



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA



**USO DO MODELO BRAMS V5.3 PARA O EVENTO DA TEMPESTADE NA  
PLATAFORMA P-70: ANÁLISE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO  
MAR (TSM) E DA MICROFÍSICA DE NUVENS**

Karine dos Santos Rodrigues

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Coorientador: M. Sc. Luiz Felipe Rodrigues do Carmo

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à  
obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Rio de Janeiro

2021

USO DO MODELO BRAMS V5.3 PARA O EVENTO DA TEMPESTADE NA  
PLATAFORMA P-70: ANÁLISE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR  
(TSM) E DA MICROFÍSICA DE NUVENS

Karine dos Santos Rodrigues

Monografia submetida ao corpo docente do  
Departamento de Meteorologia da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção de grau de Bacharel em  
Meteorologia.

Avaliada por:



---

Prof.º D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira - IGEO/UFRJ  
(Orientadora)




---

Prof.º M. Sc. Luiz Felipe Rodrigues do Carmo - IGEO/UFRJ  
(Orientador)



---

Prof.º D.Sc. Luis Manoel Paiva Nunes - CENPES/PETROBRAS



---

Prof.º D. Sc. Wallace Figueiredo Menezes - IGEO/UFRJ



---

Prof.º D.Sc. Edilson Marton - IGEO/UFRJ

Rio de Janeiro, RJ

Julho, 2021

USO DO MODELO BRAMS V5.3 PARA O EVENTO DA TEMPESTADE NA  
PLATAFORMA P-70: ANÁLISE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR  
(TSM) E DA MICROFÍSICA DE NUVENS

RODRIGUES, KARINE DOS SANTOS.

USO DO MODELO BRAMS V5.3 PARA O EVENTO DA TEMPESTADE NA  
PLATAFORMA P-70: ANÁLISE DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR  
(TSM) E DA MICROFÍSICA DE NUVENS [Rio de Janeiro], 2021

Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Meteorologia.

1. Modelo BRAMS
2. Tempestade
3. Plataforma P-70



*“Por mais difícil que a vida possa parecer,  
há sempre algo que você pode fazer e ter  
sucesso.”*

(Stephen Hawking)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me abençoado com mais uma vitória e ter me dado força e sabedoria durante esta longa jornada.

A minha mãe, Ivaneide, que sempre batalhou para criar a mim e meu irmão, e sempre acreditou em mim, me mostrando que nunca estaria sozinha e me ajudando a superar qualquer dificuldade. Te amo mais que tudo!

Ao meu marido Igor França, que tanto contribui para que eu chegasse nesse momento tão especial, e esteve ao meu lado me dando todo apoio necessário, sempre com muito amor e carinho.

A toda a minha família que tanto acreditou e torceu pelo meu sucesso, em particular às minhas avós Ivanilda e Ilda, meu pai Racine, meu irmão Leonardo, minha sogra Cecília e os meus padrinhos Ivonete e Ivanildo pelo amor, pelas palavras amigas e por todo apoio.

Ao meu pai acadêmico, Ivan Pereira, por todo carinho, conselhos, apoio e orientação que foi muito mais que acadêmica, seus ensinamentos me ajudaram a crescer como pessoa. Você foi muito mais que meu orientador, foi o melhor amigo que eu poderia ter.

A minha mãe acadêmica e orientadora Ana Cristina Palmeira, por toda paciência, pela confiança, conselhos e incentivos, tornando possível a conclusão desta monografia, que não foi nada fácil, diga-se de passagem. Seu apoio e dedicação foram fundamentais para chegar aonde cheguei com tamanha aprendizagem.

Ao amigo e coorientador Luiz Felipe do Carmo por toda colaboração e contribuição, seu apoio e conselhos foram importantes para superar as dificuldades que tive tanto acadêmicas quanto pessoais.

Ao amigo Ronaldo Palmeira, por toda ajuda na instalação do modelo BRAMS, pelas aulas de Python e por toda colaboração, paciência e boa vontade.

A todos os professores do corpo docente do departamento de meteorologia que contribuíram para a minha formação acadêmica, em especial o professor Wallace Menezes por todos os ensinamentos. Sempre muito solícito e disposto a ajudar com informações e sugestões para realização deste trabalho.

A Petrobras pela bolsa concedida durante o curso de graduação.

Aos amigos de graduação e do laboratório LADSIN obrigada pelo companheirismo e pelas trocas de experiências.

## RESUMO

A previsão numérica de tempo é uma ferramenta importante para representar e prever os eventos meteorológicos causadores de condições severas e extremas, sendo inclusive uma informação útil para ajudar na prevenção e mitigação de possíveis desastres. Por conseguinte, melhorar o seu respectivo desempenho é um dos desafios atuais mais discutidos dentro dessa temática. Tendo em vista essa problemática, neste trabalho foi realizada uma investigação sobre o desempenho do modelo atmosférico BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) em sua mais nova versão (v.5.3), no intuito de verificar quais opções de rodada do modelo, entre parametrizações e qualidade de dados de entrada, seriam capazes de melhor caracterizar os ventos e a precipitação relacionados à tempestade ocorrida no dia 30 de janeiro de 2020, que causou o deslocamento da Plataforma P-70 na Baía de Guanabara. Para tal, utilizou-se como metodologia a comparação e a correlação entre os ventos das simulações feitas com o BRAMS com os dados de METAR (METeorological Aerodrome Report) das estações SBRJ (Aeroporto Santos Dumont) e SBGL (Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão) e com informações extraídas da reanálise ERA-5 (*5th Generation of ECMWF ReAnalysis*). Além disso, também foi realizado uma série de testes de sensibilidade com o modelo BRAMS, concentrando-se nas parametrizações de microfísica de nuvens disponíveis no BRAMS 5.3, como também nas diferentes resoluções temporais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM). Os resultados demonstram que houve melhora na caracterização dos ventos e da precipitação após a inserção da TSM semanal como condição inicial no lugar da climatológica e o esquema de microfísica de nuvens de *Greg Thompson cloud water double moment and aerosol aware* (com a inserção da TSM semanal) apresentou as melhores correlações.

**Palavras-chave:** Modelagem numérica, BRAMS, microfísica de nuvens, TSM, Plataforma P-70.

## ABSTRACT

The numerical weather forecast is an important tool to represent and predict the meteorological events that cause severe and extreme conditions, being also useful information to help in the prevention and mitigation of possible disasters. Therefore, improving their respective performance is one of the most discussed current challenges within this theme. In view of this issue, in this work was realized an investigation about the performance of the BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) atmospheric model in its newest version (v.5.3), in order to verify which options for running the model, between parameterization and input data quality, would be able to better characterize the winds and precipitation related to the storm that occurred on January 30, 2020, that caused the displacement of Platform P-70 in Guanabara Bay. For this, was used as methodology the comparison and correlation between the winds of the simulations made with BRAMS with METAR (METeorological Aerodrome Report) data from SBRJ (Santos Dumont Airport) and SBGL (Rio de Janeiro International Airport / Galeão) and with information extracted from the ERA-5 reanalysis (5th Generation of ECMWF ReAnalysis). In addition, a series of sensitivity tests was carried out with the BRAMS model, focusing on the parameterization of cloud microphysics, as well as on the different temporal resolutions of the Sea Surface Temperature (SST). The results demonstrate that there was an improvement in the characterization of winds and precipitation after the insertion of weekly SST as an initial condition instead of climatology and the Greg Thompson cloud water double moment and aerosol aware scheme (with the insertion of the weekly SST) presented the best correlations.

**Keywords:** Numerical modeling, BRAMS, cloud microphysics, SST, Platform P-70.



## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	01
1.1 Objetivos.....	02
1.2 Estrutura da Monografia.....	03
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	04
2.1 Alguns fenômenos meteorológicos atuantes .....	04
2.1.1 Escala Sinótica.....	04
2.1.1.1 Ciclones.....	04
2.1.1.2 Frente Frias.....	06
2.1.1.3 ZCAS.....	07
2.1.1.4 Cavados.....	08
2.1.2 Tempestades Convectivas em Mesoescala.....	09
2.1.3 Squalls.....	13
2.2 Influência da TSM na Previsão Numérica de Tempo.....	14
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E DADOS.....	16
3.1 Área de estudo.....	16
3.2 Dados.....	16
3.2.1 Observados.....	16
3.2.2 Estimados e Reanálise ERA-5.....	17
3.3 Metodologia.....	18
3.3.1 Análise e descrição dos campos sinóticos.....	18
3.3.2 Simulações Numéricas.....	19
3.3.2.1 Modelo BRAMS.....	19
3.3.2.1.1 Parametrização de microfísica de nuvens.....	22

3.3.2.2 Configuração das simulações.....	23
3.3.2.3 Testes de sensibilidade.....	25
3.3.3 Avaliação das simulações com o BRAMS.....	28
3.3.3.1 Índices estatísticos.....	28
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Análise sinótica.....	30
4.2 Análise de sensibilidade das simulações.....	34
4.2.1 TSM climatológica e semanal.....	35
4.3 Comparação entre simulação, reanálise e dados observados.....	38
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	41
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Representação dos três núcleos com maior densidade de ciclogêneses no Oceano Atlântico Sul, para o período de 1990 a 1999. Na escala de cor da figura, o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas. Adaptado de Reboita *et al.*, (2008).....06
- Figura 2.2 - Representação em carta de Pressão ao Nível Médio do Mar da Marinha do Brasil de frentes e fenômenos abordados na seção 2.2.1.....08
- Figura 2.3 - Seção transversal simplificada de uma tempestade mostrando os três estágios de evolução de uma Cb.....09
- Figura 3.1 - Localização da área de estudo. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.....16
- Figura 3.2 - Localização das estações SBRJ e SBGL e a posição da Praia de Boa Viagem. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.....17
- Figura 3.3 - Localização dos pontos definidos para comparação com a reanálise ERA-5. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.....18
- Figura 3.4 - Estrutura da Parametrização JULES 3.0. Fonte: Moreira, 2013.....21
- Figura 3.5 - Principais processos físicos e químicos simulados pelo BRAMS versão 5.0 . Fonte: Moreira *et al.*, 2013.....22
- Figura 3.6 - Domínios das grades para as simulações do BRAMS.....24
- Figura 4.1 - (a) Imagem do satélite GOES-16 do canal 13 (Infravermelho Termal) do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. Fonte: CPTEC/INPE. (b) Carta sinótica de superfície do

dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. Fonte: DHN. (c) Imagem do radar meteorológico Sumaré, do dia 30/01/2020 às 23:50 UTC (20h50min hora local). Fonte: Prefeitura do Rio. ....31

Figura 4.2 - (a) Pressão reduzida ao nível médio do mar (contornos em cinza - hPa), vento em 200 hPa (em cores - kt) e Altura geopotencial em 500 hPa (linhas tracejadas - mgp); (b) Vento em 200 hPa (em cores / linha de corrente - kt); (c) Umidade específica (em cores - g/kg) e vento em 850 hPa (linhas de corrente - m/s); (d) Radiação de Onda Longa (em cores - W/m<sup>2</sup>), às 18:00 UTC do dia 30/01/2020 - reanálise ERA-5.....32

Figura 4.3 - (a) Anomalia média da Temperatura da Superfície do Mar (em cores), do dia 30/01/2020 - dados NOAA/AVHRR. (b) Vorticidade Relativa em 1000 hPa (em cores - 10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>) e vento a 10 metros de altura (barbelas - kt), às 22:00 UTC do dia 30/01/2020 - reanálise ERA-5.....33

Figura 4.4 - Divergência em 300 hPa (colorido - 10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC - reanálise ERA-5.....34

Figura 4.5 - Fluxo de calor latente em superfície (colorido - W/m<sup>2</sup>), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.....36

Figura 4.6 - Precipitação acumulada (colorido - mm/dia), do dia 31/01/2020. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.....37

Figura 4.7 - Divergência em 300 hPa (colorido - 10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.....37

Figura 4.8 - Vorticidade em 1000 hPa (colorido - 10<sup>-5</sup>s<sup>-1</sup>) e vento a 10 metros de altura (barbelas - kt), do dia 30/01/2020 às 22:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.....37

Figura 4.9 - Intensidade e direção do vento do BRAMS (linha e barbelas verdes), ERA-5 ( linha e barbelas vermelhas) e SBGL (linha e barbelas azuis), no período de 30/01/2020 às 00:00 UTC até 01/02/2020 às 00:00 UTC.....38

Figura 4.10 - Intensidade e direção do vento do BRAMS (linha e barbelas verdes), ERA-5 ( linha e barbelas vermelhas) e SBRJ (linha e barbelas azuis), no período de 30/01/2020 às 00:00 UTC até 01/02/2020 às 00:00 UTC.....39

Figura 4.11 - Dispersão da magnitude do vento a 10 metros (a) BRAMS e SBGL (b) BRAMS e SBRJ.....40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais configurações de grade do modelo BRAMS para diferentes domínios.....	25
Tabela 3.2 - Classificação dos coeficientes de correlação de Spearman.....	29
Tabela 4.1 - Índices estatísticos para a velocidade do vento a 10 metros da reanálise ERA-5 com os obtidos pelas rodadas dos testes de sensibilidade do BRAMS.....	35
Tabela 4.2 - Índices estatísticos para a magnitude do vento a 10 metros das estações SBGL e SBRJ.....	39

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Esquemas de parametrizações físicas utilizados no modelo BRAMS.....	25
---	----

## LISTA DE ACRÓNIMOS

**ASAS** Alta Subtropical do Atlântico Sul

**AVHRR** Advanced Very High Resolution Radiometer

**BRAMS** Brazilian Regional Atmospheric Modelling System

**CATT** Coupled Aerosol and Tracer Transport

**Cb** Cumulonimbus

**CCMs** Complexos Convectivos de Mesoescala

**CINE** Convective INhibition Energy

**CMO** Camada de Mistura Oceânica

**CPRJ** Capitania dos Portos do Rio de Janeiro

**CPTEC** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

**CSU** Colorado State University

**ECMWF** European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

**ERA-5** 5<sup>th</sup> Geration of ECMWF ReAnalysis

**FAO** Food and Agriculture Organization

**FPSO** Floating Production Storage and Offloading

**GFS** Global Forecast System

**GOES** Geostationary Operational Environmental Satellite

**INPE** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**JBN** Jatos de Baixos Níveis

**JULES** Joint UK Land Environment Simulator

**LEAF** Land Ecosystem Atmosphere Feedback

**LIs** Linhas de Instabilidade

**ME** Mean Error

**METAR** METeorological Aerodrome Report

**MODIS** Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

**NCE** Nível de Convecção Espontânea

**NCEI** National Centers for Environmental Information

**NDVI** Normalized Difference Vegetation Index

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration

**NORMAN-19** Normas da Autoridade Marítima

**OISST** Optimum Interpolation Sea Surface Temperature



**ONU** Organização das Nações Unidas  
**PETROBRAS** Petróleo Brasileiro S.A.  
**PNMM** Pressão ao Nível Médio do Mar  
**PNT** Previsão Numérica de Tempo  
**PR** Paraná  
**RAMS** Regional Atmospheric Modeling System  
**RMRJ** Região Metropolitana do Rio de Janeiro  
**RMSE** Root Mean Square Error  
**ROL** Radiação de Onda Longa  
**RRTMG** Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models  
**SBGL** Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão  
**SBRJ** Aeroporto Santos Dumont  
**SCMs** Sistemas Convectivos de Mesoescala  
**SP** São Paulo  
**TRMM** Tropical Rainfall Measuring Mission  
**TSM** Temperatura da Superfície do Mar  
**USGS** United States Geological Survey  
**WRF** Weather Research and Forecasting  
**ZCAS** Zona de Convergência do Atlântico Sul

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A zona costeira e o domínio oceânico do Brasil agregam inúmeras atividades em diversos setores social e economicamente importantes, tais como a exploração e a produção petrolífera, as operações portuárias, a pesca, o turismo, o tráfego marítimo, entre outros.

O desempenho dos setores industriais, particularmente, é constantemente influenciado por fatores ambientais como ventos fortes, rajadas e estado do mar. Dentre os quais, o vento é a principal fonte de energia geradora de grandes ondulações, e determinantes na caracterização de condições severas de tempo.

No litoral brasileiro, as regiões Sul e Sudeste refletem o dinamismo econômico, tendo uma significativa importância para o comércio exterior e sendo um importante gerador de empregos e renda da região (LEMOS *et al.*, 2018). A exploração do petróleo e gás é uma das principais atividades econômicas (SEKI, 2019), sendo Santos, a maior bacia sedimentar *offshore* a ser explorada no Pré-sal brasileiro e a principal bacia receptora dos investimentos em exploração e produção por parte da Petrobrás (SOUZA; SGARBI, 2019).

É importante salientar que a realização das atividades de exploração e produção, assim como as navegações marítimas, também dependem das condições meteoceanográficas, uma vez que, qualquer interrupção pode acarretar em grande prejuízo econômico (ANDRIONI, 2010), além de causar danos significativos ao meio ambiente e perdas de vidas humanas.

Segundo Soding e Shigunov (2015), para navios de grande porte - conhecidos como navios *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) - e aliviadores, a resistência adicionada pelos fatores ambientais como ventos e ondas são consideradas sensíveis, e muitas vezes impactam as operações oceânicas e conseqüentemente a produção de petróleo e gás offshore. Ademais, estruturas como plataformas de petróleo, também estão sujeitas a algum tipo de risco (SILVA, 2008).

A região da Bacia de Santos e suas adjacências são frequentemente influenciadas por eventos meteorológicos que apresentam distintas escalas de tempo e espaço: grande escala ou escala sinótica (> 2000 km), mesoescala (2-2000 km) e microescala (< 1 km)

(ORLANSKI, 1975; CARUZZO; CAMARGO, 1998); dentre eles destacam-se as frentes frias, os ciclones, os cavados, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as tempestades, as linhas de instabilidade e as *squalls*. A atuação destes fenômenos sobre a região pode ocasionar condições de ventos de alta intensidade, duração e extensão e, por conseguinte induzir perturbações significativas no mar.

Dentro deste íterim, para uma melhor análise, estudo e/ou previsão desses fenômenos, é importante escolher as melhores ferramentas disponíveis com as resoluções adequadas à escala do evento a ser analisado. Dessa forma, a previsão numérica é uma importante ferramenta para representar as condições físicas da atmosfera e para prever os eventos meteorológicos causadores de condições severas e extremas de tempo.

Nesse contexto, a realização de previsões de tempo para a área de interesse contribui para a detecção com uma maior confiabilidade destes eventos, auxiliando no processo de tomada de decisões para o planejamento e mitigação de possíveis danos.

Freitas *et al.* (2017), Pinto *et al.* (2014) e Bender (2018) realizaram estudos comparativos entre dados observados e as simulações numéricas com o modelo BRAMS. Seus resultados constatarem que as simulações através do BRAMS são confiáveis e similares aos modelos de previsão numérica de tempo (PNT) de última geração e também revelaram que no Sul e Sudeste do Brasil a previsão apresenta maior confiabilidade.

Portanto, a partir de um modelo numérico regional bem ajustado à região de estudo, é possível simular os fenômenos de interesse, que muitas das vezes são de difícil detecção por modelos globais e assim, compreender a dinâmica e os mecanismos destes eventos extremos com o intuito de mitigar o impacto negativo causado pelos mesmos.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo principal simular com o modelo numérico BRAMS versão 5.3, testando e verificando sua sensibilidade a diversas opções de rodadas (entre parametrizações e qualidade de dados de entrada), um caso de tempestade com ventos fortes e rajadas ocorrido na noite do dia 30 de janeiro de 2020, que ao atingir a Região Metropolitana do estado do Rio de Janeiro, provocou um

incidente envolvendo a Plataforma P-70, que estava fundeada na Baía de Guanabara e foi deslocada para uma área próxima a praia de Boa Viagem, na cidade de Niterói, justamente por conta da força do vento.

Em síntese, os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

1. Caracterizar o ambiente sinótico associado ao caso significativo pré-selecionado, procurando destacar os mecanismos dinâmicos e termodinâmicos associados ao seu desenvolvimento;
2. Testar a sensibilidade do modelo e melhorar a qualidade dos resultados simulados;
3. Calibrar e validar o modelo BRAMS comparando velocidade do vento simulada com dados observados; e
4. Utilizar a reanálise do ERA-5, como segunda fonte de dados de velocidade do vento, para efeitos comparativos com os simulados pelo BRAMS e/ou com dados observados.

## **1.2 Estrutura da Monografia**

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 será apresentada uma breve revisão teórica dos diferentes eventos meteorológicos que atingem a região de estudo. Também será apresentada uma revisão de trabalhos anteriores sobre o impacto de dados de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) de alta resolução na Previsão Numéricas de Tempo (PNT), com destaque para o modelo BRAMS; no Capítulo 3 são expostas a metodologia e as diferentes fontes de dados que foram utilizadas no decorrer da pesquisa, além de uma descrição do modelo BRAMS, das configurações das simulações e dos testes de sensibilidade realizados. No Capítulo 4 são mostrados e discutidos os resultados obtidos; as conclusões são apresentadas no Capítulo 5 e por fim, no Capítulo 6, estão disponibilizadas as referências bibliográficas.

## **CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Alguns fenômenos meteorológicos atuantes**

Nesta seção, é apresentada uma revisão de alguns dos fenômenos meteorológicos causadores de condições severas e extremas tempo na região da Bacia de Santos e suas adjacências.

#### **2.1.1 Escala Sinótica**

Dentre os mecanismos dinâmicos de escala sinótica, pode-se mencionar os sistemas transientes, como por exemplo, as Frente Frias, os Ciclones, os Cavados e a ZCAS. Segundo Campos, Camargo e Harari (2010), estes sistemas proporcionam significativas trocas de energia na superfície do mar, alterando as circulações locais e modificando a circulação de grande escala na região de interesse.

##### **2.1.1.1 Ciclones**

Dentre os fenômenos meteorológicos de escala sinótica atuantes na região da Bacia de Santos e adjacências, os ciclones recebem atenção especial devido ao seu alto poder de destruição, haja vista que seu desenvolvimento pode afetar as condições de tempo na região de interesse e causar chuvas intensas, ventos fortes e conseqüentemente agitação marítima.

Os Ciclones foram primeiramente associados a tempestades e definidos como centros de baixa pressão na escala sinótica, caracterizados por uma isóbara fechada ao nível médio do mar, com valor mínimo em seu centro e ventos intensos em sua borda. Atualmente, sabe-se que ciclones podem ser melhor detectados por vorticidades negativas, uma vez que as resoluções das isolinhas de pressão podem os subestimar, não necessariamente sendo possível observar isóbaras fechadas (SINCLAIR, 1994). Além disso, os seus sobrenomes clássicos foram dados primeiramente em associação às suas regiões mais frequentes de formação: ciclone extratropical e ciclone tropical.

O ciclone extratropical é resultado de um sistema frontal, de acordo com a teoria da frente polar (BJERKNES, 1919), de forma que ele possui um núcleo frio em todo o seu perfil vertical, além de estar embebido em um ambiente de forte gradiente de temperatura (região baroclínica), com velocidades máximas em altos níveis, em decorrência da presença dos jatos e justificados pela equação hipsométrica.

Os ciclones tropicais são também sistemas de baixa pressão em superfície, embora embebidos em um ambiente barotrópico; ou seja, sem o cisalhamento vertical do vento devido à ausência do gradiente de temperatura (AHRENS, 2000). São inicialmente marítimos, pois precisam do suporte de calor e umidade do oceano para alimentar os baixos níveis (SHAW, 1922; PALMÉN, 1948). Além disso, são quentes em todo o seu perfil vertical e possuem velocidades intensas desde os baixos níveis até os elevados.

Os ciclones subtropicais são sistemas com características mistas dos dois ciclones clássicos. Jarvinen, Neumann e Davis (1984) definiram os ciclones subtropicais como um sistema de baixa pressão não-frontal que se desenvolve inicialmente em uma circulação baroclínica sobre águas subtropicais. Posteriormente, verificou-se essas mesmas características em diferentes latitudes (GUISHARD, 2006). De maneira geral, são quentes em baixos níveis e frios em altos níveis e possuem uma grande área de ventos máximos.

É importante ressaltar que ciclones extratropicais, tropicais e subtropicais sempre serão caracterizados por sua física interna (dinâmica e termodinâmica) e não pela latitude de ocorrência, como originalmente se pensava no século passado. Além disso, desde as suas gêneses até o momento da dissipação, cada ciclone pode mudar sua característica e seguir paulatinamente adquirindo feições completamente diferentes das originais (HART, 2003).

Vários foram os ciclones subtropicais com ventos intensos, chegando à categoria de tempestade subtropical no Atlântico Sudoeste, sempre seguindo as normas das velocidades equivalentes aos ciclones tropicais. Alguns deles são o Catarina (março 2004), o Anita (março de 2010), o Arani (março de 2011), o Bapo (fevereiro de 2015), o Cari (março de 2015), o Deni (novembro de 2016), o Eçaí (dezembro de 2016), o Guará (dezembro de 2017), o Iba (março de 2019), o Jaguar (maio de 2019), o Kurumí (janeiro de 2020), o Mani (outubro de 2020), o Oqira (Dezembro de 2020) e o Potira (Abril de 2021). A maioria deles passou por mudança de fase.

Além disso, algumas climatologias importantes desenvolvidas para o Oceano Atlântico Sul, podendo citar Sinclair (1996), Hoskins e Hodges (2005), Reboita *et al.* (2008), evidenciaram três regiões de máxima atividade ciclogênica na costa sudeste da América do Sul (Figura 2.1): costa sul e sudeste do Brasil (entre 30°S e 25°S - Região 1), desembocadura do rio da Prata no Uruguai (cerca de 35°S - Região 2) e costa sul da Argentina (aproximadamente em 45°S - Região 3).

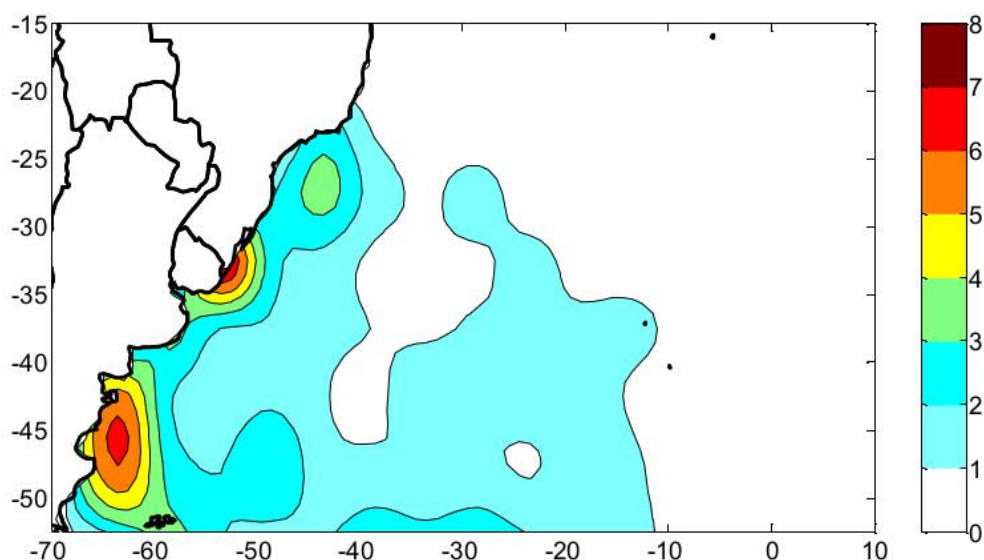


Figura 2.1 - Representação dos três núcleos com maior densidade de ciclogêneses no Oceano Atlântico Sul, para o período de 1990 a 1999. Na escala de cor da figura, o valor 1,5 corresponde a aproximadamente 37,5 sistemas. Adaptado de Reboita *et al.*, (2008).

Vale destacar que a região de estudo deste trabalho está englobada na Região 1 de Reboita, Ambrizzi e Da Rocha (2008), que apresentou características como: (1) instabilidade baroclínica menos intensa; (2) maior impacto dos fluxos de calor sensível e latente de superfície; (3) maior atividade ciclogênica mesmo quando os distúrbios em níveis superiores são mais fracos (verão) e (4) associada a maior disponibilidade de umidade.

### 2.1.1.2 Frente Frias

Para entender os conceitos de frentes, é necessário definir primeiro o Sistema Frontal (SF). Os SFs podem ser entendidos como um conjunto composto pelo encontro de duas massas de ar (centros de alta pressão) com características diferentes que, ao avançarem uma sobre a outra, formam uma terceira massa de ar (resultante da mistura

das duas primeiras), sendo a interface marcada por uma frente fria, uma frente quente, posteriormente uma frente oclusa e um ciclone extratropical associado. Em cada um desses sistemas, há formação de instabilidade e precipitação.

É importante ressaltar que, segundo Cavalcanti e Kousky (2009), o número médio de frentes frias que passam na região é entre 15 e 40 por ano (climatologia para o período de 1979 a 2005). Além disso, os autores afirmaram que as frentes ocorrem em maior número e durante todo ano entre 25°S e 30°S, contudo são mais frequentes de maio a setembro e menos frequentes durante o verão no Hemisfério Sul (dezembro a fevereiro). Trabalhos como o de Andrade (2007) e Oliveira (1986) também merecem destaque, tendo identificado a maior frequência na primavera e a menor no verão.

### **2.1.1.3 ZCAS**

A ZCAS, que é definida como uma persistente banda de nebulosidade e precipitação com orientação noroeste-sudeste, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul com duração mínima de quatro dias (KODAMA, 1993; LIEBMANN *et al.*, 1999).

Segundo Carvalho, Jones e Liebmann (2004), a sua posição oceânica pode ser bem intensa, independente da atividade no interior do continente. A persistência dessa convecção parece ser favorável quando o jato de altos níveis (subtropical) está a oeste da sua posição climatológica sobre o oceano, sendo favorecida pelas fases quentes do El Niño. Além disso, anomalias quentes (frias) da TSM na região entre 20°S-40°S e oeste de 030°W estão frequentemente associadas pelo deslocamento para sul (norte) da ZCAS. É importante ressaltar que a intensificação da porção oceânica da ZCAS está diretamente associada a anomalia quente de TSM e vice-versa.

Alguns dos sistemas atmosféricos que contribuem para a formação da ZCAS são: os Jatos de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes, que transportam umidade da região Amazônica para o Sul e Sudeste do país (SANTOS; REBOITA, 2018) e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que devido ao seu giro anticiclônico sobre o oceano, transporta vapor d'água em direção à costa sudeste do Brasil, intensificando a convergência de umidade já existente (CORREIA, 2013).

A ocorrência de eventos extremos de chuva está bem relacionada à atividade convectiva vinculada à posição geográfica das ZCAS. Por exemplo, Carvalho, Jones e Liebmann (2002) verificaram que a intensidade da ZCAS é importante para a



modulação de eventos extremos em todo o estado de São Paulo. Seus resultados revelam que cerca de 65% (35%) dos eventos extremos ocorrem quando a ZCAS apresenta intensa (fraca) atividade convectiva.

### 2.1.1.4 Cavados

Os cavados representam o prolongamento de uma baixa pressão (representado por uma linha tracejada nas cartas sinóticas - Figura 2.2) sem que a isóbara se feche (apenas meandre para cima o escoamento de oeste) e caracterizam-se por regiões de precipitação e bastante instabilidade, onde não há gradiente de temperatura associado. Vale ressaltar que, quando o meandramento está para baixo no escoamento de leste, mas ainda em sentido horário, denomina-se cavado invertido.

Um fato que merece destaque é que não se sabe ao certo quando essa tendência começou, mas algumas instituições operacionais não têm plotado alguns cavados nas cartas, e quando o fazem, os plotam com certa reserva. Essa tendência acaba por sugerir que esse fenômeno é pouco frequente, mas não é, e, além disso, estes podem vir a ocorrer em vários níveis da atmosfera.

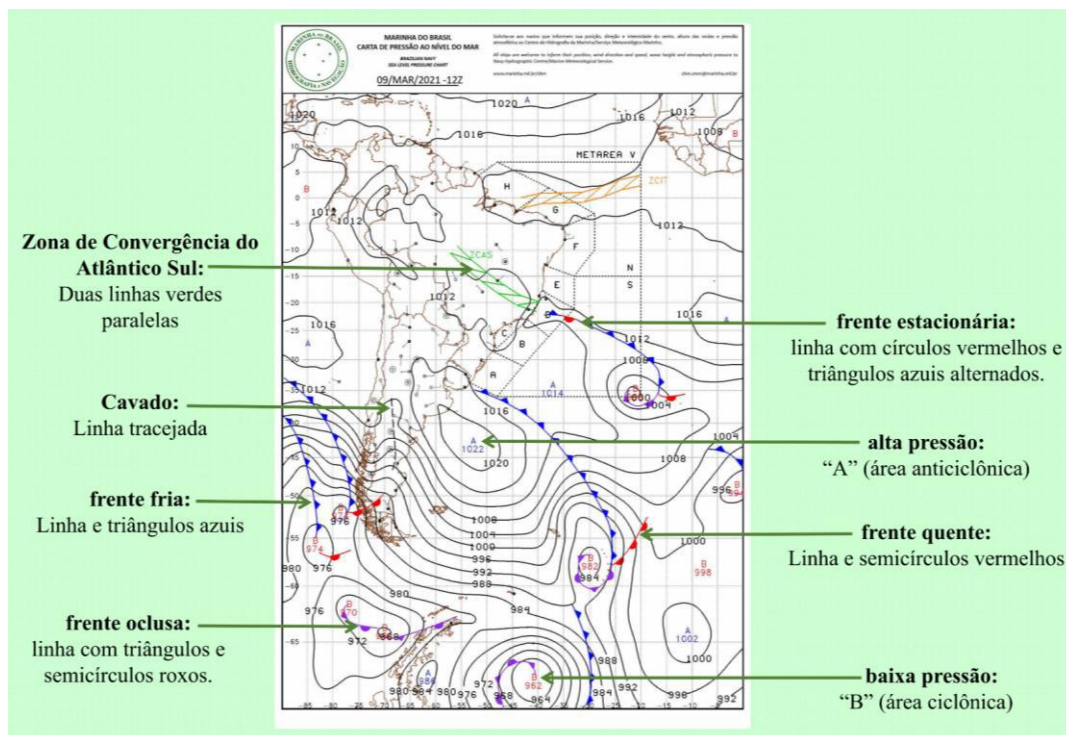


Figura 2.2 - Representação em carta de Pressão ao Nível Médio do Mar da Marinha do Brasil de frentes e fenômenos abordados na seção 2.2.1.

Vale ressaltar que Rodrigues *et al.* (2019) ao analisar o comportamento da vorticidade relativa associada às condições de fenômenos de escala sinótica atuantes na Região das Bacias de Santos e Campos, identificou um total de 111 casos de sistemas convectivos no ano de 2018, dentre os quais 29 casos produziram ventos de intensidade superior a 28 nós que segundo a escala Beaufort (WMO, 2008) é classificada como forte a duro, podendo produzir marulhos (ondas que se propagam a longas distâncias) de pequeno a grande porte e segundo a NORMAN-19 (Normas da Autoridade Marítima) seria necessário emitir Aviso de Mau Tempo.

### 2.1.2 Tempestades Convectivas em Mesoescala

A nuvem cumulonimbus (Cb) ou nuvem de tempestade é uma nuvem convectiva, em forma de torre, que se expande lateralmente no topo, assumindo a configuração de uma bigorna, e frequentemente produz chuva forte, trovoadas, descargas elétricas, granizo, rajadas de vento fortes, súbitas variações de temperatura e, ocasionalmente, tornados.

Byers e Braham (1949) e Cotton e Anthes (1989) identificaram três estágios de evolução de Cb ou tempestade convectiva, como pode ser visto na Figura 2.3: o estágio cumulus, o estágio maduro e o estágio dissipativo. A seguir, apresenta-se uma breve discussão de cada uma das fases de desenvolvimento de um Cb.

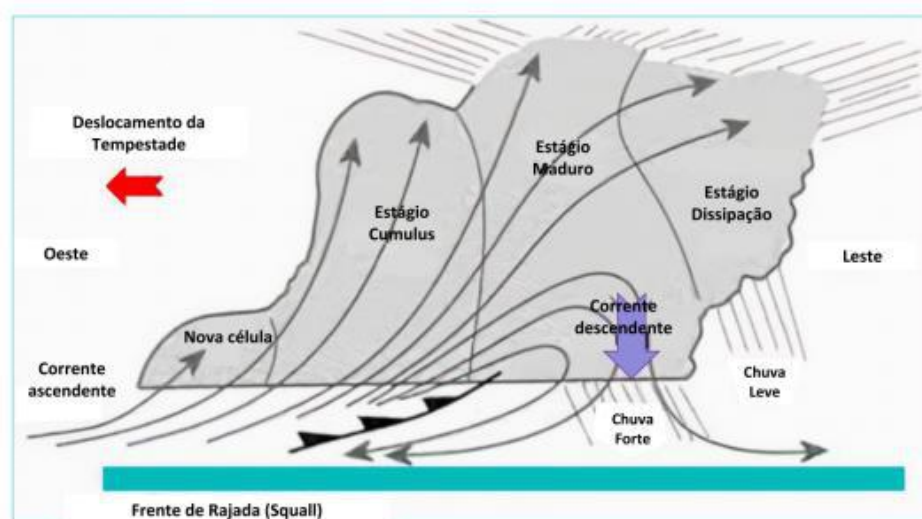


Figura 2.3 - Seção transversal simplificada de uma tempestade mostrando os três estágios de evolução de uma Cb.

- **Estágio cumulus:** Durante essa fase, existem somente correntes ascendentes no interior da nuvem cumulus que começa a se desenvolver verticalmente, alimentadas por convergência de umidade em baixos níveis e associadas a movimentos ascendentes, transformando-se em uma “Torre de Cumulus”.
- **Estágio maduro:** caracterizada pela coexistência de correntes ascendentes e descendentes, acompanhadas de precipitação. Os movimentos ascendentes ocorrem, principalmente, devido ao processo de condensação da água, que promove a liberação de calor latente na nuvem e os movimentos descendentes, que tomam a forma de frente de rajada, são formados pelo arrasto produzido pelas gotas em queda e pelo resfriamento do ar à medida que a precipitação evapora. A definição do início da fase madura acontece quando as gotas e os meteoros da nuvem atingem a superfície do solo.
- **Estágio de dissipação:** Caracterizado por movimentos predominantemente descendentes. Verifica-se, próximo ao solo, que a divergência e o resfriamento evaporativo do ar alimentam a frente de rajada, que se distancia em relação à nuvem. Dessa forma, as correntes de ar levantadas pela frente de rajada não conseguem mais abastecer os movimentos ascendentes da tempestade.

De acordo com Weisman e Klemp (1982) as tempestades convectivas em mesoescala foram classificadas com base nos seguintes termos: (1) grau de severidade (capacidade de produzir granizo, ventos fortes, tornados, entre outros), (2) tempo de vida, (3) modo de propagação, (4) intensidade da precipitação e (5) outras características relacionadas. Estas podem ser constituídas por células individuais, multicélulas ou supercélulas.

As tempestades em células individuais, conhecidas por tempestades em cumulonimbus isolados e identificadas por Byers e Braham (1949), consistem de uma única corrente de ar ascendente principal. São fenômenos instáveis de escala espaço-temporal pequena, com dimensões horizontais variando de 5 a 10 km (escala meso- $\gamma$  na classificação de Orlanski (1975)) e tempo de vida curto, geralmente menor que 1 hora. Além disso, ocorrem em ambientes onde os ventos são relativamente fracos e o cisalhamento vertical do vento é pequeno. De acordo com Weisman e Klemp (1986) sistemas de tempo severos associado a ventos fortes e granizo podem ocorrer, contudo o

tempo de vida é muito curto, e por este motivo, chuvas ocasionadas por células simples não são significativas (CHAPPELL, 1986).

Tempestades em multicélulas podem ser conceituadas, segundo Weisman e Klemp (1986), como um aglomerado de células convectivas simples de vida curta, sendo caracterizada por várias correntes ascendentes principais. Assim sendo, o tempo de vida deste tipo de tempestade dependerá do tempo de vida de cada célula individual, podendo chegar a várias horas.

Além disso, o ambiente favorável a sua formação caracteriza-se por instabilidade atmosférica e cisalhamento vertical do vento moderado a forte com padrão tendendo a unidirecional nos primeiros 5 km de altura (pequeno giro do vetor cisalhamento sendo menor ou igual a 30°).

Dentre os impactos causados por multicélulas pode-se citar: chuva com intensidade de moderada a forte, trovões e descargas atmosféricas, granizo, “*flash floods*” (alagamentos rápidos), ventos intensos e ocasionalmente tornados.

São exemplos mais comuns de tempestades multicelulares: as linhas de instabilidade (LIs) e os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), sendo a primeira um tipo de tempestade em multicélulas em forma de linha que possui um importante papel no regime de precipitação das regiões norte, centro-oeste e sudeste do Brasil (VIANELLO; ALVES, 2000).

Segundo Menezes *et al.* (2000), o deslocamento das LIs no Brasil e em especial na região de estudo é de oeste para leste, em geral à frente de uma onda frontal.

Os CCMs foram definidos por Maddox (1980), com base em imagens de satélites no canal do infravermelho, como um sistema que possui nuvens convectivas profundas constituídas basicamente por topos e bigornas de cumulonimbus, seção horizontal aproximadamente circular e tempo de vida superior a 6 horas.

Na América do Sul, a área entre as latitudes de 20°S e 40°S, compreendendo boa parte do Continente Sul-Americano (Paraguai, Uruguai e Região central, sul e sudeste do Brasil), é uma região com maior incidência de CCM's, uma vez que os sistemas meteorológicos que nela se desenvolvem têm seus processos dinâmicos e termodinâmicos principalmente influenciados pela orografia (VELASCO, 1987).

Dentre os tipos de tempestades convectivas mencionados neste trabalho, a tempestade em forma de supercélulas são as mais perigosas, maiores, mais intensas e destruidoras (CHAPPELL, 1986), e normalmente são as que produzem as condições de tempo mais severas, dentre elas, ventos intensos (>25 m/s) e rajadas, grande quantidade

de granizo (diâmetro acima de 2 cm) e tornados de vida longa sobre uma ampla trajetória.

A supercélula, descrita pela primeira vez por Browning e Ludlam (1962), denota a forma especial de uma tempestade severa em seu estágio maduro. Uma característica da supercélula é que consistem de uma corrente de ar ascendente simples, quase estacionária com relação a um sistema de referência centrado na tempestade e com rotação, que pode possuir um tempo de vida de várias horas. Em geral, este tipo de tempestade se desenvolve em ambientes muito instáveis com presença de um mecanismo inibidor de convecção (inversão térmica em baixos níveis, Energia de Inibição da Convecção - CINE, Nível de Convecção Espontânea (NCE) em nível muito elevado), e está associada com um forte cisalhamento vertical do vento com padrão direcional e grande giro do vetor cisalhamento com a altura nos primeiros 4 a 5 km de altura ( $> 60^\circ$ ) (WEISMAN; KLEMP, 1982 apud LIMA, 2005).

No Brasil, alguns trabalhos relatam a ocorrência de tempestades severas do tipo supercélula sobre os estados da região Sul e Sudeste do país.

Menezes (1998) e Menezes e Silva Dias (2004) mostraram características observacionais e numéricas utilizando o modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), associadas a uma tempestade severa isolada do tipo supercélula ocorrida no dia 14 de maio de 1994 na cidade de Ribeirão Preto (SP), que foi responsável por vento forte e granizo na região, além de provocar perdas materiais e humanas.

Nascimento (2004) identificou parâmetros de tempo severo associados à ocorrência de tempestades convectivas intensas no estado do Paraná ao analisar perfis atmosféricos diários de Foz do Iguaçu (PR), entre o período de setembro e abril dos anos de 2002/2003 e 2003/2004. Para o período analisado, o autor identificou ao menos sete eventos de tempestades severas caracterizadas como possíveis formações de supercélulas. Dentre os eventos identificados, pode-se exemplificar a tempestade severa ocorrida no dia 09 de outubro de 2003, a qual provocou inúmeros estragos e perdas materiais. Cerca de 500 residências foram destruídas e mais de 270 mil ficaram sem energia elétrica, o que levou a prefeitura da cidade de Cascavel, a 120 km de Foz do Iguaçu, a decretar estado de calamidade pública.

Pereira (2015), a partir de dados observacionais e modelagem numérica de alta resolução (modelo BRAMS – *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), caracterizou as condições sinóticas e de mesoescala associadas a três casos de

tempestades com ventos fortes e a um caso de tempestade não acompanhada de ventos severos ocorridos nas regiões sul e sudeste do Brasil. Entre os eventos analisados, três deles ocorreram ventos de mais de 100 km/h. Os casos foram de uma linha de instabilidade e dois de supercélula, sendo um deles com ocorrência de tornado.

### 2.1.3 Squalls

Segundo a Sociedade Americana de Meteorologia, *squall* é um forte vento caracterizado pelo início repentino, uma duração da ordem de minutos e uma diminuição repentina da velocidade. No setor operacional dos Estados Unidos, este fenômeno é reportado apenas quando a velocidade do vento for maior que 16 nós e for sustentada por pelo menos 2 minutos (para distinguir de rajadas). Para o uso marítimo, o termo “*squall*” é uma tempestade local severa considerada como um todo, isto é, ventos, nuvens, precipitação, trovões e relâmpagos (se houver).

Dentre as várias definições existentes, a mais utilizada é a da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1962): “*squall* é um rápido aumento na velocidade do vento de 8 m/s, sustentado acima de 11 m/s por pelo menos 1 (um) minuto”. Mais especificamente, *squalls* são eventos de fortes ventos transitórios gerados por uma tempestade convectiva, caracterizada por uma grande variação na velocidade do vento, e ainda possuem curta duração (cerca de 10 minutos) e frequentemente são acompanhadas por chuvas e tempestades. Em geral, além do aumento da velocidade do vento, ao mesmo tempo a direção do vento muda rapidamente até 180 graus.

As *squalls* se formam em regiões de instabilidade atmosférica, e segundo Santala *et al.* (2014), a escala espacial das tempestades associadas a *squalls* variam, desde células isoladas na ordem de alguns quilômetros até LI's (tempestades multicelulares) com regiões frontais que se estendem por centenas de quilômetros. Evidências de variações no tipo de tempestade foram vistas por Berkes *et al.* (2012).

Eventos de Squalls são recorrentes nos Oceanos Atlântico e Pacífico tanto em regiões tropicais quanto em latitudes médias, a exemplo disso, Lu, Osaki e Wada (2017) trataram mais de 10 anos de dados meteoceanográficos para identificar a ocorrência de *squalls* sobre o mar, na costa do Japão. Os resultados sugerem que as *squalls* de latitudes médias, incluindo o Hemisfério Norte (Japão e Sul dos Estados Unidos) e o Hemisfério Sul (Sul do Brasil), têm características de evolução no tempo diferentes daquelas documentadas na África Ocidental. Além disso, uma análise de valor extremo

do pico de vento e da taxa de mudança do vento foi conduzida para quantificar as possíveis magnitudes das *squalls*.

Uma tentativa de classificar as *squalls* com base na evolução temporal de dados de observações meteorológicas fornecidas por três plataformas próximas a costa da Angola e imagens de satélite para o período de 2006 e 2009, realizada por Berkes *et al.* (2012), sugeriu que as microexplosões de mesoescala são responsáveis por pelo menos 1/3 das *squalls* fortes, enquanto as LI's parecem ser bastante raras.

As *squalls*, em particular, são de grande interesse para a indústria do petróleo, haja vista que estas possibilitam a ocorrência de fortes rajadas de vento que avançam na direção de propagação da tempestade que podem impactar as operações nas plataformas *offshore* (SANTALA *et al.*, 2014). Por conseguinte, as melhoras nas previsões deste tipo de evento tornam-se imprescindíveis para todas as operações marítimas que ocorrem na costa brasileira.

## **2.2 Influência da TSM na Previsão Numérica de Tempo**

Atualmente existem diversos conjuntos de dados de TSM de alta resolução tanto espacial quanto temporal disponíveis para serem utilizados como condição de contorno em modelos atmosféricos regionais, contudo usualmente ainda é utilizado o conjunto de TSM climatológica mensal, onde a TSM permanece constante durante toda a simulação, variando apenas de acordo com o mês e a questão que surge é se o uso de uma maior resolução dos dados de TSM poderia levar a uma melhora na performance dos modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT).

Alguns autores relatam a eficiência em tratar a TSM de alta resolução como condições de contorno no modelo BRAMS para representar fenômenos meteorológicos ou até mesmo investigar os processos de interação oceano-atmosfera e conhecer sua influência sobre a circulação atmosférica e, principalmente, as melhorias para PNT.

Para identificar o impacto das condições da TSM na região do Oceano Atlântico, Silva *et al.* (2004) realizaram simulações do Ciclone Catarina com o modelo BRAMS, impondo anomalias positivas e negativas aos campos de TSM da ordem de 2°C. No caso do experimento com TSMs mais quentes ocorre um aumento da precipitação acumulada da ordem de 13%, enquanto TSMs mais frias resultam em uma diminuição de 35%.

Com o intuito de verificar a importância da correção de TSM para especificação nos modelos meteorológicos em termos do impacto no desenvolvimento e evolução dos sistemas atmosféricos transientes, Palmeira (2008) inseriu um módulo de Camada de Mistura Oceânica (CMO) como subrotina do modelo BRAMS e avaliou a TSM e os fluxos superficiais de calor durante a passagem de sistemas frontais de latitudes médias pelo Atlântico Sudoeste. Dentre os resultados relevantes observados, pode-se destacar que as diferenças entre as simulações apresentaram variações de TSM inferiores a 2 °C e os fluxos de calor manifestaram essas diferenças de maneira direta; quanto maior (menor) a TSM, maiores (menores) os calores latente e sensível. Outro aspecto observado foi que sob ventos fracos (intensos), as diferenças entre as simulações diminuiriam (aumentaram).

Desta forma, Palmeira (2008) verificou que os maiores gradientes de TSM ocasionam intensificação dos processos atmosféricos aumentando os fluxos de calor e a presença de uma anomalia, mesmo que pequena, pode interferir na circulação atmosférica, bem como na formação de nuvem, gelo e chuva.

Matos (2009) comparou diferentes bases de dados de TSM de alta resolução espacial e analisou a sensibilidade de um modelo de PNT à inserção desses dados em áreas dinâmicas do Atlântico Sul, como a região de ressurgência em Cabo Frio. Os resultados indicaram que a base de dados com maior resolução espacial representou de forma mais fiel os principais fenômenos oceanográficos presentes na costa sudeste-sul brasileira e ratificaram que o uso da TSM de alta resolução na PNT é altamente significativo nos índices de acerto dos modelos numéricos.

Tomaziello (2010) analisou estatisticamente o desempenho do modelo numérico BRAMS em simular a precipitação associada a dois episódios de ZCAS ocorridos em 1998 e 1999 nas três regiões que a compõem (oceânica, costeira e amazônica). Foram realizadas simulações numéricas utilizando dois conjuntos de dados de TSM com diferentes resoluções temporais e espaciais como condição de fronteira inferior do modelo. Como resultado, o melhor desempenho do modelo BRAMS ocorreu com o uso de dados de TSM com resolução espacial e temporal mais refinada.

Seba (2011) investigou o impacto da TSM de alta resolução (0,05°) como condição de contorno em simulações do modelo BRAMS na região de confluência Brasil-Malvinas, formada pela frente térmica estabelecida pelo encontro entre as águas quentes e salinas transportadas pela Corrente do Brasil e frias e menos salinas transportadas pela Corrente das Malvinas. Os resultados mostraram melhor desempenho



do modelo BRAMS com maior acurácia na previsibilidade dos campos meteorológicos analisados quando utilizada uma TSM com resolução espacial mais refinada (3 km).

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA E DADOS

### 3.1 Área de estudo

A área de estudo foi delimitada para o domínio de 20°S a 30°S e 050°W a 040°W, abrangendo tanto a região da Baía de Santos, como o estado do Rio de Janeiro, parte dos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, além de uma fração do Oceano Atlântico Sul, como indicado na Figura 3.1.

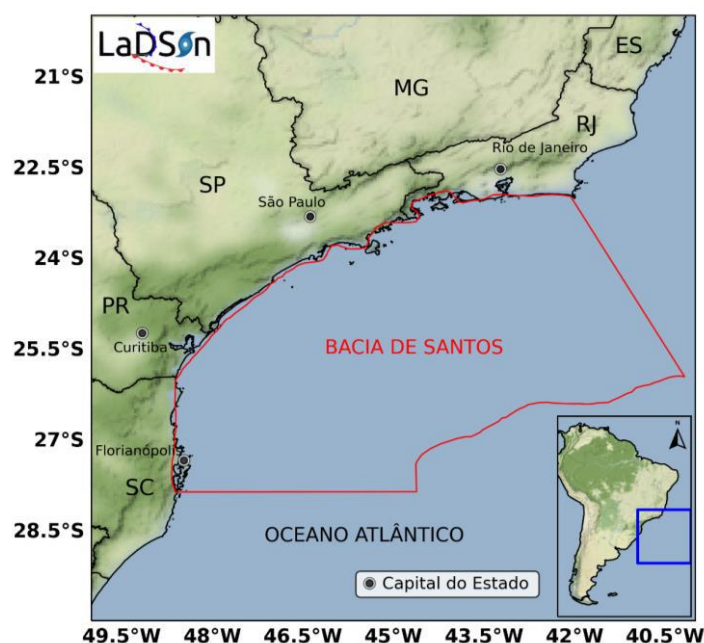


Figura 3.1 - Localização da área de estudo. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.

A Baía de Santos, localizada na costa leste brasileira, estende-se desde o litoral sul do estado do Rio de Janeiro (23°S) até o norte do estado de Santa Catarina (28°S), abrangendo uma área de aproximadamente 350 mil km<sup>2</sup> até a cota batimétrica (isóbata) de 3.000 m de profundidade. Está limitada ao norte com a Baía de Campos e a sul com a Baía de Pelotas (MOREIRA *et al.*, 2007).

### 3.2 Dados

#### 3.2.1 Observados

Para a comparação com os resultados das simulações do modelo BRAMS, foram utilizados, para o período entre 30 e 31 de janeiro de 2020, dados horários de intensidade do vento em superfície extraídos de METAR (*METEorological Aerodrome Report*) das estações SBRJ (Aeroporto Santos Dumont) e SBGL (Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão), localizadas próximas à costa do Rio de Janeiro. A distribuição espacial das estações pode ser vista na Figura 3.2.

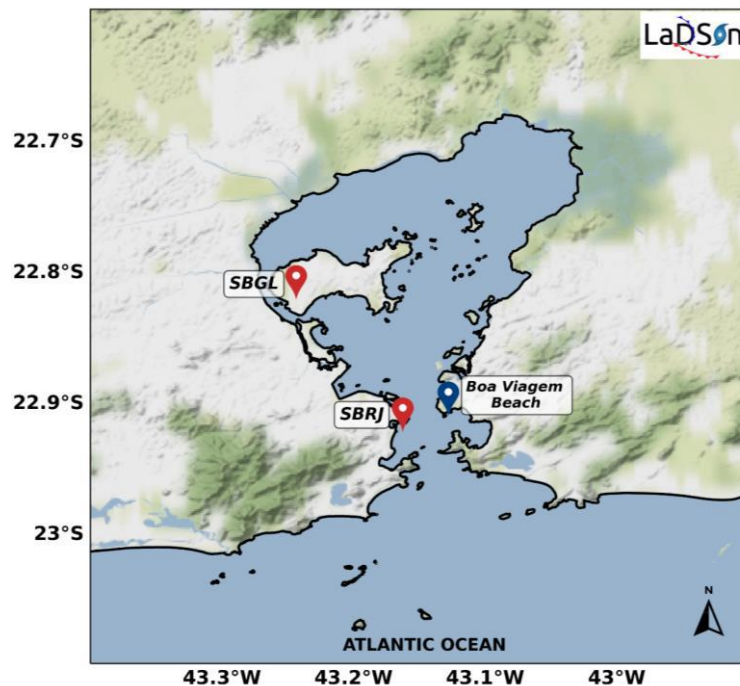


Figura 3.2 - Localização das estações SBRJ e SBGL e a posição da Praia de Boa Viagem. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.

### 3.2.2 Estimados e Reanálise ERA-5

Para elaboração dos campos de anomalia de TSM diária para análise sinótica do evento, utilizou-se dados de análise de TSM de interpolação ótima diária da *National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centers for Environmental Information* (NOAA/NCEI) de 1/4 de grau (OISST - *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) e análise combinada de alta Resolução da Temperatura média diária da superfície do mar a longo prazo usando dados de satélite do sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) com resolução de  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ .

Para análise sinótica e comparação com as rodadas do modelo BRAMS, foram usadas informações oriundas da reanálise ERA-5 (HERSBACH *et al.*, 2020) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), fornecendo dados horários em grades regulares de latitude e longitude e uma resolução espacial de  $0.25^{\circ} \times$

0.25° (~31km) para o período entre 30 e 31/01/2020. O uso da reanálise tem como objetivo avaliar também as divergências desta com relação aos dados e o quanto a modelagem regional pode encontrar ou não melhores resultados para caracterizar os eventos severos. Os parâmetros utilizados da reanálise ERA-5 foram: Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), vorticidade em 1000 hPa, ventos zonal e meridional em 200 hPa, 850 hPa e 1000 hPa, fluxo de radiação de onda longa emergente no topo da atmosfera, divergência em 300 hPa, vento zonal e meridional a 10 metros de altura, umidade específica em 850 hPa e geopotencial em 500 hPa.

As componentes zonal e meridional do vento a 10 metros de altura da reanálise ERA-5 com resolução espacial de 0.1° x 0.1° (resolução nativa de 9 km) foram extraídas para três pontos de grade diferentes. Os pontos foram selecionados de forma a representar locais com diferentes interferências da proximidade ou distância com relação ao oceano, ou seja, região continental, costeira e oceânica, como pode ser visto na Figura 3.3.

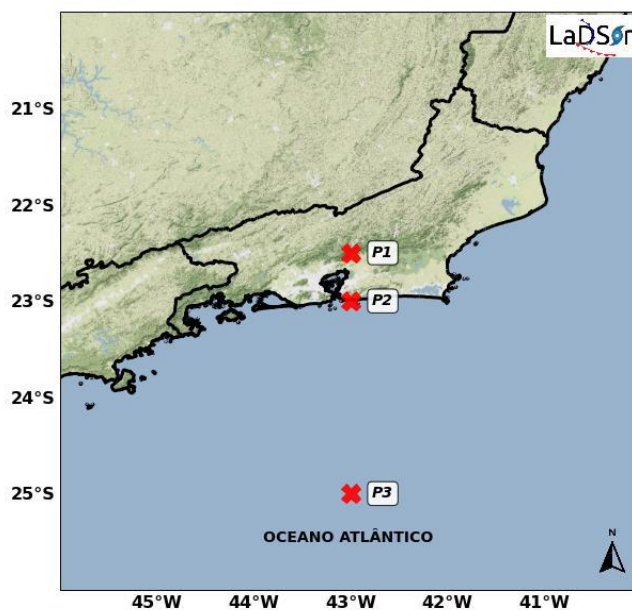


Figura 3.3 - Localização dos pontos definidos para comparação com a reanálise ERA-5. Fonte: Autor através de um script, *software* Python.

### 3.3 Metodologia

#### 3.3.1 Análise e descrição dos campos sinóticos

Sabendo-se que a formação, o desenvolvimento e a manutenção dos fenômenos atmosféricos em diferentes escalas dependem das condições da superfície, haja vista a

constante interação entre atmosfera e superfície, a TSM desempenha um papel relevante na contribuição de análises sinóticas podendo influenciar direta ou indiretamente a região de predomínio de uma determinada tempestade.

Deste modo, para a interpretação de quais forçantes ambientais (dinâmicas e termodinâmicas) contribuíram para o caso de tempestade severa selecionada, os dados da reanálise ERA-5 foram visualizados através da linguagem de programação *Python* versão 3.7, através de uma rotina foram elaborados campos de vorticidade relativa em 1000 hPa ( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ), Vento a 10 metros (kt), PNMM (hPa), altura geopotencial em 500hPa (m), vento em 200 hPa e 850 hPa (kt), umidade específica em 850 hPa (g/kg) e divergência do vento em 300 hPa.

A etapa seguinte foi calcular as anomalias diárias de TSM com base nos dados da NOAA/AVHRR para posteriormente gerar o campo de anomalia média de TSM diária ( $^{\circ}\text{C}$ ). Para o cálculo das anomalias o valor de TSM observada foi subtraído da média climatológica do dia, descrita pela Equação 1:

$$X' = X - \bar{X} \quad (1)$$

onde,  $X'$  é a anomalia de TSM diária,  $X$  é a TSM do dia e  $\bar{X}$  é TSM média climatológica diária.

Por fim, para o levantamento das características e intensidades do evento selecionado, foram utilizadas cartas sinóticas da Marinha do Brasil, imagens de satélite GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) do canal 13 (Infravermelho) e imagens do radar meteorológico localizado no Sumaré, cedidas pela prefeitura do Rio de Janeiro.

### 3.3.2 Simulações Numéricas

#### 3.3.2.1 Modelo BRAMS

O BRAMS, é uma versão brasileira adaptada do *Regional Atmospheric Modeling System* (RAMS, PIELKE *et al.*, 1992; COTTON *et al.*, 2003) originalmente desenvolvido na CSU (*Colorado State University*) nos Estados Unidos. Ele é baseado em equações não hidrostáticas capazes de simular fenômenos meteorológicos de diferentes escalas espaciais [SILVA, 2016] e inclui no seu código várias opções de parametrizações físicas apropriadas para simular processos como trocas entre a

superfície e o ar, turbulência na camada limite planetária, radiação de onda longa e de onda curta, convecção rasa e profunda e microfísica de nuvens (FREITAS *et al.*, 2009).

O modelo é versátil em alguns aspectos de operacionalização e execução, e é equipado com um esquema com aninhamento múltiplo de grades que permite as equações do modelo serem resolvidas simultaneamente com qualquer número de grades interagindo em via de mão dupla (*two-way*) com grades de maior resolução. Desta forma, os processos que ocorrem na grade de menor resolução podem ser melhor resolvidos na grade mais refinada, enquanto os resultados desta grade mais refinada são transmitidos à grade mais grossa e podem influenciar na simulação da mesma. Contudo, a partir da versão 5.0, este aninhamento passou a ser *one-way*, onde as grades grossas alimentam as com maior resolução.

Ao longo dos últimos anos, foram desenvolvidas várias versões deste modelo e neste estudo, foi utilizada a versão 5.3, que possui vários novos recursos, modificações, avanços de resolução, diversas aplicações, ajustes e melhorias em esquemas de parametrizações e atualizações voltadas para a região tropical e subtropical do Brasil, as quais tiveram impactos direto na representação numérica das propriedades físicas fundamentais (FREITAS *et al.*, 2009; FREITAS *et al.*, 2017).

Dentre as novas modificações, a *Joint UK Land Environment Simulator* (JULES, parametrização do modelo de superfície), é uma das mais importantes parametrizações do BRAMS v.5. Ela inclui, por exemplo, processos químicos totalmente acoplados, aerossóis e ciclos biogeoquímicos. Além disso, este sistema aumenta significativamente a capacidade de simular processos envolvendo interações entre a atmosfera e a superfície, devido à capacidade da JULES de simular fotossíntese, respiração e vegetação dinâmica, entre outros processos (MOREIRA *et al.*, 2013). Este desenvolvimento proporcionou um ganho significativo na precisão em comparação com o modelo de superfície *Land Ecosystem Atmosphere Feedback* - LEAF (versão 3) originalmente empregado pelo BRAMS. Haja vista que o LEAF não permite o prognóstico de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) atmosférico por não contemplar os processos de fotossíntese e respiração, além disso, a vegetação dinâmica também não está presente neste esquema de superfície.

Segundo Best *et al.* (2011), o JULES é considerado um modelo no estado da arte em termos de representação dos processos de superfície, uma vez que fornece um sistema de modelagem flexível capaz de simular um grande número de processos de superfície.

Na Figura 3.4, observa-se um esquema da estrutura do JULES versão 3.0, onde é possível observar os processos simulados separados por cores. A cor azul representa os processos hidrológicos; a verde refere-se aos processos que envolvem a vegetação e a roxa é referente aos gases e aerossóis. Além disso, subdividindo o esquema em níveis, nota-se que na camada inferior estão os processos que ocorrem no solo, nas outras duas camadas acima encontra-se os processos localizados entre a superfície e o topo do dossel, sendo que as setas da camada superior indicam os fluxos, gases e aerossóis que são trocados com o modelo atmosférico (MOREIRA, 2013).

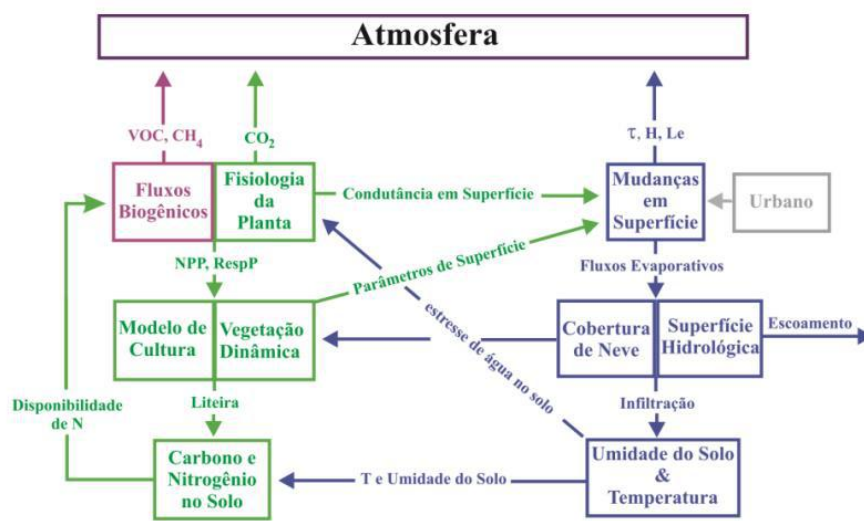


Figura 3.4 - Estrutura da Parametrização JULES 3.0. Fonte: Moreira, 2013.

No BRAMS versão 5.0, o modelo de superfície JULES foi totalmente acoplado ao sistema de modelagem de transporte de aerossóis e traçadores atmosféricos - *Coupled Aerosol and Tracer Transport* (CATT), formando o modelo integrado BRAMS 5.0 (JULES-CATT-BRAMS).

Este acoplamento ocorre de forma bidirecional, ou seja, para cada passo de tempo do modelo, o componente atmosférico fornece ao JULES as variáveis meteorológicas usadas como forçantes de entrada e, após esse processamento, o JULES avança no tempo e dessa vez é o JULES que passa a alimentar o componente atmosférico com um conjunto de variáveis como os fluxos de momento, calor sensível e calor latente, fluxos de radiação de onda longa emergente e fluxos de gases traços. Na Figura 3.5, pode-se observar alguns dos processos sub-grade simulados pelo BRAMS na sua versão 5.0 (MOREIRA *et al.*, 2013).

Segundo Moreira (2013), existe um ganho significativo de qualidade ao utilizar o JULES em comparação com o LEAF, pois o aumento no tempo de processamento do JULES-CCATT-BRAMS em relação ao CCATT-BRAMS (que utiliza o LEAF como modelo de superfície) foi por volta de 17%, representando um baixo custo computacional uma vez que o JULES simula mais processos que o LEAF.

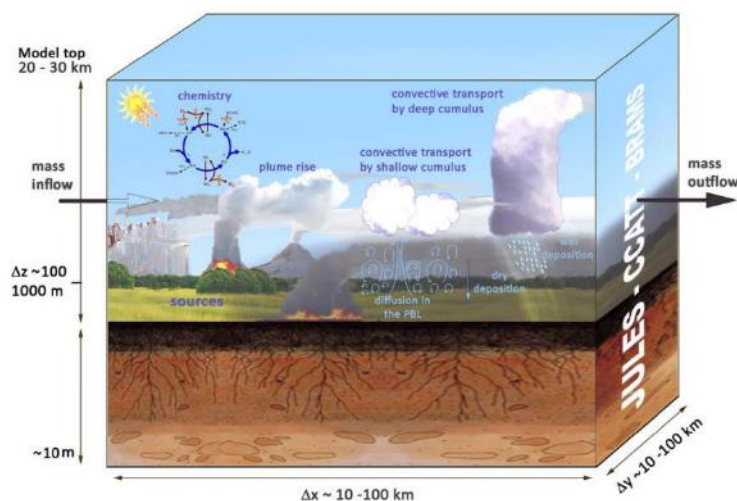


Figura 3.5 - Principais processos físicos e químicos simulados pelo BRAMS versão 5.0 . Fonte: Moreira *et al.*, 2013.

### 3.3.2.1.1 Parametrização de microfísica de nuvens

A parametrização de microfísica de nuvens é particularmente importante na representação dos campos meteorológicos por modelos de PNT, visto que os processos microfísicos influenciam diretamente a precipitação e a umidade, além de modificar a temperatura do ar através da absorção e liberação de calor latente (resultante das mudanças de fase da água) e das interações das nuvens com a radiação (PARDO; CHAN, 2017).

Os processos microfísicos são geralmente representados em modelos numéricos usando duas abordagens: *bin* e *bulk*. Sendo que em *bin*, as distribuições de tamanho de aerossóis e hidrometeoros são discretizadas por um número “bins” de tamanho (divisão do espectro de massa das gotas em categorias), o que possibilita que a distribuição de tamanhos evolua livremente em concordância com a situação simulada. No entanto, como cada categoria requer uma equação prognóstica para ser resolvida, esta classe de

esquemas são lentos e costumam requerer muito tempo computacional, sendo raro seu uso em modelos de previsão.

Por sua vez, no enfoque *bulk* as distribuições de tamanho dos hidrometeoros são diagnosticadas a partir de variáveis prognósticas (razão de mistura, concentração e entre outras). Além disso, considera-se que a quantidade de bins é 1 (um), e deve-se assumir uma distribuição de tamanhos específica para o total de hidrometeoros da mesma espécie, ou seja, uma forma espectral assumida (como por exemplo, funções exponenciais inversas ou distribuições gama) [PARDO, 2016].

Se apenas uma variável prognóstica for utilizada, via de regra a razão de mistura (massa), o esquema é chamado de “*single-moment*”. Para o caso em que, além da razão de mistura, outra variável também é prevista (em geral, a concentração), o esquema é dito “*double-moment*” (WALKO *et al.*, 1995 *apud* MARTINS, 2014).

Vale destacar que os enfoques *bulk* possuem baixo custo computacional com relação aos *bin*, sendo por este motivo os esquemas mais aplicáveis em modelagem numérica para previsão. Contudo, quanto maior a quantidade de variáveis prognóstica, maior a aplicabilidade do esquema de microfísica de nuvens, mas consequentemente maior demanda computacional exigida.

### 3.3.2.2 Configuração das simulações

O período selecionado para a simulação compreende um caso de persistência de vento intenso observado próximo à costa do estado do Rio de Janeiro. Para simular o evento, o modelo foi integrado por um período de 48 h, com início às 00:00 UTC do dia 30 de janeiro de 2020 e término às 00:00 UTC do dia 01 de fevereiro de 2020 e resolução temporal de saída de 1 (uma) hora.

Para inicializar as simulações numéricas no BRAMS foram utilizados como condição inicial e de contorno, dados de geopotencial, temperatura do ar, umidade relativa e componente zonal (u) e meridional (v) do vento oriundos das análises do *Global Forecast System - GFS* (SAHA *et al.*, 2010), com resolução de 0,25°x0,25°, 21 níveis de pressão e com atualização a cada 6 horas.

Ademais, para execução do modelo foram utilizados dados de TSM climatológicas e semanais do CPTEC/INPE com resolução de cerca de 1° (100km), dados globais de umidade de solo do modelo hidrológico simples obtido a partir de dados de precipitação antecedente do programa *Tropical Rainfall Measuring Mission*



(TRMM), descrito por Gevaerd e Freitas (2006), e, disponível diariamente (00Z e 12Z) com resolução de 0.25 x 0.25 graus. Dados globais de topografia do *United States Geological Survey* (USGS) com resolução de 1 km, composição de vegetação do USGS com resolução de aproximadamente 1 km, tipo de solo (textura) do Mapa global do FAO (*Food and Agriculture Organization*) da ONU (Organização das Nações Unidas) com resolução de aproximadamente 10 km e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), conjunto de dados global mensal com Resolução de 1 km.

Dois domínios foram utilizados para a configuração das simulações, representados pela Figura 3.6, com configurações da grade elencadas na Tabela 3.1. O Domínio 1 foi determinado e posteriormente delimitado de modo a englobar não só a região de interesse, como também identificar e explorar as características dinâmicas e termodinâmicas durante o fenômeno, uma vez que a influência de padrões atmosféricos de escala sinótica podem se propagar de forma significativa tanto para locais próximos da região de interesse quanto para os remotos. No Domínio 2, foi configurada uma resolução horizontal mais refinada (cerca de 1 km), focada na região de maior interesse e na localização dos dados observados.

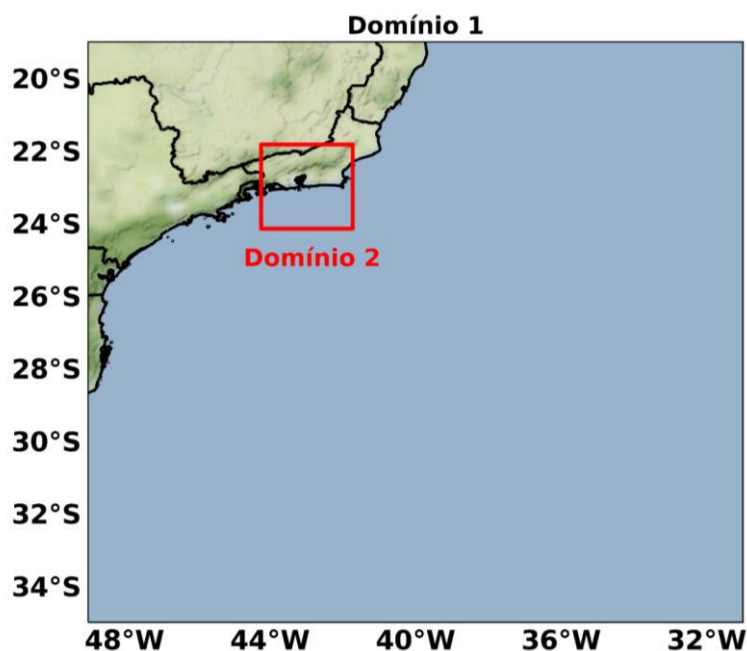


Figura 3.6 - Domínios das grades para as simulações do BRAMS

Tabela 3.1 - Principais configurações de grade do modelo BRAMS para diferentes domínios.

	Domínio 1	Domínio 2
Domínio Meridional	049°W a 031°W	044.25°W a 041.73°W
Domínio Zonal	19°S a 35°S	21.83°S a 24.15°S
Resolução Horizontal	~10km	~1km
Número de Pontos (x,y,z)	200, 200, 47	260, 260, 47
Centro da Grade	27°S e 040°W	23°S e 043°W
Passo de Tempo	20 segundos	10 segundos
Resolução temporal de saída	1 hora	1 hora

A respeito dos níveis na vertical, o modelo utiliza uma grade telescópica na qual o espaçamento vertical ( $\Delta z$ ) começa com 100 metros, e cresce com fator de amplificação ( $\Delta z_{RAT}$ ) de 1.2 até chegar a 1 km, quando passa a ser constante, até totalizar os 47 níveis.

Quanto às opções de parametrizações físicas utilizadas foram os padrões (*default*) do modelo BRAMS v.5.3, estas informações estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Esquemas de parametrizações físicas utilizados no modelo BRAMS.

Parametrização	Esquema	Referência
Microfísica de nuvens	Thompson double moment and aerosol aware	Thompson e Eidhammer (2014)
Convecção Cumulus	Grell and Freitas	Grell e Freitas (2014)
Radiação de Onda Curta	Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models (RRTMG)	Iacono <i>et al.</i> (2008)
Radiação de Onda Longa	Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models (RRTMG)	Iacono <i>et al.</i> (2008)
Turbulência	Mellor and Yamada	Mellor e Yamada (1982)
Superfície	Joint UK Land Environment Simulator (JULES)	Moreira <i>et al.</i> (2013)

### 3.3.2.3 Testes de sensibilidade

Na tentativa de obter a configuração de modelo mais apropriada para a área de interesse e para as variáveis as quais se pretendia analisar, além de viabilizar um menor

custo computacional e a melhoria na qualidade dos resultados simulados, foram realizadas duas séries de testes de sensibilidade.

Com o intuito de avaliar a influência da parametrização de microfísica de nuvens na confiabilidade das estimativas de velocidade do vento, a primeira etapa consistiu na verificação e consistência das diferentes parametrizações de microfísicas de nuvens disponíveis no modelo BRAMS versão 5.3, sendo elas:

- Original BRAMS (WALKO *et. al.*, 1995)

Calcula as fontes e sumidouros das diferentes categorias de hidrometeoros: vapor, gota de nuvem, chuva, cristais de gelo, neve, agregados, *graupel* e granizo. A razão de mistura de vapor d'água e gota de nuvem é diagnosticada, enquanto que, a razão de mistura para as demais categorias é prognosticada. Nesta parametrização são levados em consideração os diferentes processos microfísicos, como a colisão e coalescência, nucleação, sedimentação e conversão de uma categoria para outra.

- *Double-moment from CSU RAMS 6.0* ( MEYERS *et al.*, 1997; SALEEBY; COTTON, 2008)

A versão atual da parametrização microfísica *double-moment* usada no RAMS, versão 6 e implementada no BRAMS. Este esquema tem equações de prognóstico para concentração numérica e razão de mistura para oito categorias de hidrometeoros (nuvem, garoa, chuva, cristais de gelo, neve, agregados, *graupel* e granizo). Cada espectro de tamanho de hidrometeoro é descrito por uma distribuição gama generalizada com um parâmetro de forma especificado pelo usuário.

- *Greg Thompson cloud water single-moment* (THOMPSON *et al.*, 2008)

É um esquema *single-moment*, embora para nuvens de gelo e chuva também atue como um esquema *double-moment*. Neste esquema a neve assume uma forma não esférica, com uma densidade de massa que varia inversamente com o diâmetro, ao contrário de outros esquemas que adotam a neve esférica com densidade constante. Ocorrem melhorias nas implementações da deposição, sublimação e evaporação. Sua distribuição de tamanho é representada como uma soma das distribuições exponencial e gama.

• *Greg Thompson cloud water double-moment and aerosol aware* (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014)

É uma atualização do esquema de Thompson *et al.* (2008) que inclui a ativação de aerossóis tanto como núcleos de condensação de nuvem quanto núcleos de gelo e que considera os processos físicos entre formação de nuvem e as propriedades higroscópicas de aerossol.

Uma segunda etapa desta seção de testes consistiu na utilização de dois conjuntos de dados de TSM como entrada para o modelo BRAMS: um com a análise mensal climatológica e a outra semanal, sendo ambas do CPTEC/INPE. Esta etapa permitiu investigar a influência da resolução temporal dos dados de TSM na qualidade das saídas do modelo, principalmente no que diz respeito a precipitação e a estimativa da magnitude do vento. Este ensaio foi aplicado sobre as configurações de parametrizações de microfísica de nuvens definidas na primeira etapa. Em todas as simulações desta seção, à exceção do parâmetro de microfísica de nuvens, as opções de parametrizações físicas utilizadas foram os padrões (Quadro 1) do modelo BRAMS v.5.3. Além disso, possuem em comum o Domínio 1 da Figura 3.6 e as configurações de grade da Tabela 3.1 para a resolução de ~10 km.

Uma análise subjetiva foi implementada nesta etapa com o intuito de destacar as principais diferenças observadas entre as rodadas do teste de sensibilidade. Para tal, foram gerados campos de precipitação acumulada, calor latente, divergência em 300 hPa e vento a 10 metros com as saídas do modelo BRAMS, para então compará-los entre si.

Para obter a vorticidade relativa e a divergência do vento levou-se em consideração que as componentes horizontais do vento são muito maiores do que a componente vertical, e as escalas verticais muito menores do que as escalas horizontais. Deste modo, o cálculo destas variáveis foram reduzidos para as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2)$$

onde,  $\zeta$  é a vorticidade relativa, o 1º termo é a derivada do vento meridional em relação à longitude  $x$  e o 2º termo é a derivada do vento zonal em relação à latitude  $y$ .

$$DivV_h = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3)$$

onde,  $DivV_h$  é a divergência para as componentes horizontais do vento, o 1º termo é a derivada do vento zonal em relação à longitude  $x$  e o 2º termo é a derivada do vento meridional em relação à latitude  $y$ .

### 3.3.3 Avaliação das simulações com o BRAMS

Com o intuito de avaliar se as simulações do BRAMS foram capazes de representar de forma factível e coerente a magnitude do vento em superfície em locais com diferentes interferências da proximidade ou distância com relação ao oceano, os dados de vento a 10 metros de altura das rodadas do BRAMS foram extraídos para os três pontos de grade diferentes (Figura 3.3) e posteriormente confrontados com os dados da reanálise ERA-5 para os mesmos pontos.

Por último, realizou-se uma comparação qualitativa e quantitativa do vento em superfície entre a simulação do modelo BRAMS que apresentou a melhor performance no teste de sensibilidade com a reanálise ERA-5 e os dados extraídos de METAR das estações SBGL e SBRJ. Para tanto, foram utilizados os seguintes índices estatísticos: Correlação de Spearman ( $r_s$ ), Erro Médio (ME) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE).

#### 3.3.3.1 Índices estatísticos

Abaixo serão descritos os cálculos e a finalidade de cada índice estatístico utilizado, descritos em Wilks (2006).

O coeficiente de correlação de Spearman ( $r_s$ ) é uma técnica não-paramétrica, baseada em postos ou *ranks*, que indica o grau de ajuste dos dados simulados com os observados, e pode ser calculado através da equação:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n D_i^2}{n(n^2-1)} \quad (4)$$

onde  $D_i$  é a diferença nos *ranks* entre o  $i$ -ésimo par de valores (simulado e o observado), sendo  $i=1,2,3,\dots,n$ , e  $n$  é o número de amostras.

O valor de  $r_s$  está sempre entre  $-1$  e  $1$ , com  $r_s = 0$  correspondendo à não associação. Utiliza-se o termo de correlação positiva quando  $r_s > 0$  e correlação

negativa quando  $r_s < 0$ . A máxima correlação negativa ( $r_s = -1$ ) indica que o crescimento de uma das variáveis implica, em geral, no decréscimo da outra, enquanto que a máxima correlação positiva ( $r_s = 1$ ), o crescimento ou decréscimo concomitante das duas variáveis consideradas. Para a interpretação da magnitude das correlações foi adotada a classificação proposta por Brun *et al.* (2001), conforme a tabela abaixo:

Tabela 3.2 - Classificação dos coeficientes de correlação de Spearman.

Intervalo de $r_s$	
(+ ou -)	Classificação
< 0.4	Fraca
$0.4 \leq r_s < 0.6$	Moderada
$\geq 0.6$	Forte

O Erro Médio (ME), ou tendência, viés (BIAS, em inglês), mede a tendência, em média, do modelo de subestimar (BIAS<0) ou superestimar (BIAS>0) a variável analisada em relação ao observado, sendo definido como:

$$BIAS = \bar{S} - \bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S_k - O_k) \quad (5)$$

onde  $\bar{S}$  e  $\bar{O}$  são os valores médios de simulação e observação, e  $(S_k, O_k)$  é o  $k$ -ésimo ( $k=1,2,3,\dots,n$ ) de  $n$  pares de simulações e observações respectivamente.

A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em Inglês) é mais sensível a erros maiores e valores discrepantes, por elevar as diferenças ao quadrado e possuir a vantagem de apresentar as mesmas dimensões da variável analisada ao se tomar a sua raiz quadrada.

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (S_k - O_k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

Como o quadrado dos erros necessariamente produz termos positivos na Equação 6, então o RMSE aumenta de zero para simulações perfeitas por meio de valores positivos crescentes conforme as discrepâncias entre simulações e observações tornam-se cada vez maiores.

## **CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Análise sinótica**

Na noite do dia 30 de janeiro de 2020, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) apresentava aglomerados convectivos associados às condições pré-frontais que favoreceram a formação de nuvens de tempestade acompanhadas por pancadas de chuvas, ventos fortes e rajadas sobre a região da Baía de Guanabara.

De acordo com a nota à imprensa emitida pela Marinha do Brasil (MARINHA DO BRASIL, 2020) e reportagem do G1/Globo (G1 GLOBO, 2020), esta tempestade ocasionou em um incidente envolvendo o deslocamento da Plataforma P-70.

A plataforma estava sendo fundeada na Baía de Guanabara, quando duas de suas linhas de ancoragem foram rompidas em virtude das fortes rajadas de vento, fazendo com que a plataforma fosse deslocada para uma área mais próxima à praia da Boa Viagem, em Niterói (Figura 3.2). A Capitania dos Portos do Rio de Janeiro (CPRJ) informou que não houve vítimas.

Para se ter ideia da potência do vento, segundo o ClimaTempo, entre às 20h40min e 21h (hora local) do dia 30 de janeiro de 2020 foram registrados ventos de até 67 Km/h (ou seja, um pouco mais que 36 nós).

Segundo dados pluviométricos do Alerta Rio os maiores acumulados diários ocorreram nas estações de Santa Teresa, Laranjeiras e Copacabana, chegando a 46,6 mm/dia. Já as maiores intensidades horárias ocorrem para as mesmas estações ditas anteriormente, chegando até 42,2 mm/hora.

A partir da imagem do satélite GOES-16 no canal 13 (Infravermelho) [Figura 4.1-a] e da carta da Marinha do Brasil do dia 31 de janeiro de 2020 às 00:00 UTC (Figura 4.1-c) observa-se, respectivamente, uma extensa banda de nebulosidade com topos frios sobre os estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e sobre o oceano adjacente, além de um sistema frontal sobre o Atlântico Sudoeste (35°S/050°W). Próximo a esse mesmo horário, a imagem do radar meteorológico (Figura 4.1-b), também indica uma acentuada instabilidade próxima à costa oeste do estado do Rio de Janeiro, com precipitação de intensidade moderada a forte.

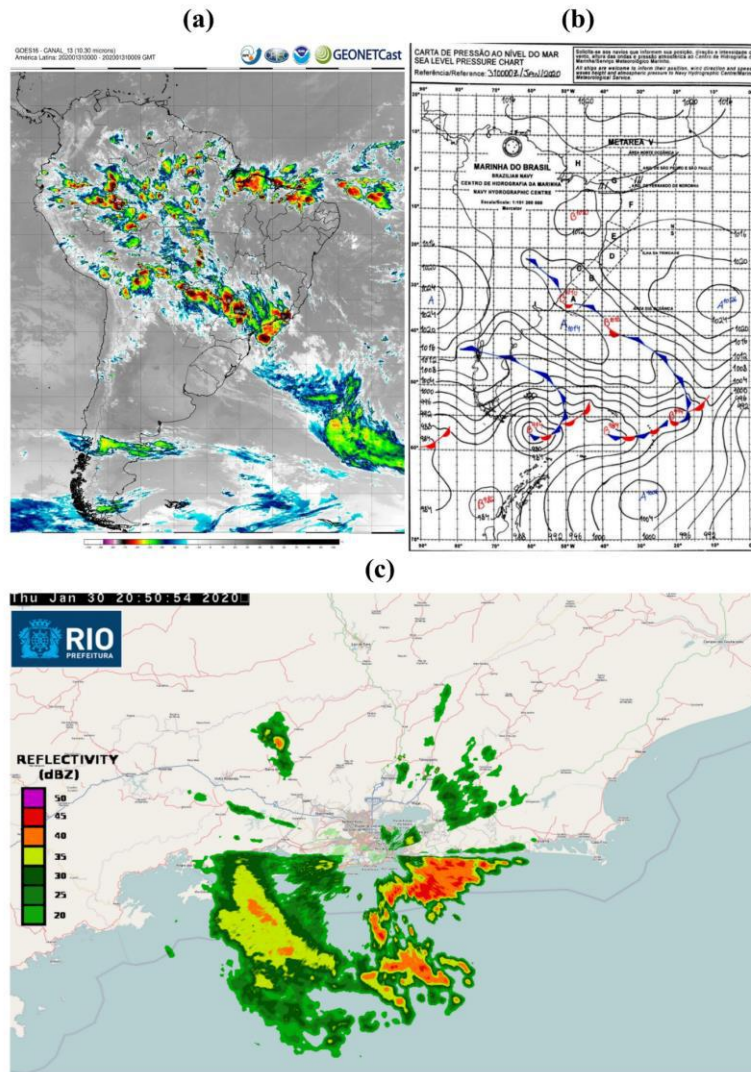


Figura 4.1 - (a) Imagem do satélite GOES-16 do canal 13 (Infravermelho Termal) do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. Fonte: CPTEC/INPE. (b) Carta sinótica de superfície do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. Fonte: DHN. (c) Imagem do radar meteorológico Sumaré, do dia 30/01/2020 às 23:50 UTC (20h50min hora local). Fonte: Prefeitura do Rio.

Em níveis médios, identifica-se um cavado a oeste do sistema em superfície, indicando um suporte dinâmico necessário para sua persistência (Figura 4.2-a). O posicionamento da corrente de jato em altos níveis contribui positivamente para o desenvolvimento da baixa em superfície, estando sobre a saída polar do jato. Deste modo, cria-se um ambiente em escala sinótica favorável à formação de tempestade sobre a região de interesse.

No decorrer do dia 30 e 31 de janeiro, destacam-se alguns aspectos típicos de um evento de ZCAS (PALLOTTA; GAN, 2011), dentre elas:



- A existência em altos níveis, (Figura 4.2-b) da configuração da circulação anticiclônica associada à Alta da Bolívia com centro sobre o estado do Mato Grosso e o cavado próximo à região nordeste do Brasil;

- A presença em baixos níveis (Figura 4.2-c) de um padrão similar a um jato de baixos níveis, com escoamento de noroeste para sudeste, que se estendeu desde a região Amazônica e convergiu em direção ao Atlântico Sul, trazendo ar úmido para a região sul e sudeste do Brasil;

- Valores de radiação de onda longa (ROL) abaixo de  $235 \text{ W/m}^2$  (Figura 4.2-d), indicando uma região de atividade convectiva com padrão da banda de convecção favorável para ZCAS.

Nota-se também (Figura 4.2-c) a presença de um cavado em baixos níveis sobre Atlântico Sudoeste, próximo a  $25^{\circ}\text{S}/043^{\circ}\text{W}$ , indicando a presença de uma circulação ciclônica em superfície, que possibilita a ocorrência de ventos intensos próximo a costa do estado do Rio de Janeiro (por aumentar o gradiente de pressão), e a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) próxima ao continente, indicada pela circulação anticiclônica em 850 hPa, que direciona o escoamento em direção ao Sudeste do Brasil.

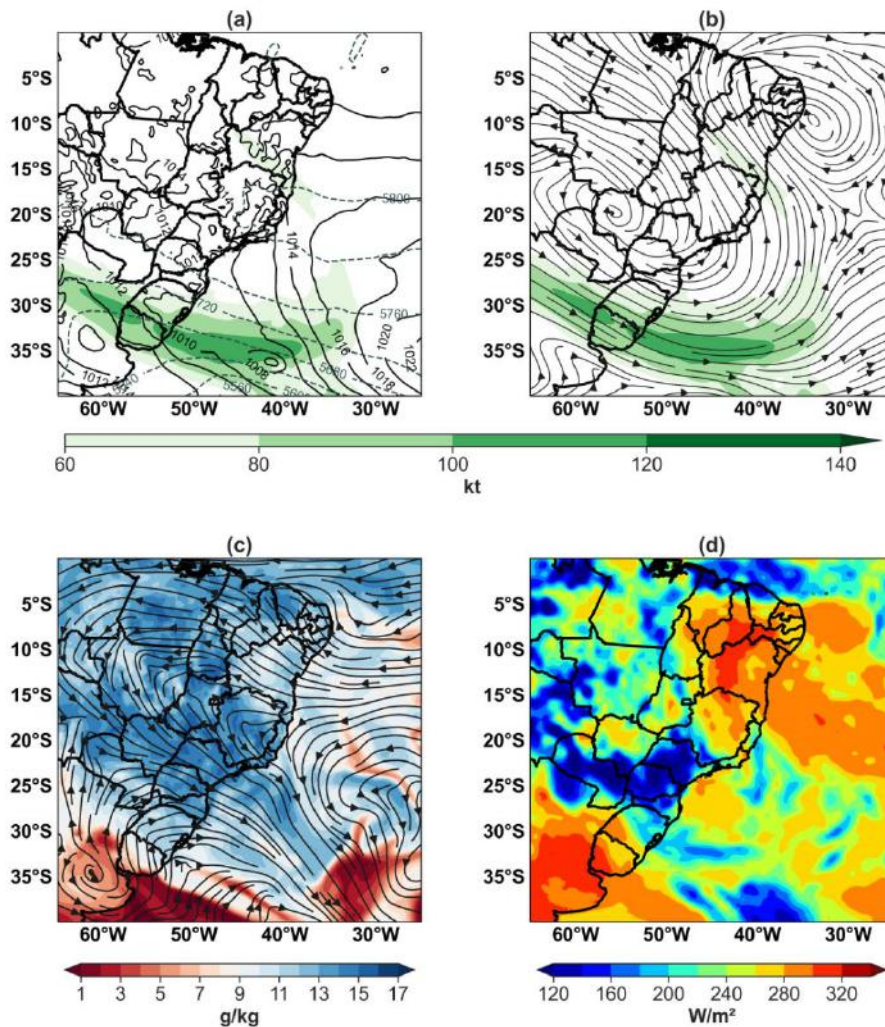


Figura 4.2 - (a) Pressão reduzida ao nível médio do mar (contornos em cinza - hPa), vento em 200 hPa (em cores - kt) e Altura geopotencial em 500 hPa (linhas tracejadas - mgp); (b) Vento em 200 hPa (em cores / linha de corrente - kt); (c) Umidade específica (em cores - g/kg) e vento em 850 hPa (linhas de corrente - m/s); (d) Radiação de Onda Longa (em cores - W/m<sup>2</sup>), às 18:00 UTC do dia 30/01/2020 - reanálise ERA-5.

O padrão oceânico indicou a presença de anomalia negativa de TSM próximo ao limite entre o litoral do Rio de Janeiro e do Espírito Santo (21.5°S e 041°W). Este foi um fator determinante para uma possível intensificação da ZCAS, uma vez que acentua-se a circulação entre o oceano e o continente [Figura 4.3-a], conforme Chaves (2011) mostrou em seu trabalho. Além disso, próximo a costa Sul e Sudeste do Brasil, a presença de uma anomalia positiva de TSM favoreceu a formação de nuvens convectivas.

O campo de vorticidade em 1000 hPa (Figura 4.3-b), apresentou valores negativos sobre a região de interesse, sendo mais um indicador associado tanto à instabilidade atmosférica quanto a ventos fortes, por estar relacionado a região de baixa pressão conforme Rodrigues *et al.* (2019) mostraram em seu estudo. Observa-se também, a partir da Figura 4.3-b uma pista de vento de nordeste sobre o oceano próximo ao litoral do estado do Rio de Janeiro e do Espírito Santo gerada pela combinação do centro de alta (ASAS) e baixa pressão (sistema frontal).

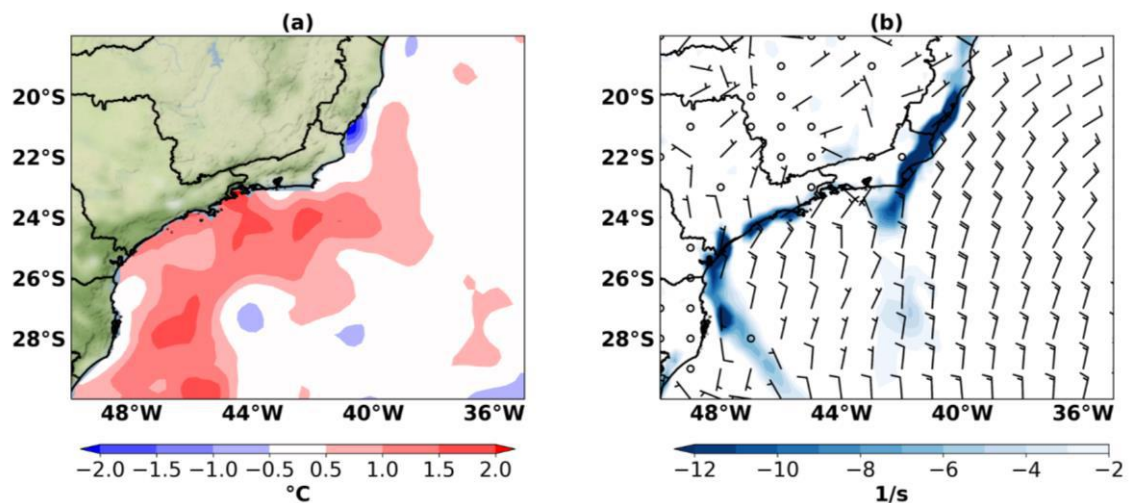


Figura 4.3 - (a) Anomalia média da Temperatura da Superfície do Mar (em cores), do dia 30/01/2020 - dados NOAA/AVHRR. (b) Vorticidade Relativa em 1000 hPa (em cores -  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e vento a 10 metros de altura (barbelas - kt), às 22:00 UTC do dia 30/01/2020 - reanálise ERA-5.

Em altos níveis, a divergência do vento em 300 hPa (Figura 4.4) mostrou-se positiva principalmente sobre o estado do Rio de Janeiro e o oceano adjacente, contribuindo para promover convergência em baixos níveis e implicando na ascendência de ar sobre a região, tornando-se uma região dinamicamente favorável a tempestades.

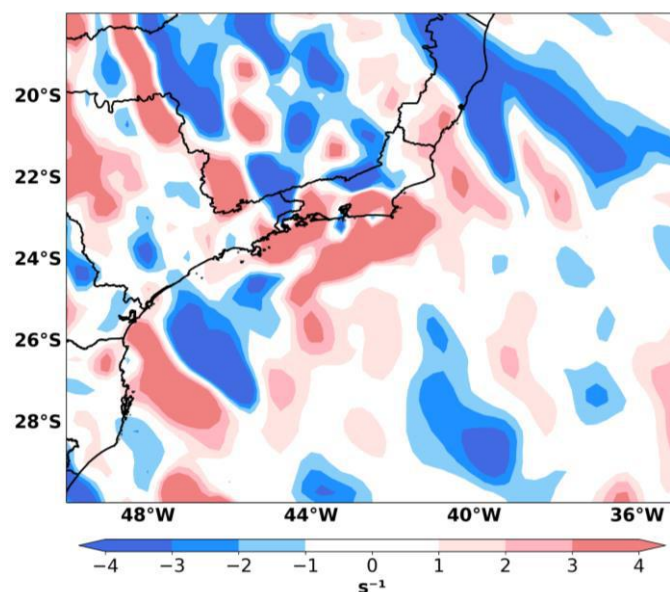


Figura 4.4 - Divergência em 300 hPa (colorido -  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC - reanálise ERA-5.

## 4.2 Análise de sensibilidade das simulações

Os índices estatísticos apresentados na Tabela 4.1 indicam que, para os três pontos da Figura 3.3, a inserção da TSM semanal como dado de entrada para as simulações com o BRAMS, apresentou uma melhor correlação ( $r_s$ ) e os menores valores para a raiz do erro quadrático médio (RMSE) em todas as quatro parametrizações de microfísica de nuvens simuladas.

Além disso, é verificada uma tendência de subestimativa (Viés negativo) entre os dados do BRAMS e da reanálise ERA-5, muito embora, no ponto 3 com a inserção da TSM semanal, tenha apresentado Viés positivo e na maioria dos casos, com exceção da parametrização de Greg Thompson Single Moment, pode ser considerado pequeno. Já para a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o mínimo valor se deu para a TSM semanal no ponto 3.

De maneira geral, dentre todas as parametrizações de microfísicas analisadas, o esquema de Greg Thompson Double Moment (com a TSM semanal), que incorpora aerossóis explicitamente, obteve uma melhor performance contendo as melhores correlações e os menores BIAS e RMSE para os três pontos selecionados, chegando a correlações fortes no ponto localizado sobre o oceano (P3).

Tabela 4.1 - Índices estatísticos para a velocidade do vento a 10 metros da reanálise ERA-5 com os obtidos pelas rodadas dos testes de sensibilidade do BRAMS.

TSM Climatológica												
Pontos	Original BRAMS			CSU RAMS6.0			Greg Thompson single moment			Greg Thompson double moment		
	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE
P1	0,11	-6,21	6,95	0,01	-1,94	3,07	0,1	-6	6,6	0,12	-3,67	4,49
P2	0,28	-4,94	6,34	0,39	-4,83	6,33	0,43	-5,18	6,59	0,44	-3,72	4,99
P3	0,47	-1,34	3,73	0,43	-1,24	3,94	0,4	-1,15	3,92	0,75	0,82	2,81
TSM Semanal												
Pontos	Original BRAMS			CSU RAMS6.0			Greg Thompson single moment			Greg Thompson double moment		
	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE	$r_s$	BIAS	RMSE
P1	0,13	0,07	1,97	0,15	-1,79	2,87	0,25	-1,61	2,64	0,44	-3,32	3,73
P2	0,4	-4,01	5,3	0,45	-3,9	5,14	0,49	-4,24	5,42	0,45	-2,16	3,43
P3	0,66	0,35	3,15	0,69	0,45	3,12	0,68	0,48	3,08	0,82	0,88	2,69

#### 4.2.1 TSM climatológica e semanal

Nesta seção são apresentadas as principais diferenças observadas entre as saídas do BRAMS após a realização da segunda etapa da seção de testes de sensibilidade. As características da simulação usada para esta análise tem como parametrização de microfísica o esquema de *Greg Thompson Double Moment* e o Domínio 1. A escolha da parametrização se justifica por apresentar o melhor desempenho em comparação com os dados de vento da reanálise ERA-5 e uma física mais representativa para a área de interesse.

Com a inserção da TSM semanal, o fluxo de calor latente (Figura 4.5-b) foi intensificado entre a costa do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, região com anomalia negativa de TSM (Figura 4.5-a) conforme visto na análise sinótica, e também entre a costa do Rio de Janeiro e de São Paulo apresentou fluxos elevados com valores próximos a 200 W/m<sup>2</sup>. Ao utilizar o conjunto de dados de TSM climatológica (Figura 4.5-a) esse mesmo ponto ficou com valores próximos de zero, entretanto, conforme as imagens de radar (Figura 4.1-b) essa região apresentava núcleos convectivos. É possível

observar também, a partir da comparação entre as figuras 4.5-a e 4.5-b, que há uma intensificação do fluxo de calor latente próximo a região da Baía de Guanabara após a utilização da TSM semanal.

Para as mesmas regiões mencionadas acima, há o aumento da intensidade da precipitação no campo de Precipitação Acumulada com TSM Semanal (Figura 4.6-b). Em concordância com este mesmo campo, a Figura 4.7-b apresenta divergência positiva em altos níveis, ou seja, convergência em baixos níveis próximo ao litoral do Rio de Janeiro. Sendo mais uma vez coerente com as imagens de satélite e de radar (Figura 4.1-a. e Figura 4.1-c) e também com a reanálise ERA-5 (Figura 4.4), o mesmo não ocorre com para a TSM climatológica, onde tem-se divergência igual a zero na mesma região.

Conforme a Figura 4.8, não houve expressivas alterações para o regime de vento quando comparado os campos com TSM climatológica e semanal. Ambos representaram a pista de vento de nordeste próxima a costa do Rio de Janeiro e do Espírito Santo, em acordo com o campo de vento a 10 metros da reanálise ERA-5 (Figura 4.8-b), contudo com uma intensificação da intensidade do vento. Nota-se, também, ventos fortes chegando até 25 kt (nós) próximos à costa da região metropolitana do Rio de Janeiro.

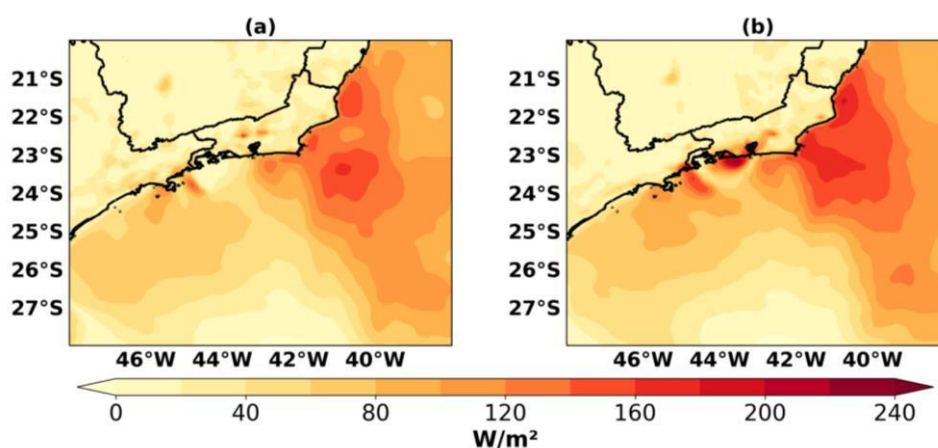


Figura 4.5 - Fluxo de calor latente em superfície (colorido -  $W/m^2$ ), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.

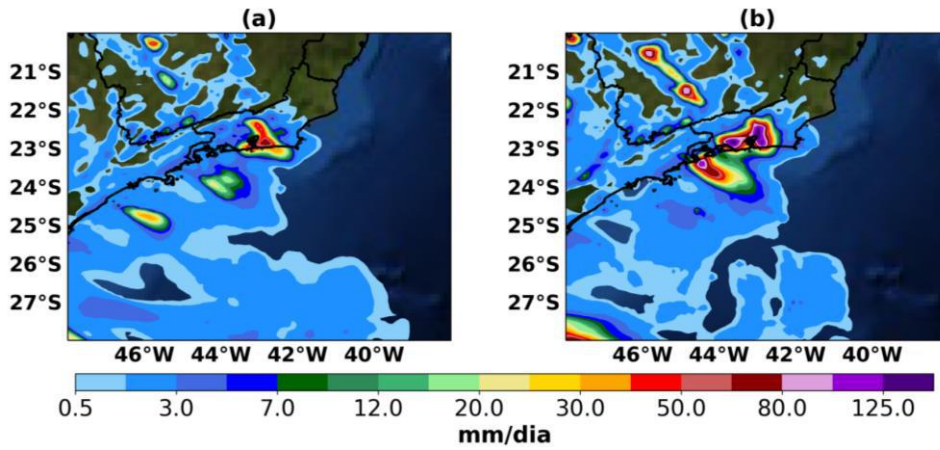


Figura 4.6 - Precipitação acumulada (colorido - mm/dia), do dia 31/01/2020. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.

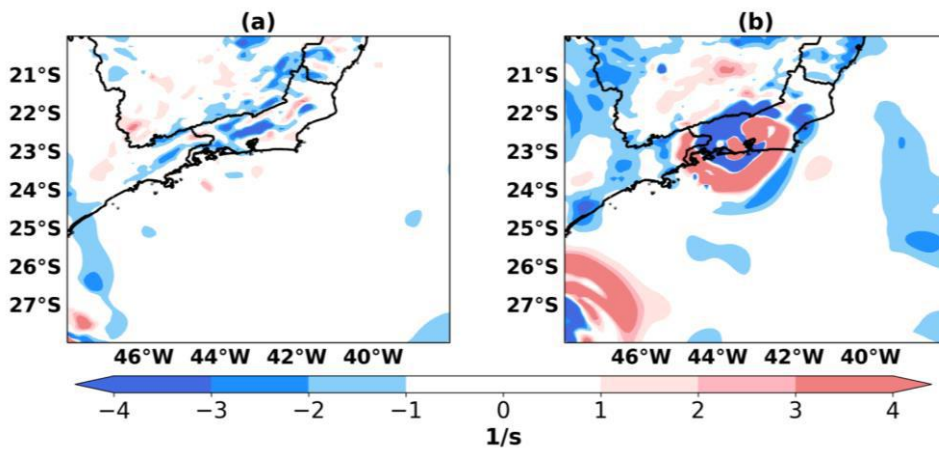


Figura 4.7 - Divergência em 300 hPa (colorido -  $10^{-5}s^{-1}$ ), do dia 31/01/2020 às 00:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.

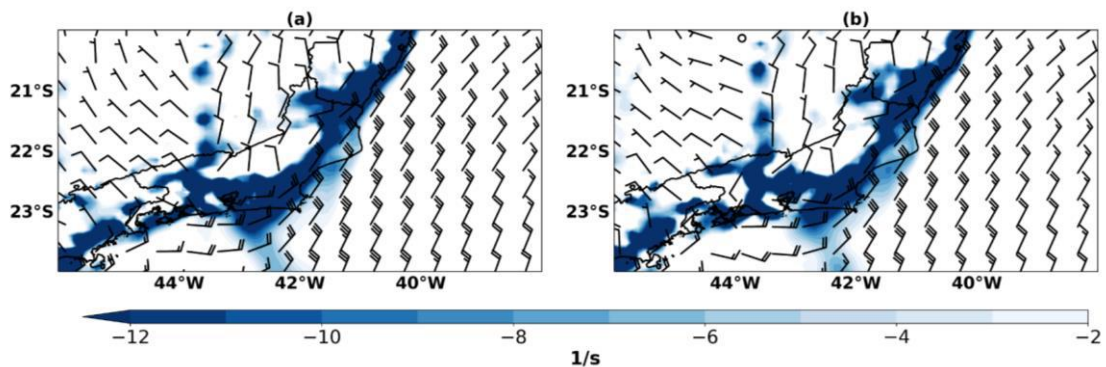


Figura 4.8 - Vorticidade em 1000 hPa (colorido -  $10^{-5}s^{-1}$ ) e vento a 10 metros de altura (barbelas - kt), do dia 30/01/2020 às 22:00 UTC. (a) TSM Climatológica (b) TSM Semanal. Simulados pelo BRAMS.

### 4.3 Comparação entre simulação, reanálise e dados observados

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a comparação da evolução temporal da velocidade e direção do vento estimado pelo BRAMS e ERA-5 e observadas nas estações SBGL e SBRJ.

Verificou-se que tanto os dados de magnitude do vento do BRAMS, quanto os da reanálise ERA-5 reproduzem coerentemente, ainda com ocorrências de períodos com discrepância entre valores estimados e observados, a série temporal do período para os dois locais estudados, reproduzindo as tendências crescente e decrescente observadas na série do vento para o evento analisado.

Observa-se que o BRAMS e o ERA-5 subestimaram a velocidade do vento observada em ambas as localidades apresentando valores máximos estimados menores que os máximos observados.

Nota-se ainda que para a avaliação do modelo BRAMS obteve-se valores mais estatisticamente significativos (Tabela 4.2), comparado ao ERA-5, possuindo os menores desvios para as duas localidades, a saber, BIAS (-2,72) e RMSE (3,88) para estação do SBGL e BIAS (-2,46) e RMSE (4,43).

O Viés calculado (BIAS) para o BRAMS e o ERA-5 demonstram que a variável magnitude do vento é subestimada em, respectivamente, 2,5 kt e 2,9 kt para a estação SBRJ e 2,7 kt e 2,9 kt para a estação SBGL.

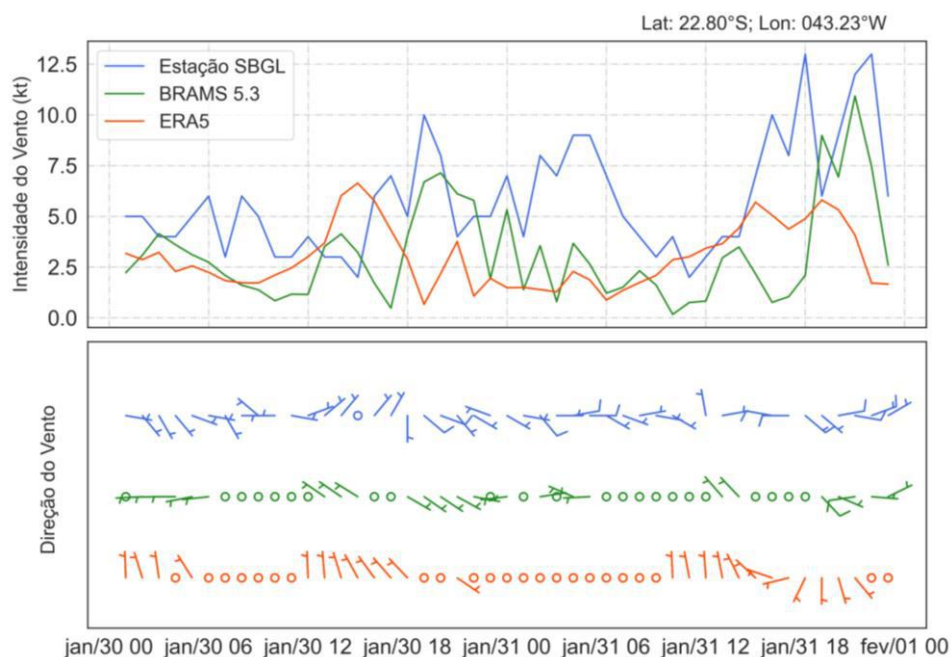


Figura 4.9 - Intensidade e direção do vento do BRAMS (linha e barbelas verdes), ERA-5 (linha e barbelas vermelhas) e SBGL (linha e barbelas azuis), no período de 30/01/2020 às 00:00 UTC até 01/02/2020 às 00:00 UTC.



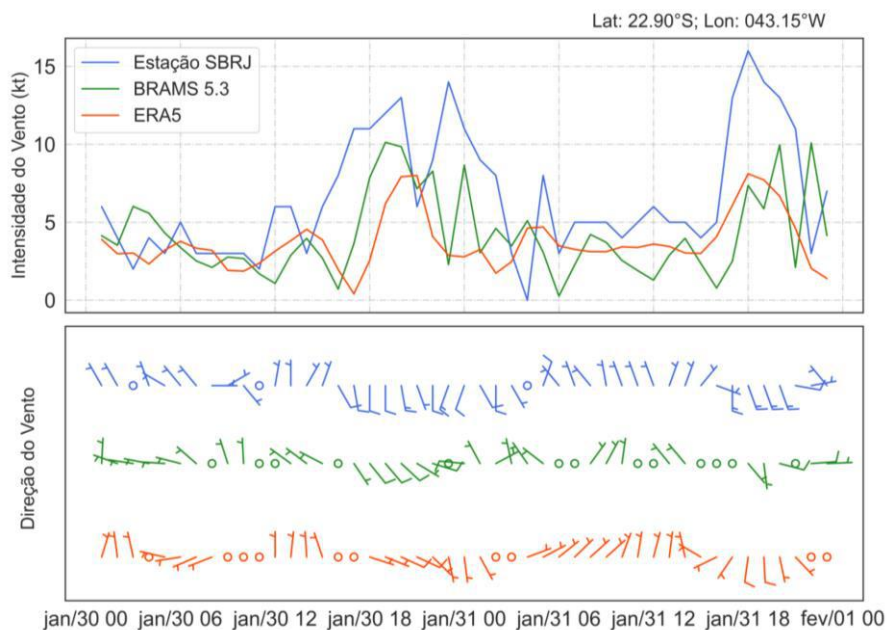


Figura 4.10 - Intensidade e direção do vento do BRAMS (linha e barbelas verdes), ERA-5 (linha e barbelas vermelhas) e SBRJ (linha e barbelas azuis), no período de 30/01/2020 às 00:00 UTC até 01/02/2020 às 00:00 UTC.

Tabela 4.2 - Índices estatísticos para a magnitude do vento a 10 metros das estações SBGL e SBRJ.

Estações	BRAMS		ERA-5	
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
<b>SBGL</b>	-2,72	3,88	-2,87	4,25
<b>SBRJ</b>	-2,46	4,43	-2,91	4,44

Por fim, realizou-se uma comparação qualitativa do vento em superfície da simulação do modelo BRAMS com resolução de 1km, utilizando o conjunto de dados de TSM semanal, a parametrização de microfísica de nuvens de *Greg Thompson Double Moment*, que apresentou a melhor performance na comparação com a reanálise ERA-5 e o domínio mais refinado (Domínio 2 da Figura 3.5), com os dados das estações SBGL e SBRJ.

Pode-se notar pela Figura 4.11, que obteve-se um melhor desempenho do modelo para a região da Baía de Guanabara com correlações ( $r_s$ ) moderada de 0.54 no SBGL e forte de 0.63 no SBRJ.

Os gráficos de dispersão da Figura 4.11, apresentam em média os valores de velocidade do vento em 10 metros do BRAMS menores que os valores dos dados

observados (respectivamente, 1,0 kt e 3,2 kt). Ou seja, o BRAMS está subestimando (Viés negativo) a magnitude do vento em relação às estações SBGL e SBRJ.

Além disso, é observado que para os dois casos houve uma subestimação dos dados pelo modelo BRAMS, apresentando uma maior densidade de pontos abaixo da linha de ajuste perfeito (linha vermelha).

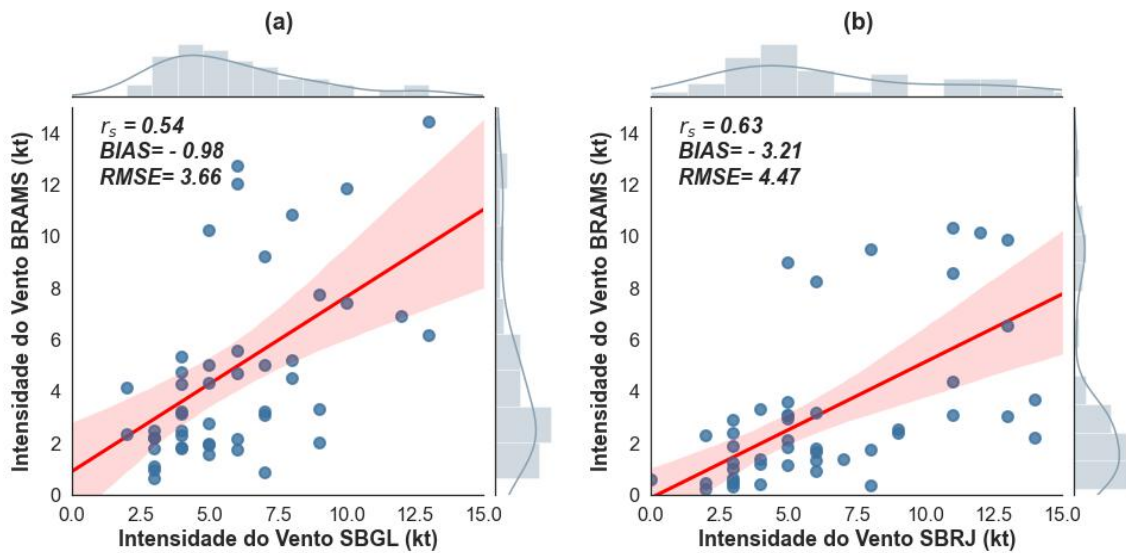


Figura 4.11 - Dispersão da magnitude do vento a 10 metros (a) BRAMS e SBGL (b) BRAMS e SBRJ.

## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

No presente estudo, buscou-se avaliar o desempenho do modelo regional BRAMS para um caso de tempestade convectiva ocorrido no dia 30 de janeiro de 2020 na RMRJ, através da comparação das simulações com reanálises e dados observados.

Em escala sinótica, os resultados mostraram que a tempestade se formou num ambiente de intensa forçante termodinâmica em superfície e suporte dinâmico em níveis médios e altos, favorecido por instabilidade pré-frontal, núcleos de liberação de calor latente, acentuado gradiente de TSM, em conjunto com um grande suprimento de umidade em baixos níveis e pela atuação da ZCAS, os quais favoreceram a propagação e desenvolvimento do sistema convectivo e potencializaram as fortes pancadas de chuvas com rajadas de vento sobre a RMRJ.

Considerando o resultados dos índices estatísticos, uma melhor caracterização da microfísica de nuvens, foi obtida com a utilização do esquema de *Greg Thompson cloud water double-moment and aerosol aware* (com a inserção da TSM semanal) que obteve um melhor performance contendo as melhores correlações e os menores BIAS e RMSE, chegando a correlações fortes sobre o oceano.

Este mesmo esquema microfísico foi validado por Brown, Bell e Frambach (2016), o qual testou seis parametrizações de microfísicas diferentes usando o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) e comparou com dados observados de radar dos EUA do ano de 2014 para os furacões Arthur e Ana. Seus resultados expressam que o esquema de Thompson e Eidhammer (2014) obteve maior fidelidade e precisão com os dados observados, em especial, para a variável velocidade máxima do vento a 10 metros.

Além disso, deve-se levar em consideração que esta parametrização de microfísica incorpora aerossóis explicitamente, rastreamento e prevendo o número total de aerossóis disponíveis, este fato pode ter contribuído para uma melhor performance do modelo BRAMS, haja vista que os aerossóis influenciam o desenvolvimento de nuvens e precipitação, desde nuvens individuais até sistemas inteiros de tempestades (THOMPSON; EIDHAMMER, 2014). Não obstante, vale ressaltar que apesar da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (área onde estão localizados os dados observados) fazer parte de uma área costeira, esta sofre com a influência direta de aerossóis marinhos transportados pelo escoamento de umidade (efeitos de circulação)

proveniente do Oceano Atlântico adjacente, e também, de partículas transportadas em longo alcance de fora da área de estudo.

Observou-se também, que quando inserida a TSM semanal como condição inicial, o modelo conseguiu representar a intensificação do evento de tempestade estudado, indicando a partir dos altos valores de fluxo de calor latente, divergência, precipitação acumulada e magnitude do vento, uma acentuada instabilidade próxima a costa oeste do estado do Rio de Janeiro coerente com as imagens de satélite e do radar meteorológico para o mesmo dia e horário. Por outro lado, o mesmo não ocorre com a TSM climatológica, onde os valores para os mesmos parâmetros não foram consistentes. Esse resultado destaca a importância da utilização de um campo de TSM com resolução temporal mais refinada, uma vez que a alteração nesse campo pode influenciar na maior (ou menor) liberação de calor latente em uma determinada região, influenciando, portanto, no campo de magnitude do vento em superfície. Ou seja, no caso de tempestade estudada, após a inserção da TSM semanal, os fluxos de calor latente se intensificaram na região de interesse, e deste modo, proporcionalmente, o vento também se intensificou. Além disso, esse resultado é consistente com estudos anteriores, nos quais as maiores variações nos fluxos de calor latente, bem como nos índices pluviométricos estão diretamente relacionados a maiores valores de TSM (conforme em SILVA *et al.*, 2004; PALMEIRA; CAMARGO; PALMEIRA, 2019).

Portanto, foi verificado que a combinação entre o esquema de Greg Thompson Double Moment somado a inserção da TSM semanal, representou melhor a velocidade do vento na área de interesse durante o evento da P-70.

Verificou-se, a partir da análise estatística da evolução temporal da magnitude e direção do vento, que tanto as estimativas de vento do modelo BRAMS e da reanálise ERA-5, possuem a tendência de subestimar os valores do vento observados. Esses resultados são similares com o trabalho de Mariano *et al.* (2017), que realizou uma análise comparativa da velocidade do vento simulado pelo BRAMS e pela reanálise ERA-Interim com dados medidos em três torres anemométricas no estado da Paraíba.

Além disso, a partir da análise dos resultados estatísticos foi observado que tanto os dados de magnitude do vento do BRAMS, quanto os da reanálise ERA-5, reproduziram as tendências crescente e decrescente observadas na série do vento para o evento analisado.

Para uma validação pontual o modelo BRAMS conseguiu reproduzir a tendência de aumento e diminuição do vento, porém, ainda com ocorrências de períodos com

discrepância entre valores estimados e observados tanto para as estações do SBGL e SBRJ.

Por fim, é de suma importância destacar que apesar dos expressivos avanços do modelo BRAMS destacados neste trabalho, os testes numéricos precisam ser cada vez mais focados na área de interesse, uma vez que as simulações dos modelos disponíveis pelos órgãos operacionais na época falharam nas previsões destes eventos, subestimando o ocorrido. Isso é uma consideração importante, pois a regionalização dos modelos é uma tendência que precisa ser aplicada a todos os centros operacionais.

## CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, C. D. **Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment**. 6th ed. California: West Publishing, 2000.

ANDRADE, K. M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul**. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2007.

ANDRIONI, M. **Influência de Forçantes Locais na Camada de Ekman Superficial do Talude Superior da Bacia de Santos**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, São Paulo, 2010.

BENDER, A. **Condições Atmosféricas Conducentes a Tempestades Severas e sua Relação com a Urbanização na RMSP**. 2018. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo (USP)/Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2018.

BERKES, F.; KNIPPERTZ, P.; PARKER, D. J.; JEANS, G.; QUINIOU-RAMUS, V. Convective Squalls over the Eastern Equatorial Atlantic. **Weather and Forecasting**, 27, p. 770–783, 2012.

BEST, M. J.; PRYOR, M.; CLARK, D. B.; ROONEY, G. G., *et al.* The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes, **Geosci. Model Dev.**, 4, p. 677–699, 2011. DOI:10.5194/gmd-4-677-2011.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geofysiske Publikasjoner**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 1919.

BROWNING, K. A; LUDLAM, F. H. Airflow in Convective Storms. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 88, p. 117-135, 1962.

BROWN, B. R.; BELL, M. M.; FRAMBACH, A. J. Validation of simulated hurricane drop size distributions using polarimetric radar, **Geophys. Res. Lett.**, 43, p. 910– 917, 2016. DOI:10.1002/2015GL067278.

BRUN, E. J.; SCHUMACHER, M. V.; VACCARO, S.; SPATHELF, P. Relação entre a produção de serapilheira e variáveis meteorológicas em três fases sucessionais de uma floresta estacional decidual no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 277-285, 2001.

BYERS, H. R.; BRAHAM, R. R. **The Thunderstorm: Final Report of the Thunderstorm Project**. Washington: Government Publishing Office, 1949.

CAMPOS, R. M.; CAMARGO, R.; HARARI, J. Caracterização de eventos extremos no 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, p. 175 - 184, 2010.

CARUZZO, A.; CAMARGO, R. **Influências sinóticas no Atlântico Sudoeste: levantamento preliminar de situações de interesse**. Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, São Paulo, 1998.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. **J. Climate**, 17, p. 88-108, 2004.

CAVALCANTI, I. F. A.; KOUSKY, V. Frentes Frias sobre o Brasil. *In*: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Justi da Silva, M. G. A.; Silva Dias, M. A. F. (Eds.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 135-145.

CHAPPELL, C. F. Quasi-Stationary Convective Events, *In*: Ray, P.S. (Ed). **Meso-scale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986. p. 289-310.

CHAVES, R. R. Conexões entre a TSM do Atlântico Sul e a convecção de verão sobre a América do Sul: análise observacional. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 5-20, 2011.

CORREIA, F. R. S. **Zonas de Convergência Subtropicais na América do Sul: Características da circulação e fluxos de umidade**. 2013. 106p. Monografia (Bacharel em Meteorologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud Dynamics**. San Diego: Academic Press, 1989.

COTTON, W. R.; PIELKE, R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. Rams 2001. Current status and future directions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 82, p. 5-29, 2003.

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P. L.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L. F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J. The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation, **Atmos. Chem. Phys.**, 9, p. 2843-2861, 2009.

FREITAS, S. R.; PANETTA, J.; LONGO, K. M. *et al.* The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas, **Geoscientific Model Development**, 10, p. 189-222, 2017.



G1 GLOBO. **Navio-plataforma vai parar perto da costa em Niterói durante temporal.** 2020. Technical report. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2020/01/30/navio-plataforma-p-70-e-deslocado-ate-a-orla-de-boa-viagem-em-niteroi.ghtml>>. Acesso em: 04 fev. 2020.

GEVAERD, R.; FREITAS, S. R. Estimativa operacional da umidade do solo para inicialização de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação, **Rev. Bras. Meteorol.**, 21, p. 1–15, 2006.

GUISHARD, M. P. **Atlantic subtropical storms: Climatology and characteristics.** 2006. 158p. Ph.D. thesis – Department of Meteorology, The Pennsylvania State University, 2006.

GRELL, G. A.; FREITAS, S. R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmos. Chem. Phys.**, 14, 5233, 2014.

HART, R. E. A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. **Mon. Wea. Rev.**, 131, p. 585-616, 2003.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P., *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1–51, 2020. DOI:10.1002/qj.3803.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on southern hemisphere storm tracks. **J. Clim.**, 18, p. 4108–4129, 2005. DOI:10.1175/JCLI3570.1.

IACONO, M. J.; DELAMERE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, **J. Geophys. Res.**, 113, D13103, 2008. DOI:10.1029/2008JD009944.

JARVINEN, B. R.; NEUMANN, C. J.; DAVIS, M. A. S. A tropical cyclone data tape for the North Atlantic Basin, 1886–1983: Contents, limitations, and uses. **NOAA Tech. Memo.** NWS NHC 22, 24 pp, 1984.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ). Part II: Conditions for generating the STCZs. **J. Meteor. Soc. Japan**, 71, p. 581-610, 1993.

LEMOS, C. J.; APOLINÁRIO, M.; LISBOA, I.; MORAIS, V.; CATANI, Q. Porto de Santos: Transportes modais e sua importância. *In*: 3º SEMINÁRIO DE GESTÃO E TECNOLOGIA. **Anais [...]** Porto Alegre. 2018.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. **J. Climate**, 12, p. 1877–1891, 1999.

LIMA, D. R. O. **Diagnóstico de Chuvas e Previsão Meteorológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Manso**. 2005. 155 pp. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2005.

LU, Y.; OSAKI, M.; WADA, R. Squalls in sea off coast of Japan and their effects on marine operations based on weather observatory data at remote islands. **Journal of Marine Science and Technology**. v.23, ed.1, p.104-121, 2017.

MADDOX, R. A. Mesoscale convective complexes. **Bull. Am. Meteorol. Soc.** v.61, p. 1374-1387, 1980.

MARIANO, E. B.; CAVALCANTI, E. P.; BESERRA, E. A. Análise comparativa da velocidade do vento simulado pelo brams com dados observados e de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2017.

MARINHA DO BRASIL. **Nota à imprensa**. 2020. Technical report. Disponível em: <[https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/nota\\_a\\_imprensa-plataforma\\_p-70.pdf](https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/nota_a_imprensa-plataforma_p-70.pdf)>. Acesso em: 05 fev. 2020.

MARTINS, R. C. G. **Estudo da Sensibilidade do Modelo WRF às Parametrizações de Microfísica de Nuvens e à Assimilação de Dados Observados**. 2014. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2014.

MATOS, P. P. O. **Impacto da utilização de dados de temperatura da superfície do mar de alta resolução espacial em um modelo de previsão numérica do tempo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 140 p., 2009.

MELLOR, G. L.; J. YAMADA. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. **Rev. Geophys.**, 20, p.851–875, 1982.

MENEZES, W. F., PAIVA, L. M. S., SILVA, M. G. A. J. Estudo do Ambiente Favoráveis à Propagação de Ambientes Convectivos de Mesoescala sobre o Município do Rio de Janeiro. *In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia; Anais [...]*. 2000; Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Meteorologia. v. 1. p. 1635 - 1645, 2000.

MENEZES, W. F. **Tempestades Severas: Um Modelo para Latitudes Subtropicais**. 1998. 174f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Inst. de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 1998.

MENEZES, W. F.; SILVA DIAS, E P. L. Um Estudo do Impacto das Opções Físicas do Modelo RAMS na Simulação Numérica do “Ciclone Catarina”. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais [...]* Fortaleza. 2004.

MEYERS, M. P.; WALKO, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; COTTON, W. R. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. **Atmospheric Research**, 45, 1, p. 3-39, 1997.

MOREIRA, D. S.; FREITAS, S. R.; BONATTI, J. P.; MERCADO, L. M.; ROSÁRIO, N. M. É.; LONGO, K. M.; MILLER, J. B.; GLOOR, M.; GATTI, L. V. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO<sub>2</sub> budget in South America. **Geos. Model Devel.**, 6, p.1243-1259, 2013.

MOREIRA, D. S. **Simulação numérica do ciclo do carbono**. 2013. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.

MOREIRA, J. L. P.; MADEIRA, C. V.; GIL, J. A.; MACHADO, M. A. P. Bacia de Santos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 531-549, 2007.

NASCIMENTO, E.L.: Identifying severe thunderstorm environments in southern Brazil: analysis of severe weather parameters. *In: 22nd CONFERENCE ON SEVERE LOCAL STORMS*, 2004, Hyannis/EUA. **Anais [...]** Hyannis/EUA: American Meteorological Society. 2004.

NÓBILE TOMAZIELLO, A. C. **Influência da temperatura da superfície do mar e da umidade do solo na precipitação associada à zona de convergência do Atlântico sul**. 2010. 166 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, A. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e a convecção da Amazônia**. 1986. 134p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.

ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. **Bulletin of American Meteorological Society**, v.56, n.5, p. 527-534, 1975.

PALLOTTA, M.; GAN, M. A. Caracterização do Mês de Janeiro de 2010 em Relação a Não Ocorrência de ZCAS: Uma Comparação com a Climatologia. *In: IV Simpósio Internacional de Climatologia. Anais [...]* João Pessoa. 2011.

PALMEIRA, A. C. P. A.; CAMARGO, R.; PALMEIRA, R. M. J. Sea Surface Temperature Optimization Evaluation in the Passage of an Explosive Cyclone in the Southwest Atlantic Ocean. **Anuário do Instituto de Geociências**, v.42, n.2, p.245-258, 2019. DOI:10.11137/2019\_2\_245\_258.

PALMEIRA, A. C. P. A. **Importância da Camada de Mistura Oceânica nos fluxos de calor na interface ar-mar e sua relação com os sistemas transientes no Atlântico Sudoeste**. 2008. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

PALMÉN, E. On the Formation and Structure of Tropical Hurricanes. **Geophysica**, 3, p. 26-38, 1948.

PARDO, L. H. **Esquema de microfísica de nuvens no modelo ETA: diagnóstico e testes de sensibilidade**. 2016. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

PARDO, L. H.; CHAN, C. S. Análise da Sensibilidade de um Esquema de Microfísica Single-Moment a Variações na sua Configuração. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 623-632, 2017.

PEREIRA, R. F. **Um Estudo de Características Físicas Associadas a Ventos Convectivos Intensos nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil Usando Modelagem Numérica**. 2015. 96 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2015.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L, *et al.* A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. **Meteorology and atmospheric physics**, v.49, p.69, 1992.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; FISCH, G. F.; LYRA, R. F. F. Confiabilidade nas estimativas do regime do vento fornecidas pelo BRAMS no Estado de Alagoas: influência do aninhamento e da resolução horizontal de grades. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 2, p. 242-258, 2014.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P. Relationship between the Southern Annular Mode and the Weather Systems over Southeast South America. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2008.

RODRIGUES, K. S.; AMARAL, I. C. F.; CAIAFA, M. V.; PALMEIRA, A. C. P. A. Proposta de Escala de Vorticidade Relativa para Sistemas Convectivos na região das Bacias de Campos e Santos. *In: XIII SIMPÓSIO SOBRE ONDAS, MARÉS, ENGENHARIA OCEÂNICA E OCEANOGRAFIA POR SATÉLITE*, 2019, Arraial do Cabo, RJ. **Anais [...]** Rio de Janeiro. 2019.

SAHA S.; MOORTHI, S.; PAN, H., *et al.* The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bull American Meteorological Society**, 91, p.1015–1057, 2010. DOI: 10.1175/2010BAMS3001.1.

SALEEBY, S. M.; COTTON, W. R. A Binned Approach to Cloud-Droplet Riming Implemented in a Bulk Microphysics Model. **J.Appl. Meteorol.**, 47, p. 694–703, 2008.

SANTALA, M. J.; CALVERLEY, M.; TAWS, S.; GRANT, H.; WATSON, A.; JEANS, G. Squall Wind Elevation/Gust Factors and Squall Coherence. **Offshore Technology Conference**, Houston, May 2014. DOI: 10.4043/25249-MS.

SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Jatos de baixos níveis a leste dos andes: comparação entre duas reanálises. **Revista Brasileira de Climatologia**, 22, p. 423-445, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.47595>.

SEBA; W. M. P. S. **Impacto da TSM de alta resolução em simulações de previsão numérica do tempo na região da confluência Brasil-Malvinas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

SEKI, G. Y. **A influência das correntes no tempo de navegação na região da Bacia de Santos**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) – Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico. São Paulo, 2019.

SHAW, W., N. The Birth and Death of Cyclones. **Geophys. Mem**, v.2, n.19, 213-227, 1922.

SILVA, F. B. **Análise dos Efeitos Combinados da Ilha de Calor e da Poluição do Ar Urbanas**. 2016. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

SILVA, F. L. C. **Investigações sobre a chegada de ondulações (swell) em situações de bom tempo na Bacia de Campos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, R. R.; SILVA DIAS, P. L.; GANDU, A.; MOREIRA, D. S. Impactos da temperatura da superfície do mar no ciclone Catarina. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Anais [...]* Fortaleza. 2004.

SINCLAIR, M. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, 122, p. 2239–2256, 1994.

SÖDING, H.; SHIGUNOV, V. Added resistance of ships in waves. **Ship Technol Res**, v. 62, n. 1, p. 2–13, 2015.

SOUZA, L. S.; SGARBI, G. N. C. Bacia de Santos no Brasil: geologia, exploração e produção de petróleo e gás natural. **Boletín de Geología**, v. 41, n. 1, p.175-195, 2019. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019009.

THOMPSON, G; EIDHAMMER, T. A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone, **J.Atmos. Sci.**, 71, p. 3636–3658, 2014. DOI:10.1175/JAS-D-13-0305.

THOMPSON, G.; FIELD, P. R.; RASMUSSEN, R. M.; HALL, W. D. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization, **Mon. Weather Rev.**, 136, p. 5095–5115, 2008. DOI:10.1175/2008MWR2387.1.

VELASCO, I.; FRITSH, J. M. Mesoscale Convective Complexes over the Americas. **Journal of Geophysical Research**, 92, p. 9591-9613, 1987.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa, 449p., 2000.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New Rams cloud microphysics parameterization. 1. The single-moment scheme. **Atmospheric Research**, v. 38, n.14, p. 29-62, 1995.

WEISMAN, M.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically-simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 504-520, 1982.

WEISMAN, M., L.; KLEMP, J. B. Characteristics of isolated convective storms. *In*: RAY, P.S. (Org.). **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986. p. 331-358.

WILKS, D. S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2th ed. London: Elsevier Academic Press, 2006.

WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 2008. World Meteorological Organization Rep. WMO-08 (7th ed.). Disponível em: <<http://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2016/09/MET-474-WMO-Guide.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

WMO. **Supplement to the WMO publication No. 122.RP.50 abridged final report of the third session of the Commission for Synoptic Meteorology**. Washington: World Meteorological Organization, 228 pp, 1962.