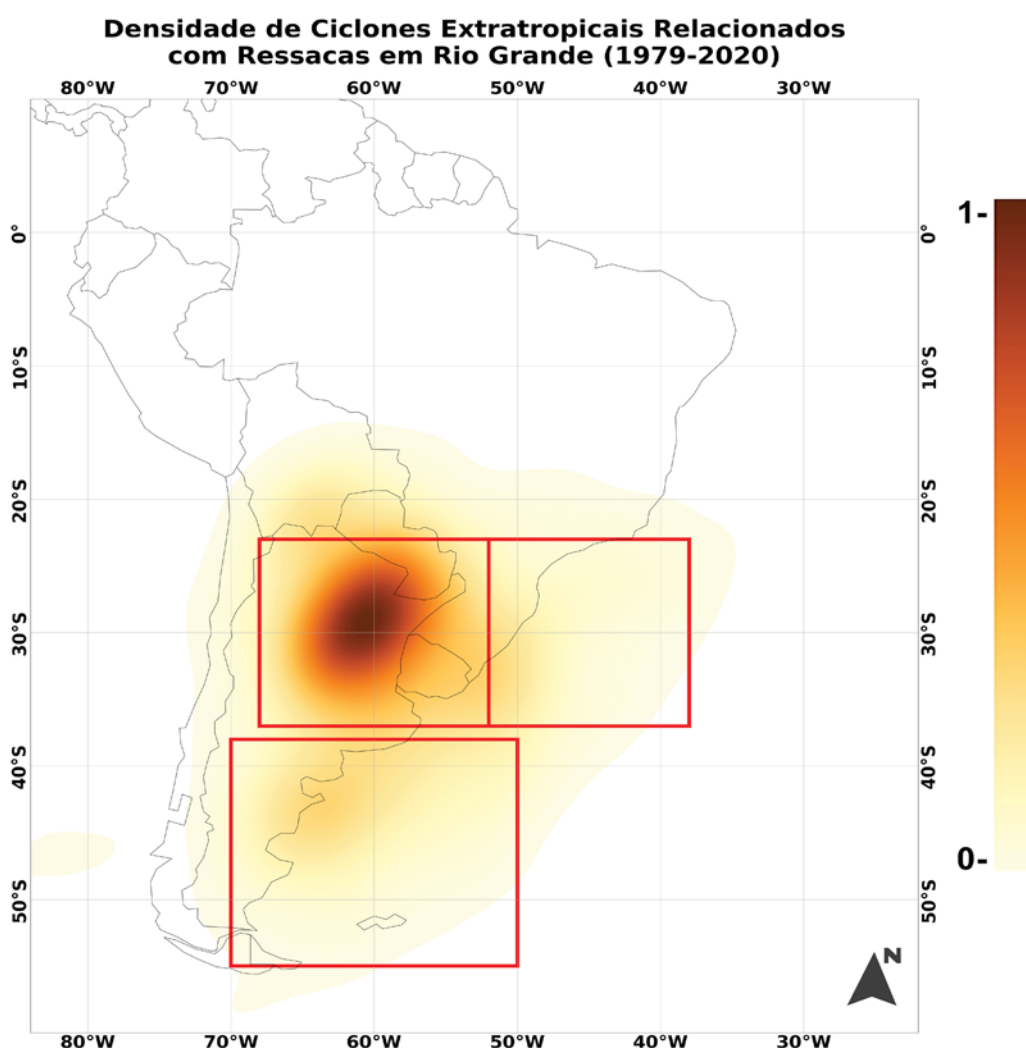


Figura 69 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gênese.

Os mapas de deslocamento e gênese de ciclones e de calor das Figuras 70 e 71 mostram os dados de forma sazonal. Pela grande quantidade de ressacas e ciclones no inverno, os gráficos desta estação são similares aos que exibem os

dados anuais acima, com grande quantidade de ciclones na região do Rio da Prata com deslocamento para sudeste/leste, de ciclogêneses que se formam na costa gaúcha e ciclones de forte intensidade oriundos da área Argentina, com deslocamento para nordeste. Os mapas do outono mostram uma similaridade com o inverno e aumento de ciclogêneses nos limites entre continente e oceano, bem como na área Argentina. Na primavera, a densidade na área Argentina diminui e aumenta no Sudeste do Brasil, o que está de acordo com a imagem da Figura 23, que mostra um aumento da direção mediana de ondas de leste/nordeste durante a estação. O verão tem queda considerável de ciclones na área do Rio da Prata e aumento no Sudeste do Brasil, em relação ao inverno.

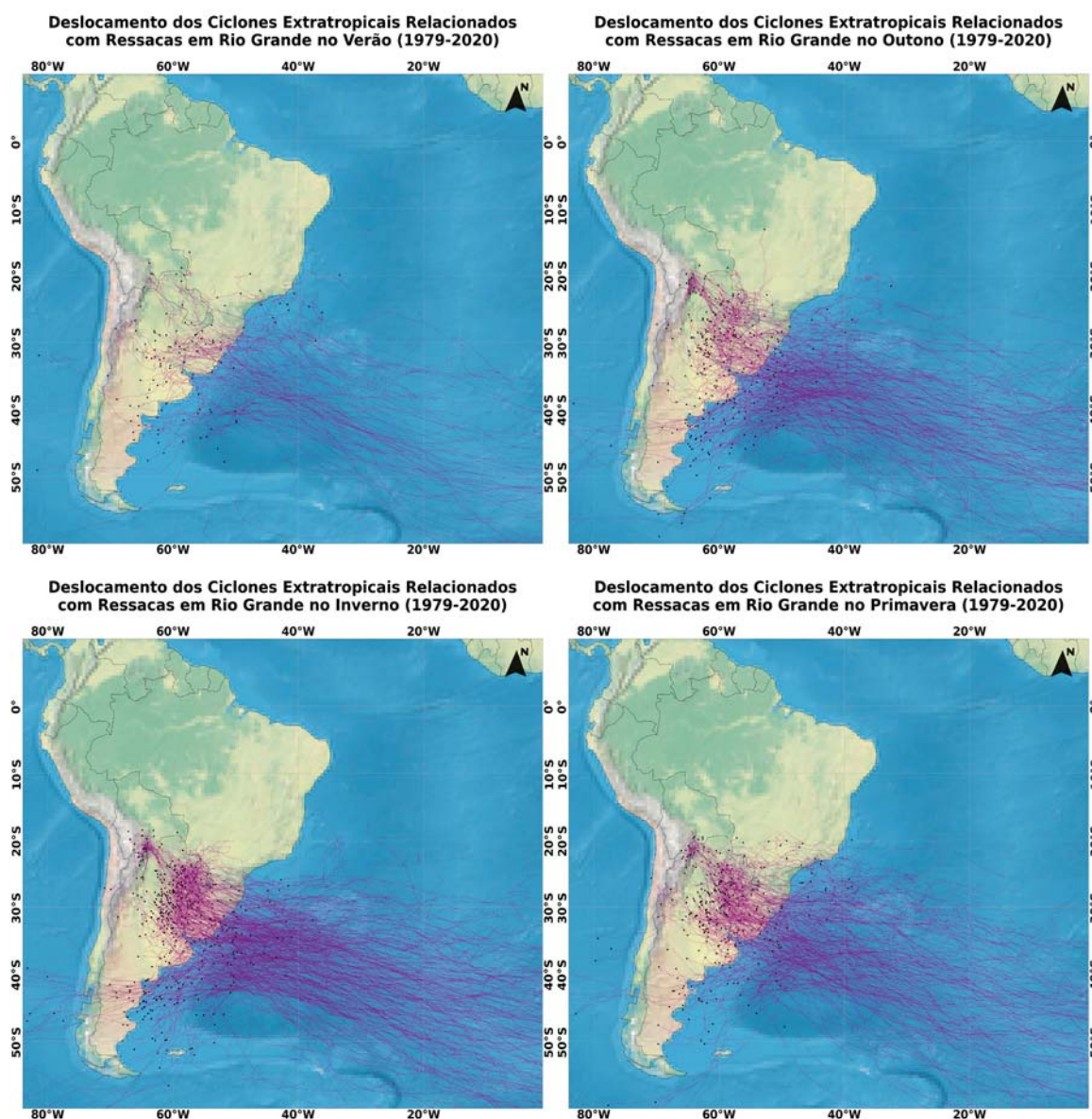


Figura 70 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Rio Grande de 1979 a 2020 em cada estação do ano.



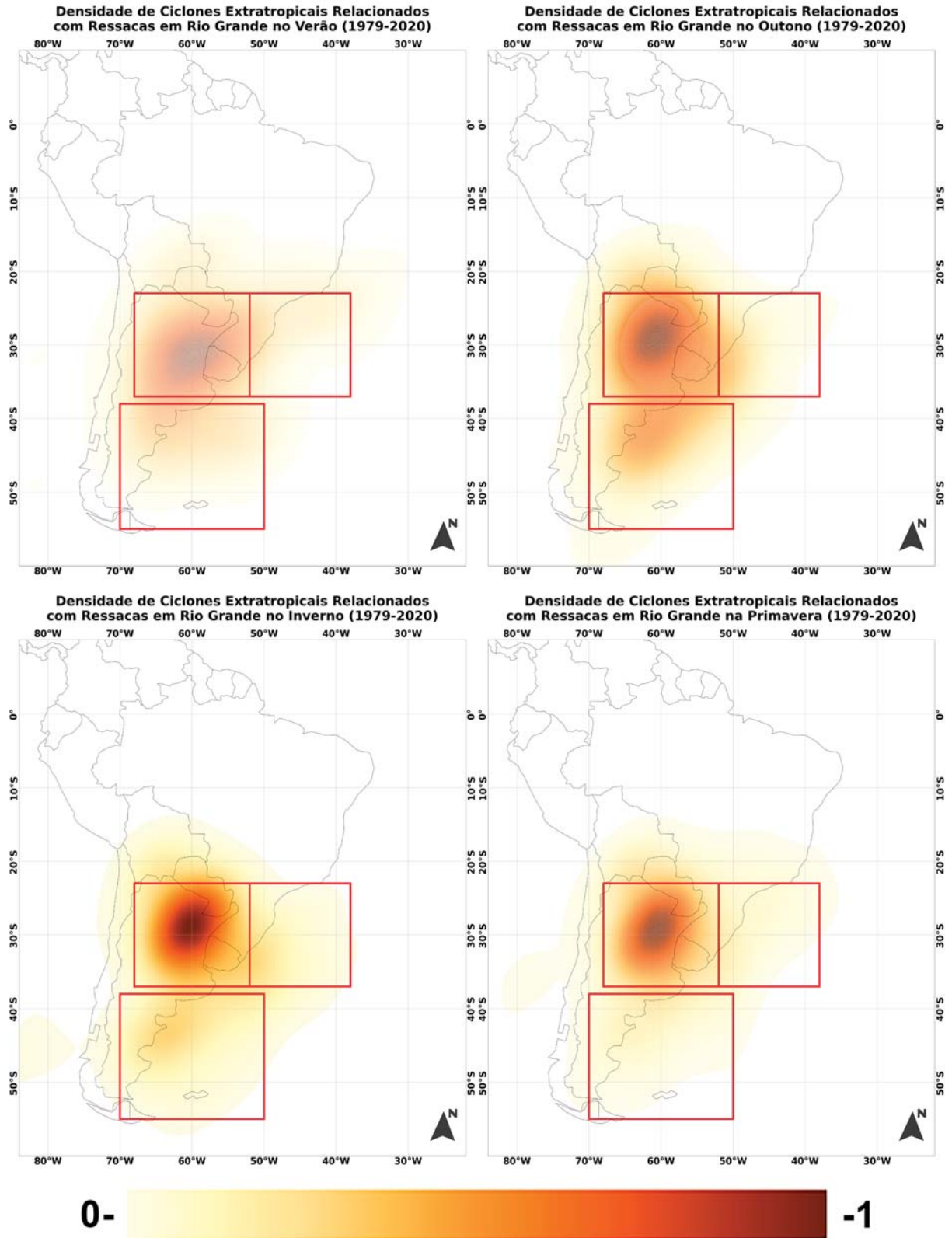


Figura 71 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Rio Grande entre 1979 e 2020 nas estações do ano. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gêneses. As cores foram ajustadas para mostrar valores proporcionais em cada estação considerando a quantidade total de ciclones, sendo o inverno a base.

## 5.2.2 CICLONES EXTRATROPICAIS EM ITAJAÍ

Foram identificadas 736 ressacas em Itajaí no período analisado. Desse total, foi encontrado no mínimo um ciclone relacionado em 62,4% dos casos. A Figura 72 exhibe a gênese desses ciclones e seu deslocamento. Em 52,6%, os ciclones tiveram gênese em La Plata. Em comparação com Rio Grande, a área Sudeste do Brasil teve um aumento de participação para 16%. A área Argentina teve contribuição de 14,3% e áreas externas aos quadrantes 17,1%.

Observa-se uma diminuição da quantidade total de ciclones e um aumento proporcional de gêneses próximo ao litoral brasileiro em comparação com o ponto da boia Rio Grande. Ocorre, ainda, uma diminuição de ciclones com deslocamento sul, próximo da latitude 40°S.

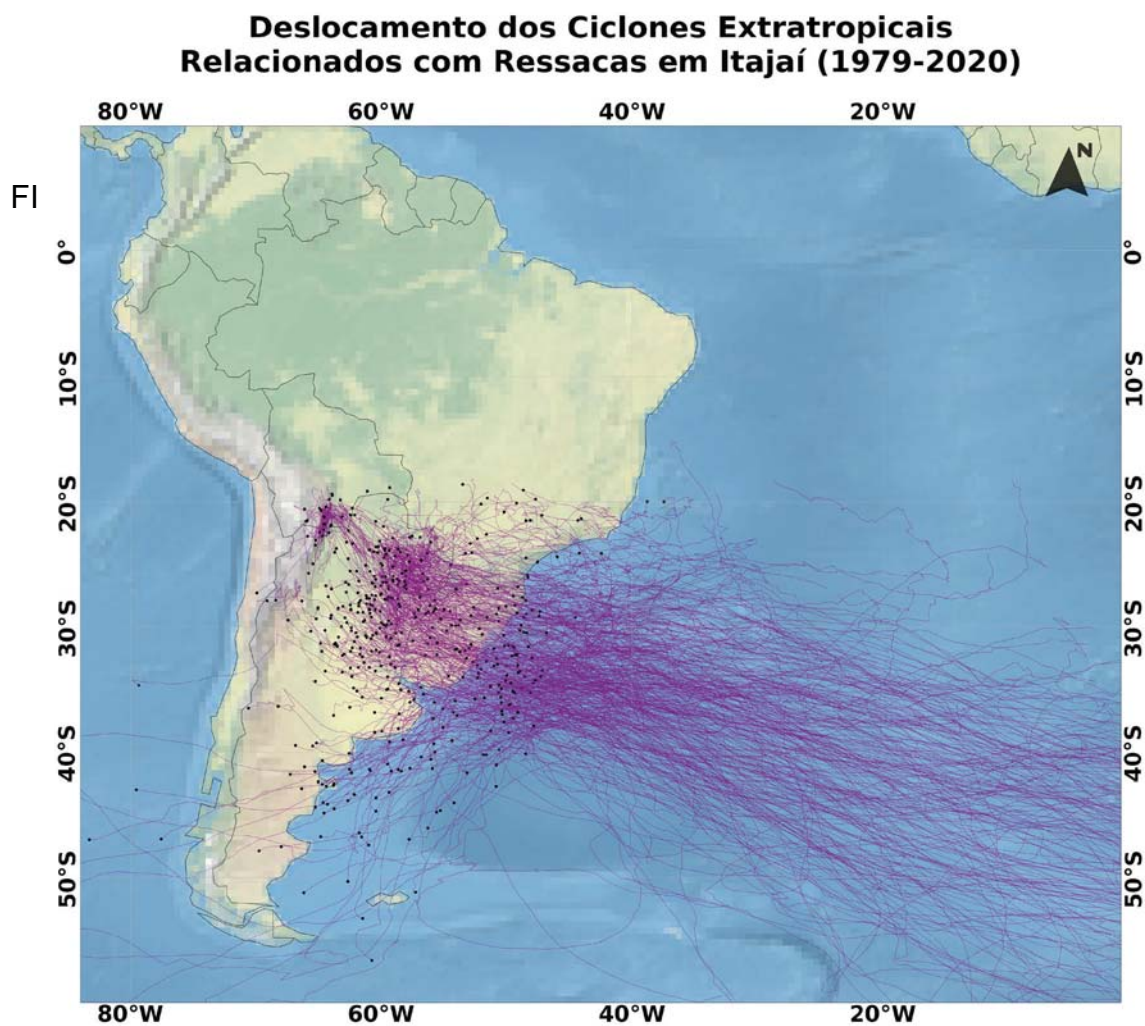


Figura 72 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Itajaí de 1979 a 2020.

A Figura 73 mostra esse aumento da densidade na área Sudeste do Brasil. Parte considerável do Rio Grande do Sul e Uruguai é considerado como La Plata, onde a densidade também foi maior que em Rio Grande. Houveram sistemas com formação até mesmo no litoral do estado do Espírito Santo.

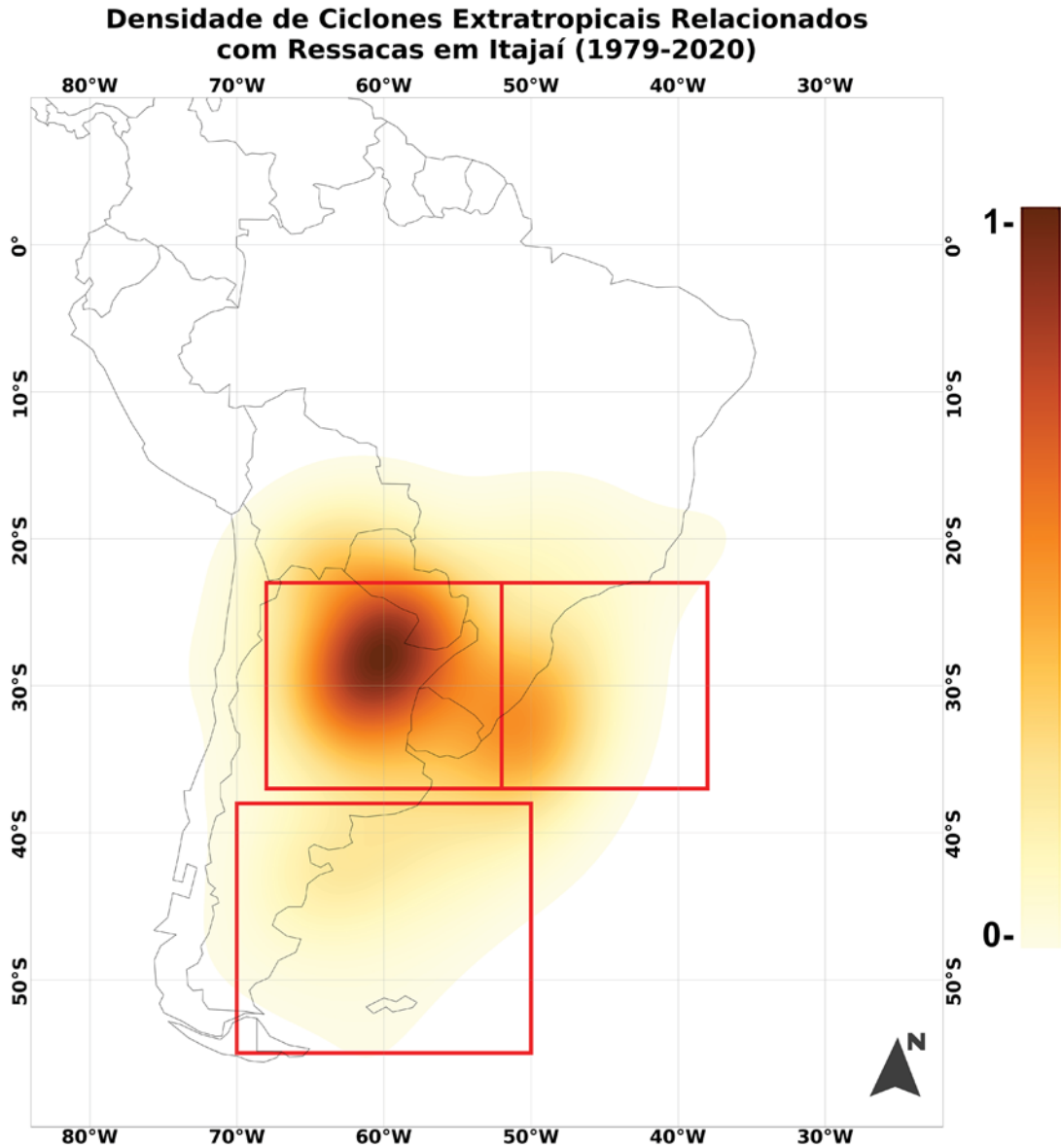


Figura 73 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gêneses.



De forma sazonal, as Figuras 74 e 75 mostram dados similares a Rio Grande. No verão, a predominância é de ciclones com origem na bacia do Prata e Sul/Sudeste do Brasil, com raras formações na área Argentina. Durante o outono e o inverno, ocorre um aumento considerável de ciclogêneses em todas as áreas, com um visível aumento na área Argentina. Na primavera, ciclones nessa área diminuem e aumentam em latitudes menores, como o Sudeste do Brasil.

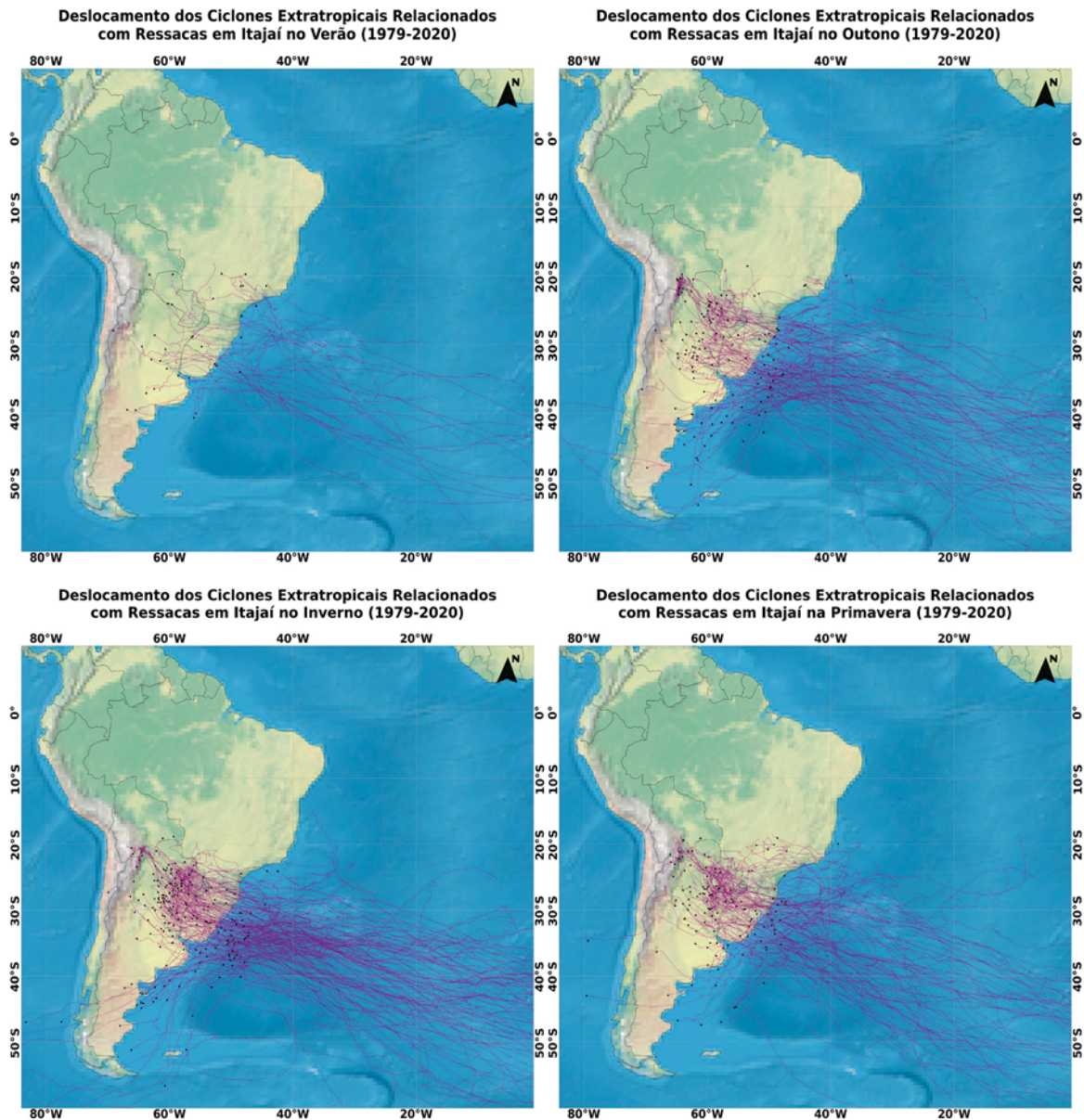


Figura 74 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Itajaí de 1979 a 2020 em cada estação do ano.

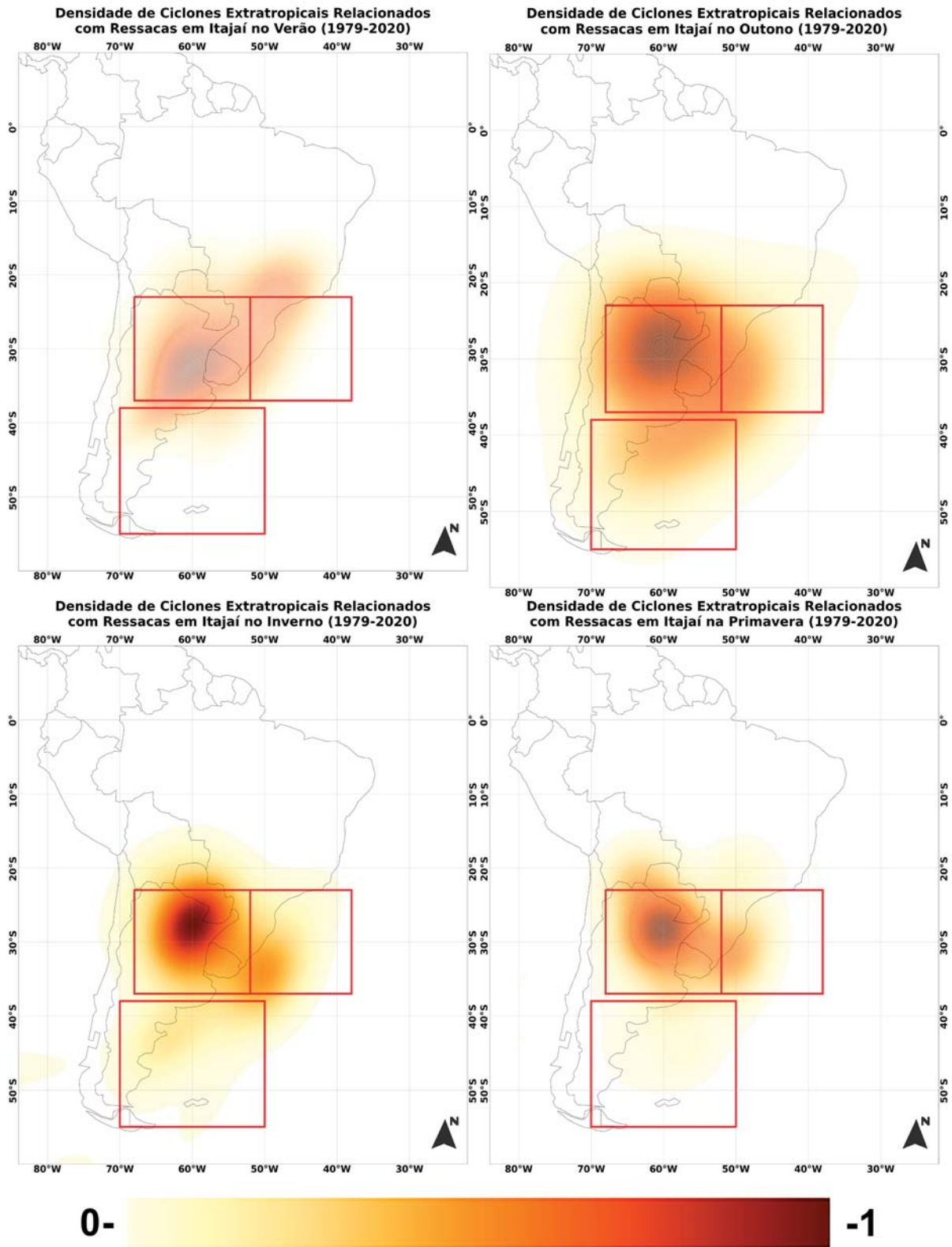


Figura 75 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Itajaí entre 1979 e 2020 nas estações do ano. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gênese. As cores foram ajustadas para mostrar valores proporcionais em cada estação considerando a quantidade total de ciclones, sendo o inverno a base.

### 5.2.3 CICLONES EXTRATROPICAIS EM SANTOS

Entre as 770 ressacas identificadas em Santos, foi possível encontrar um ciclone associado em 56% dos casos. A maior distância entre o ponto da boia e a região da bacia do rio da Prata fizeram com que a porcentagem diminuísse, considerando que a maioria das ressacas identificadas em Itajaí também ocorreram em Santos.

Na Figura 76, pode-se observar que os dados são similares a Itajaí, pela pouca distância entre as boias. A contribuição de La Plata caiu para 44,1%, a área Sudeste do Brasil teve 16,8%, a área Argentina 15,9% e áreas externas aos quadrantes representaram 23,2%. A principal diferença na comparação com Itajaí foi a diminuição em La Plata e aumento em áreas próximas da boia, principalmente em latitudes menores.

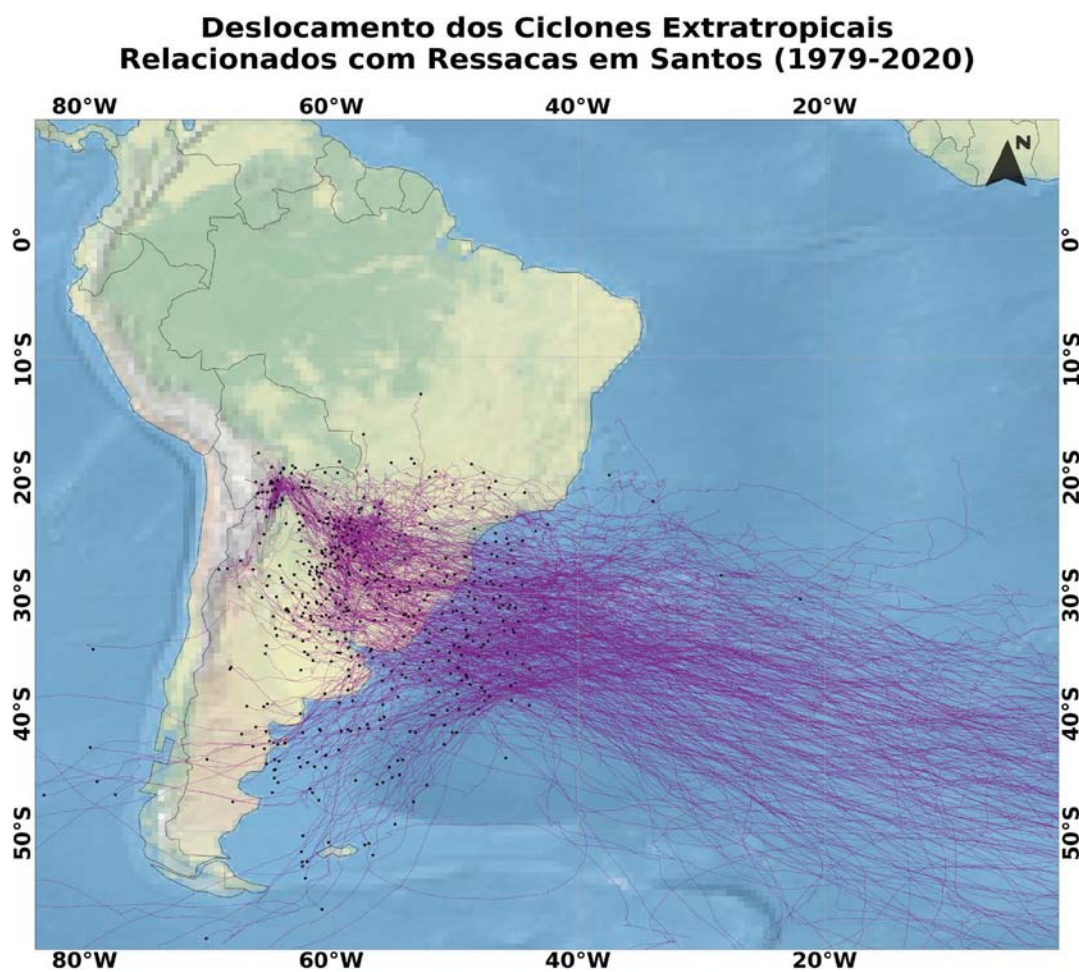


Figura 76 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Santos de 1979 a 2020.



O mapa de calor da Figura 77 mostra um aumento brando no norte em comparação com Itajaí, tanto na área La Plata quanto na do Sudeste do Brasil. Na comparação com Rio Grande, o foco diminui em La Plata e se torna mais expandido, principalmente em direção ao litoral do Rio Grande do Sul, o que é esperado, considerando a menor latitude da boia de Santos.

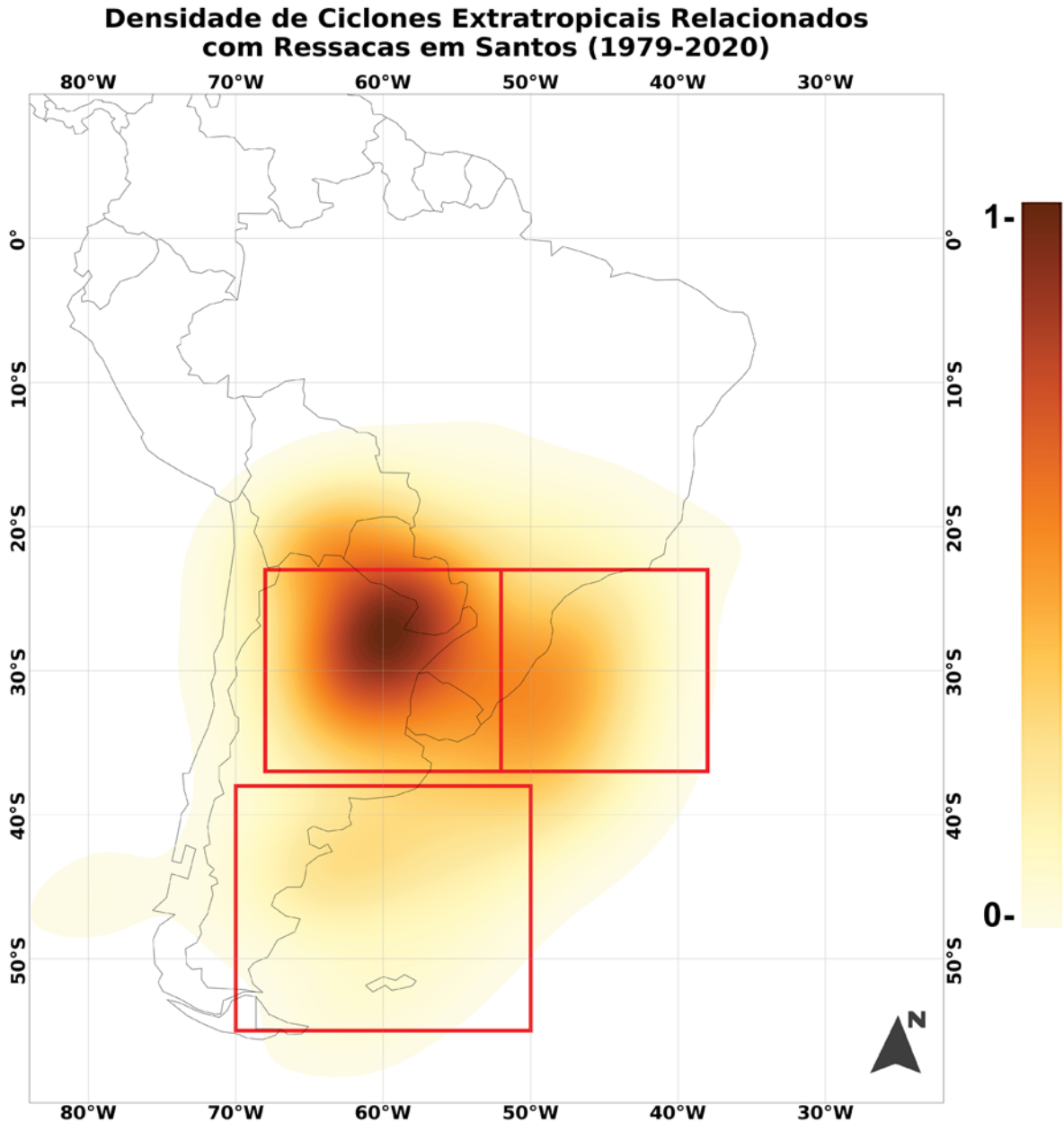


Figura 77 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gênese.

Os mapas sazonais das Figuras 78 e 79 mostram, novamente, uma similaridade entre o outono e inverno, uma pequena diminuição de gêneses de origem na área Argentina e deslocamento para nordeste na primavera e uma concentração menor na áreas La Plata e Argentina durante o verão. O mapa de densidade mostra essa diminuição de gêneses em La Plata no verão, assim como também ocorreu em Rio Grande e Itajaí. Porém, essa interrupção é mais visível em Santos.

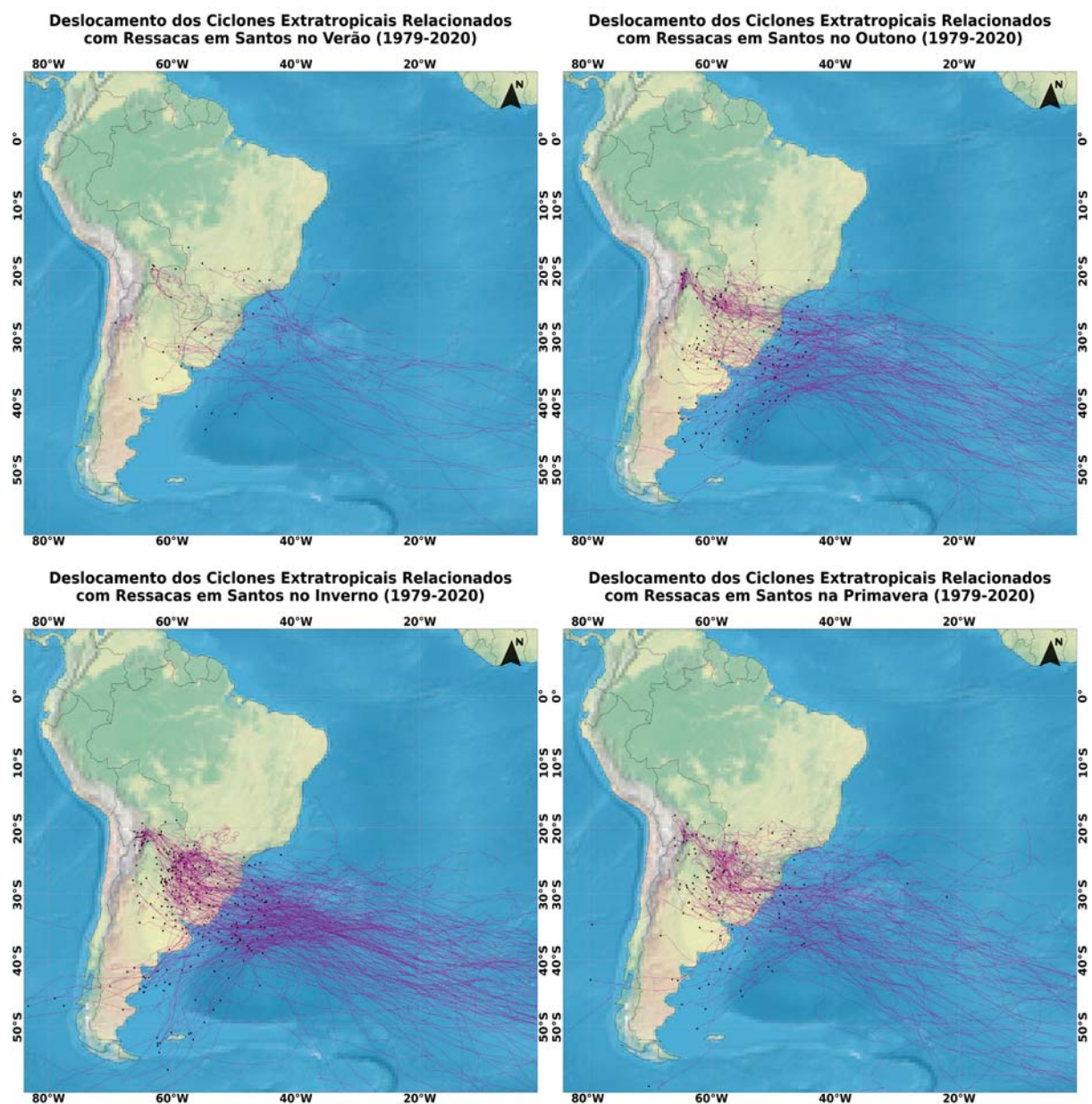


Figura 78 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Santos de 1979 a 2020 em cada estação do ano.



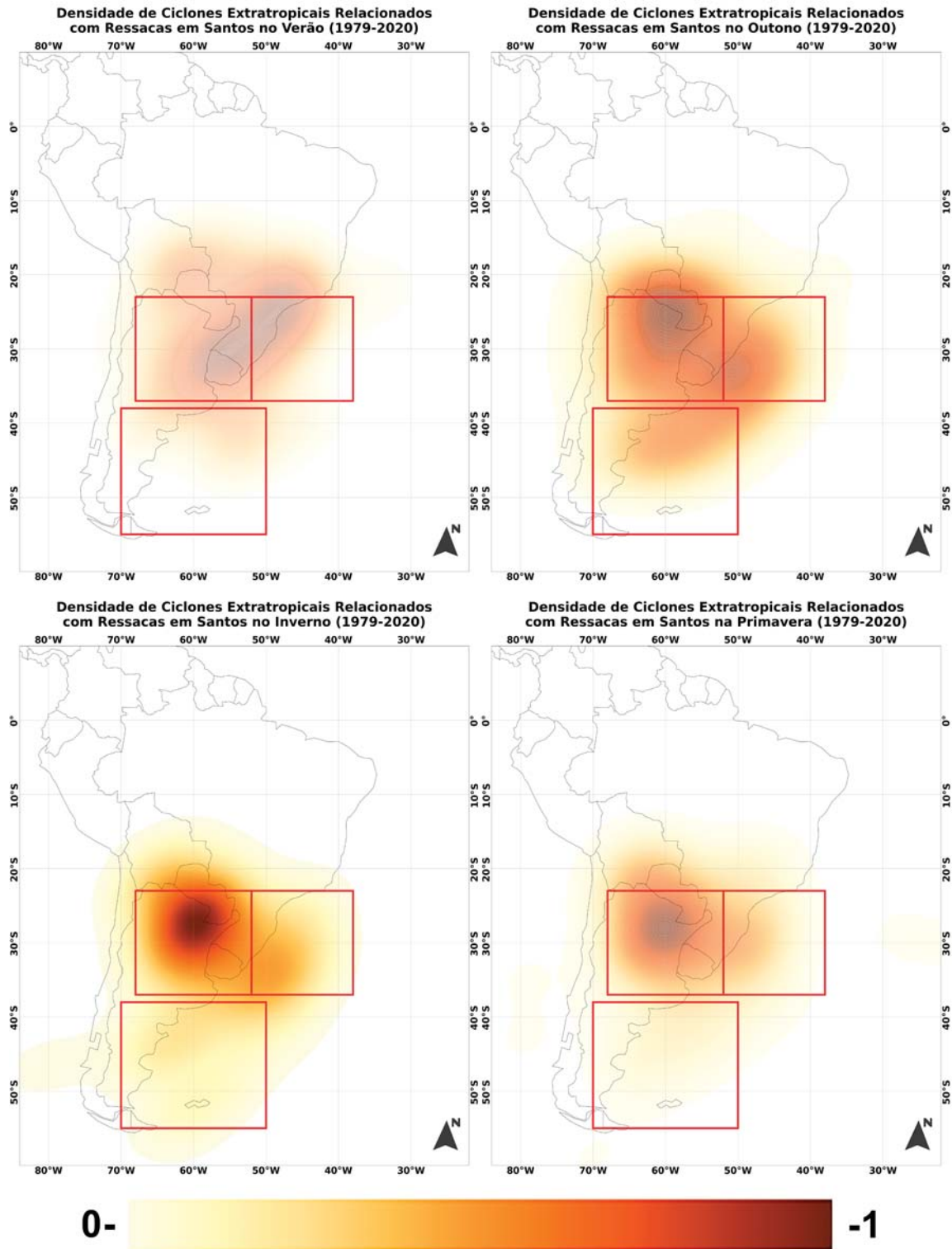


Figura 79 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020 nas estações do ano. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gêneses. As cores foram ajustadas para mostrar valores proporcionais em cada estação considerando a quantidade total de ciclones, sendo o inverno a base.

#### 5.2.4 CICLONES EXTRATROPICAIS EM CABO FRIO

Foi encontrado ao menos um ciclone extratropical relacionado com as 533 ressacas de Cabo Frio em 60,4% dos casos. A porcentagem de ciclones por quadrante foi de 41,7% em La Plata, de 20,9% na área Sudeste do Brasil e de 17,3% na área Argentina. Áreas externas representaram 20,1%. Considerando isso, a participação da área La Plata diminui 11,5% em Cabo Frio em comparação com Rio Grande, e aumenta 11,8% na área Sudeste do Brasil.

A Figura 80 mostra essa quantidade proporcional maior de pontos pretos representando a gênese dos ciclones na costa brasileira e a diminuição em La Plata. Apesar da distância, a grande quantidade de ciclones intensos que se formam na área Argentina e têm deslocamento nordeste conseguem influenciar as ressacas em Cabo Frio pela posição geográfica da boia.

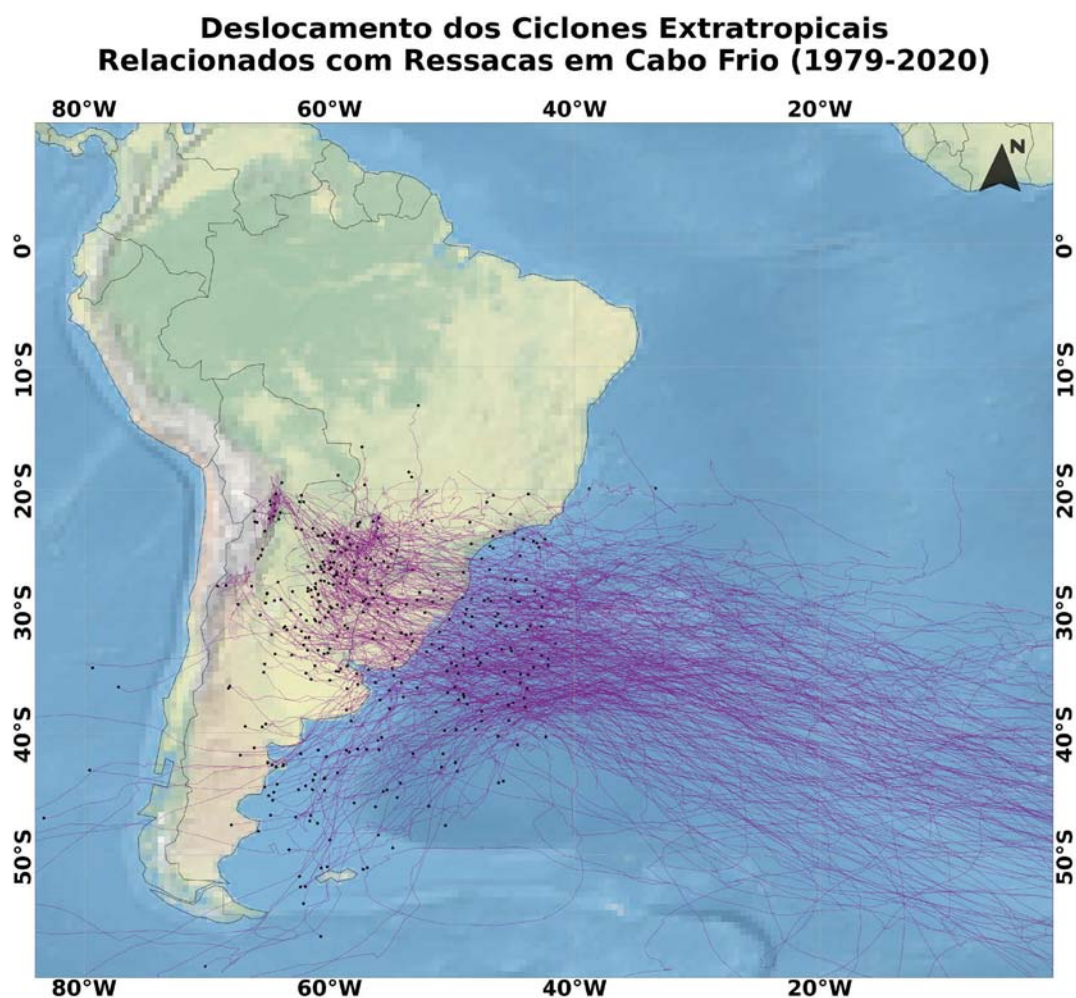


Figura 80 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Cabo Frio de 1979 a 2020.





Analisando os mapas das estações do ano nas Figuras 82 e 83, conclui-se que são raras as ressacas em Cabo Frio no verão, com gênese mais forte em área continental. No outono, a densidade na área Argentina é notada, além de um aumento na direção ao oceano, como verificado também nos outros três pontos de estudo. O inverno tem um aumento na área La Plata e foco intenso entre os litorais gaúcho e uruguaio. Na primavera, ocorre um deslocamento leve das manchas para nordeste.

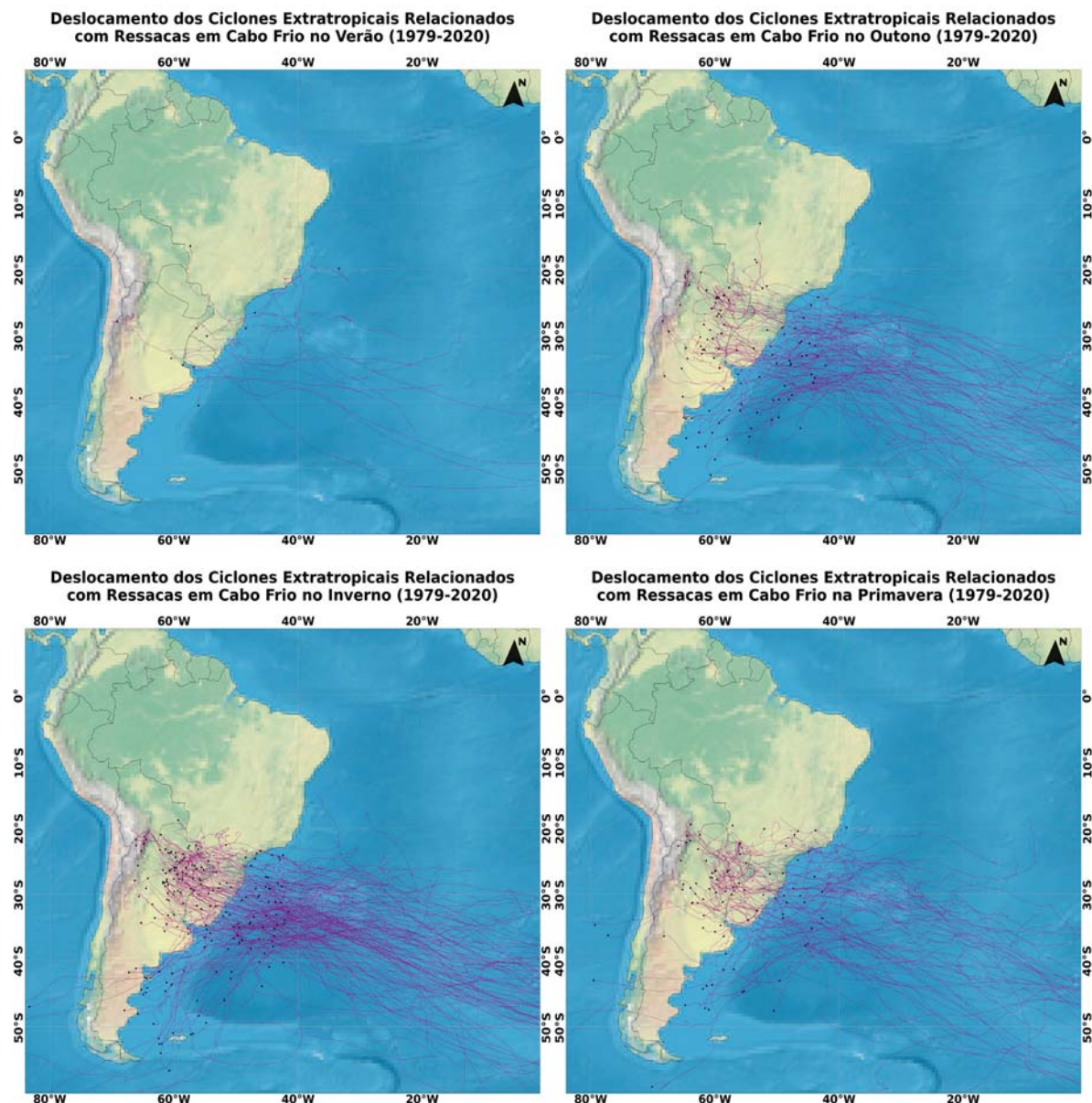


Figura 82 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas com ressacas em Cabo Frio de 1979 a 2020 em cada estação do ano.

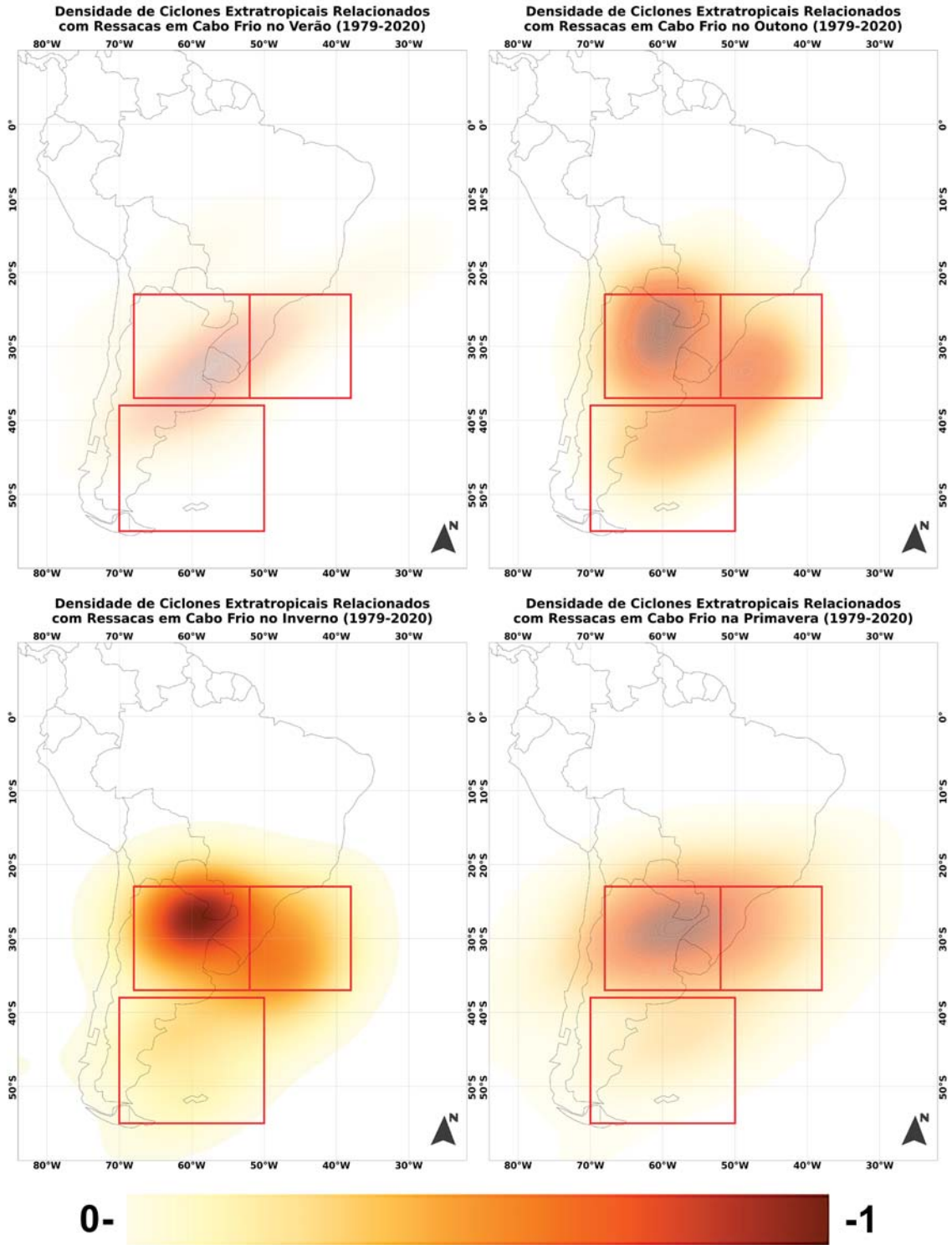


Figura 83 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas em Santos entre 1979 e 2020 nas estações do ano. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gêneses. As cores foram ajustadas para mostrar valores proporcionais em cada estação considerando a quantidade total de ciclones, sendo o inverno a base.

### 5.3 CICLONES EXTRATROPICAIS ASSOCIADOS COM RESSACAS INTENSAS

Considerando apenas a amostra de 10% de ressacas mais intensas, os mapas das Figuras 84 e 85 mostram dados de ciclones associados com esses eventos extremos. A distribuição por quadrantes mostrou que em Rio Grande 50% das gêneses ocorreram em La Plata, 10,1% na área Sudeste do Brasil, 23% na Argentina e 16,9% fora dos quadrantes. Em Itajaí, diminui em La Plata para 38,9%, aumenta para 20,8% no Sudeste do Brasil, aumenta na Argentina para 25% e cai para 15,3% fora. Em Santos, é de 32,9% em La Plata, de 22,4% em Sudeste do Brasil, de 25,9% em Argentina e de 18,8% fora dos quadrantes. Em Cabo Frio, 36,8% tiveram gênese em La Plata, 21,1% no Sudeste do Brasil, 26,3% na Argentina e 15,8% fora dos quadrantes.

Com isso, o mapa de calor de Rio Grande mostra uma maior concentração na região da bacia do Prata, seguido da área Argentina. O mapa de Itajaí tem um deslocamento de gêneses que causaram ressacas em direção ao Rio Grande do Sul e Uruguai, até o litoral. Em Santos, ocorre uma diminuição ainda maior em La Plata e um aumento nas áreas costeiras, entre a Argentina e o Sudeste do Brasil. Por fim, o mapa de Cabo Frio mostra similaridade com Santos.

A Tabela 1 faz uma comparação entre a porcentagem de gêneses em cada quadrante considerando todos os ciclones relacionados a todas as ressacas e também apenas os ciclones associados com as ressacas mais intensas (10%). Os dados mostram que há uma similaridade em Rio Grande. Em Itajaí, a porcentagem diminui em La Plata na amostra de 10% e aumenta nas áreas Sudeste do Brasil e Argentina. Em Santos, ocorreu uma situação similar, mas com valor ainda menor em La Plata. Em Cabo Frio, a maior variação ocorreu na área Argentina, que teve um aumento da porcentagem de gêneses dos ciclones associados a ressacas intensas.

Tabela 1. Comparação da porcentagem de ciclones extratropicais com gênese em cada área ciclogênica na América do Sul associado a ressacas nos quatro pontos analisados na costa brasileira. A coluna “todos” representa todas as ressacas e “10%” apenas extrato de casos com maior swh máxima.

	La Plata		Sudeste do		Argentina		Sem quadrante	
	Todos	10%	Todos	10%	Todos	10%	Todos	10%
<b>Rio Grande</b>	53,2%	50%	9,1%	10,1	20,6%	23%	17,1%	16,9%
<b>Itajaí</b>	52,6%	38,9%	16%	20,8%	14,3%	25%	17,1%	15,3%
<b>Santos</b>	44,1	32,9%	16,8%	22,4%	15,9%	25,9%	23,2%	18,8%
<b>Cabo Frio</b>	41,7%	36,8%	20,9%	21,1%	17,3%	26,3%	20,1%	15,8%



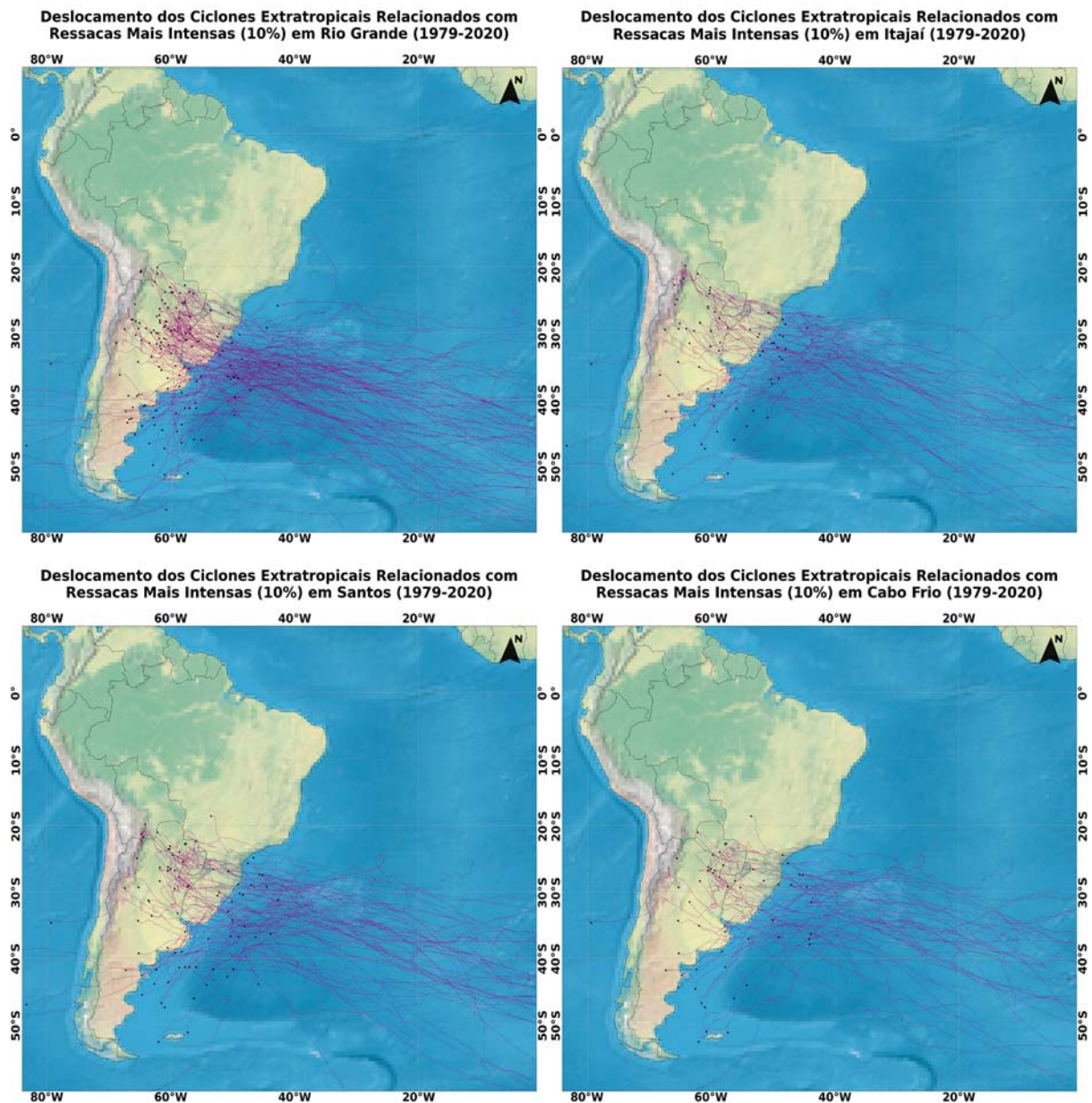


Figura 84 - Deslocamento (linhas roxas) e gênese (pontos pretos) das ciclogêneses associadas ao extrato de 10% de ressacas mais intensas em Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio de 1979 a 2020.

Os mapas sazonais de deslocamento e densidade não foram incluídos porque apresentam informações similares aos mapas de estações que incluem todos os ciclones e ressacas do subcapítulo 5.2. Além disso, o verão apresenta poucos dados.

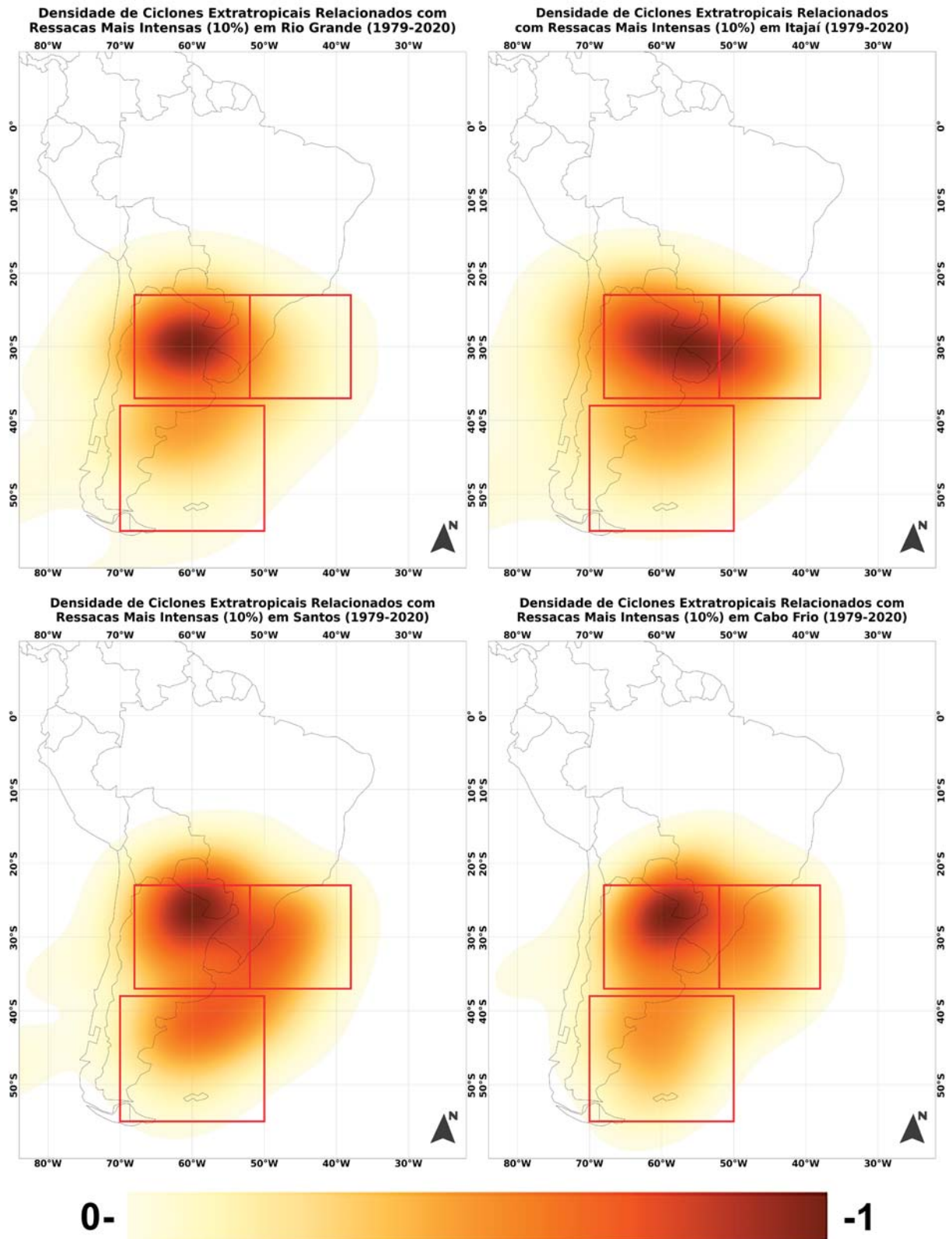


Figura 85 - Mapa de calor da gênese dos ciclones extratropicais que causaram ressacas 10% mais intensas em Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio entre 1979 e 2020. A barra de cores indica as áreas preferenciais, sendo branco (0) as áreas onde nenhum sistema foi identificado e marrom (1) a área com mais gênese.



## 5.4 ANÁLISE DAS RESSACAS MAIS INTENSAS EM CADA PONTO DE ESTUDO

Este subcapítulo aborda com mais detalhes as ressacas com swH máximo ocorridas em cada ponto da área de estudo, entre 1979 e 2020.

### 5.4.1 RESSACA MAIS INTENSA EM RIO GRANDE: ABRIL DE 1999

Como mencionado no subcapítulo 4.1.5, uma ressaca ocorrida entre os dias 16 e 20 de abril de 1999 registrou o swH máximo mais elevado no ponto da boia Rio Grande. A altura foi de 9,24 m e o vento máximo de 25,20 m s<sup>-1</sup>, durante o dia 17. A Figura 86 apresenta o local da gênese do ciclone (ponto preto) e o seu deslocamento. Já a Figura 87 mostra os mapas de pressão atmosférica e vento do ciclone em dois horários diários. A gênese do ciclone ocorreu na área do Rio da Prata, com posterior deslocamento para nordeste, próximo à costa gaúcha, onde permaneceu ativo até o dia 20. O “X” presente na imagem exibe o ponto de pressão atmosférica mínima do ciclone, próximo à costa do Brasil.

Gramcianinov *et al.* (2020c) analisaram esta ressaca, mostrando que o ciclone relacionado teve lento deslocamento (5,93 m s<sup>-1</sup>), o que pode ter contribuído para uma intensificação da altura máxima de ondas, com vento máximo de 31,05 m s<sup>-1</sup>. A queda de pressão atmosférica foi de 1016 hPa na gênese para 1002 hPa nas primeiras 24 h e 992 hPa em 36 h. A mínima foi de 990 hPa, no dia 17. Machado *et al.* (2010) apontaram que 22 casas foram destruídas durante a ressaca na Praia do Hermengildo, no litoral do estado do Rio Grande do Sul, e cerca de 20% das casas à beira-mar foram danificadas. Além disso, a ressaca provocou uma forte erosão na praia.

Segundo Gramcianinov *et al.* (2023c), nas fases iniciais, mudanças rápidas na direção do vento devido aos movimentos dos ciclones alteram a trajetória do vento em relação ao mar. Já os ciclones maduros combinam intensidade e uma estrutura mais estável, gerando uma trajetória de vento mais prolongada sobre o oceano. Além disso, ciclones associados a ondas extremas causam esta ação não apenas devido à intensidade do vento, mas também devido ao maior tempo de interação entre esse vento e a superfície do oceano. Portanto, a ressaca foi fortemente influenciada pela intensidade e deslocamento do ciclone.



Figura 86 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 15 e 24 de abril de 1999. O ponto preto representa a gênese e o X o ponto de pressão atmosférica mínima.

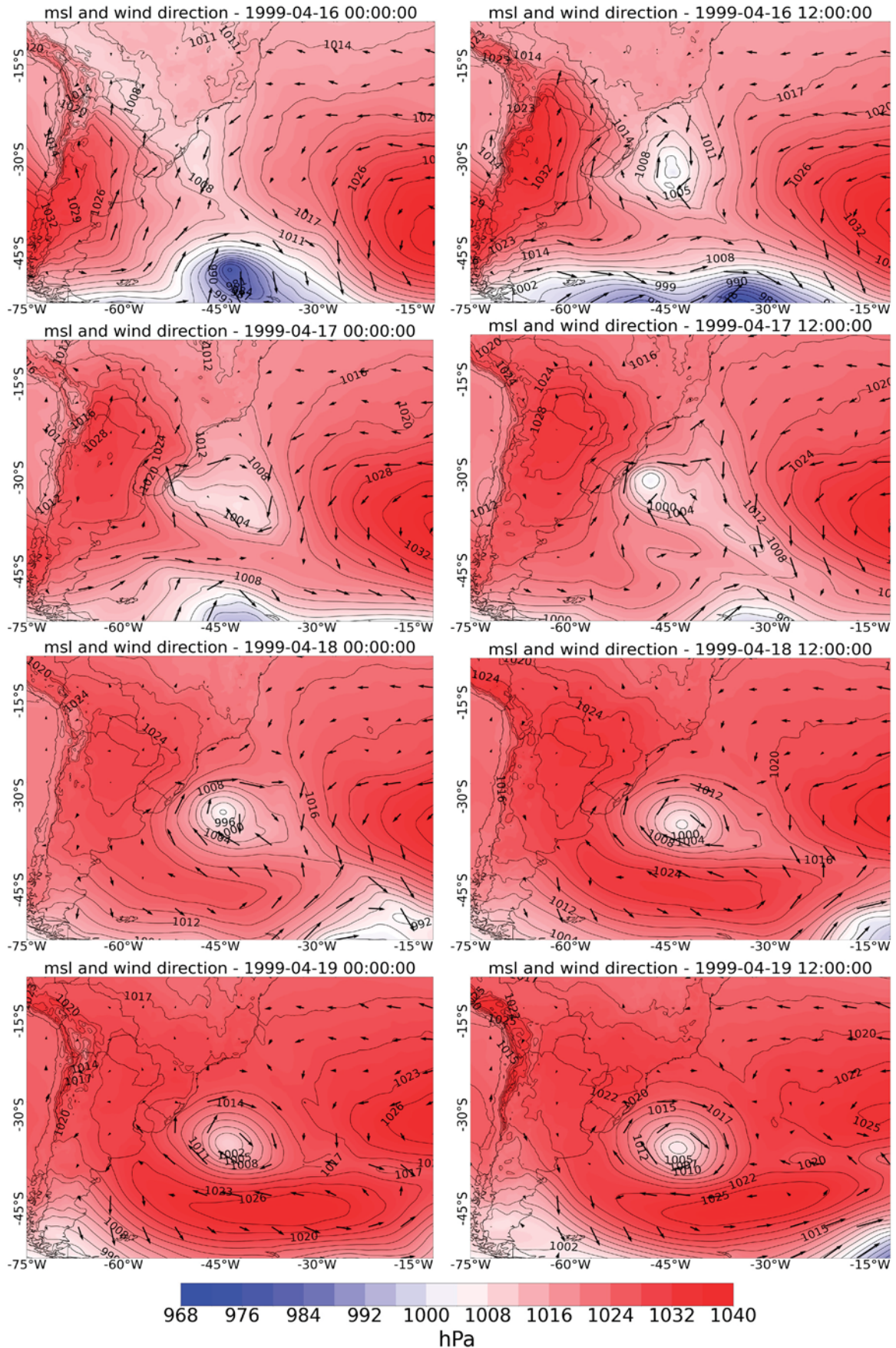


Figura 87 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca de abril de 1999. Imagens com dados do ERA5 de 12 em 12 horas.

Uma comparação entre a pressão atmosférica mínima por hora (hPa) do ciclone extratropical (swh) pode ser verificada na Figura 88. Os dados do swh são referentes ao ponto Rio Grande. É perceptível que a queda da pressão é contrastante com a elevação da altura de ondas. Essa relação ocorre com uma diferença de 12 a 24 horas. Os gráficos não foram sobrepostos porque não estão na mesma escala temporal.

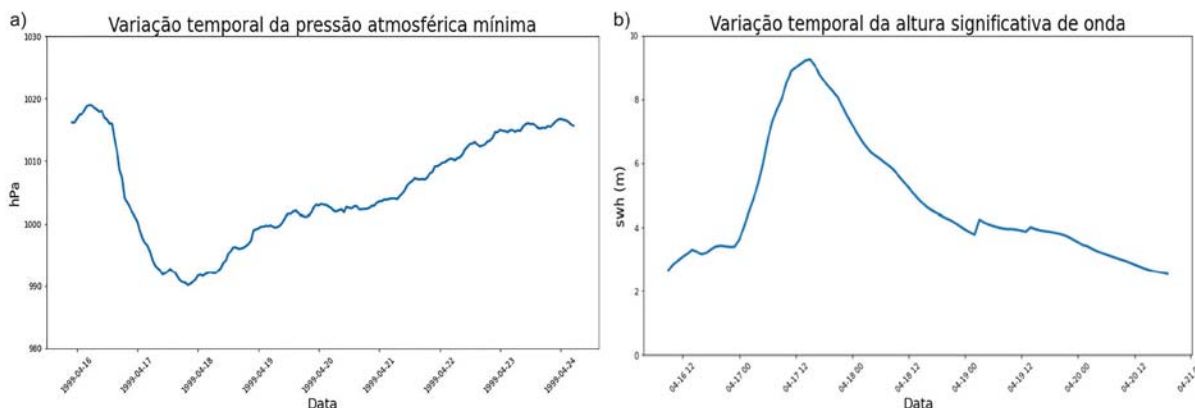


Figura 88 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida em abril de 1999 em Rio Grande.

Os mapas da evolução da ressaca na costa brasileira constam na Figura 89, com dados entre 16 e 20 de abril, de 12 em 12 horas. Nota-se uma elevação preliminar nas duas primeiras imagens na costa do Uruguai e no Rio Grande do Sul, e uma elevação menor em Santa Catarina. Com o deslocamento lento do ciclone para leste/sudeste, a ressaca evoluiu e atingiu a marca de 9,24 m no dia 17 de abril. Posteriormente, as ondas atingem outras áreas da costa sul e sudeste do Brasil, até diminuírem no dia 20.

Esta foi a ressaca identificada com a maior máxima no ponto da boia Rio Grande. Porém, os dados do ERA5 da ressaca do final de outubro de 2016 indicam valores similares mas mais ao sul da posição da boia, onde a máxima foi de 8,23 m.



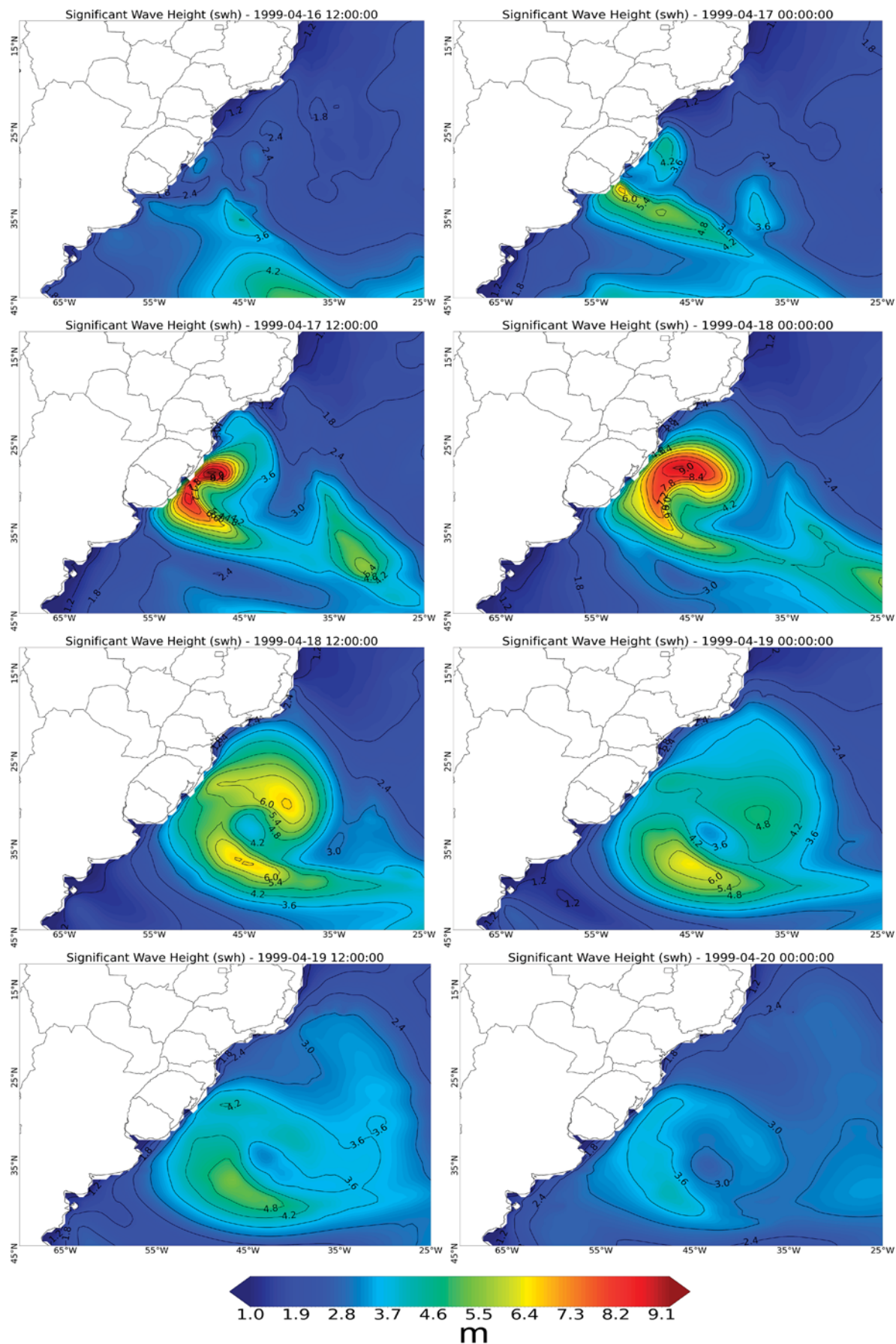


Figura 89 - Mapas da ressaca ocorrida entre 16 e 20 de abril de 1999 na costa brasileira. Dados em metros.

#### 5.4.2 SEGUNDA RESSACA MAIS INTENSA EM RIO GRANDE: OUTUBRO DE 2016

A ressaca de outubro de 2016, a segunda mais intensa registrada no Rio Grande, teve swh máximo de 8,23 m e vento máximo de  $22,09 \text{ m s}^{-1}$ . A Figura 90 mostra que a vorticidade inicial foi identificada no sul da Argentina, com intensificação no litoral do Rio Grande do Sul, conforme indicado pelo "X" na imagem. O ponto de pressão atmosférica mínima desse ciclone está próximo do local onde foi verificada a mínima do sistema associado à maior ressaca em Rio Grande.



Figura 90 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil no final de outubro de 2016. O ponto preto representa a gênese e o X o ponto de pressão atmosférica mínima.

Na figura 91, pode-se observar como o ciclone teve rápida queda de pressão atmosférica próximo da costa gaúcha e forte intensidade de vento. A pressão mínima, conforme os dados fornecidos pelo ERA5, foi de 975 hPa no final do dia 27 de outubro, quando o centro do ciclone estava muito próximo do continente. A velocidade média de deslocamento foi de  $10,91 \text{ m s}^{-1}$ .



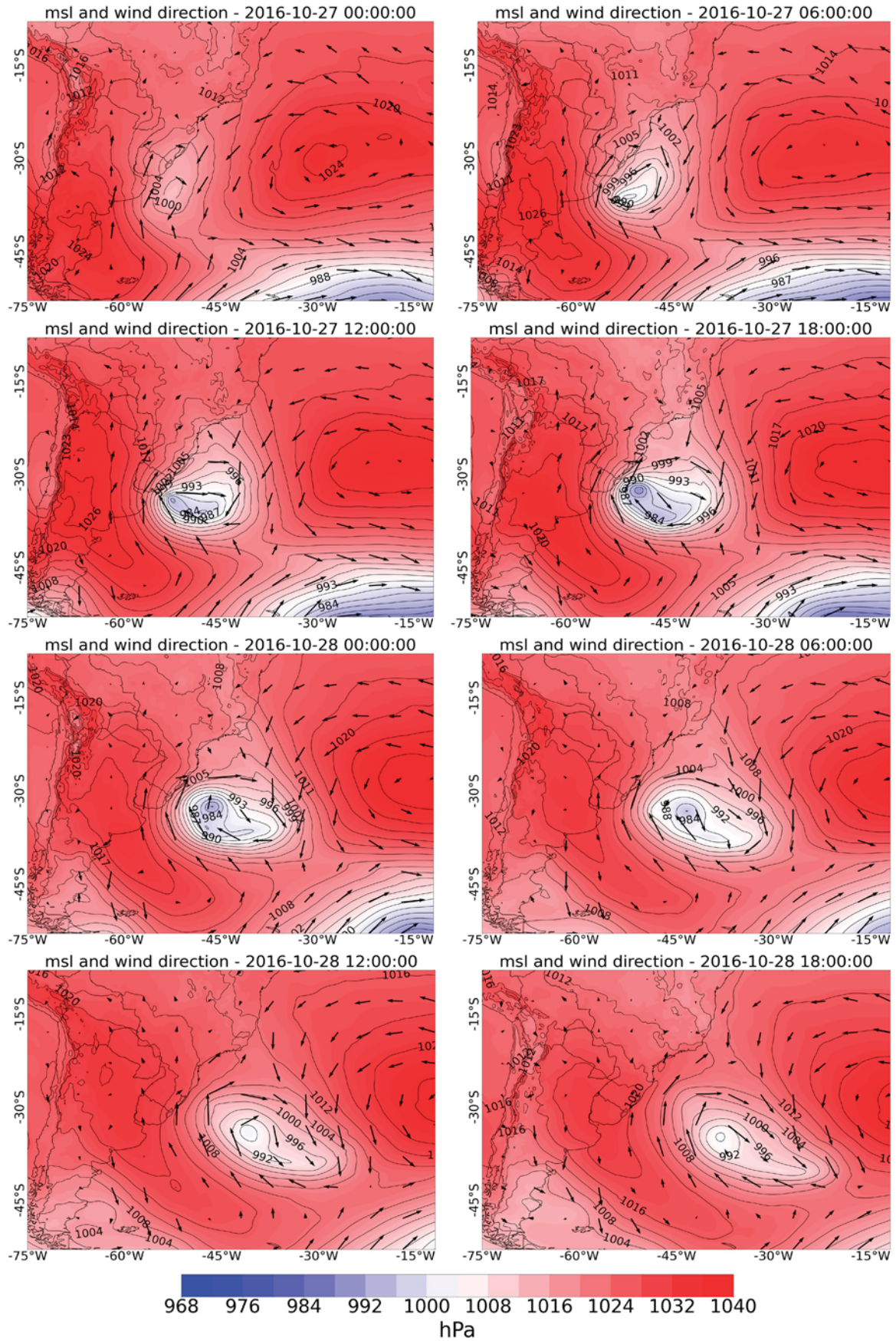


Figura 91 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca no final de outubro de 2016. Imagens com dados do ERA5 de 06 em 06 horas.

O gráfico comparando a pressão atmosférica mínima e o swh (FIGURA 92) mostra uma queda vertiginosa da pressão no final do dia 26 de outubro e um aumento proporcional da altura de ondas horas depois, já no dia 27, com este aumento sendo bastante intenso.

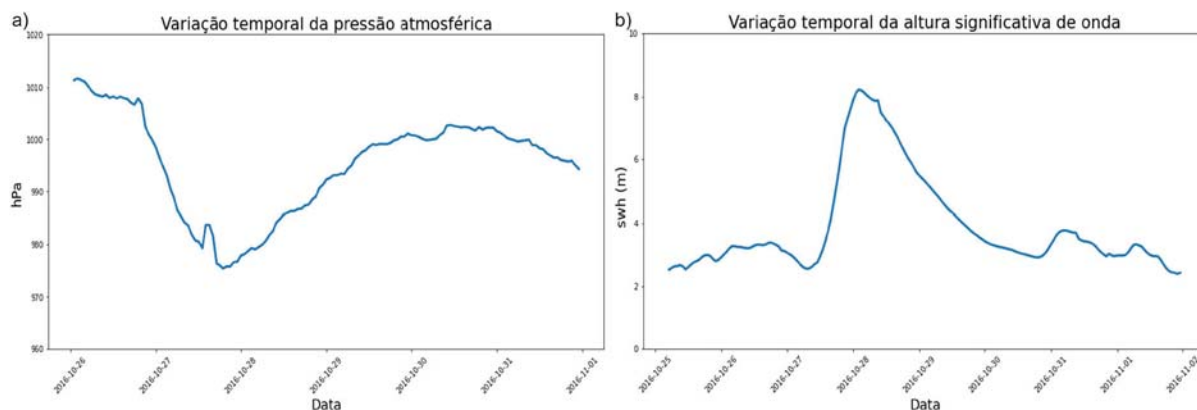


Figura 92 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida no final de outubro de 2016 em Rio Grande.

A ressaca inicia-se na costa da Argentina, com intensificação no Uruguai e maior intensidade atingindo o litoral do Rio Grande do Sul (FIGURA 93). Nota-se que a ressaca teve forte intensidade em toda a região Sul e, posteriormente, também na região Sudeste. Em áreas mais distantes do continente, o swh superou os 10 m, indicando que esta pode ser considerada a ressaca mais intensa dependendo do ponto escolhido.



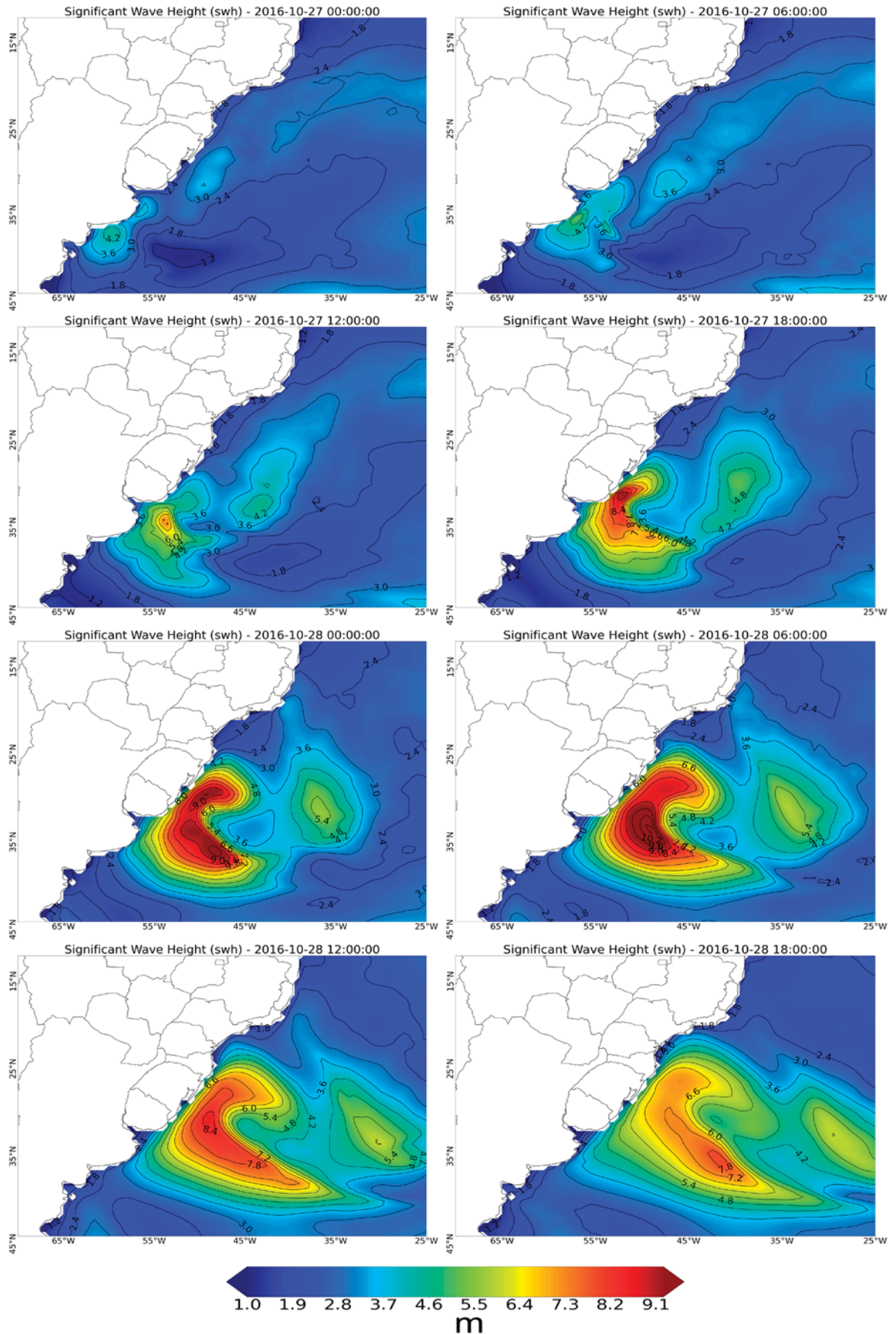


Figura 93 - Mapas da ressaca ocorrida no final de outubro na costa brasileira. Dados em metros.

### 5.4.3 RESSACA MAIS INTENSA EM ITAJAÍ E SANTOS: JULHO DE 1987

A ressaca mais intensa em Itajaí e em Santos foi mais detalhada a seguir, considerando que se trata do mesmo evento. A ressaca teve swl máxima de 6,96 m em Itajaí e 6,23 m em Santos, entre os dias 30 de julho e 01 de agosto de 1987. A duração foi de 51 horas no litoral catarinense e de 52 horas no litoral paulista.

A Figura 94 exibe o deslocamento do ciclone extratropical que ocasionou a ressaca. A gênese ocorreu em 27 de julho entre o norte da Argentina e o Sul do Paraguai, com deslocamento para leste, entre os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A velocidade média de deslocamento foi de  $9,42 \text{ m s}^{-1}$  e o vento máximo de  $23,74 \text{ m s}^{-1}$ , no dia 30 de julho. A pressão atmosférica mínima ocorreu em área continental.



Figura 94 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 30 de julho e 01 de agosto de 1987. O ponto preto representa a gênese e o X o ponto de pressão atmosférica mínima.

Os mapas exibindo a evolução do ciclone estão presentes na Figura 95. O sistema atuou na sua máxima intensidade próximo da costa, entre os estados de Santa Catarina e Rio de Janeiro, gerando ventos intensos de sul/sudeste no oeste do ciclone. A pressão atmosférica mínima foi de 998 hPa, no dia 29 de julho.



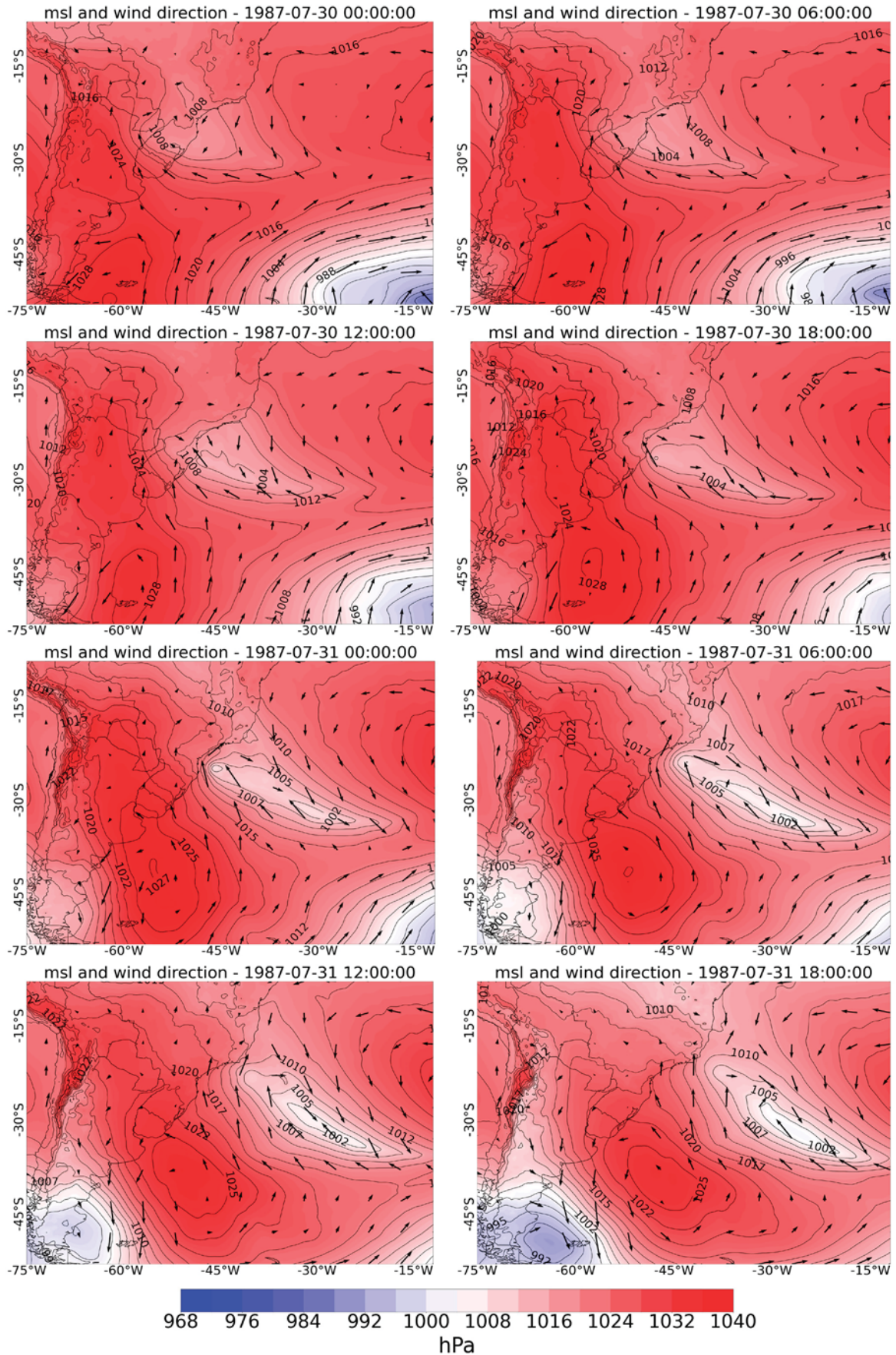


Figura 95 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca entre julho e agosto de 1987. Imagens com dados do ERA5 de 06 em 06 horas.

A pressão atmosférica mínima horária (hPa) do ciclone extratropical e swh foram incluídos na Figura 96. A linha azul do gráfico “b” representa Itajaí e a “vermelha” Santos. A queda de pressão atmosférica do ciclone e a elevação das ondas não foram contrastantes neste caso. A ressaca evoluiu após o deslocamento do ciclone para o oceano. A menor altura de onda em Santos é perceptível, além do pico, que ocorreu cerca de 06 a 12 horas depois do registrado em Itajaí.

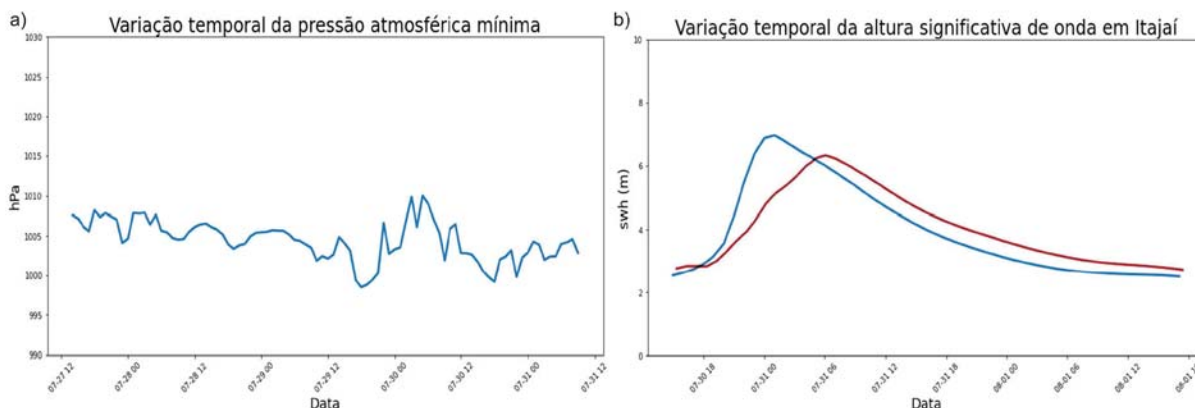


Figura 96 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida entre julho e agosto de 1987 em Itajaí (linha azul) e Santos (linha vermelha).

Os mapas apresentados na Figura 97 mostram que a ressaca é notada primeiramente no litoral do Rio Grande do Sul. Após isso, tem deslocamento para norte, onde se acentua entre Santa Catarina e São Paulo, com a trajetória do ciclone para o oceano. O swh máximo foi verificado no dia 31 de julho, cerca de 12 a 24 horas após a pressão atmosférica mínima do ciclone ocorrer e da proximidade do sistema com a costa, sendo esses dois fatores concomitantes os mais importantes para a ocorrência da ressaca.



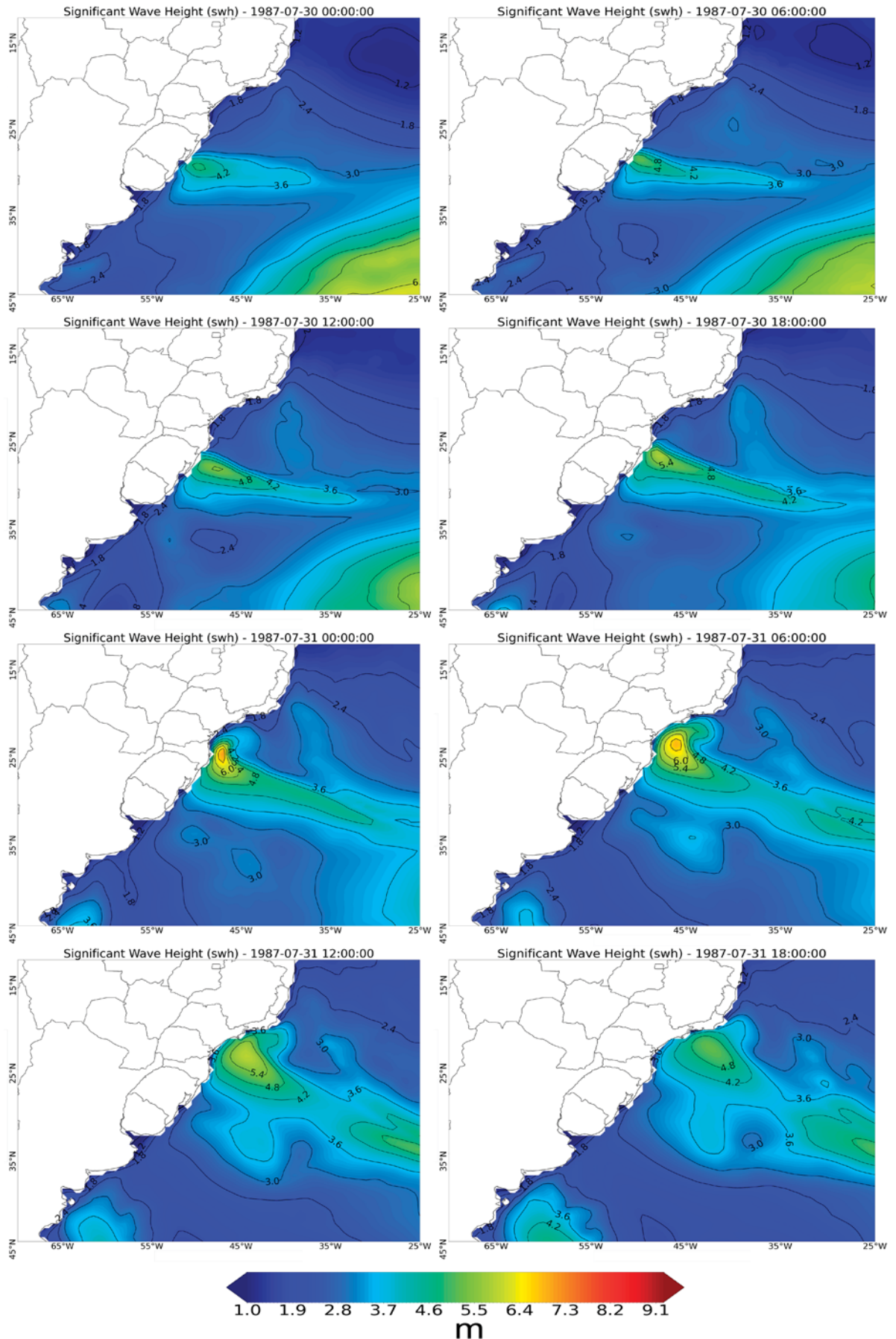


Figura 97 - Mapas da ressaca ocorrida entre 30 de julho e 01 de agosto na costa brasileira. Dados em metros.

#### 5.4.4 RESSACA MAIS INTENSA EM CABO FRIO: MAIO DE 1999

A ressaca de máximo swh em Cabo Frio atingiu 5,40 m. O evento ocorreu entre 30 de maio e 02 de junho de 1999. A duração foi de 65 horas. Em Itajaí, o swh máximo nesta ressaca foi de 6,16 m (a quinta mais intensa), em Santos foi de 5,87 (terceira) e em Rio Grande foi de 6,74 m (a décima primeira).

A gênese e deslocamento do ciclone extratropical (Figura 98) mostram origem no norte da Argentina, com deslocamento para leste/sudeste. O vento máximo registrado foi de  $23,10 \text{ m s}^{-1}$  no dia 30 de maio e a velocidade média de deslocamento de  $14,36 \text{ m s}^{-1}$ . O ponto de pressão atmosférica mínima foi verificado distante da costa brasileira. Porém, a pressão mínima já estava abaixo de 1000 hPa desde as 10h do dia 29 de maio de 1999.



Figura 98 - Deslocamento do ciclone extratropical que causou a ressaca nas regiões sul e sudeste do Brasil entre 30 de maio e 02 de junho de 1999. O ponto preto representa a gênese e o X o ponto de pressão atmosférica mínima.

O ciclone se intensificou na costa do Uruguai e Rio Grande do Sul (FIGURA 99) e se deslocou para leste. A pressão atmosférica seguiu caindo, atingindo 972 hPa. Isso criou um campo de vento de sul, com *swell* atingindo diretamente a costa nas regiões sul e sudeste. A direção mediana de  $195^\circ$  reforça este fato.



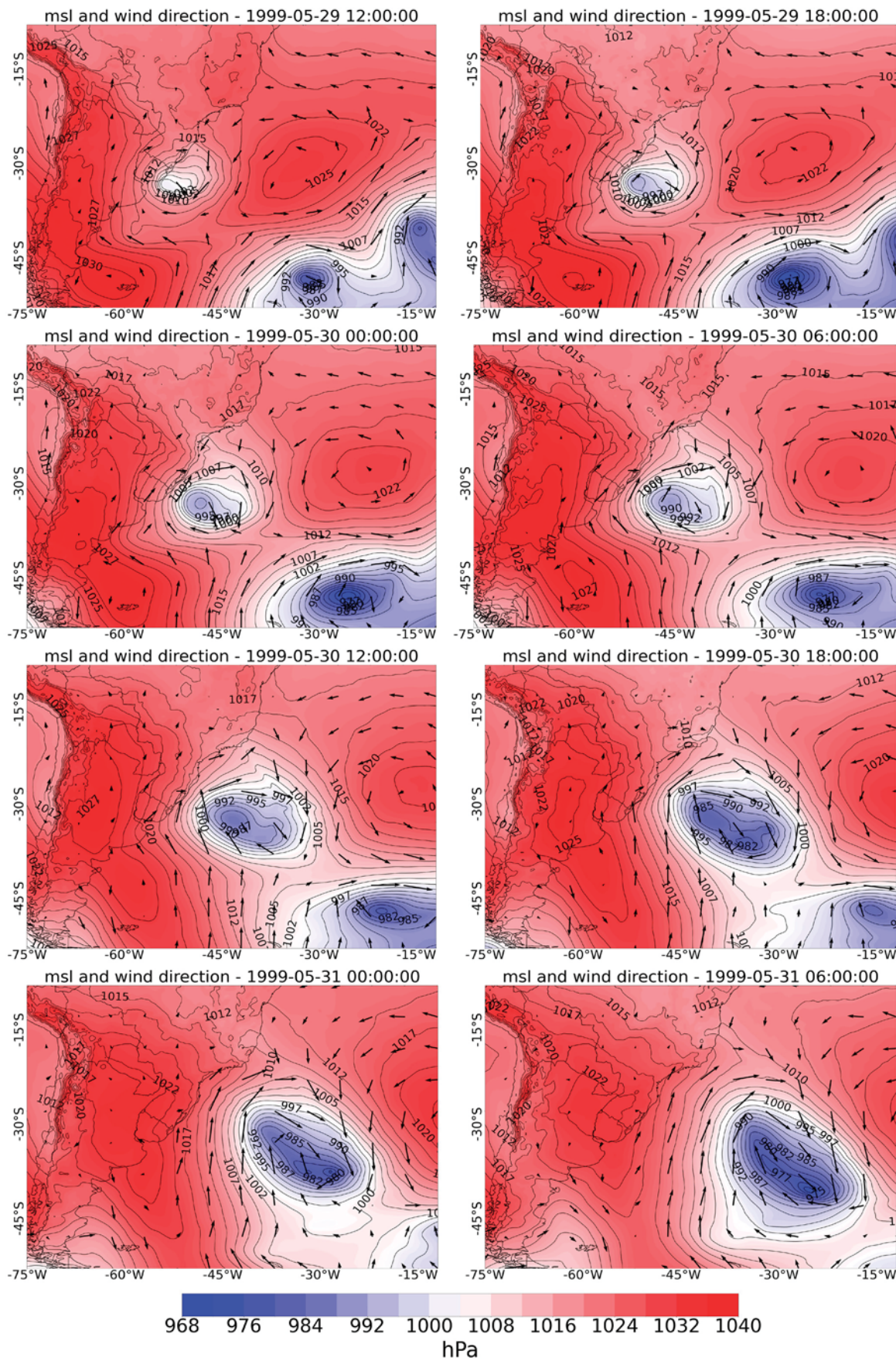


Figura 99 - Pressão atmosférica (hPa) e direção e intensidade de vento (setas) do ciclone extratropical que causou a ressaca entre maio e junho de 1999. Imagens com dados do ERA5 de 06 em 06 horas.

A pressão atmosférica mínima horária (hPa) do ciclone e swh da ressaca exibida na Figura 100 mostram que a queda de pressão foi constante e que a altura de ondas máxima ocorreu no final do dia 31. Esse ciclone teve pressão mínima abaixo de 1000 hPa ainda no dia 29. Apesar da distância considerável de Itajaí, Santos e Cabo Frio, foi capaz de gerar uma das ressacas mais intensas nestes pontos.

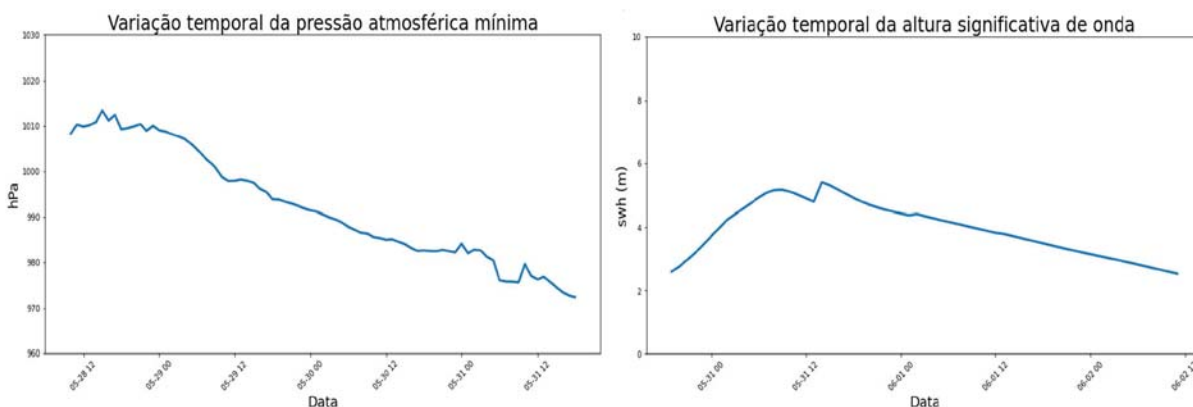


Figura 100 - Linha temporal de pressão atmosférica mínima (a) do ciclone extratropical e linha temporal da elevação do swh (b) da ressaca ocorrida entre maio e junho de 1999 em Cabo Frio.

A Figura 101 mostra que a distância dos ventos até as ondas atingirem a costa brasileira foi de mais de 1000 km. A ressaca tem início da costa do Rio Grande do Sul e se expande em sentido nordeste, atingindo uma grande área, como observado no quinto e sexto mapas. Como discutido por Melo Filho (2017), os ciclones podem causar agitação marítima na costa do Brasil mesmo em situações de tempo bom, quando estão distantes da costa, o que é o caso desta ressaca. Outro ponto interessante é que as ressacas mais intensas em Rio Grande e Cabo Frio ocorreram em abril e maio de 1999, respectivamente. Além disso, há uma outra ressaca observada no mesmo ano que também está entre os casos de maior swh máximo, datada em agosto. Isso fortalece as informações já apresentadas de que 1999 foi um dos anos com mais registros de ressacas e eventos intensos.



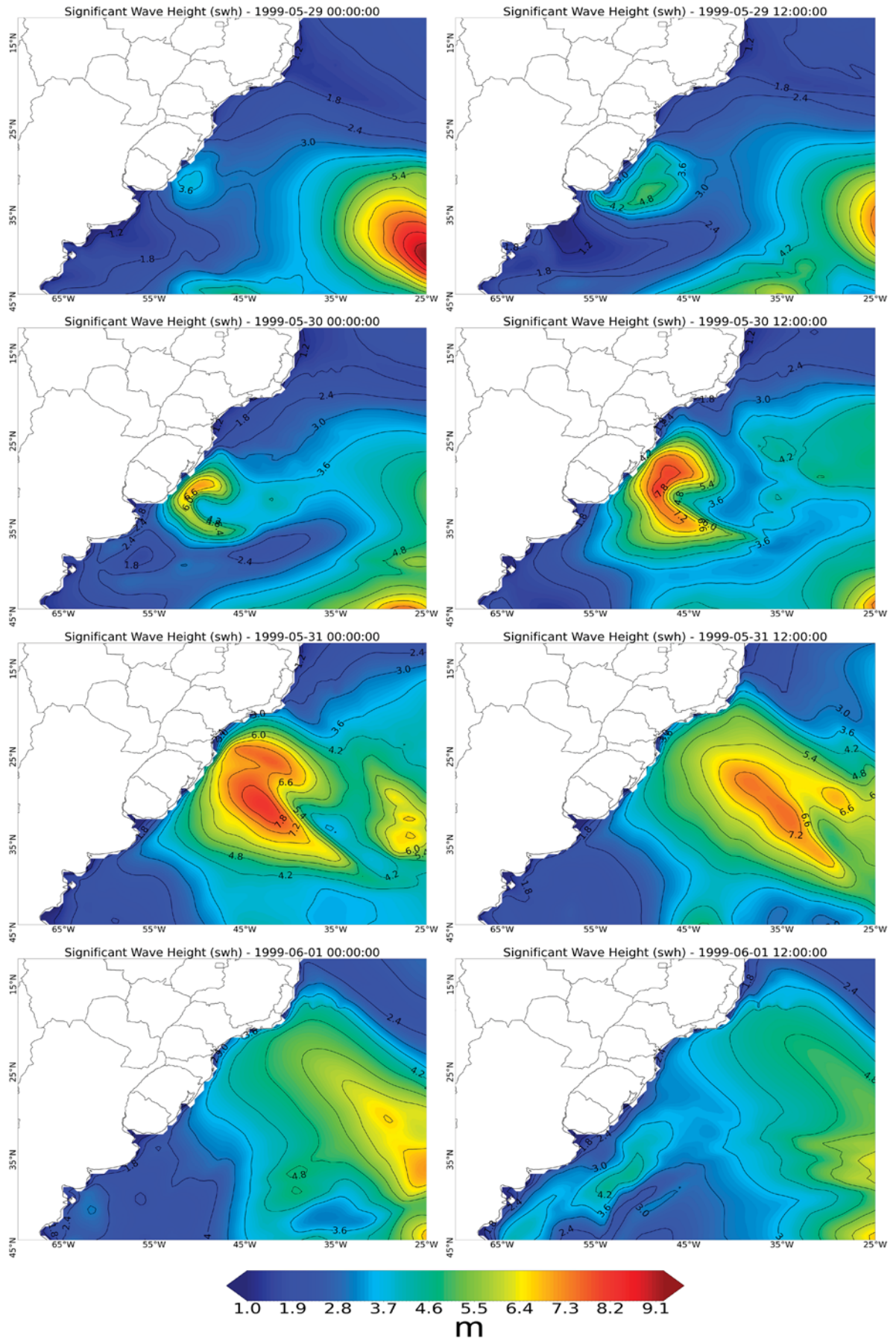


Figura 101 - Mapas da ressaca ocorrida entre 30 de maio e 02 de junho na costa brasileira. Dados em metros.

## 5.5 DISCUSSÃO GERAL

Considerando as ciclogêneses identificadas por Gramcianinov *et al.* (2020b) que ocorreram no Atlântico Sul de 1979 e 2020, houve tendência de elevação (Figura 65), com mais registros no ano de 2016 (745). Na quantificação de ressacas, 2016 está entre os anos com mais casos. Além disso, considerando as ressacas mais intensas, o ano de 2016 apresentou a maior quantidade em todos os quatro pontos analisados na costa brasileira.

Analisando a tendência temporal dos 42 anos das áreas isoladamente, La Plata apresenta tendência positiva, Sudeste do Brasil negativa e Argentina positiva. A área La Plata apresenta média anual de 42,1 ciclones, a Sudeste do Brasil de 26,2 e a área Argentina de 100,6. Resultados próximos foram encontrados por Gramcianinov *et al.* (2019), com média anual de 37,3 e 27,6 em La Plata e Sudeste do Brasil, respectivamente, também por Reis (2022), que encontrou 42,45 casos em La Plata e 25 em Sudeste do Brasil, e por Jantsch (2019), que verificou uma média de 40,2 sistemas em áreas similares. Somando as áreas La Plata e Sudeste do Brasil, que tem maior proximidade com a costa brasileira, a média anual foi de 68,3 ciclones, com tendência positiva baixa. Sazonalmente, a distribuição não apresentou grande variação, em acordo com o verificado no estudo de Cresto *et al.* (2020).

Em relação aos ciclones explosivos, Reis (2022) identificou 109 ciclones em La Plata e Sudeste do Brasil de 1980 a 2019. Não houve tendência anual de aumento ou diminuição, tampouco decenal. Sazonalmente, 40,4% ocorreram no inverno, 26,6% na primavera, 20,2% no outono e 12,8% no verão.

O código utilizado para identificar os ciclones extratropicais associados às ressacas apresentou um bom desempenho, mas não foi capaz de estabelecer essa relação em 100% dos casos. Isso se deve ao fato de que a margem de 2,5 m utilizada para definir uma ressaca não é elevada e inclui muitos eventos que exigem análise manual, os quais não necessariamente se caracterizaram como ressacas na costa. Além disso, a distância entre a costa e os pontos de análise, de aproximadamente 200 km, é significativa. No entanto, a amostra obtida foi considerada adequada para analisar as áreas de gênese dos ciclones.

Houve três padrões de deslocamento de ciclones associados às ressacas: I) formação na bacia do rio da Prata e deslocamento entre sudeste e nordeste; II)

formação no norte da área Argentina e deslocamento para leste ou nordeste; III) formação na área Sudeste do Brasil e deslocamento para leste ou sudeste.

Ciclones associados às ressacas tiveram predominância de gênese na região do Rio da Prata nos quatro pontos de estudo. Nos pontos de menor latitude, essa participação de La Plata foi menor, com aumento na área Sudeste do Brasil. Em Rio Grande, mais de 50% dos ciclones relacionados com ressacas tiveram origem em La Plata e deslocamento de sudeste a nordeste, de acordo com os padrões definidos por Parise *et al.* (2009). Porém, para os autores, os ciclones na costa gaúcha com origem equivalente à área Argentina tiveram deslocamento preferencial para leste, enquanto que neste trabalho a maioria dos ciclones tiveram deslocamento para nordeste e, depois, para leste ou sudeste. Machado *et al.* (2010) mostraram quatro padrões sinóticos relacionados com ressacas, sendo três similares com este estudo e um causado por anticiclones (não analisados na tese).

Os mapas de densidade sazonais mostraram uma similaridade entre os ciclones associados a ressacas no inverno com os dados anuais, com maior ocorrência na região do Rio da Prata. Como esperado, houve aumento na área Sudeste do Brasil nos três pontos de análise mais ao norte, em comparação com Rio Grande, mas com densidade maior ainda em La Plata. No outono, La Plata seguiu como área principal de gênese, mas houve aumento nas áreas Sudeste do Brasil e Argentina. Durante a primavera, houve diminuição de gêneses em latitudes maiores e aumento em menores, em comparação com o inverno e outono. Ao longo do verão, houve diminuição considerável da densidade em La Plata e Argentina e uma distribuição mais expressiva de gêneses na costa dos estados das regiões sul e sudeste do Brasil.

Considerando as ciclogêneses relacionadas com as ressacas de maior swl máxima de onda, houve uma diminuição da porcentagem de sistemas com origem em La Plata e aumento na área Argentina e, em menor valor, na Sudeste do Brasil (na comparação com todas as ressacas). Apesar da densidade principal se manter em La Plata nos quatro pontos, há um aumento entre áreas limítrofes continentais e oceânicas, o que mostra que um maior contraste de temperatura pode gerar ciclones com maior capacidade de gerar fortes ventos e ressacas. Sazonalmente, verificou-se similaridade entre os mapas de densidade das estações e os anuais em todos os pontos. A principal diferença observada foi que a maioria das ressacas intensas que ocorreram no verão em Rio Grande tiveram ciclones com gênese na área Argentina.

## 6 CONCLUSÕES

Na análise quantitativa das ressacas, foram identificados 3.284 eventos entre 1979 e 2020. Não foi possível determinar quantas dessas ressacas ocorreram de forma isolada. Por isso, os pontos de Rio Grande, Itajaí, Santos e Cabo Frio foram analisados separadamente. Dessa forma, uma ressaca identificada pode ter ocorrido em um ou mais pontos, não sendo necessariamente um evento único. Assim, registraram-se 1.245 ressacas em Rio Grande, 736 em Itajaí, 770 em Santos e 533 em Cabo Frio. Essa dificuldade em identificar eventos únicos mostra que as ressacas são dinâmicas, com eventos que podem se propagar ao longo da costa, afetando diferentes locais simultaneamente. A frequência de ressacas diminui em latitudes menores, indicando que a localização geográfica desempenha um papel significativo na quantidade e severidade desses eventos, o que está relacionado à proximidade das áreas onde os ciclones extratropicais são mais frequentes.

A climatologia de ciclones extratropicais mostrou uma tendência positiva, considerando os sistemas que se formaram em todo o Atlântico Sul durante o período de estudo. O ano com mais registros foi 2016, com 745 ciclogêneses. Como esse foi também o ano com o maior número de ressacas severas, uma análise das condições atmosféricas e oceânicas do período pode contribuir a entender melhor o que levou a esse cenário. Ao considerar as áreas ciclogênicas do Sudeste do Brasil, La Plata e Argentina separadamente, observou-se uma tendência positiva nas duas últimas, com médias de 42,1 e 100,6 ciclones extratropicais por ano, respectivamente. Isso sugere que essas áreas têm se tornado mais propensas à formação de ciclones ao longo do tempo. Quando consideradas conjuntamente, as áreas de La Plata e do Sudeste do Brasil apresentaram uma tendência positiva, com uma média anual de 68,3 ciclones extratropicais.

A associação de ciclones extratropicais com ressacas permite identificar três padrões principais de gênese e deslocamento: I) formação na bacia do rio da Prata e deslocamento entre sudeste e nordeste; II) formação no norte da área Argentina e deslocamento para leste ou nordeste; III) formação na área Sudeste do Brasil e deslocamento para leste ou sudeste. Conclui-se que esses padrões de gênese e deslocamento dos ciclones extratropicais estão fortemente ligados às regiões costeiras do Atlântico Sul, com impactos significativos sobre as ressacas nas costas sul e sudeste do Brasil. A variação nos padrões sugere que a resposta e os



preparativos para eventos de ressacas podem ser adaptados conforme a trajetória esperada dos ciclones.

Os anos com mais ressacas em Rio Grande foram 2017 (38), 2010 e 2000 (ambos com 37), e 1999 (36), enquanto os anos com menos foram 1982 e 1993 (20). Todos os anos com a maior quantidade de ressacas em Rio Grande coincidiram com eventos de La Niña, o que destaca a necessidade de uma análise sobre como esse fenômeno está relacionado com as ressacas no Brasil. Em Itajaí, os anos com maior número de eventos foram 1995, 1998, 2010 e 2011 (23), e os anos com menor registro foram 1985 (10) e 1983, 1988 e 1989 (12). Em Santos, registraram-se mais ressacas em 2007 (24) e em 2004, 2008 e 2019 (23), enquanto os anos com menos ocorrências foram 1983 (9) e 1991 (12). Em Cabo Frio, ocorreram mais ressacas em 2010 (19) e 2008 (18), e menos em 1983 (5). Essas variações significativas na frequência de ressacas ao longo dos anos e entre os quatro pontos indica uma complexidade na dinâmica dos fenômenos costeiros.

Não foi possível verificar a tendência entre 1979 e 1992, pois os dados posteriores a 1992 foram aprimorados com a era dos satélites de altimetria. Nesse contexto, os dados do ERA referentes à altura significativa de onda (swh) devem ser utilizados com cautela. Porém, considerando o período entre 1993 e 2020, os quatro pontos analisados apresentam tendência positiva de ressacas.

Sazonalmente, o inverno apresentou o maior número de ressacas em todos os quatro pontos analisados, seguido pela primavera, outono e verão. O inverno também registrou as maiores médias de swh em Rio Grande (3,22 m). No entanto, apesar da maior quantidade de ressacas na primavera do que no outono, este último apresentou médias do swh maiores que a primavera (média de 3,12 m no outono e 3,06 m na primavera), sugerindo que, embora as ressacas no outono sejam menos frequentes, podem ser mais intensas que na primavera. A exceção foi Cabo Frio, onde a primavera teve média de swh e de quantidade superior ao outono. O verão registrou as menores médias em Rio Grande (2,94 m). Os dados podem ajudar na preparação e adaptação de estratégias de mitigação de impactos costeiros ao longo do ano, reforçando o período entre o outono e a primavera, quando tanto a frequência quanto a intensidade das ressacas tendem a ser maiores.

Embora o inverno seja a estação com mais ressacas, o mês com o maior número total de eventos foi setembro, nos quatro pontos analisados. Os meses entre abril e outubro concentraram mais de 70% das ressacas, evidenciando a

sazonalidade desses eventos. Apesar disso, as ressacas podem ocorrer em qualquer mês do ano, e com grande intensidade.

A média do swl das ressacas em Rio Grande foi de 3,12 m ao longo de todo o período. As médias em Itajaí, Santos e Cabo Frio foram, respectivamente, 3,05 m, 2,96 m e 2,92 m. Ou seja, Rio Grande apresentou tanto a maior quantidade de ressacas quanto a maior média de swl. A maior média mensal de swl ocorreu em junho em Rio Grande, em agosto em Itajaí, e em maio em Santos e Cabo Frio. Essa variação pode ser influenciada por fatores regionais, como a posição geográfica, circulação atmosférica, relevo local e correntes oceânicas.

A direção mediana das ondas foi predominantemente de sul e sudeste nos quatro pontos de estudo, incluindo as ressacas mais intensas. Esse padrão ocorre devido à maior frequência de ciclones extratropicais em latitudes mais elevadas, com maior capacidade de gerar ondas severas. Sazonalmente, a direção mediana também foi predominantemente de sul/sudeste no inverno e outono. Na primavera, porém, houve um aumento de ressacas provenientes de leste/nordeste, associadas a ventos mais frequentes de nordeste nessa estação, o que pode elevar o risco de ressacas em regiões normalmente menos impactadas no inverno e outono. Isso também explica a maior quantidade de ressacas na primavera em relação ao outono, apesar de a média do swl ser menor na primavera.

Em Rio Grande, a ressaca mais intensa ocorreu em abril de 1999, com um swl máximo de 9,24 m. A segunda mais intensa foi em outubro de 2016, com um swl de 8,23 m. Outras quatro ressacas ultrapassaram a marca de 7 m: junho de 1985, maio de 2004, junho de 2008 e dezembro/janeiro de 1979/1980. Em Itajaí e Santos, o maior swl registrado ocorreu em junho de 1987 (6,96 m em Itajaí e 6,23 m em Santos). Em Cabo Frio, o swl máximo foi registrado em maio de 1999, atingindo 5,40 m. Esses dados destacam a importância de um enfoque regional na análise de ressacas, levando em conta a variabilidade de intensidade e as características de cada área.

O ano de 2016 registrou a maior quantidade de ressacas severas em Rio Grande. Em Itajaí, as ressacas mais fortes ocorreram em 1985, 1990 e 2016. Em Santos, eventos intensos foram registrados em sete anos diferentes, incluindo 2016. Em Cabo Frio, as ressacas ocorreram em cinco anos, com 2016 novamente destacado. Embora 2016 não tenha sido o ano com o maior número total de

ressacas nos quatro pontos, foi o ano com mais eventos extremos em todos eles, podendo fornecer informações valiosas para a compreensão de eventos extremos.

Nas áreas de La Plata e Sudeste do Brasil, 20,9% dos ciclones ocorreram no verão, 21,9% no outono, 30,7% no inverno e 26,5% na primavera, sem uma grande sazonalidade quantitativa. O ano de 2017 registrou a maior quantidade anual de ciclones, totalizando 81, e também foi o ano com o maior número de ressacas em Rio Grande.

A área de gênese que mais causou ressacas em cada um dos quatro pontos de estudo foi a La Plata. Em Rio Grande, a porcentagem de ocorrências com gênese em La Plata foi de 53,2%; em Itajaí, 52,6%; em Santos, 44,1%; e em Cabo Frio, 41,7%. Em latitudes menores, a proporção de ciclogêneses na área Sudeste do Brasil foi maior devido à proximidade geográfica. No entanto, os ciclones com origem nessa área tendem a ter menor capacidade de gerar eventos extremos em comparação aos da área La Plata. Além disso, ciclones com gênese na área Argentina também foram capazes de provocar ressacas na costa brasileira, demonstrando a amplitude desses sistemas e sua capacidade de causar ressacas mesmo com gênese em diferentes áreas.

O filtro de 10% das ressacas mais severas revelou uma diminuição das ciclogêneses na La Plata e um aumento nas áreas Sudeste do Brasil e Argentina em cada um dos quatro pontos de estudo, em comparação com os dados que consideraram todas as ressacas. Porém, a densidade principal de ciclogêneses responsáveis por gerar ressacas extremas também foi a área La Plata, mas com um aumento nas áreas limítrofes entre continente e oceano. Isso implica que, embora a gênese ciclônica na La Plata continue predominando nos casos mais severos, as áreas limítrofes entre continente e oceano podem ser relevantes para posteriores análises. Durante as diferentes estações do ano, a densidade de gênese de ciclones apresentou padrões semelhantes aos dados de todas as ressacas.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se investigar as variações sazonais na quantidade e na altura média significativa das ondas, que podem ser importantes para análises de risco. Outro estudo importante seria analisar os dados do ENSO e do SAM para avaliar sua influência anual e sazonal na ocorrência de ressacas e ciclones extratropicais. Estudos multidisciplinares futuros podem ajudar a entender não apenas os aspectos físicos das ressacas, mas também suas consequências socioeconômicas para as comunidades afetadas.

## ANEXOS

Tabela 2 - Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Rio Grande com dados do ERA5 (1979-2020). Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Rio Grande com dados do ERA5 (1979-2020). Id é a identificação de cada ressaca naquele ponto. Data de início e fim no formato dia/mês hora. Duração é o tempo total da ressaca em horas. Direção representa a mediana durante toda a ressaca. Período apresenta a média em segundos. Swh média em metros. Swh máx. mostra o valor mais elevado em metros. Vento máximo em  $m s^{-1}$ .

Id	Data início e fim	Duração	Direção	Período	Swh média	Swh máx.	Vento máx.
99b13	16/04 09h - 20/04 19h	107	205	9,1	4,76	9,24	25,20
16b41	25/10 05h - 04/11 01h	237	103	8,7	3,65	8,23	22,09
85b16	05/06 06h - 10/06 19h	134	164	9,5	4,78	7,62	19,78
04b13	23/05 15h - 29/05 11h	141	186	8,7	3,84	7,21	22,11
08b18	09/06 23h - 11/06 19h	45	229	8,4	4,38	7,17	22,11
79b45	31/12 06h - 03/01 02h	69	177	10,1	4,87	7,09	19,53
94b12	07/04 02h - 12/04 04h	123	156	8,8	3,38	6,91	20,38
96b24	20/07 14h - 24/07 07h	90	187	10,2	4,08	6,84	16,99
03b17	23/05 15h - 30/05 03h	157	200	9,7	3,92	6,79	19,35
20b17	29/06 22h - 03/07 23h	98	191	9	4,11	6,78	23,32
99b18	26/05 04h - 06/06 18h	279	190	8,8	3,31	6,74	19,63
16b26	26/07 00h - 02/08 04h	173	145	9,4	3,47	6,66	21,38
19b21	03/07 09h - 07/07 22h	110	219	9,3	4,36	6,65	20,72
93b16	14/07 01h - 16/07 01h	49	243	8,2	4,66	6,65	21,16
20b06	02/04 16h - 12/04 07h	232	163	10,1	3,79	6,64	19,96
84b19	26/06 19h - 30/06 01h	79	204	9,5	4,1	6,63	20,34
79b15	30/04 14h - 02/05 21h	56	262	7,9	4,51	6,6	20,80
00b23	10/07 22h - 18/07 08h	179	225	8,8	4,05	6,58	19,14
05b28	31/08 01h - 07/09 00h	168	173	8,4	3,36	6,56	22,52
16b21	06/06 11h - 13/06 12h	170	218	8,7	4,05	6,4	18,08
11b24	26/06 13h - 28/06 23h	59	238	8,2	4,53	6,4	20,42
06b21	24/06 03h - 03/07 05h	219	131	9,7	3,24	6,36	20,94
81b27	02/09 15h - 05/09 20h	78	152	9,2	3,47	6,36	22,25
80b29	03/09 21h - 06/09 06h	58	207	10,2	4,69	6,35	17,26
84b13	28/05 19h - 02/06 00h	102	197	7,9	3,5	6,35	19,83
80b14	12/06 17h - 15/06 05h	61	203	8,6	3,98	6,34	20,40
16b33	12/09 15h - 17/09 05h	111	188	8,7	3,85	6,32	19,59
99b20	29/06 11h - 05/07 11h	145	152	8,8	3,32	6,31	20,25
81b29	12/09 23h - 16/09 20h	94	137	8	3,8	6,31	21,35
98b28	25/08 16h - 28/08 14h	71	140	7,7	3,73	6,29	21,30
93b17	24/07 08h - 03/08 00h	233	179	9,6	3,87	6,27	19,22
94b22	24/06 21h - 01/07 03h	151	217	9,5	4,37	6,26	18,48
84b32	18/09 17h - 25/09 15h	167	185	8,8	3,46	6,22	20,29
98b15	12/05 11h - 18/05 12h	146	138	9,4	3,99	6,22	18,92
81b19	16/06 22h - 20/06 07h	82	241	8,4	4,6	6,21	19,26
90b44	26/11 04h - 29/11 07h	76	179	9,4	4	6,13	16,40
00b14	05/05 03h - 07/05 21h	67	220	8,5	3,86	6,12	20,32
06b28	18/08 23h - 22/08 23h	97	211	8,5	3,49	6,12	17,96
99b25	13/08 20h - 18/08 03h	104	173	9,3	3,37	6,11	18,12
10b27	11/08 21h - 19/08 10h	182	93	8,3	3,35	6,1	19,50
82b20	13/07 05h - 17/07 23h	115	141	8,5	3,47	6,09	20,92
12b32	19/09 19h - 24/09 15h	117	209	8,5	3,28	6,07	20,28

08b19	15/06 01h - 17/06 09h	57	226	8,8	4,15	6,05	18,75
93b12	09/06 00h - 15/06 14h	159	153	8,8	3,48	6,03	19,54
91a34	05/10 18h - 08/10 11h	66	166	9	3,68	6,02	19,29
91b25	09/08 08h - 13/08 19h	108	134	9,1	3,51	6	20,05
86b37	22/10 17h - 24/10 14h	46	201	8,8	4,28	5,98	18,40
97b16	25/04 16h - 27/04 20h	53	215	9,6	4,22	5,94	16,71
88b47	22/11 11h - 23/11 22h	36	213	8,4	4,06	5,94	20,28
18a35	25/08 05h - 27/08 13h	57	211	9,9	4,34	5,91	18,10
09b49	12/12 17h - 15/12 14h	70	143	10,1	3,76	5,9	20,38
06b25	29/07 00h - 02/08 07h	104	202	9,6	3,95	5,88	17,64
81b21	17/07 06h - 22/07 10h	125	136	8,4	3,36	5,88	22,17
06b31	02/09 17h - 06/09 17h	97	205	9,5	4,76	5,87	19,48
16b25	16/07 18h - 20/07 10h	89	195	8,7	3,67	5,87	18,32
89b30	11/09 14h - 18/09 06h	161	108	8,6	3,5	5,86	19,26
80b13	01/06 16h - 06/06 02h	107	211	9,3	3,53	5,85	18,29
87b11	08/05 17h - 12/05 05h	85	194	9,7	4	5,83	18,28
82b40	06/12 05h - 09/12 03h	71	193	9	3,79	5,82	17,16
02b37	28/08 00h - 05/09 19h	212	192	8,6	3,62	5,81	16,82
92b29	18/07 12h - 24/07 04h	137	203	8,5	3,54	5,81	18,60
87b25	16/08 14h - 19/08 15h	74	210	9,4	4,03	5,81	18,61
03b11	11/04 03h - 13/04 20h	66	220	9,2	4,34	5,8	17,41
08b33	04/09 07h - 08/09 18h	108	190	9,6	4	5,78	20,45
87b23	05/08 11h - 09/08 13h	99	104	8,8	4,05	5,73	19,04
85b29	27/08 08h - 28/08 23h	40	185	8	3,64	5,72	23,81
07b35	24/09 02h - 28/09 05h	100	166	8,1	3,45	5,72	18,42
82b32	13/10 06h - 21/10 03h	190	182	9,9	3,95	5,69	17,43
17b24	09/08 05h - 15/08 15h	155	109	9,9	4,59	5,67	18,04
16b10	25/03 23h - 28/03 22h	72	99	8,5	3,57	5,66	18,96
15b18	27/05 01h - 31/05 02h	98	143	9,1	3,57	5,65	16,53
93b10	26/05 03h - 29/05 00h	70	188	8,6	3,69	5,65	16,53
89b15	05/07 01h - 07/07 20h	68	203	9,1	3,87	5,64	16,89
07b28	09/08 04h - 23/08 16h	349	133	8	2,95	5,63	21,41
08b14	29/04 15h - 06/05 23h	177	185	9	4,01	5,61	17,76
79b24	09/06 09h - 16/06 13h	173	200	9,7	3,23	5,58	16,30
11b17	26/05 04h - 30/05 16h	109	159	9,4	3,38	5,56	12,93
97b23	05/06 14h - 09/06 22h	105	138	9,1	3,9	5,55	17,85
08b16	24/05 16h - 01/06 18h	195	181	9,8	3,34	5,55	17,79
16b23	06/07 15h - 08/07 13h	47	230	8,7	3,95	5,53	19,31
90b30	01/09 07h - 10/09 00h	210	113	8,6	3,26	5,52	18,28
83b18	04/06 01h - 05/06 18h	42	255	7,7	4,02	5,51	19,22
06b41	05/11 07h - 15/11 10h	244	162	8,6	3,27	5,49	20,53
90b10	17/04 20h - 21/04 09h	86	188	10,5	3,88	5,48	16,29
91b23	23/07 08h - 24/07 23h	40	220	8	3,89	5,47	18,64
83b20	12/06 12h - 16/06 02h	87	136	7,6	3,65	5,41	19,16
09b19	28/05 17h - 03/06 23h	151	212	9	3,76	5,4	19,79
09b12	07/04 22h - 13/04 21h	144	189	10,5	3,15	5,39	14,49
18b20	13/06 07h - 16/06 01h	67	213	8,5	3,79	5,39	17,55
01b31	26/09 08h - 10/10 22h	351	82	8,7	3,53	5,39	18,96
85b38	07/10 19h - 08/10 21h	27	195	8,1	3,9	5,39	18,37
10b04	15/02 20h - 19/02 09h	86	149	8,5	3,15	5,39	20,09
97b14	04/04 07h - 08/04 12h	102	198	9,7	3,62	5,39	16,27
99b19	09/06 01h - 11/06 19h	67	55	7,7	3,7	5,37	19,21
17b11	25/04 20h - 29/04 11h	88	204	9,4	4,05	5,35	17,67
00b44	16/12 13h - 17/12 14h	26	174	8,2	3,6	5,35	21,37

11b47	01/12 00h - 04/12 08h	81	171	9,7	3,54	5,34	15,97
17b14	17/05 20h - 26/05 05h	202	69	8,8	3,59	5,33	18,21
20b12	23/05 10h - 28/05 11h	122	202	9,1	3,97	5,33	17,42
90b29	28/08 00h - 30/08 19h	68	194	9,1	3,94	5,31	17,44
84b14	05/06 03h - 08/06 08h	78	159	8,2	3,08	5,28	19,17
81b17	06/06 11h - 09/06 14h	76	148	9,4	3,87	5,27	16,48
88b23	23/07 13h - 25/07 17h	53	241	7,4	3,54	5,27	19,32
94b24	08/07 09h - 10/07 20h	60	242	8	4,04	5,26	17,75
04b17	08/07 20h - 14/07 11h	136	199	8,7	3,11	5,26	16,77
87b22	28/07 14h - 01/08 09h	92	145	8,5	3,59	5,25	18,17
12b23	13/07 00h - 17/07 03h	100	207	9	3,44	5,24	14,54
85b21	10/07 12h - 12/07 03h	40	190	8,7	3,88	5,24	17,23
90b21	20/06 09h - 23/06 05h	69	164	8,1	3,83	5,23	16,27
11b30	15/08 07h - 26/08 12h	270	161	9,5	3,44	5,23	16,78
97b42	01/10 13h - 10/10 01h	205	92	8,7	3,47	5,22	18,47
07b26	27/07 18h - 30/07 15h	70	194	10,7	3,85	5,21	14,01
03b29	09/08 06h - 11/08 15h	58	216	8	3,61	5,19	17,94
20b03	20/02 22h - 23/02 23h	74	195	9,9	3,65	5,19	14,44
05b20	04/07 23h - 09/07 02h	100	175	9,4	3,33	5,18	15,74
92b23	04/06 11h - 06/06 09h	47	178	8	3,07	5,17	23,39
04b12	14/05 06h - 22/05 18h	205	185	9,1	3,11	5,17	18,05
18a31	10/08 03h - 12/08 20h	66	188	9,1	3,77	5,16	18,02
88b25	09/08 10h - 16/08 00h	159	108	9,3	3,79	5,15	20,56
82b28	18/09 06h - 21/09 07h	74	138	9,4	3,74	5,15	16,57
05b27	24/08 08h - 27/08 22h	87	188	10,1	3,7	5,14	16,90
19b29	13/08 06h - 16/08 04h	71	191	8,6	3,23	5,13	16,51
08b31	28/08 00h - 30/08 11h	60	115	7,8	3,41	5,1	17,26
13b14	11/04 22h - 17/04 19h	142	205	8,1	3,24	5,1	15,87

Tabela 3 - Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Itajaí com dados do ERA5 (1979-2020). Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Itajaí com dados do ERA5 (1979-2020). Id é a identificação de cada ressaca naquele ponto. Data de início e fim no formato dia/mês hora. Duração é o tempo total da ressaca em horas. Direção representa a mediana durante toda a ressaca. Período apresenta a média em segundos. Swh média em metros. Swh máx. mostra o valor mais elevado em metros. Vento máximo em  $m s^{-1}$ .

<b>Id</b>	<b>Data início e fim</b>	<b>Duração</b>	<b>Direção</b>	<b>Período</b>	<b>Swh média</b>	<b>Swh máx.</b>	<b>Vento máx.</b>
87c11	30/07 15h - 01/08 17h	51	160	9,4	3,94	6,96	21,58
81c10	06/06 19h - 09/06 21h	75	170	9,8	3,88	6,37	21,28
01c05	04/05 06h - 09/05 17h	132	172	9,5	3,70	6,27	17,43
05c14	08/08 13h - 12/08 14h	98	172	8,5	3,95	6,21	18,91
99c11	30/05 05h - 01/06 22h	66	184	10,6	4,17	6,16	17,82
96c18	21/07 02h - 24/07 02h	73	188	10,7	4,11	6,05	16,97
90c10	21/06 06h - 23/06 10h	53	215	8,9	4,36	5,92	18,34
85c11	07/07 07h - 08/07 10h	28	198	8,5	4,21	5,91	18,98
81c18	03/09 08h - 06/09 11h	76	167	9,7	3,44	5,85	18,75
85c21	08/10 01h - 09/10 05h	29	206	8,6	4,20	5,83	18,56
85c12	10/07 18h - 12/07 11h	42	190	9,3	4,03	5,76	18,10
19c20	04/07 00h - 08/07 02h	99	195	9,9	3,55	5,73	15,71
20c07	03/04 09h - 05/04 21h	61	181	10,5	3,87	5,64	16,85
16c24	28/10 01h - 31/10 07h	79	177	10,7	3,81	5,61	14,64
88c24	09/08 16h - 15/08 19h	148	137	10,1	3,42	5,50	17,87
99c20	14/08 02h - 18/08 17h	112	176	9,2	3,39	5,44	16,09



94c09	07/04 10h - 10/04 08h	71	169	9,4	3,60	5,37	17,48
18c17	09/07 03h - 13/07 06h	100	169	8,7	3,17	5,36	16,84
99c10	19/05 22h - 22/05 23h	74	193	8,9	3,78	5,31	17,51
01c18	16/09 10h - 18/09 11h	50	201	9,1	3,49	5,21	16,81
16c06	26/04 21h - 01/05 20h	120	198	9,3	3,33	5,17	17,05
91c20	05/10 23h - 08/10 16h	66	169	8,8	3,34	5,17	16,89
11c09	27/05 17h - 31/05 03h	83	172	9,9	3,59	5,16	13,52
79c31	31/12 15h - 03/01 09h	67	192	9,7	3,97	5,14	15,03
09c01	02/01 19h - 05/01 20h	74	131	8,6	3,57	5,13	16,50
82c19	19/09 05h - 21/09 12h	56	158	10,1	3,82	5,09	15,70
13c30	24/09 22h - 28/09 10h	85	153	9,9	3,49	5,07	17,33
06c19	20/08 22h - 23/08 07h	58	194	10,1	3,58	5,06	15,63
04c07	04/05 18h - 09/05 18h	121	136	8,9	3,47	5,04	16,15
16c16	21/08 07h - 22/08 23h	41	184	8,6	3,75	5,03	16,33
16c29	04/12 00h - 06/12 10h	59	173	8,1	3,86	5,02	21,02
97c11	06/06 09h - 10/06 00h	88	177	9,3	3,56	5,00	15,74
82c12	13/07 10h - 15/07 20h	59	190	10,1	3,40	4,98	13,55
94c12	11/05 17h - 14/05 07h	63	113	8,8	3,86	4,98	17,84
07c21	28/07 08h - 30/07 20h	61	188	10,6	3,58	4,97	14,31
06c16	29/07 05h - 01/08 10h	78	193	9,9	3,50	4,97	14,69
85c09	05/06 23h - 11/06 06h	128	196	9,5	4,07	4,96	15,47
06c15	26/06 09h - 03/07 08h	168	144	10,0	3,11	4,96	15,06
82c23	13/10 14h - 20/10 22h	177	178	10,5	3,32	4,95	16,50
01c07	13/05 18h - 20/05 06h	157	160	9,2	2,96	4,94	17,31
07c09	08/05 12h - 11/05 23h	85	182	8,4	3,22	4,93	16,05
90c24	27/11 11h - 29/11 14h	52	193	10,1	3,88	4,93	13,60
85c17	28/08 03h - 29/08 07h	29	199	9,3	3,62	4,90	15,68
93c08	27/05 00h - 29/05 06h	55	191	9,2	3,66	4,90	15,02
80c12	14/07 23h - 16/07 19h	45	193	10,1	3,67	4,88	15,90
89c19	15/09 12h - 18/09 13h	74	187	9,2	3,61	4,87	15,87
87c02	10/03 01h - 12/03 12h	60	195	10,5	3,79	4,85	14,86
12c25	25/09 18h - 29/09 16h	95	172	8,5	3,22	4,84	16,31
03c22	09/09 13h - 11/09 22h	58	196	8,4	3,44	4,83	16,55
94c18	23/07 01h - 24/07 09h	33	199	8,2	3,81	4,82	16,64
90c08	10/06 14h - 11/06 22h	33	195	9,3	3,62	4,79	14,69
91c14	01/08 19h - 04/08 09h	63	194	9,5	3,43	4,77	15,39
07c28	24/09 08h - 28/09 08h	97	171	8,3	3,26	4,77	16,39
89c09	05/07 09h - 08/07 00h	64	201	8,9	3,72	4,77	15,53
00c34	16/12 18h - 18/12 05h	36	181	8,2	3,51	4,75	16,00
80c17	04/09 06h - 06/09 10h	53	195	10,6	3,78	4,74	14,01
88c21	24/07 14h - 26/07 10h	45	201	8,2	3,34	4,73	14,78
83c27	23/10 10h - 24/10 17h	32	197	7,9	3,66	4,72	15,51
79c13	14/06 00h - 16/06 11h	60	192	10,2	3,54	4,70	15,06
84c16	21/07 15h - 23/07 20h	54	194	8,1	3,65	4,67	17,94
88c05	08/04 16h - 09/04 17h	26	193	8,6	3,63	4,67	16,05
15c17	18/06 17h - 20/06 03h	35	196	8,7	3,64	4,67	15,41
07c12	29/05 04h - 05/06 06h	171	195	9,0	2,93	4,67	14,64
08c15	29/05 21h - 31/05 23h	51	195	8,8	3,50	4,66	15,81
90c15	28/08 07h - 30/08 20h	62	191	9,8	3,56	4,66	15,95
06c22	02/09 10h - 06/09 21h	108	195	9,7	3,48	4,65	15,76
00c16	12/07 14h - 18/07 11h	142	200	9,8	3,06	4,65	13,47
16c09	09/06 05h - 13/06 15h	107	198	10,4	3,36	4,64	13,85
20c20	30/06 01h - 03/07 16h	88	184	9,0	3,45	4,64	16,74
09c32	13/12 01h - 15/12 14h	62	168	10,2	3,66	4,63	16,03
15c13	11/05 18h - 15/05 14h	93	133	10,1	3,35	4,61	13,63

18c28	27/10 18h - 31/10 14h	93	139	10,1	3,22	4,61	17,64
90c02	18/04 06h - 21/04 17h	84	176	10,2	3,44	4,59	15,09

Tabela 4 - Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Santos com dados do ERA5 (1979-2020). Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Santos com dados do ERA5 (1979-2020). Id é a identificação de cada ressaca naquele ponto. Data de início e fim no formato dia/mês hora. Duração é o tempo total da ressaca em horas. Direção representa a mediana durante toda a ressaca. Período apresenta a média em segundos. Swh média em metros. Swh máx. mostra o valor mais elevado em metros. Vento máximo em  $m s^{-1}$ .

<b>Id</b>	<b>Data início e fim</b>	<b>Duração</b>	<b>Direção</b>	<b>Período</b>	<b>Swh média</b>	<b>Swh máx.</b>	<b>Vento máx.</b>
87d12	30/07 18h - 01/08 21h	52	175	9,3	3,86	6,23	18,93
01d05	05/05 03h - 09/05 16h	110	182	9,9	3,96	5,91	16,93
99d11	30/05 10h - 02/06 05h	68	190	11,0	4,10	5,87	14,97
96d20	21/07 05h - 24/07 16h	84	190	10,8	3,81	5,77	13,79
16d24	28/10 09h - 02/11 09h	121	165	9,8	3,28	5,62	12,20
81d19	31/08 10h - 06/09 16h	151	178	10,0	3,03	5,49	15,52
81d12	06/06 13h - 10/06 07h	91	175	9,3	3,47	5,37	16,05
20d07	03/04 17h - 06/04 01h	57	192	10,6	3,72	5,21	14,51
85d13	10/07 23h - 12/07 20h	46	191	9,9	3,70	5,21	15,49
99d24	14/08 12h - 22/08 06h	187	148	8,6	3,08	5,05	13,79
85d23	08/10 06h - 09/10 12h	31	210	9,0	3,63	5,01	14,90
88d18	09/08 23h - 15/08 22h	144	140	10,0	3,48	4,95	14,66
07d19	28/07 16h - 31/07 10h	67	190	10,9	3,52	4,91	14,22
16d15	21/08 17h - 23/08 07h	39	189	9,1	3,56	4,90	16,55
06d14	27/06 06h - 02/07 17h	132	146	10,3	3,40	4,82	13,58
19d19	04/07 09h - 08/07 06h	94	194	10,2	3,50	4,80	12,76
95d23	12/09 14h - 16/09 14h	97	182	9,3	3,26	4,75	12,99
82d09	13/07 23h - 17/07 16h	90	168	9,6	3,13	4,73	13,25
82d15	19/09 10h - 21/09 20h	59	170	10,2	3,62	4,70	13,70
97d12	07/06 07h - 10/06 03h	69	187	9,8	3,78	4,68	14,55
99d10	20/05 04h - 23/05 03h	72	205	9,1	3,71	4,67	16,34
87d03	10/03 10h - 12/03 15h	54	196	11,2	3,62	4,66	13,07
04d12	26/05 10h - 30/05 05h	92	197	10,8	3,37	4,62	14,62
94d13	24/06 14h - 30/06 23h	154	199	10,2	3,09	4,61	15,68
11d12	28/05 06h - 31/05 09h	76	181	10,5	3,43	4,60	10,49
07d07	09/05 04h - 12/05 07h	76	178	8,8	3,28	4,57	14,36
07d28	24/09 12h - 28/09 11h	96	183	8,6	3,16	4,56	13,75
13d17	23/07 04h - 27/07 15h	108	192	8,9	2,93	4,56	16,02
89d13	16/09 07h - 18/09 17h	59	192	9,8	3,50	4,56	12,92
10d07	05/04 12h - 11/04 12h	145	160	9,5	3,41	4,54	13,64
01d06	14/05 10h - 20/05 10h	145	169	9,2	2,92	4,54	16,14
85d10	06/06 06h - 11/06 07h	122	209	9,5	3,70	4,54	13,17
79d07	30/05 18h - 01/06 21h	52	217	9,3	3,44	4,53	15,18
00d12	12/07 12h - 18/07 20h	153	204	9,7	3,15	4,52	13,20
06d16	21/08 04h - 23/08 12h	57	197	10,6	3,38	4,51	12,28
90d06	18/05 06h - 20/05 19h	62	226	8,7	3,70	4,51	16,00
83d11	02/08 06h - 05/08 19h	86	155	9,8	3,63	4,50	17,38
85d12	07/07 08h - 08/07 17h	34	224	8,3	3,53	4,50	15,04
86d18	11/11 04h - 12/11 20h	41	190	8,1	3,40	4,49	16,37
18d09	19/05 10h - 24/05 07h	118	169	10,6	3,15	4,49	15,55
94d07	07/04 17h - 11/04 09h	89	165	9,4	3,24	4,49	13,44

86d02	15/04 20h - 17/04 08h	37	171	8,5	3,26	4,49	15,11
18d16	09/07 21h - 13/07 01h	77	185	8,8	3,01	4,47	14,82
06d15	29/07 18h - 02/08 07h	86	194	10,5	3,31	4,47	11,59
79d23	09/11 17h - 12/11 16h	72	153	9,1	3,66	4,46	13,63
06d19	03/09 09h - 07/09 01h	89	198	10,6	3,55	4,46	12,26
90d08	10/06 22h - 12/06 05h	32	197	9,7	3,48	4,41	13,16
97d11	29/05 10h - 03/06 03h	114	149	10,7	3,43	4,41	12,40
94d10	12/05 06h - 13/05 22h	41	137	9,3	3,36	4,40	10,13
13d26	25/09 05h - 28/09 18h	86	163	10,0	3,38	4,39	15,79
16d08	09/06 03h - 14/06 01h	119	200	10,7	3,27	4,38	9,89
03d23	10/09 21h - 12/09 05h	33	202	9,0	3,40	4,38	14,08
16d11	17/07 00h - 20/07 15h	88	203	9,9	3,05	4,37	12,89
01d23	16/09 15h - 20/09 21h	103	179	9,0	2,95	4,37	14,66
93d18	10/08 17h - 13/08 18h	74	195	11,1	3,23	4,35	13,29
11d13	04/06 15h - 10/06 09h	139	191	9,1	3,05	4,34	15,82
96d14	26/06 11h - 01/07 05h	115	190	10,7	3,41	4,34	13,47
84d21	25/08 15h - 27/08 18h	52	199	9,1	3,23	4,34	14,65
12d22	26/09 04h - 01/10 14h	131	158	8,5	2,93	4,33	14,61
91d14	02/10 22h - 10/10 12h	183	170	9,3	2,84	4,31	14,09
17d10	15/05 06h - 25/05 12h	247	113	9,4	3,16	4,31	15,77
08d09	30/05 10h - 01/06 00h	39	196	9,4	3,41	4,31	13,61
94d15	09/07 04h - 11/07 08h	53	211	8,9	3,58	4,31	14,13
81d22	20/10 03h - 21/10 05h	27	100	7,4	3,03	4,30	17,40
11d19	20/08 15h - 26/08 05h	135	177	11,3	3,55	4,29	11,42
93d08	27/05 18h - 31/05 09h	88	185	9,0	2,99	4,29	13,15
02d24	01/09 01h - 03/09 23h	71	197	10,6	3,27	4,28	12,66
92d23	24/08 00h - 26/08 00h	49	194	10,0	3,58	4,28	11,14
18d20	26/08 06h - 28/08 02h	45	195	10,9	3,26	4,27	9,24
07d10	29/05 14h - 01/06 18h	77	186	9,5	3,28	4,27	13,77
20d14	26/05 05h - 28/05 23h	67	205	9,9	3,41	4,26	12,78
18d31	08/12 01h - 10/12 10h	58	179	10,7	3,08	4,26	10,14
97d07	26/04 20h - 28/04 10h	39	199	11,4	3,15	4,26	7,54
97d21	02/10 17h - 10/10 11h	187	136	8,8	3,23	4,26	14,95
98d17	11/06 23h - 13/06 13h	39	184	9,8	3,36	4,26	15,39
17d17	10/08 09h - 15/08 21h	133	131	10,9	3,55	4,25	12,74
05d07	25/04 23h - 28/04 20h	70	182	10,1	3,17	4,25	14,07

Tabela 5 - Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Cabo Frio com dados do ERA5 (1979-2020). Lista de 10% de ressacas do swh máximo mais elevada ocorridas no ponto da boia Cabo Frio com dados do ERA5 (1979-2020). Id é a identificação de cada ressaca naquele ponto. Data de início e fim no formato dia/mês hora. Duração é o tempo total da ressaca em horas. Direção representa a mediana durante toda a ressaca. Período apresenta a média em segundos. Swh média em metros. Swh máx. mostra o valor mais elevado em metros. Vento máximo em  $m s^{-1}$ .

<b>Id</b>	<b>Data início e fim</b>	<b>Duração</b>	<b>Direção</b>	<b>Período</b>	<b>Swh média</b>	<b>Swh máx.</b>	<b>Vento máx.</b>
99g08	30/05 19h - 02/06 11h	65	196	11,4	3,94	5,40	13,79
01g04	05/05 11h - 09/05 10h	96	205	9,8	3,84	5,18	14,63
96g13	21/07 12h - 24/07 15h	76	193	11,3	3,65	5,16	13,33
83g06	02/08 13h - 06/08 05h	89	174	9,6	3,63	4,82	16,32
96g09	26/06 13h - 01/07 08h	116	194	11,0	3,38	4,79	14,77
79g06	31/05 01h - 02/06 01h	49	220	9,3	3,42	4,67	16,34
19g18	05/09 15h - 08/09 07h	65	184	10,5	3,19	4,56	12,06

81g12	01/09 01h - 06/09 21h	141	183	10,3	2,96	4,53	13,73
87g12	31/07 05h - 02/08 00h	44	187	9,3	3,58	4,50	16,25
07g18	28/07 23h - 31/07 10h	60	194	11,0	3,48	4,48	12,71
94g12	09/07 12h - 11/07 18h	55	215	9,2	3,26	4,46	14,77
97g08	07/06 12h - 10/06 04h	65	192	10,6	3,54	4,43	13,76
95g16	12/09 21h - 15/09 23h	75	181	9,6	3,19	4,42	12,15
01g05	15/05 17h - 20/05 16h	120	176	9,5	2,81	4,39	15,32
90g04	18/05 09h - 20/05 22h	62	223	9,0	3,59	4,37	15,44
92g12	24/08 10h - 26/08 04h	43	204	10,2	3,45	4,36	10,66
86g02	16/04 05h - 17/04 12h	32	180	8,9	3,31	4,33	12,50
19g11	04/07 18h - 08/07 13h	92	198	10,1	3,38	4,31	13,17
99g07	20/05 16h - 23/05 10h	67	212	9,1	3,37	4,31	15,20
20g04	04/04 03h - 06/04 04h	50	203	10,8	3,37	4,30	11,88
06g13	27/06 15h - 02/07 09h	115	163	10,6	3,22	4,29	13,18
16g08	09/06 11h - 14/06 08h	118	206	10,8	3,23	4,27	9,66
97g07	29/05 14h - 03/06 05h	112	163	10,6	3,50	4,23	13,25
16g21	28/10 21h - 03/11 01h	125	168	9,7	2,94	4,22	13,42
04g05	26/05 22h - 30/05 10h	85	201	11,5	3,29	4,21	12,66
85g18	08/10 12h - 09/10 18h	31	213	9,0	3,26	4,20	15,17
18g26	08/12 06h - 10/12 03h	46	188	11,4	3,20	4,19	11,29
07g07	09/05 13h - 12/05 12h	72	181	9,3	3,21	4,16	14,15
88g13	10/08 08h - 16/08 07h	144	150	10,2	3,13	4,15	12,96
81g07	07/06 11h - 10/06 10h	72	191	9,8	2,95	4,15	13,18
97g19	20/10 22h - 24/10 01h	76	116	8,8	2,93	4,15	15,63
94g11	26/06 00h - 30/06 23h	120	205	11,4	3,12	4,15	15,21
99g15	14/08 23h - 19/08 10h	108	171	10,0	3,05	4,14	12,78
10g04	06/04 16h - 11/04 17h	122	161	10,1	3,41	4,13	14,58
13g21	25/09 12h - 28/09 10h	71	187	9,8	3,42	4,11	15,76
88g06	05/06 07h - 06/06 10h	28	225	8,8	3,23	4,11	15,09
11g07	28/05 16h - 31/05 06h	63	193	10,3	3,27	4,09	10,84
19g12	16/07 16h - 23/07 20h	173	116	10,5	3,32	4,08	13,40
18g06	20/05 10h - 23/05 08h	71	193	10,4	3,11	4,08	15,22
89g02	26/05 20h - 30/05 03h	80	190	8,3	3,11	4,06	13,89
82g08	19/09 21h - 22/09 00h	52	180	10,6	3,42	4,06	11,67
06g18	04/09 07h - 07/09 04h	70	202	11,2	3,45	4,06	11,24
20g11	26/05 15h - 29/05 10h	68	209	10,0	3,23	4,06	12,07
00g10	14/07 07h - 19/07 07h	121	200	10,4	3,07	4,02	12,83
82g03	14/07 09h - 16/07 15h	55	191	10,9	3,14	4,01	9,08
05g06	26/04 10h - 29/04 02h	65	187	10,5	3,06	4,01	11,08
09g03	11/04 09h - 14/04 14h	78	195	12,3	2,98	3,99	6,65
95g13	05/08 02h - 07/08 23h	70	189	10,7	3,23	3,98	9,61
89g01	06/05 20h - 08/05 04h	33	216	8,2	3,12	3,98	14,80
93g13	25/07 15h - 30/07 17h	123	165	10,8	3,09	3,98	12,40
82g12	19/10 17h - 21/10 13h	45	197	11,8	3,39	3,97	11,20
16g11	17/07 05h - 20/07 17h	85	210	9,9	2,91	3,96	11,42
11g15	20/08 00h - 26/08 10h	155	172	11,0	3,10	3,96	12,02

## REFERÊNCIAS

ALLABY, M. Atmosphere. **A Scientific History of Air, Weather, and Climate (Discovering the Earth)**. Facts On File, 242 pg. 2009.

AQUINO, F. E. **Conexão climática entre o modo anular do Hemisfério Sul com a Península Antártica e o Sul do Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012

ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of the Southern Brazilian coast. Sixth International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, **COPEDEC VI**, Colombo, Sri Lanka, n°. 097, pg. 1-15. 2003.

ARDHUIN, F.; ORFILA, A. Wind waves. In "New Frontiers in Operational Oceanography", E. Chassignet, A. Pascual, J. Tintoré, and J. Verron, Eds., **GODAE OceanView**, pp. 393-422. 2018. Doi: 10.17125/gov2018.ch14.

AZEVEDO, P. R. M. de. **Introdução à estatística [recurso eletrônico]**. 3. ed; Natal, RN; EDUFRN. 2016. ISBN 978-85-425-0601-3. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21298/2/Introduc%CC%A7a%CC%83o%20a%CC%80%20Estati%CC%81stica%20%28digital%29.pdf>>. Acesso em 07 out. 2024.

BARLIER, F.; LEFEBVRE, M. A new look at planet Earth: Satellite geodesy and geosciences. **Kluwer Academic Publishers**, pg. 1-29. 2001.

BARROS, F. M. L.; KLUMB-OLIVEIRA, L. A.; LIMA, R. F. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). **Revista de Gestão Costeira Integrada** 18(2), pg. 85-102. 2018. Doi: 10.5894/rgci-n146

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Tradução por: Ronaldo Cataldo Costa. Porto Alegre: Editora Bookman, 9. ed., 512 pg. 2013.

BENGTSSON, L.; HODGES, K. I.; KEENLYSIDE, N. Will Extratropical Storms Intensify in a Warmer Climate? **Journal of Climate**, v. 22, pg. 2276-2301. 2008.

BITENCOURT, D. P.; FUENTES, M. V.; CARDOSO, C. S. Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, pg. 43-56. 2013.

BITENCOURT, D. P.; QUADRO, M. F. L.; CALBETI, N. O. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, pg. 3910-3917. 2002.

BJERKNES, J. On the Structure of Moving Cyclones. **Monthly Weather Review**, pg. 95-99. 1919.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. **Geofysike Publikasjoner**, v. III, pg. 393-400. 1922.

BULHÕES, E. M. R.; FERNANDEZ, G. B.; FILHO, S. R. O.; PEREIRA, T. G.; ROCHA, T. B. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Quaternary and Environmental Geosciences**. 05(2), pg. 155-165. 2014.

CAMPOS, R. M.; ALVES, J. H. G. M.; GUEDES SOARES, C.; GUIMARAES, L.G.; PARENTE, C. E. Extreme wind-wave modeling and analysis in the South Atlantic Ocean. **Ocean Model**, 124, pp. 75–93. 2018.

CAMPOS, R. M.; de CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, pg. 175-184. 2010.

CAMPOS, R. M.; PARENTE, C. E.; de Camargo, R. Extreme wave Analysis in Campos basin (Rio de Janeiro - Brazil) associated with extra-tropical cyclones and anticyclones. In: **Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, pp. 1–10. 2012.

CAPUCIN, B. C.; REBOITA, M. S.; LUCYRIO, V. Onda de Frio Histórica no Brasil: um Estudo de Caso de Junho de 1985. **Anu. Inst. Geociênc.**, 45:40761. 2022. Doi: doi.org/10.11137/1982-3908\_45\_40761

CARDOSO, C. S.; BITENCOURT, D. P.; MENDONCA, M. Comportamento do vento no setor leste de Santa Catarina sob influência de ciclones extratropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.1, 39 – 48. 2012.

CARTER, R. W. G. Coastal environments –An introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines. London. UK: **Academic Press**, 617pg. 1988.

CATTO, J. L. Extratropical cyclone classification and its use in climate studies. *Rev. Geophys.*, **54 (2)**, pg. 486-520. 2016

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). **CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**. Vol.23, nº 06. 2008.

Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). **Novo ciclone atinge regiões sul, centro-oeste e sudeste**. Disponível em: <[http://antigo.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod\\_Noticia=28](http://antigo.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=28)>. Acesso em 29 jul. 2023.

CHARNEY, J. G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. **Journal of Meteorology**, 4, No. 05, pg.135–162. 1947.



CRESPO, N. M.; ROCHA, R. P.; SPRENGER, M.; WERNLI, H. A Potential Vorticity Perspective on Cyclogenesis over Center-Eastern South America. **Int. J. Climatol.** 41, pg. 663–678. 2020. Doi: 10.1002/joc.6644

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). **ERA5: data documentation.** 2021. Disponível em: <[https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5 %3A+data+documentation](https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+%3A+data+documentation)>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DA ROCHA, R.P.; SUGAHARA, S.; SILVEIRA, R.B. Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data. *Weather and Forecastin*, v. **19**. pg 398-410. 2003.

DE CAMARGO, R.; HARARI, J. Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste do Brasil a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície. **Bolm Inst. oceanogr.**, São Paulo, v. 42(1), pg. 19-34. 1994.

DEE D. P.; UPPALA S. M.; SIMMONS A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HOLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; de ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THEPAUT, J. N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Q. J. R. Meteorol. Soc.** 137, pp. 553 – 597. 2011. Doi: 10.1002/qj.828

Diário do Grande ABC. **Ciclone provoca rajadas de vento de 103 km/h no RS.** Disponível em <<https://www.dgabc.com.br/Noticia/276559/ciclone-provoca-rajadas-de-vento-de-103-km-h-no-rs>>. Acesso em: 29 jul. 2023.

EADY, E. T. **Long waves and cyclone waves.** *Tellus* 1, pg. 33–52. 1949.

ESCUDIER, P., FELLOUS, J. L. **The Next 15 Years of Satellite Altimetry Ocean Surface Topography Constellation User Requirements Document.** Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). Preparado por European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), 50 pg. 2009.

ESPINDOLA, R., ARAÚJO, A. M. Validação de dados de onda de reanálise do ERA/Interim para estimativa do potencial energético das ondas. **VI Congresso Brasileiro de Energia Solar.** Belo Horizonte, 2016.

FOLLEY, M. The Wave Energy Resource. In: Pecher, A.; Kofoed, J. P. (eds.). *Handbook of Ocean Wave Energy.* Ocean Engineering & Oceanography, v. **7**. 2017.

FORTUNE, M. A., KOUSKY V. E. Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. *American Meteorological Society*, v. **11**, pg. 181-196. 1983.

FUENTES, E. V., BITENCOURT, D. P., FUENTES, M. V. Análise da velocidade do vento e altura de onda em incidentes de naufrágio na costa brasileira entre os

estados do Sergipe e do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. **28**, pg. 257-266. 2013.

GAN, M. A. **Ciclogênese e ciclones sobre a América do Sul**. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1992.

GAN, M. A. CICLONE CATARINA: ANÁLISE SINÓTICA. In: III Simpósio Internacional de Climatologia, 2009, Canela. **III Simpósio Internacional de Climatologia**. Rio de Janeiro, SBMET, v. 1, pg. 1-5. 2009.

GAN, M. A., RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Am Meteorological Society**. Notes and correspondence, pg. 1293-1302. 1991.

GAN, M. A., SELUCHI, M. E. Ciclones e ciclogênese. IN: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. e DIAS, M.A.F.S (orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, pg. 111– 125. 2009.

GENG, Q., SUGI, M. Possible Change of Extratropical Cyclone Activity due to Enhanced Greenhouse Gases and Sulfate Aerosols—Study with a High-Resolution AGCM. **Journal of Climate**, v. 16, pg. 2262-2274. 2003.

GODOI, V. A., CALADO, L., WATANABE, W. B., YAGINUMA, L. E., BASTOS, M. Evento extremo de ondas na Baía da Ilha Grande: um estudo de caso. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, v. 5, n. 2, pg. 27-44. 2021.

GRAMCIANINOV, C. B., de CAMARGO, R., CAMPOS, R. M., GUEDES SOARES, R. Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the Atlantic Ocean. **Climate Dynamics**, v. 60, pg. 1447–1466. 2023c.

GRAMCIANINOV, C., CAMPOS, R., de CAMARGO, R., GUEDES SOARES, C. Relation between cyclone evolution and fetch associated with extreme wave events in the South Atlantic Ocean. **Journal of offshore mechanics and arctic engineering**, v. 1, pg. 1-27. 2021.

GRAMCIANINOV, C. B., CAMPOS, R. M., de CAMARGO, R., HODGES, K. I., GUEDES SOARES, C., da SILVA DIAS, P. L. Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases. **Ocean Engineering**, 216C. 2020b. Doi: doi.org/10.1016/j.oceaneng108111.

GRAMCIANINOV, C. B., CAMPOS, R. M.; SOARES, C., de CAMARGO, R. Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, 213. 2020a. Doi: doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107745.

GRAMCIANINOV, C. B., HODGES, K. I., de CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. **Clim. Dynam.**, 53, pg. 4115–4140. 2019. Doi: doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1.

GRAMCIANINOV, C.B., STANEVA, J., de CAMARGO, R. et al. Changes in extreme wave events in the southwestern South Atlantic Ocean. **Ocean Dynamic**. 2023b. Doi: doi.org/10.1007/s10236-023-01575-7.

GRAMCIANINOV, C. B., STANEVA, J., SOUZA, C. R. G., LINHARES, P., de CAMARGO, R., and da SILVA DIAS, P. L.: Recent changes in extreme wave events in the south-western South Atlantic, in: 7th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR7), edited by: von Schuckmann, K., Moreira, L., Le Traon, P.-Y., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J. and Neukermans, G., Copernicus Publications, **State Planet**. 2023a. Doi: doi.org/10.5194/sp-1-osr7-12-2023.

HARARI, J.; de CAMARGO, R. Patterns of Evolution of Frontal Systems Along the South-Southeastern Brazilian Coast. In: Nunes L., Greco R., Marengo J. (eds) **Climate Change in Santos Brazil: Projections, Impacts and Adaptation Options**. Springer, Cham. 2019. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96535-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96535-2_2).

HASSELMANN, K., BARNETT, T. P., BOUWS, E., CARLSON, H., CARTWRIGHT, D. E.; ENKE, K., EWING, J. A., GIENAPP, H., HASSELMANN, D. E., KRUSEMAN, P., MEERBURG, A., MLLER, P., OLBERS, D. J., RICHTER, K., SELL, W., WALDEN, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North sea wave project (JONSWAP). **Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A 8°**, Nr. 12. 1973.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., et al. The ERA5 global reanalysis. **Q. J.R. Meteorol Soc.**, 146, pg. 1999–2049. 2020. Doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

HODGES, K. I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. **Mon. Weather Rev.** 122, pg. 2573–2586. 1994.

HODGES, K. I. Feature tracking on the unit sphere. **Mon. Weather Rev.** 123, pg. 3458–3465. 1995

HODGES, K. I. Adaptive constraints for feature tracking. **Mon. Weather Rev.** 127, pg. 1362–1373. 1999

HOLTON, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. **Academic Press**, Fourth Editon, 535 pg. 2004.

HOSKINS, B.J., HODGES, K. I. A new perspective on southern hemisphere storm tracks. **J. Clim.** 18, pg. 4108–4129. 2005.

INNOCENTINI, V., OLIVEIRA, F. A., PRADO, S. C. S. C. Modelo de ondas aplicado ao caso 5-8 de maio de 2001. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 18, pg. 97-104. 2003.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **"Ciclone bomba": fenômeno atingiu o sul do Brasil no início da semana**. 2020. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/noticias/ciclone-bomba-fortes-ventos-e-tempestades-associados-%C3%A0-forma%C3%A7%C3%A3o-do-ciclone-extratropical-e-ao-desenvolvimento-de-uma-ciclog%C3%AAnese-explosiva-ou-ciclone-bomba>>. Acesso em: 29 jul. 2023.

IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. **Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático** [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suíça. 2014.

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pg. 35-115. Doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Ivis, F. (2006). **Calculating geographic distance: Concepts and methods.** Canadian Institute for Health Information. Disponível em <<https://www.lexjansen.com/nesug/nesug06/dm/da15.pdf>>. Acesso em: 29 mai. de 2023.

JANTSCH, M. **Climatologia de ciclones extratropicais na Região Sul do Brasil de 2000 a 2016.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2019.

JANTSCH, M., AQUINO, F. E. Ocorrência e distribuição espacial de ciclones extratropicais na região sul do Brasil em 2018. Rev. **ParaOnde!?**, v.13, n.1, pg. 234-249. 2020.

KLUMB-OLIVEIRA, L. A., PEREIRA, N. E. S., LEÃO, R. R. Morfodinâmica multitemporal em praia refletiva no litoral Centro-Norte do RJ, em resposta ao clima de ondas regional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, nº 1, pg. 20-36. 2015.

KRUEGER, J. **Análise dos Parâmetros Meteorológicos e Oceanográficos dos Eventos de Ressaca, ocorridos entre Janeiro de 2001 a Dezembro de 2010, no Estado de Santa Catarina.** Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar (CTTMar), Universidade do Vale do Itajaí. Monografia. 2011.

LICHTENSTEIN, E. R. **La Depresion del Noroeste Argentino.** Tese de Doutorado. Universidad of Buenos Aires. 1980.

LIM, E.P., SIMMONDS, I. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere Events. **Monthly Weather Review**, v. 130, n. 9, pg. 2188-2209. 2002.

MACHADO, J. P., MIRANDA, G. S. B., GOZZO, L. F., CUSTÓDIO, M. S. Condições Atmosféricas Associadas a Eventos de Ressaca no Litoral Sul e do Sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 4, pg. 529-544. 2019.

MACHADO A.A., CALLIARI L.J. Synoptic systems generators of extreme wind in Southern Brazil: atmospheric conditions and consequences in the coastal zone. *J Coast Res* **1(75)**, pg.1182–1186. 2016. Doi: <https://doi.org/10.2112/SI75-237.1>.

MACHADO, A. A., CALLIARI, L. J., MELO, E.; KLEIN, A. H. F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, **5(2)**: pg. 277-286. 2010.

MAGRIN, G.O., MARENGO, J. A., BOULANGER, J. P., BUCKRIDGE, M. S., CASTELLANOS, E., POVEDA, G., SCARANO, F. R. and VICUÑA, S. Central and South America. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V. R., C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pg. 1499-1566. 2014.

MARCELINO, E. V.; RUDORFF, F. de M.; MARCELINO, I. P. V. de O.; GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. **Impacto do Furacão Catarina sobre a região sul catarinense: monitoramento e avaliação pós-desastre**. *Geografia*, Rio Claro, v. 30, n. 3, pg. 559-582. 2005.

MARINHA DO BRASIL. **Normas de autoridade marítima para as atividades de meteorologia marítima** - Normam-19. 1ª Revisão, Brasília. 2018.

MARONE, E., de CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. *Rev. Nerítica*, v.8 (1-2), pg. 73-85. 1994.

MELO FILHO, E. **Maré meteorológica na costa brasileira**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Rio Grande. 2017.

MELO FILHO, E., HAMMES, G. R., FRANCO, D. **Estudo de Caso: A Ressaca de Agosto de 2005 em Santa Catarina**. 2º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande. 2006.

MENDES, D., SOUZA, E. P., TRIGO, I. F., MIRANDA, P. M. A. **On Precursors of South-American Cyclogenesis**. V. 59, n. 1, pg. 114-121. 2007.

MENDES, D., MOURA, R. G., MENDES, M. C. D. Estudo de caso de ciclone extratropical sobre a América do Sul: Sensibilidade das análises. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n.4, pg. 309-406. 2009.

METAXAS, D. A. Evidence on the Importance of Diabatic Heating as a Divergence Factor in the Mediterranean. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. A, 27. Pg. 69-80. 1978.

METSUL METEOROLOGIA. **Ciclone de amanhã traz memória de evento extremo de 2008**. Disponível em: <<https://metsul.com/ciclone-de-amanha-traz-memoria-de-evento-extremo-de-2008/>>. Acesso em: 29 jul. 2023.

NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (NCAR). Last modified 01 Jul 2016. **"The Climate Data Guide: AVISO: Satellite derived Sea Surface Height above Geoid."** Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/aviso-satellite-derived-sea-surface-height-above->. Acesso em: 22 jun. 2021.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION - NOAA. **State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>>. Acesso em 03 out. 2023.

NEIMAN, P. J., SHAPIRO, M. A. The Life Cycle of an Extratropical Marine Cyclone. Part I: Frontal Cyclone Evolution and Thermodynamic Air-Sea Interaction. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, pg. 2153-2176. 1993.

PARISE, C. K., CALLIARI, L. J., KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the South of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, 57(3), pg. 175- 188. 2009.

PAULA, D.P.; de, MORAIS, J.O.; FERREIRA, O.; DIAS, J.A. Análise Histórica das Ressacas do Mar no Litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. In Davis Pereira Paula de e J. Alveirinho Dias (orgs.). Editora Premium, **Ressacas do Mar/Temporais e Gestão Costeira**, Fortaleza, Brasil, pg. 173-201. 2015.

PBMC. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J. A., Scarano, F. R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 pg. 2016. ISBN: 978-85-285-0345-6. Disponível em: <[https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio\\_DOIS\\_v1\\_04.06.17.pdf](https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio_DOIS_v1_04.06.17.pdf)>. Acesso em 15 mai. 2021.

PEREIRA, N.; RODRIGUES, J.; RIBEIRO, A. de L.; D'INCAO, F. Influence analysis of extratropical cyclones in increase of salinity at the estuary of Patos Lagoon, Southern Brazil. *Atlântica*, Rio Grande, **34(2)**, pg. 173-187. 2012.

PETTERSEN, S., SMEBYE, S. J. On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. R. Metl. Soc.* **97 (414)**, pg. 457-482. 1971.

PIANCA, C., MAZZINI, P. L. F., SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian J. Oceanogr.** 58, pg. 53–70. 2010.

PUGH, D. T. Tides, surges and mean sea level. Chichester, U.K.: **Jonh Wiley**, pg. 472 p. 1987.

RADINOVIC, D. On the development of orographic cyclones. **Quart. J. R. Met. Soc.** 112, pg. 927-951. 1986.

REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2008.

REBOITA, M., AMBRIZZI, T., ROCHA, R. P. Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, pg. 48-55. 2009.



REBOITA, M. S., GAN, M. A., ROCHA, R. P. da; CUSTÓDIO, I. S. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, pg. 171-186. 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863220010>.

REBOITA, M. S., ROCHA, R. P., AMBRIZZI, T., SUGAHARA, S. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate. Dyn.*, **35 (7-8)**, pg. 1331-1347. 2010.

REIS, P. A. **Quarenta anos de ciclogênese explosiva na Região Sul do Brasil**. Dissertação de Mestrado. UFRGS. 2022.

REIS, P. A., AQUINO, F. E. SCHOSSLER, V., BERNARDO, R. T., SIMÕES, J. C. Tropical–Antarctic connections of an explosive cyclone in southern Brazil: rainfall stable isotope ratios and atmospheric analysis. **Adv Polar Sci**, 31(2), pg. 103-111. 2020. Doi: 10.13679/j.advps.2019.0039.

REITER, E. R. **Jet Stream Meteorology**. The University of Chicago Press, pg. 515, 1969.

RUDORFF, F. M., BONETTI, J. Avaliação da Suscetibilidade à Erosão Costeira de Praias da Ilha de Santa Catarina. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, v. 14(1), pg. 9-20. 2010.

SANDERS, F., GYAKUM, J. R. Synoptic-dynamic climatology of the “bomb”. **Mon Weather Rev.** Pg. 1589-1606. 1980.

SANTOS, C. L. D., SILVA, M. A. M., SALVADOR, M. V. S. Dinâmica sazonal e os efeitos das ressacas nas praias de Niterói/RJ. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34 (3), pg. 355-360. 2004.

SATO, N. Influences of intraseasonal disturbances on the oceanic mixed layer in the western North Pacific ITCZ region, **Geophys. Res. Lett.**, v. 32. 2005.

SATYAMURTY, P., SANTOS, R. P., LEMS, M. A. M. On the stationary trough generated by the Andes. **Mon. Wea. Rev.**, **108**, pg. 510-520. 1980.

SCHOSSLER, V., AQUINO, F. E., REIS, P., SIMÕES, J. C. Antarctic atmospheric circulation anomalies and explosive cyclogenesis in the spring of 2016. **Theoretical and Applied Climatology**, 141, pg. 537–549. 2020. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03200-9>.

SCHOSSLER, V., AQUINO, F. E., REIS, P. A., SIMÕES, J. C. Anomalias da circulação atmosférica antártica na primavera de 2016. **Revista de Geografia – PPGeo - UFJF**. Juiz de Fora/MG, v.8, n.2, (XIII SBCG 2018), pg. 54-64. 2018.

SELUCHI, M. E., SAULO, C. A., NICOLINI, M., SATYAMURTY, P. The Northwestern Argentinean Low: a study of two typical events. **Monthly Weather Review**, v. 131, pg. 2361-2378. 2003.

SHAPIRO, M. A., KEYSER, D. Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial. Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., **American Meteorological Society**, pg. 167-191. 1990.

SHIMIZU, M. H. **Fontes de ondas de Rossby: aspectos observacionais, simulações numéricas projeções futuras.** Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2012.

SIMÓ, D. H.; HORN FILHO, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Gravel*, n°2, pg. 93-103. 2004.

SONDERMANN, M., CHOU, S. C., SOUZA, C. R. de, RODRIGUES, J., CAPRACE, J. D. Atmospheric patterns favourable to storm surge events on the coast of São Paulo State, Brazil. **Natural Hazard** **117**, pg. 93–111. 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05851-z>

STRETEN, N., TROUP, A J. A synoptic climatology of satellite observed cloud vórtices over the Southern Hemisphere. **Quart. J. li. Met. SOC.**, 99, pg. 56-72. 1973.

TALJAARD, J. J. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during IGY. **J. Appl. Meteor.**, **6**, pg. 973-987. 1967.

TALJAARD, J. J. Synoptic meteorology in the Southern Hemisphere. In: Newton, C. W. Meteorology of the Southern Hemisphere. **American Meteorological Society**, pg. 139–213. 1972.

TIMMERMANS, B. W., GOMMENGINGER, C. P., DODET, G., & BIDLOT, J.-R. (2020). Global wave height trends and variability from new multimission satellite altimeter products, reanalyses, and wave buoys. **Geophysical Research Letters**, **47**, e2019GL086880. 2020. Doi: <https://doi.org/10.1029/2019GL086880>.

TORRES, S. **Mar avança e ameaça área urbana no Rio.** Folha de São Paulo. 7 de setembro. 1996. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/1996/9/07/cotidiano/1.html>>. Acesso em: 07 ago. 2023.

TOZZI, H. A. de M., CALLIARI, L. J. Morfodinâmica da Praia do Cassino, RS. *Pesquisas em Geociências*, **27** (1), pg. 29-42. 2000.

TOZZI, H. A. M., CALLIARI, L. J. Trajetórias e distribuição das tempestades extratropicais e o impacto na costa do Rio Grande do Sul. In: **CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR**, 7, Porto Seguro, BA. 1999.

TURNER, R. K., SUBAK, S., ADGER, W. N. Pressures, trends, and impacts in coastal zones: Interactions between socioeconomic and natural systems. **Environmental Management**, **20**(2), pg. 159-173. 1996.

VANZ, A., RODRIGUES, M. L. G. A erosão costeira na praia da Armação do Pântano do Sul, no litoral catarinense. **Revista Agropecuária Catarinense**, v.25, n.1. 2012.

VERA, C. S., VIGLIAROLO, P. K., BERBERY, E. H. Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. **Mon. Wea. Rev.**, 130, pg. 684-699. 2002.

VIANNA, J. A. P.; MENEZES, V.V.; PEZZA,A.B.;SIMMONDS,I. Interaction between Hurricane Catarina and Warm Core Rings in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research, Oceans*, Volume 115. 2010.

WALLACE, J. M., HOBBS, P. V. *Atmospheric Sciences: An Introduction Survey*. New York: **Academic Press**. 2006.