



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE SINÓTICA E VALIDAÇÃO DA
PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO WRF EM MODO
DE CONVECÇÃO PERMITIDA NO LITORAL DO
ESTADO DE SÃO PAULO**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Juan Roger de Godoi

Itajubá, MG, Brasil

2025

ANÁLISE SINÓTICA E VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO WRF EM MODO DE CONVECÇÃO PERMITIDA NO LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

por

Juan Roger de Godoi

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Orientadora: Dra. Michelle Simões Reboita

**Itajubá, MG, Brasil
2025**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

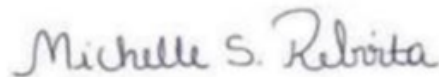
A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**ANÁLISE SINÓTICA E VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA
PELO WRF EM MODO DE CONVECÇÃO PERMITIDA NO LITORAL
DO ESTADO DE SÃO PAULO**

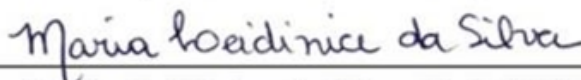
elaborada por
Juan Roger de Godoi

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



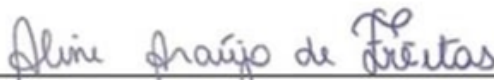
Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Maria Leidinice da Silva, Dr^a. (ICPT)



João Gabriel Martins Ribeiro, Msc. (UNIFEI)



Aline Araújo de Freitas, Msc. (UNIFEI)

Itajubá, 26 de novembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela oportunidade e pela força concedida ao longo desta trajetória acadêmica, permitindo que eu chegasse até aqui. Aos meus pais, Rogério Eugênio e Maria Virgínia, e a todos os meus familiares, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelo amor e pela confiança no meu potencial, mesmo diante dos desafios e incertezas que surgiram no caminho. À Família República Papatravamus, minha eterna gratidão pelo acolhimento e pelo suporte em viver experiências incríveis, que certamente marcaram minha vida não apenas acadêmica, mas também pessoal. Em especial, dedico um agradecimento emocionado ao meu amigo mais do que amigo, um verdadeiro irmão, Gabriel Lopes, que partiu neste ano, mas que sempre estará presente na memória e no coração de todos que tiveram o privilégio de conviver com ele. Agradeço imensamente à professora Michelle Simões Reboita, uma pessoa incrível, que sempre acredita nos seus alunos, oferecendo não apenas orientação acadêmica, mas também amizade, compreensão e inspiração. Mais do que professora, uma verdadeira amiga. Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos da faculdade Linguini, Macauli, Bife, Xandrão, Vale, Volts, News, Zip, Laurete, Lê, Sapa, Art, Sarah, Jean que tornaram essa caminhada muito mais leve e divertida, compartilhando desafios, vitórias e momentos inesquecíveis. Agradeço ao projeto Atlético UNIFEI que sempre me apoiou e me ajudou nas batalhas, fazendo com que ganhasse uma família e aprendesse coisas que jamais imaginei desenvolver. Por fim, agradeço aos amigos de classe: Vitor, Douglas, Alysson, Caio, Felipe e Isis, pela parceria, pela troca de conhecimentos e pelo companheirismo que fizeram toda a diferença nesta jornada

Dedico
a todos que são apaixonados
na natureza do nosso planeta.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ANÁLISE SINÓTICA E VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO WRF EM MODO DE CONVECÇÃO PERMITIDA NO LITORAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

AUTOR(A): JUAN ROGER DE GODOI
ORIENTADORA: Dra. MICHELLE SIMÕES REBOITA
Local e Data da Defesa: Itajubá, 26 de novembro de 2025.

Este trabalho apresenta a análise do ambiente sinótico e a avaliação do desempenho do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) na simulação do evento extremo de precipitação ocorrido entre 18 e 19 de fevereiro de 2023 no litoral norte do estado de São Paulo. Nessa região, a Serra do Mar favorece o levantamento orográfico de ar úmido proveniente do oceano, contribuindo para acumulados elevados de precipitação e elevada vulnerabilidade a desastres. O evento de fevereiro de 2023 teve precipitação superior a 600 mm em 24 horas. O ambiente sinótico em que a tempestade estava embebida esteve associado à atuação de uma frente fria quase estacionária sobre o oceano nas latitudes de São Paulo, altos valores de umidade em baixos e médios níveis, um cavado em altitude e forte cisalhamento vertical do vento, condições que sustentaram convecção profunda organizada. Para investigar o evento, o modelo WRF foi utilizado em modo de Convecção Permitida nas resoluções de 3 km e 1 km. A validação das simulações foi realizada por meio das métricas de viés e correlação. De forma geral, as simulações em 1 e 3 km não demonstraram desempenho satisfatório, com vieses elevados e correlações baixas em todos os municípios, evidenciando a baixa habilidade do WRF em representar a variabilidade temporal da chuva.

Palavras-chave: WRF, Convecção Permitida, Precipitação Extrema, São Sebastião

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa de localização da área de estudo com destaque para o litoral norte do estado de São Paulo, abrangendo os municípios de Caraguatatuba, São Sebastião, Ilhabela e Ubatuba, e apresentando a topografia regional e a posição relativa no estado.....	5
FIGURA 2 – Área de cobertura do radar meteorológico da FCTH localizado entre Biritiba Mirim e Salesópolis (SP).....	9
FIGURA 3 – Acumulado total de precipitação (mm) registrado entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 em cidades do litoral norte de São Paulo e em Bertioga, com valores observados nas estações do CEMADEN,	13
FIGURA 4 – Média do acumulado diário de precipitação (mm) acumulada pelas estações do CEMADEN nos municípios de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba entre 17 e 19 de fevereiro de 2023	14
FIGURA 5 - Acumulado de precipitação (mm) entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 obtido a partir do produto MERGE/CPTEC-INPE.....	17
FIGURA 6 - Painel de imagens do radar meteorológico de São Roque-SP (subproduto produto CAPPI a 3,1 km).....	18
FIGURA 7 - Cartas sinóticas de superfície elaboradas pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) entre os dias 17 e 19 de fevereiro de 2023 (00 e 12 UTC), evidenciando os principais sistemas atmosféricos atuantes.....	21
FIGURA 8 - Imagens do satélite GOES-16 (canal infravermelho realçado – CH 13) mostrando a evolução da convecção profunda sobre o Sudeste do Brasil entre 18 e 19 de fevereiro de 2023.....	22
FIGURA 9 - Mapa da umidade relativa média entre 1000-500 hPa, altura geopotencial em 500 hPa e movimentos verticais do ar para o dia 18/02, nos horários de 00 UTC.....	23
FIGURA 10 - Espessura 500–1000 hPa, altura geopotencial em 250 hPa e divergência em 250 hPa para o dia 18/02/2023 nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC.....	24
FIGURA 11 - Cisalhamento vertical do vento (1000–500 hPa), espessura 500–1000 hPa e altura geopotencial em 500 hPa para o dia 18/02/2023 nos horários de 00, 06, 12 e 18 UTC.....	25

FIGURA 12 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido de 3 e 1 km, para o municípios de Caraguatatuba, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.....	26
FIGURA 13 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido de 3 e 1 km, para o municípios de Ilhabela, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.....	27
FIGURA 14 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido de 3 e 1 km, para o municípios de São Sebastião, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.....	27
FIGURA 15 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido de 3 e 1 km, para o municípios de Ubatuba, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.....	28
FIGURA 16 - Campos simulados de velocidade do vento em superfície (10 m) obtidos pelo modelo WRF Modo CP (3 km) para os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 (0000 e 1200 UTC), evidenciando a intensificação dos ventos de nordeste e o escoamento costeiro convergente.....	29
FIGURA 17 - Campos simulados de velocidade do vento em superfície (10 m) obtidos pelo modelo WRF Modo CP (1 km) para os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 (0000 e 1200 UTC), evidenciando a intensificação dos ventos de nordeste e o escoamento costeiro convergente.....	31

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Estações pluviométricas utilizadas no estudo, com identificação da cidade, código da estação, latitude, longitude e base de dados (CEMADEN).....	7
TABELA 2 - Categorias de interpretação dos resultados para a métrica de viés (bias).....	12
TABELA 3 - Categorias de interpretação para o coeficiente de correlação de Pearson.....	12
TABELA 4 – Total cumulado de precipitação entre o dia 18 (0000 UTC) até o dia 19 (2359 UTC) de fevereiro de 2023 nas estações pluviométricas do CEMADEN, localizadas nas cidades de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba.....	15

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABI – *Advanced Baseline Imager*

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

BR – Brasil

CAPPI – *Constant Altitude Plan Position Indicator*

CAPE – *Convective Available Potential Energy*

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CH 13 – Canal 13 do sensor ABI (GOES-16)

CHM – Centro de Hidrografia da Marinha

CIN – *Convective Inhibition*

CP – Convecção Permitida

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

DIV – Divergência

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

ERA5 – Quinta geração da reanálise global do ECMWF

FCTH – Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica

GOES-16 – *Geostationary Operational Environmental Satellite – 16*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JST – Jato Subtropical

MERGE – Produto combinado de precipitação (pluviômetros + satélite) do CPTEC/INPE

REDEMET – Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica

RegCM – *Regional Climate Model*

RH – *Relative Humidity (Umidade Relativa)*

SCM – Sistema Convectivo de Mesoescala

SP – Estado de São Paulo

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

T2M – Temperatura a 2 metros

U – Componente zonal do vento

U10 – Componente zonal do vento a 10 metros

UTC – Tempo Universal Coordenado

V – Componente meridional do vento

V10 – Componente meridional do vento a 10 metros

W – Velocidade vertical (movimento vertical)

WRF – *Weather Research and Forecasting Model*

Z – Altura geopotencial

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	4
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	4
2.2. DADOS.....	5
2.2.1. Carta Sinótica.....	5
2.2.2. Estações Meteorológicas.....	6
2.2.3. Imagens de Satélite.....	8
2.2.4. Radar Meteorológicas	8
2.2.5. Reanálise	9
2.2.6. WRF	9
2.3. ANÁLISES.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
3.1. EVENTO EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO.....	13
3.2. AMBIENTE SINÓTICO.....	20
3.3. PERFORMANCE DO WRF EM MODO CP.....	25
4. CONCLUSÕES.....	32
5. REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

A região Sudeste do Brasil insere-se em um regime climático de monção, no qual mais de 50% da precipitação anual ocorre entre os meses de dezembro e fevereiro, enquanto o período seco ocorre durante o inverno (FERREIRA; REBOITA, 2022; ALVARES et al., 2013). Essa marcada sazonalidade pluviométrica decorre, sobretudo, da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e da influência recorrente dos sistemas frontais que se propagam a partir do sul do continente (SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019).

No contexto do clima do estado de São Paulo, destaca-se a região do litoral norte, que abriga as cidades de Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba, como a mais chuvosa, devido às características da circulação atmosférica, onde a Serra do Mar serve como uma barreira para que a entrada de umidade do Oceano Atlântico Sul e induz movimentos ascendentes que geram grandes volumes de precipitação (NUNES et al. 2009). Nessa região do litoral norte normalmente são registrados os níveis mais altos de precipitação, variando de 1675,3 a 2132,5 mm/ano (SILVA; MARENGO; LEMES, 2023). Como essa região possui elevados totais pluviométricos (BARBOSA, 2007), essa pode ser suscetível a episódios de inundações e deslizamentos de terra (TAVARES, 2012). Nesse contexto, um dos episódios mais marcantes desde o início dos registros meteorológicos na região ocorreu em fevereiro de 2023, quando um evento de chuva extrema atingiu o litoral norte do estado de São Paulo. Em 24 horas (G1, 2023), foram registrados mais de 600 mm de precipitação, o maior acumulado já documentado no Brasil em um único dia até o momento, com postos pluviométricos registrando no dia 19 de fevereiro 682,8 mm (Bertioga), 234,3 mm (Caraguatatuba), 337,3 mm (Ilhabela), 627,5 mm (São Sebastião) e 334,9 mm (Ubatuba) (PAMPUCH et al., 2025). Esse evento resultou em 64 mortes (G1, 2024), desabrigados e expressivos prejuízos à infraestrutura regional.

Os eventos extremos têm sido um problema mundial devido aos seus impactos potencialmente severos na vida humana, economia e ecossistema naturais (SUN et al., 2016). Além disso, a ocorrência de um evento extremo em uma sociedade com condições vulneráveis, em geral, configura-se como um desastre (LAVELL et al., 2012; UNGA, 2016).

Casos de extrema precipitação têm sido estudados com modelos climáticos, sendo que os modelos climáticos regionais (MCR), de modo geral, representam melhor as características climáticas, uma vez que operam com resolução horizontal mais elevada e utilizam parametrizações físicas mais adequadas para representar processos atmosféricos de mesoescala (GIORGI; MEARNNS, 1999; CUADRA; DA ROCHA, 2006). Essas características conferem aos MCR maior capacidade de reproduzir fenômenos associados à topografia complexa, como aqueles observados no Sudeste do Brasil. Um exemplo de MCR é o *Weather Research and Forecasting (WRF)*.

O WRF pode ser executado em modo climático de convecção permitida (CP) quando a resolução horizontal é suficientemente alta ($\Delta s \leq 4$ km), de modo que a convecção passe a ser explicitamente representada (STOCCHI et al., 2022; TAKAYABU et al., 2022). Esses modelos dispensam esquemas de parametrização convectiva, pois resolvem diretamente os movimentos verticais por meio da dinâmica não-hidrostática. A convecção úmida, por sua vez, é tratada explicitamente pelos esquemas de microfísica, que representam as diferentes classes de hidrometeoros (Lackmann, 2011).

Apesar de cobrirem domínios menores, as simulações na escala de CP demandam capacidade computacional substancialmente maior, tanto para processamento quanto para armazenamento. Essa exigência limita a execução de experimentos longos, tipicamente da ordem de décadas e faz com que, na prática, muitas aplicações empreguem janelas temporais reduzidas ou análises de eventos específicos (BETTOLLI et al., 2021; BARTOLOMEI et al., 2024; DA ROCHA et al., 2024). O propósito dessas simulações direcionadas é extrair características atmosféricas que modelos regionais mais grosseiros não capturariam adequadamente, como a estrutura e a intensidade de eventos extremos de precipitação ou temperatura, justificando o esforço computacional envolvido.

Embora o evento tenha sido recentemente discutido em estudos nacionais, algumas lacunas permanecem. Pampuch et al. (2025) apresentam um panorama climático de 2023, destacando o recorde histórico de precipitação no litoral norte paulista, mas o enfoque do estudo é descritivo, voltado à caracterização das anomalias atmosféricas em escala nacional, sem aprofundar a análise sinótica detalhada do sistema frontal nem avaliar a capacidade de modelos numéricos em representar o evento. Por sua vez, Marengo et al. (2024) realizam um diagnóstico

abrangente dos deslizamentos em São Sebastião, enfatizando os impactos socioambientais, a vulnerabilidade territorial e a efetividade dos sistemas de alerta precoce. Contudo, apesar de discutirem os fatores meteorológicos gerais, os autores não desenvolvem uma investigação voltada à modelagem atmosférica de alta resolução.

Nesse contexto, o presente estudo apresenta a análise sinótica do evento extremo de precipitação no litoral norte de São Paulo em fevereiro de 2023 e analisa o desempenho do modelo WRF em modo CP para representação deste evento nas cidades do litoral norte. Esse estudo contribui tanto para o avanço científico da modelagem de alta resolução quanto para a prática operacional. Simultaneamente, a compreensão mais precisa da distribuição espacial e temporal da chuva intensa tem impacto direto na tomada de decisão, fortalecendo sistemas de alerta, planejamento urbano e estratégias de mitigação de desastres, demonstrando o valor estratégico de desenvolver, testar e validar modelos de convecção permitida no Brasil.

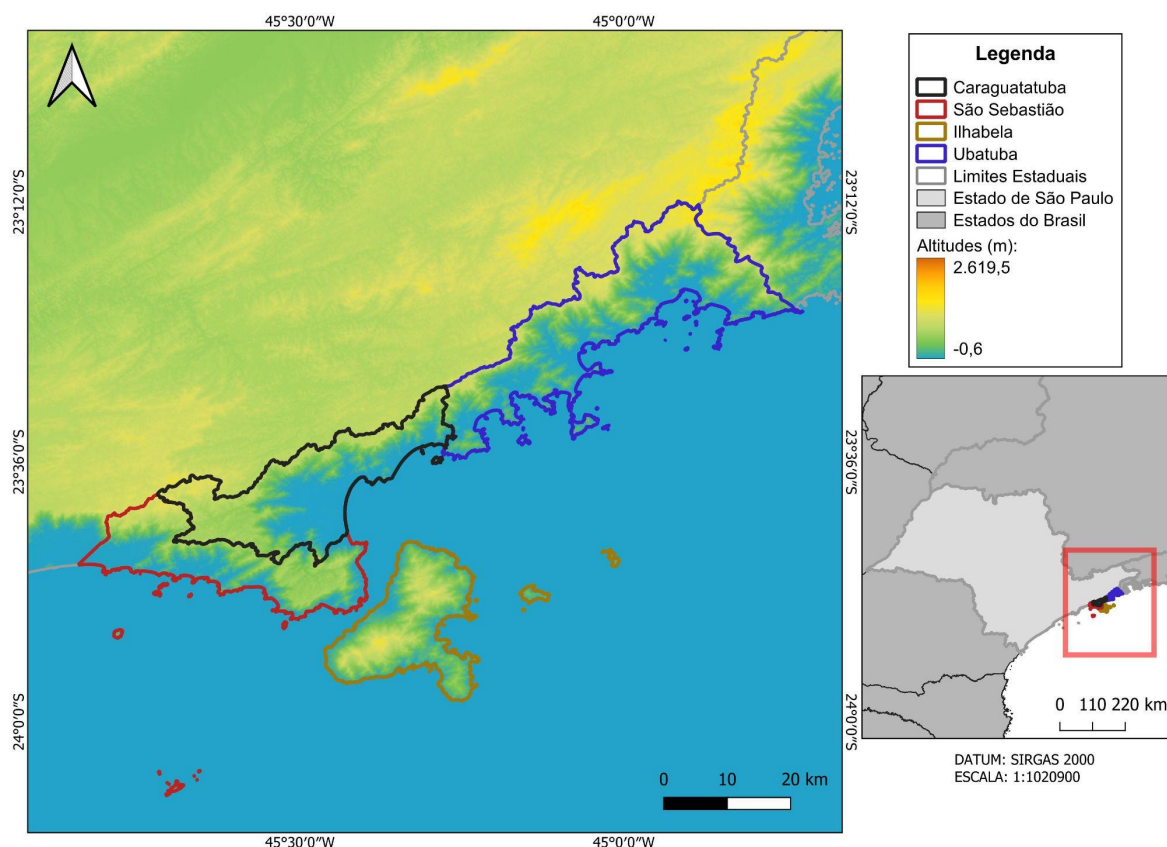
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o litoral norte do estado de São Paulo (Figura 1), que abrange os municípios de Caraguatatuba, Ubatuba, Ilhabela e São Sebastião. Essa região é marcada pela presença da Serra do Mar, um extenso conjunto montanhoso que exerce forte influência sobre o escoamento atmosférico, contribuindo para a ocorrência de fenômenos como chuvas orográficas, movimentos ascendentes localizados e forçados, além do bloqueio parcial de frentes frias e quentes que se deslocam pela costa paulista (SCOFIELD; DE ANGELIS; SOUSA JR., 2015). Basicamente, as correntes de ar úmido transportadas do oceano para o continente se elevam ao entrar em contato com a barreira topográfica, de forma que há condensação, formação de nuvens e chuva (PELLEGATTI; GALVANI, 2010).

De acordo com a classificação de Köppen, os municípios de Caraguatatuba e Ubatuba são classificados como Af, caracterizados por um clima tropical úmido, sem estação seca definida e com precipitação média mensal de no período mais seco superior a 60 mm. Já Ilhabela e São Sebastião apresentam uma classificação Am, correspondente a um clima tropical úmido com inverno seco, no qual o mês menos chuvoso apresenta precipitação inferior a 60 mm, enquanto a temperatura média do mês mais frio permanece acima de 18 °C, segundo o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI (2016).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com destaque para o litoral norte do estado de São Paulo, destacando os municípios de Caraguatatuba (preto), São Sebastião (vermelho), Ilhabela (amarelo) e Ubatuba (azul). O mapa apresenta ainda a topografia regional (em metros) e a posição relativa da área em relação ao estado de São Paulo e ao território brasileiro.



Fonte: Autor.

2.2. DADOS

2.2.1. Carta Sinótica

Cartas sinóticas de superfície foram obtidas da Marinha do Brasil - Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Essas cartas são elaboradas diariamente (0000 e 1200 UTC) contendo o campo de pressão atmosférica representado através de isóbaras; plotagem de dados observados provenientes de estações meteorológicas, boias meteoceanográficas, bóias de deriva e navios; e a representação gráfica de fenômenos atmosféricos de escala sinótica, mediante sua ocorrência, tais como: centros de alta e baixa pressão atmosférica; cristas e cavados; sistema frontais; Zona de Convergência Intertropical; Zona de Convergência do Atlântico Sul; ondas

tropicais; e ciclones subtropicais. Essas cartas estão disponíveis para acesso público por meio do site oficial do CHM, no endereço:

<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>.

2.2.2. Estações Meteorológicas

Foram utilizadas observações provenientes de estações meteorológicas automáticas operadas por diferentes instituições.

- Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN): Mantém uma rede de estações meteorológicas que fornece dados em tempo real, com frequência de 10 minutos, especialmente focados em áreas vulneráveis a desastres naturais, como o litoral norte paulista. Essas medições são essenciais para o monitoramento contínuo e a gestão de riscos associados a eventos extremos. Os dados do CEMADEN estão disponíveis publicamente em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>. Desse centro, foram obtidos dados de 41 estações pluviométricas, que são apresentadas na Tabela 1.

- Agência de águas do Estado de São Paulo (DAEE): Disponibiliza dados hidrometeorológicos provenientes de sua rede de monitoramento, com estações localizadas em diversas regiões do estado de São Paulo, incluindo o litoral. As informações incluem variáveis como precipitação, nível de rios e vazão. Dessa base de dados, foram utilizados oito postos pluviométricos distribuídos pelos municípios de São Sebastião, Ilhabela, Ubatuba, Guarujá, São Vicente, Mongaguá, Itanhaém, Praia Grande e Peruíbe (Tabela 1). Os dados são disponibilizados como chuvas diárias(mm). O acesso aos dados pode ser feito pelo portal: <http://ph.daee.sp.gov.br/Pluviometricos#>.

Tabela 1 - Estações pluviométricas do CEMADEN utilizadas no estudo, localizadas em municípios do litoral norte e na cidade de Bertioga, no estado de São Paulo. A tabela apresenta os nomes das estações, suas respectivas coordenadas geográficas.

CIDADE	ESTAÇÃO	LATITUDE (°S)	LONGITUDE (°W)
Caraguatatuba	Fazenda Serra Mar	23,661	45,518
Caraguatatuba	Getuba	23,602	45,37
Caraguatatuba	Indaiá	23,637	45,426
Caraguatatuba	Jardim Casa Branca	23,607	45,38
Caraguatatuba	Jardim Casa Branca 2	23,616	45,379
Caraguatatuba	Martim de Sá	23,618	45,39
Caraguatatuba	Massaguaçu	23,583	45,33
Caraguatatuba	Massaguaçu 2	23,579	45,338
Caraguatatuba	Rio Claro	23,708	45,468
Caraguatatuba	Rio do ouro	23,612	45,423
Caraguatatuba	Rio do ouro 2	23,597	45,43
Caraguatatuba	Tabatinga	23,571	45,274
Caraguatatuba	Tabatinga 2	23,569	45,295
Caraguatatuba	Tinga	23,629	45,437
Ilhabela	Barra Velha	23,822	45,367
Ilhabela	São Pedro	23,884	45,448
São Sebastião	Barra do Una	23,758	45,764
São Sebastião	Boiçucanga	23,777	45,612
São Sebastião	Boiçucanga 2	23,767	45,596
São Sebastião	Enseada	23,723	45,43
São Sebastião	Itatinga	23,813	45,414
São Sebastião	Jaraguá	23,729	45,441
São Sebastião	Juquehy	23,768	45,685
São Sebastião	Juquehy 2	23,759	45,722
São Sebastião	Morro do Abrigo	23,76	45,418
São Sebastião	Pontal da Cruz	23,783	45,404
São Sebastião	Praia Grande	23,823	45,415
São Sebastião	Praia das Cigarras	23,732	45,403
São Sebastião	Toque Toque Pequeno	23,814	45,531
Ubatuba	Centro 2	23,44	45,082
Ubatuba	Estufa II	23,452	45,079
Ubatuba	Ipiranguinha	23,452	45,079
Ubatuba	Itamambuca	23,398	45,004
Ubatuba	Marafunda	23,439	45,103
Ubatuba	Perequê-Mirim	23,485	45,237
Ubatuba	Picinguaba	23,376	44,838
Ubatuba	Poruba	23,347	44,94
Ubatuba	Praia Dura	23,502	45,173
Ubatuba	Praia do Lázaro	23,502	45,13
Ubatuba	Rio Grande	23,4305	45,0852
Ubatuba	Ubatumirim	23,305	44,869

2.2.3. Imagens de Satélite

Foram utilizadas imagens do canal 13 (10,3 μm) do sensor ABI, embarcado no satélite GOES-16 e disponibilizadas pelo CPTEC/INPE, com propósito de monitorar a evolução dos sistemas convectivos sobre o litoral norte de São Paulo entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023. Por se tratar de um canal no infravermelho, o canal 13 fornece a temperatura de brilho, permitindo identificar regiões com topos de nuvens mais frios típicos de convecção profunda para acompanhar a evolução das nuvens de forma contínua, inclusive no período noturno.

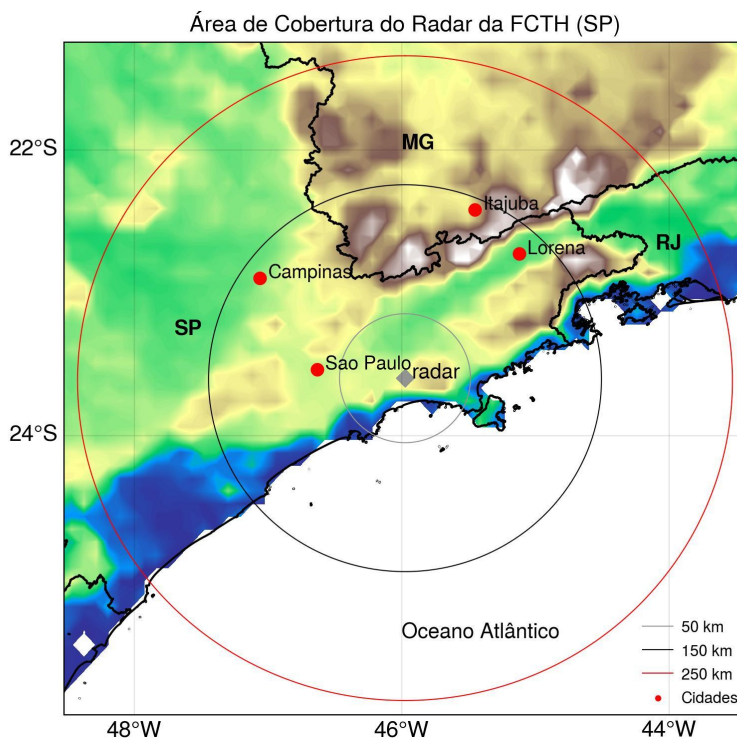
O CPTEC/INPE também disponibiliza o produto MERGE que combina dados observacionais de precipitação com estimativas obtidas por satélite (Rozante et al., 2010). Os dados do MERGE são disponibilizados em formato GRIB2 com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e frequência diária. Os dados podem ser acessados gratuitamente pelo link: <https://ftp.cptec.inpe.br/modelos/tempo/MERGE/GPM/DAILY/>

2.2.4. Radar Meteorológico

Os dados de radar usados neste estudo são provenientes do radar instalado em uma área próxima à Barragem de Ponte Nova, entre os municípios paulistas de Biritiba Mirim e Salesópolis. Suas coordenadas geográficas são $23^\circ 36' 00''$ S e $45^\circ 58' 20''$ W, e ele está posicionado a aproximadamente 916 metros de altitude. Esse radar possui um campo de detecção que abrange grande parte do estado de São Paulo, além de áreas adjacentes do sul de Minas Gerais e parte do território fluminense. O radar opera na Banda S, utiliza tecnologia Doppler com dupla polarização e possui um alcance radial de 240 km com resolução de 2×2 km ou com raio de 120 km com resolução de 1×1 km, de acordo com informações da MEMÓRIA DO DAEE (2010)

Foram usados dados CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) referente ao nível de 3 km de altitude no período entre 2300 UTC do dia 18 e 1200 UTC do dia 19 de fevereiro de 2023. A área analisada foi delimitada pelas coordenadas $24^\circ 48' 00''$ S e $22^\circ 06' 00''$ S de latitude e $47^\circ 42' 00''$ W e $44^\circ 36' 00''$ W de longitude (Figura 2). O uso desse produto permitiu monitorar a evolução da tempestade, descrevendo seu ciclo de vida, intensidade, duração e trajetória.

Figura 2 - Área de cobertura do radar meteorológico da FCTH localizado entre Biritiba Mirim e Salesópolis (SP). Os círculos concêntricos representam o alcance aproximado de 50 km, 150 km e 250 km a partir da posição do radar.



Fonte: Autor.

2.2.5. Reanálise

Para analisar o ambiente sinótico do evento de precipitação extrema no litoral norte de São Paulo foram obtidos dados de reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF, Herbach et al., 2020). Esses dados são disponibilizados com resolução temporal horária e resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ abrange diferentes níveis da atmosfera. As variáveis analisadas neste estudo foram: componentes zonal e meridional do vento (m s^{-1}), velocidade vertical do vento (Pa s^{-1}), geopotencial ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), umidade relativa do ar (%) e pressão ao nível médio do mar (Pa).

2.2.6. WRF

Neste estudo, o modelo WRF (SKAMAROCK et al., 2005) foi utilizado no modo de CP. Esse modelo possui núcleo dinâmico denominado ARW, que resolve

as equações de Euler não hidrostáticas para uma atmosfera totalmente compressível, utilizando coordenadas verticais que seguem o relevo e um esquema de integração com divisão temporal. As variáveis estáticas (por exemplo, topografia, uso e cobertura da terra) empregadas são aquelas fornecidas como padrão nas configurações do WRF.

O modelo foi integrado a partir das 1700 UTC do dia 17 de fevereiro de 2023 até as 1700 UTC do dia 19 de fevereiro, sobre dois domínios de alta resolução. O domínio, com resolução horizontal de 3 km, estendeu-se aproximadamente entre 27,78°S e 19,30°S, e 52,21°W e 40,93°W. Já o domínio interno, com resolução de 1 km, concentrou-se na área de maior interesse, compreendida entre 25,28°S e 22,13°S, e 48,06°W e 44,82°W.

Utilizando o ponto de grade correspondente a cada município, foram adotadas as seguintes coordenadas geográficas de referência para a extração dos valores simulados pelo modelo WRF: Caraguatatuba (23,62° S; 45,41° W), Ilhabela (23,78° S; 45,36° W), São Sebastião (23,76° S; 45,41° W) e Ubatuba (23,43° S; 45,07° W). Esses pontos representam a posição aproximada do centro urbano de cada cidade, permitindo a comparação direta entre as séries horárias observadas pelo CEMADEN e aquelas simuladas pelos experimentos do WRF com resoluções espaciais de 3 km e 1 km.

2.3. Análises

A análise do evento extremo de 18 a 19 de fevereiro de 2023 foi conduzida a partir de uma sequência estruturada de produtos observacionais e de reanálise, permitindo caracterizar tanto o comportamento local da precipitação quanto o ambiente atmosférico de grande escala responsável pela sua intensificação.

O primeiro passo consistiu na visualização do acumulado total de precipitação entre os dias 18 e 19, utilizando dados das estações do CEMADEN. Esse produto é essencial para identificar espacialmente onde ocorreu a maior concentração de chuva e evidenciar contrastes entre municípios e micro-regiões afetadas. Em seguida, examinou-se a evolução diária do acumulado para Bertioga, Caraguatatuba, São Sebastião, Ilhabela e Ubatuba. Essa etapa permite compreender o tempo do evento, quando o volume precipitado começou a aumentar,

quando atingiu seu pico e quando começou a diminuir.

Utilizou-se o MERGE para uma visão contínua e espacialmente representativa da precipitação, inclusive em áreas sem estações. O radar é o produto mais importante para caracterizar os processos físicos do evento, pois revela: células convectivas isoladas, formação de linhas de instabilidade, regeneração de núcleos sobre uma mesma área, presença de sistemas convectivos de mesoescala (SCMs). Assim, as imagens CAPPI a 3 km permitem acompanhar a evolução temporal da tempestade em detalhe, evidenciando deslocamento, organização interna e intensidade dos núcleos convectivos.

As cartas sinóticas fornecem o cenário de grande escala responsável pela organização da atmosfera regional. São essenciais para identificar: posição de frentes, sistemas de alta e baixa pressão, cavados, padrões de convergência de umidade e intensidade dos ventos de superfície. Já as imagens de satélite do canal infravermelho permitem acompanhar a evolução das topos das nuvens, destacando: resfriamento dos topos, expansão de áreas profundas de nuvens, persistência e deslocamento de sistemas convectivos. Este produto complementa o radar ao mostrar o comportamento das nuvens em uma escala maior, inclusive onde o radar não cobre.

Na análise sinótica são também mostrados os mapas de umidade relativa média entre 1000–500 hPa, combinados com o geopotencial em 500 hPa e os movimentos verticais do ar (ω), que forneceram um diagnóstico essencial do ambiente termodinâmico que sustentou o evento extremo; cisalhamento vertical do vento (1000–500 hPa), espessura 500–1000 hPa e geopotencial em 500 hPa, permitiu avaliar a organização dinâmica da atmosfera.

A etapa seguinte do trabalho é de validação das simulações do modelo WRF em modo CP, utilizando resoluções horizontais de 3 km e 1 km. A avaliação foi realizada a partir de pontos de grade representativos das principais cidades do litoral norte de São Paulo: Caraguatatuba (23,62° S, 45,41° W), Ilhabela (23,78° S, 45,36° W), São Sebastião (23,76° S, 45,41° W) e Ubatuba (23,43° S, 45,07° W), cada uma delas representada por um único grid point no domínio modelado. A precipitação horária simulada nesses pontos foi então comparada diretamente com as observações do CEMADEN, permitindo analisar o desempenho dos modelos na reprodução da variabilidade temporal e da intensidade dos eventos de chuva registrados durante o período estudado para o período do dia 17 (1700 UTC) até o

dia 19 (1700 UTC) em fevereiro de 2023.

A comparação empregou duas métricas, sendo viés (bias) e correlação temporal de Pearson. O bias indica se o modelo tende a superestimar ou subestimar os valores simulados:

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Mi - Oi)$$

Onde na equação o Mi representa o valor do modelo (3 ou 1 km), Oi é o valor observado com os dados dos pluviômetros do CEMADEN, e N corresponde ao número total de pares de dados, conforme apresentado em metodologia clássica para análise de séries temporais e validação de modelos (MONTGOMERY; JENNINGS; KULAHCI, 2015).

Tabela 2 - Categorias de interpretação para a métrica de viés (bias).

Valor de Bias	Interpretação
Bias > 0	O modelo superestima os valores observados (chove mais no modelo do que na realidade).
Bias < 0	O modelo subestima os valores observados (chove menos no modelo do que na realidade).
Bias = 0	Não há erro médio sistemático; o modelo não tem tendência fixa.

A correlação de Pearson é utilizada para investigar relações entre variáveis, é um número adimensional e seus resultados compreendem: $-1 \leq r \leq 1$ (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

Tabela 3 - Categorias de interpretação para o coeficiente de correlação de Pearson, utilizadas para avaliar a força e a direção linear entre variáveis, conforme a amplitude de valores de r .

Valores de r (+ ou -)	Interpretação
0,00	Ausência de correlação
0,01 a 0,19	Correlação muito fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 0,99	Correlação muito forte
1,00	Correlação perfeita

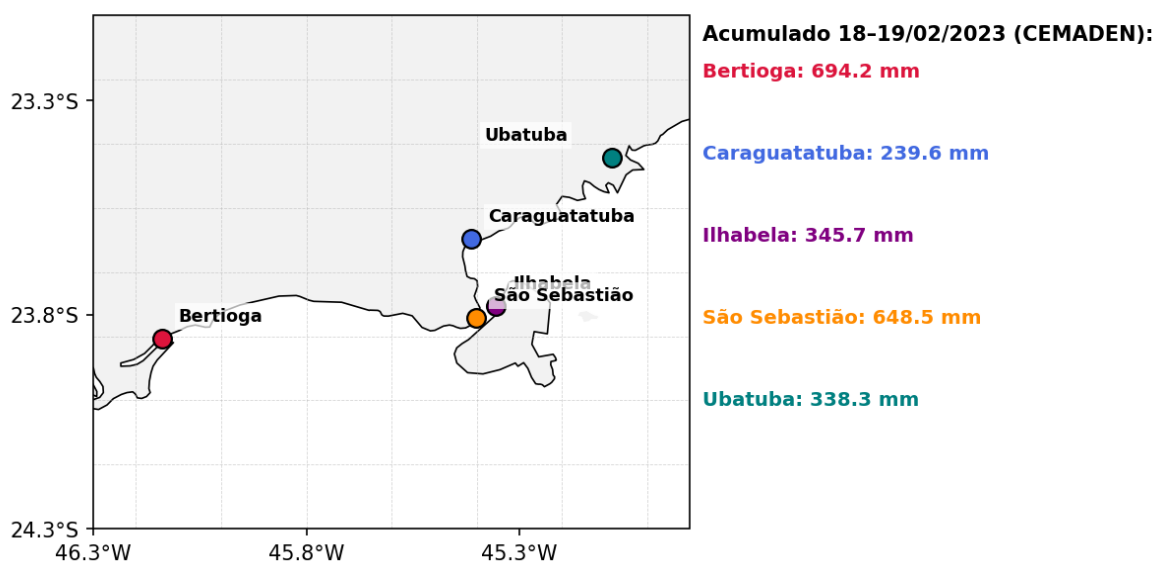
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evento Extremo de Precipitação

A Figura 3 mostra o total acumulado de precipitação (mm) registrado entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 nas estações que registraram os maiores acumulados de precipitação nas cidades de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba. A cidade de Bertioga na estação da Praia de Guaratuba registrou o acumulado de 694,22 mm, Caraguatatuba na estação de Tabatinga registrou 239,6 mm, Ilhabela com a estação de São Pedro registrou 345,7 mm, a cidade de São Sebastião registrou o acumulado de 648,5 mm e Ubatuba com a estação da Praia do Lázaro registrou 338,3 mm.

Figura 3 - Acumulado total de precipitação (mm) registrado entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 em cidades do litoral norte de São Paulo e em Bertioga. Os valores indicam o total acumulado em estações do CEMADEN.

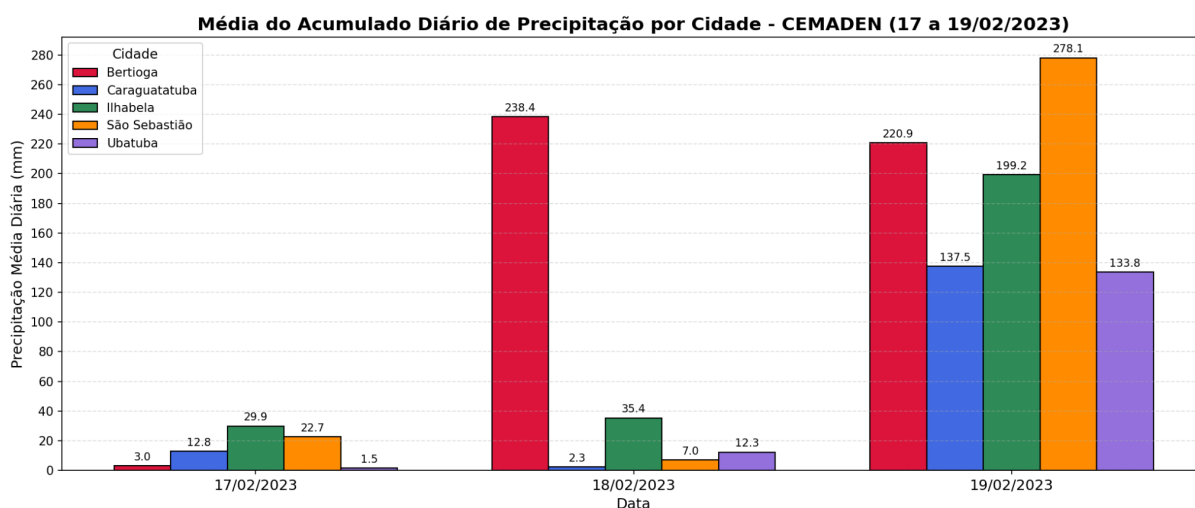
Acumulado de precipitação (mm) no Litoral Norte e Bertioga



Fonte: Autor.

A Figura 4 mostra a média do total acumulado diário de precipitação para os dias 17, 18 e 19 de fevereiro de 2023, registradas pelas estações do CEMADEN, abrangendo os municípios de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba. A evolução temporal mostra que o evento de precipitação extrema foi precedido por precipitação fraca nos dias 17 e 18, seguida de uma grande intensificação no dia 19/02, caracterizando o auge do episódio extremo.

Figura 4 - Média do acumulado diário de precipitação (mm) pelas estações do CEMADEN nos municípios de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba, entre os dias 17, 18 e 19 de fevereiro de 2023 (0000 UTC - 2359 UTC).



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 4 que analisa a média do acumulado diário precipitação por cidade no dia 17 de fevereiro indica que as chuvas no litoral norte e Bertioga foram fracas, atingindo seu maior acumulado na cidade de Ilhabela com 29,9 mm. Isso se repete no dia 18 para as cidades do litoral norte onde Ilhabela atinge 35,4 mm, diferente da cidade de Bertioga que registra 238,4 mm. No dia 19, os valores atingiram 278,1 mm em São Sebastião, 220,9 mm na cidade de Bertioga, 199,2 mm em Ilhabela, 137,5 mm em Caraguatatuba e 133,8 mm em Ubatuba no dia 19 de fevereiro, identificando que a chuva no dia foi bem intensa.

Diferente da Figura 4 que mostra a média diária dos acumulados das estações das cidades do litoral norte e Bertioga, na Tabela 2 é mostrada o total acumulado da chuva nas estações do CEMADEN disponíveis no litoral norte do dia 18 às 0000 UTC até 2359 UTC do dia 19 de fevereiro. O objetivo é mostrar a variabilidade registrada pelas estações em cada ponto da cidade pelas estações.

Tabela 4 - Total acumulado de precipitação entre o dia 18 (0000 UTC) até o dia 19 (2359 UTC) de fevereiro de 2023 nas estações pluviométricas do CEMADEN, localizadas nas cidades de Bertioga, Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba. A tabela apresenta os nomes das estações, suas respectivas cidades e o acumulado de chuva (mm).

NOME DA ESTAÇÃO	CIDADE	ACUMULADO (mm)
Praia de Guaratuba	Bertioga	694,22
Barra do Una	São Sebastião	648,5
Juquehy 2	São Sebastião	591,8
Juquehy	São Sebastião	532,3
Boiçucanga	São Sebastião	504,1
Toque Toque Pequeno	São Sebastião	403
Jardim Vista Linda	Bertioga	362,2
São Pedro	Ilhabela	345,7
Praia do Lázaro	Ubatuba´	338,3
Jardim Lindo	Bertioga	321,4
Praia Dura	Ubatuba´	280,9
Perequê-Mirim	Ubatuba´	269,2
Maranduba	Ubatuba´	256,2
Tabatinga 2	Caraguatatuba	239,6
Massaguaçu	Caraguatatuba	219,2
Tabatinga	Caraguatatuba	215,3
Massaguaçu 2	Caraguatatuba	209
Rio do Ouro	Caraguatatuba	176,2
Rio do Ouro 2	Caraguatatuba	166,4
Jaraguá	Caraguatatuba	156,8
Getuba	Caraguatatuba	152,9
Praia Grande	São Sebastião	148,6
Ubatumirim	Ubatuba´	147
Martim de Sá	Caraguatatuba	143,1
Praia das Cigarras	Sebastião	138,9
Jardim Casa Branca 2	Caraguatatuba	138,8
Enseada	São Sebastião	129,6
Barra Velha	Ilhabela	123,5
Morro do Abrigo	São Sebastião	110,8
Indaiá	Caraguatatuba	99,9
Rio Claro	Caraguatatuba	99,9
Tinga	Caraguatatuba	96,4
Itamambuca	Ubatuba	92,5

Marafunda	Ubatuba	92,4
Ipiranguinha	Ubatuba	76,5
Estufa II	Ubatuba	76,1
Centro 2	Ubatuba	50,8
Pontal da Cruz	São Sebastião	42,1
Rio Grande	Ubatuba	40
Picinguaba	Ubatuba	33,7
Itatinga	São Sebastião	15,2
Jardim Casa Branca	Caraguatatuba	0,6
Fazenda Serra Mar	Caraguatatuba	0

Fonte: Autor.

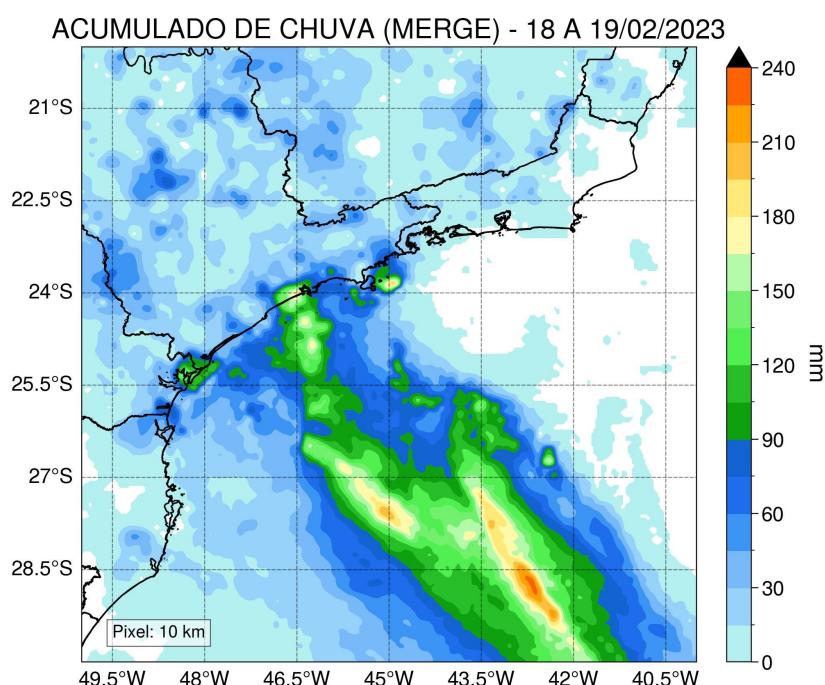
Os maiores acumulados de precipitação da Tabela 2 ocorreram no município de Bertioga na estação de Praia de Guaratuba (694,22 mm) e São Sebastião na estação da Barra do Una (648, 5 mm), seguido de Juquehy 2 (591,8 mm), Juquehy (532,3 mm) e Boiçucanga (504,1 mm) provenientes do sul da costa do município. Tais valores são considerados bem diferentes das médias climatológicas de precipitação de Bertioga que registra 342 mm e São Sebastião de 222 mm no mês de fevereiro (CLIMATEMPO).

Diferente dos valores registrados por estações que são provenientes do sul da costa da cidade de São Sebastião, as estações que ficam localizadas próximas à região central e norte registraram acumulados bem menores tais como a estação de Pontal da Cruz (42,1 mm) e Itatinga (15,2 mm). Essa diferença também foi observada na cidade de Caraguatatuba, onde as estações que estavam posicionadas ao norte como Tabatinga 2 (239,6 mm) registraram maiores acumulados e outras estações próximas localizadas ao sul obtiveram resultados bem menores como Jardim Casa Branca (0,6 mm) e Fazenda Serra Mar (0 mm). O mesmo se aplica para o município de Ubatuba onde registraram na Praia do Lázaro (338,3 mm) localizada ao sul e volumes menores em direção ao norte Itamambuca (92,5 mm) e Picinguaba (33,7 mm). Num mesmo município como Caraguatatuba, diferentes fatores como a orografia, proximidade da Serra do Mar e oceano impactam na distribuição espacial da chuva nas cidades.

A análise dos dados observacionais de superfície é complementada pela Figura 5, que apresenta o acumulado de precipitação entre os dias 18 e 19 (0000 - 2359 UTC) de fevereiro de 2023, obtido a partir do produto MERGE/CPTEC-INPE,

com resolução espacial de 10 km. Nessa figura é possível identificar o maior volume de precipitação acumulada no oceano Atlântico Sul com valores entre 230-240 mm no litoral norte. Destaca-se que sobre o continente o MERGE não conseguiu reproduzir os valores observados nas estações. Pelo MERGE a precipitação no litoral de São Paulo está associada a um ramo frontal, responsável por organizar e direcionar um intenso e contínuo fluxo de umidade do oceano diretamente para a barreira orográfica do litoral norte de São Paulo (mais detalhes na seção 3.2 sobre a análise sinótica).

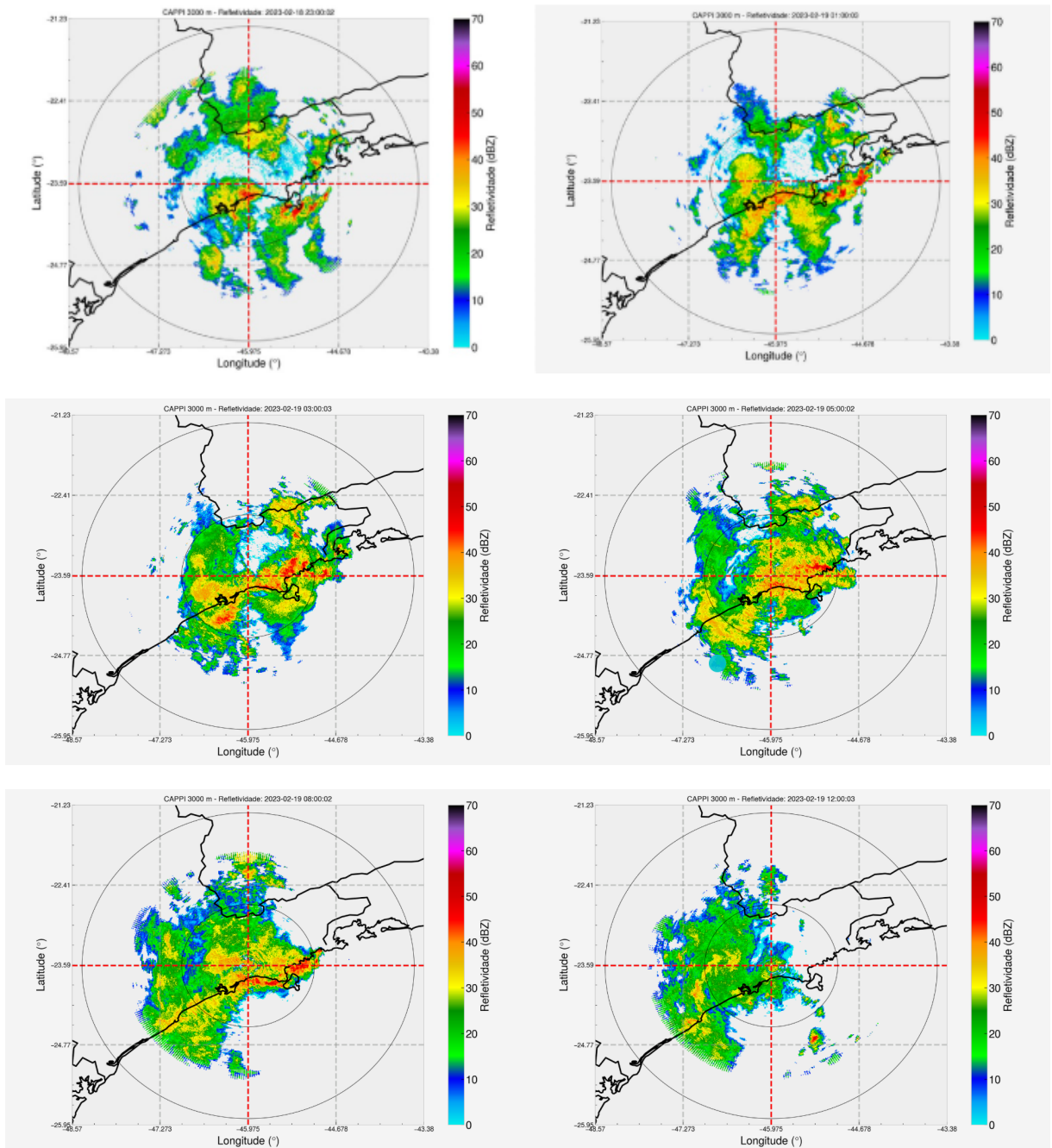
Figura 5 - Acumulado de precipitação (mm) entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, obtido a partir do produto MERGE/CPTEC-INPE, com resolução espacial de 10 km.



Fonte: Autor

A sequência de imagens CAPPI a 3,0 km (Figura 6) mostra a evolução da refletividade sobre o litoral norte do estado de São Paulo entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023.

Figura 6 - Painel de imagens do radar meteorológico (subproduto CAPPI a 3,0 km de altitude), referentes ao dia 18 e 19 de fevereiro ilustrando a evolução da tempestade que aconteceu no litoral norte.



Fonte: Autor

Durante o dia 18 às 2300 UTC, observa-se a presença de células convectivas isoladas, com valores de refletividade predominantemente entre 20 e 35 dBZ. Esses valores são típicos de convecção inicial ainda pouco organizada, associada ao crescimento de núcleos convectivos em estágios de desenvolvimento (HOUZE, 2004). No entanto, ao longo da madrugada do dia 19, a estrutura se intensifica e passa a adquirir uma organização linear, característica de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM).

Entre 00:00 e 0500 UTC do dia 19, nota-se que a banda convectiva se desloca do oceano em direção ao litoral norte, tornando-se mais extensa e com núcleos de refletividade mais elevados. A presença de áreas com valores entre 40 e 50 dBZ indica precipitação moderada a forte, típica de correntes ascendentes vigorosas e de hidrometeoros maiores (como gotas grandes e granizo pequeno), que são marcas da fase madura dos SCMs (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010). A intensificação da convecção sobre a faixa costeira é compatível com o aporte contínuo de ar quente e úmido vindo do oceano, favorecendo o mecanismo de advecção marítima + levantamento orográfico proporcionado pela Serra do Mar — frequentemente associado a eventos extremos de precipitação na região (DOS SANTOS; GALVANI, 2019; MONTEIRO, 1973).

Por volta de 1200 UTC do dia 19, observa-se uma perda significativa de organização e redução nos valores de refletividade. Assim, a sequência de imagens ilustrada na Figura 6 descreve de maneira clara o ciclo de vida completo do sistema precipitante que afetou o litoral norte: início com células isoladas, organização em banda convectiva intensa e posterior dissipação.

Em resumo, o sistema convectivo observado nas imagens teve duração aproximada de 13 horas, iniciando-se por volta das 23:00 UTC do dia 18, quando surgiram as primeiras células isoladas, e se estendendo até cerca de 12:00 UTC do dia 19, momento em que já apresentava sinais claros de enfraquecimento. Sua trajetória foi predominantemente oceano para o continente, com avanço progressivo em direção ao Litoral Norte de São Paulo, acompanhando o fluxo de nordeste que prevalecia na região. A intensidade máxima foi registrada entre 00:00 e 05:00 UTC, quando as imagens exibiram núcleos persistentes entre 40 e 50 dBZ, indicando precipitação moderada a forte e convecção profunda bem organizada, estágio compatível com o ápice do ciclo de vida de um Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM). Após esse período, o sistema passou para a fase de dissipação, com redução da organização espacial, enfraquecimento das correntes ascendentes e queda nos valores de refletividade. Assim, o evento apresentou um ciclo de vida completo: gênese oceânica, amadurecimento e intensificação sobre a costa e dissipação no final da manhã, coerente com a literatura clássica sobre SCMs (HOUZE, 2004; MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010).

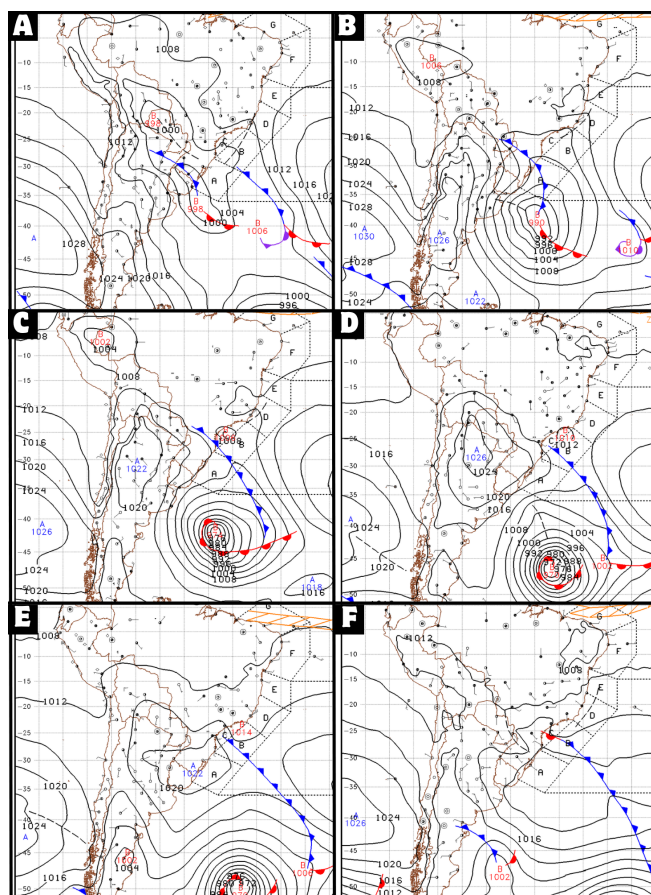
3.2. AMBIENTE SINÓTICO

O litoral norte de São Paulo é historicamente marcado por eventos de precipitação extrema e características de relevo e solos que propiciam o desenvolvimento de desastres naturais como escorregamentos, inundações, entre outros (DOS SANTOS; GALVANI, 2019).

Para iniciar a caracterização do ambiente sinótico a Figura 7 apresenta as cartas sinóticas do dia 17/02/2023 ao dia 19/02/2023 às 0000 e 1200 UTC. A carta sinótica das 0000 UTC do dia 17 de fevereiro (Figura 7.A) mostra um cavado sobre a região sudeste e a atuação de uma frente fria se estendendo desde o sul do Paraguai até o oceano Atlântico. Esse sistema está associado a um centro de baixa pressão de 998 hPa. Na análise das 1200 Z (Figura 8.B) do mesmo dia, a frente fria avança sobre o sul do Brasil e continua o predomínio do cavado sobre o litoral da região sudeste.

Na carta das 0000 Z do dia 18 (Figura 8.C), a frente fria já atinge a latitude de 25°S enquanto na costa do sudeste do Brasil, predomina uma área de baixa pressão. Esta se encontra na interface da frente fria a sul e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) a nordeste. Na retaguarda da frente há uma alta pós-frontal com centro de 1022 hPa. A situação às 1200 UTC do mesmo dia mostra que a frente continua atingindo 25°S, mais deslocada para o oceano. O padrão sinótico das 1200 UTC se mantém nos horários sinóticos do dia 19 (Figuras 8.F).

Figura 7 - Cartas Sinóticas de Superfície elaboradas pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) nos dias 17, 18 e 19 de fevereiro de 2023. (A) 17/02/2023 - 00Z, (B) 17/02/2023 - 12Z, (C) 18/02/2023 - 00Z, (D) 18/02/2023 - 12Z, (E) 19/02/2023 - 00Z e (F) 19/02/2023 - 12, mostrando a pressão nível médio do mar (hPa), frentes e synop sobre o continente..

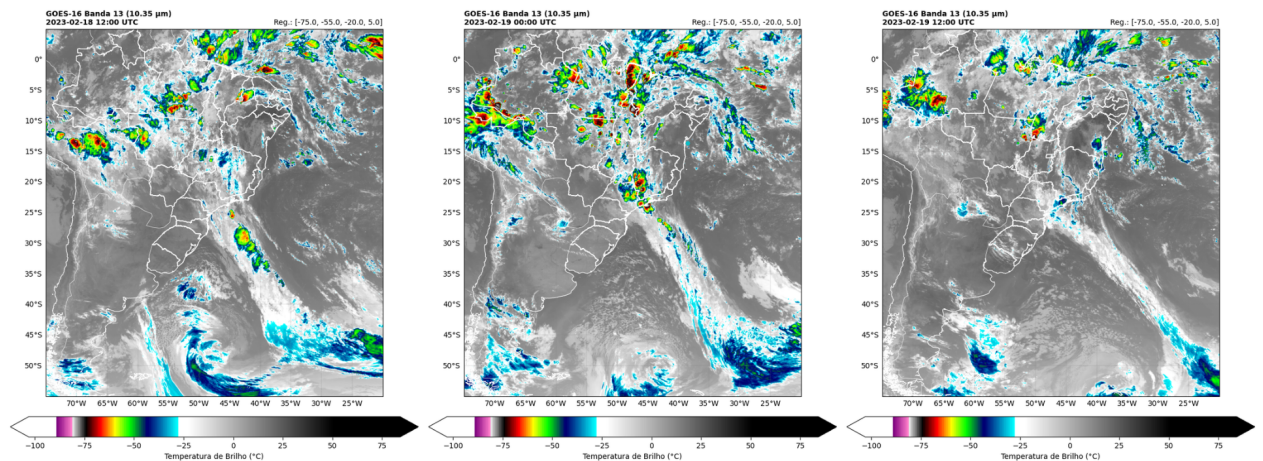


Fonte: CHM/Marinha do Brasil (2023).

Com o intuito de apresentar de forma mais detalhada a organização e evolução dos sistemas convectivos associados ao evento extremo de precipitação, foram analisadas imagens do satélite GOES-16 (canal 13) referentes ao período de 17 a 19 de fevereiro de 2023 (Figura 8). Essas imagens mostram a disposição e o desenvolvimento das áreas de convecção profunda (cores verde, amarelo, laranja e vermelho, associadas a temperaturas de brilho entre -40°C e -65°C), bem como o avanço e intensificação das nebulosidades associadas à frente fria identificada nas cartas sinóticas. Os núcleos de topos de nuvens mais frios (cores vermelho-escuro, magenta e roxo, típicas de temperaturas inferiores a -70°C) indicam a presença de

sistemas convectivos de grande intensidade e persistência. A banda frontal se conecta com os aglomerados convectivos na região do litoral de São Paulo.

Figura 8 - Imagens do satélite GOES-16 (canal 10,3 μm) referente ao período entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023.



Fonte: CPTEC/INPE

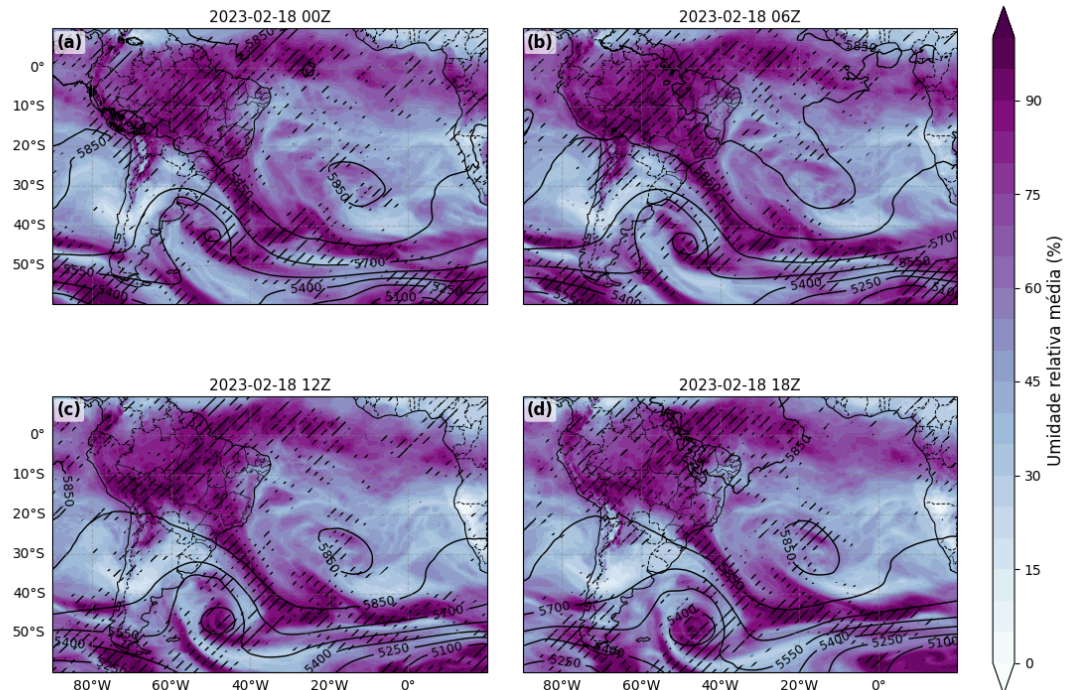
Na Figura 9 mostra-se a umidade relativa e movimento vertical (ω); altura geopotencial em 500 hPa, divergência em altos níveis (250 hPa) e o cisalhamento vertical entre 1000 e 500 hPa.

Nos campos de 500 hPa, é possível avaliar a contribuição da instabilidade dinâmica por meio da configuração das linhas de altura geopotencial. A presença de um cavado sobre o Sudeste gera curvatura ciclônica do escoamento, favorecendo a advecção de vortacidade ciclônica em níveis médios. Quando esse padrão coincide com valores negativos de ω , representando movimento vertical ascendente, evidencia um forte forçamento dinâmico para a subida do ar. Os campos de 250 hPa mostram um padrão de divergência em altos níveis associado à intensificação do jato subtropical, reforçando o ambiente favorável ao desenvolvimento convectivo. Já o cisalhamento vertical do vento fornece subsídios para compreender a organização e a persistência do sistema convectivo que resultou nos acumulados extremos de precipitação registrados entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023.

Figura 9 - Mapa da umidade relativa média entre 1000-500 hPa (escala da barra de cor - roxo-azulado), altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas - em metros) e movimentos verticais do

ar (ω - hachuras indicando ascendência, $\omega < 0$) para o dia 18/02, nos horários de 0000 UTC (a), 0600 UTC (b), 1200 UTC (c) e 1800 UTC (d).

Mapa da média da umidade relativa, altura geopotencial em 500 hPa e ω em 500 hPa - 18/02/2023 - 00, 06, 12, 18 UTC

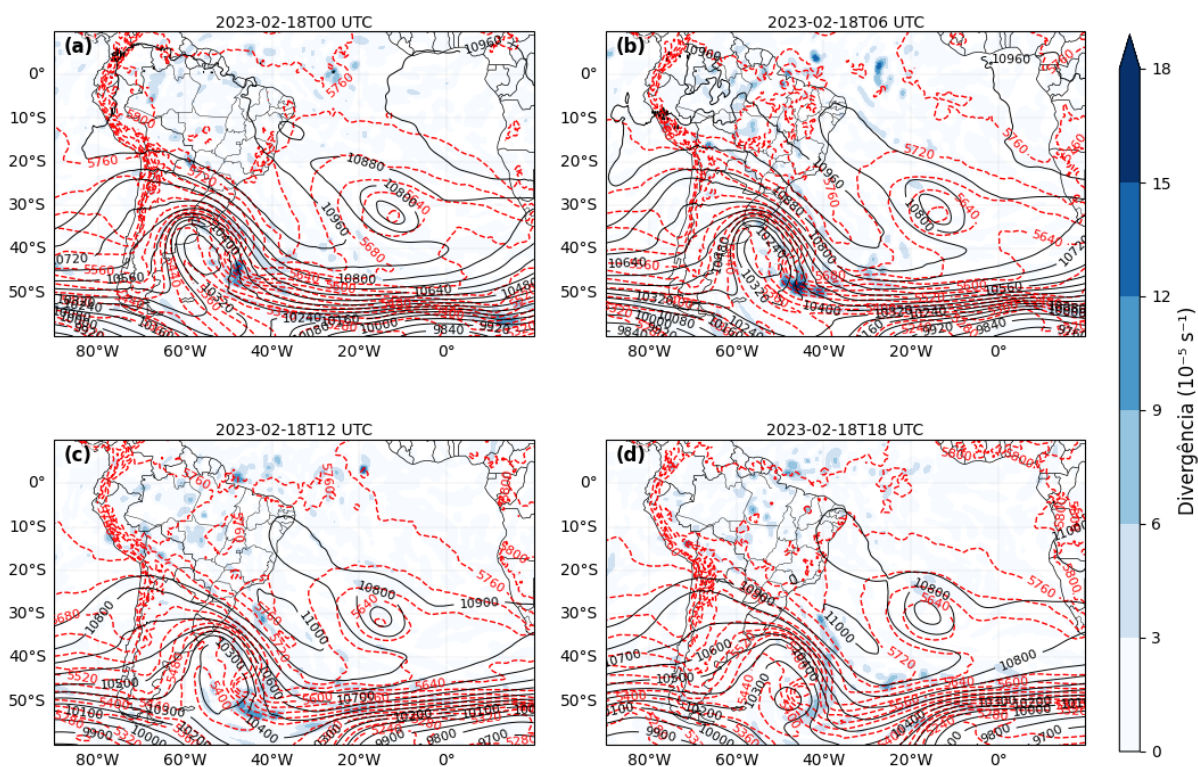


Fonte: Autor

Na Figura 9 a–d, observa-se um núcleo de alta umidade relativa média de 500-1000 hPa ($>80\%$) sobre o sudeste do Brasil, associado à presença de movimentos ascendentes (ω negativo) e ao estabelecimento de uma região de cavado em altos níveis (Figura 9.a). Essa configuração pode ser um facilitador para o levantamento de ar úmido, criando condições propícias à formação de nuvens convectivas profundas. De fato, a Figura 10 (a-d) mostra a divergência em altos níveis (250 hPa), especialmente sobre o litoral paulista e o sul de Minas Gerais, o que reforça a ventilação superior e a sustentação do movimento ascendente. A sobreposição entre os fatores de alta umidade média, ascensão do ar e divergência em altos níveis, com destaque na Figura 10.b onde observamos valor de divergência de $3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, o mesmo se repete para a Figura 10.c com o valor de $3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, fazendo com que caracterize um ambiente altamente favorável à convecção organizada.

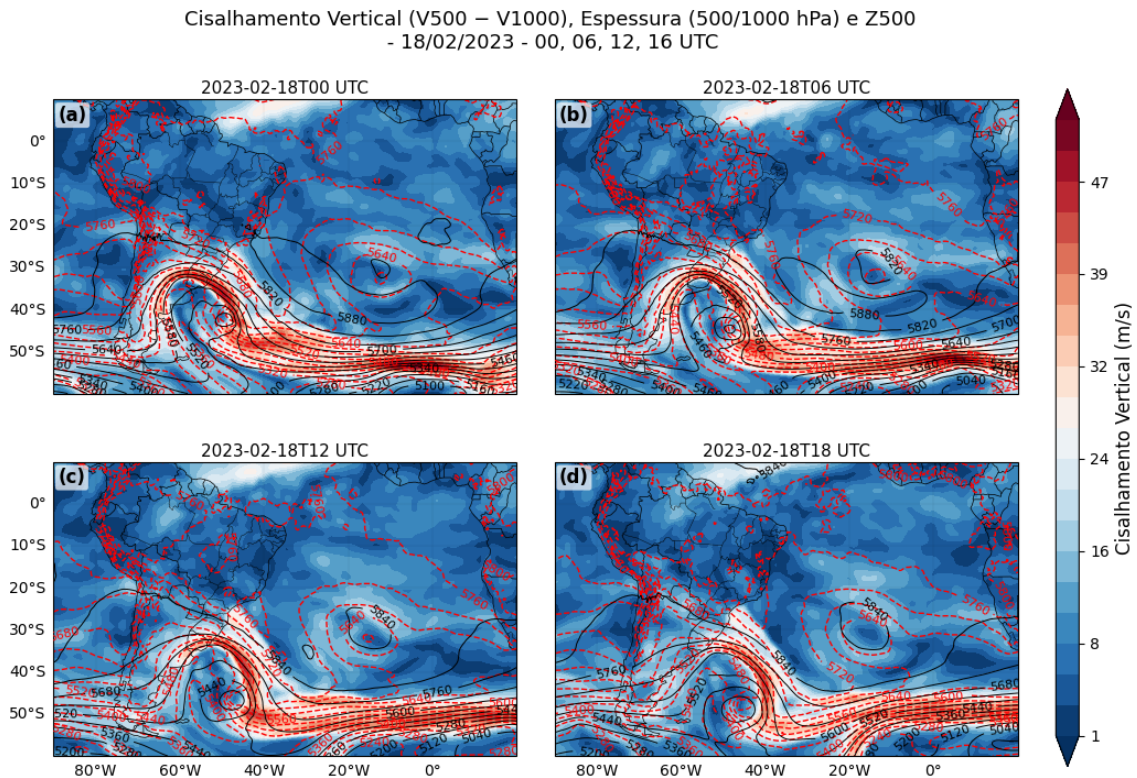
Figura 10 - Espessura 500-1000 hPa (linhas tracejadas em vermelho), altura geopotencial em 250 hPa (linhas pretas) e a divergência em 250 hPa (barra de cores) para o dia 18/02, nos horários de 0000 UTC (a), 0600 UTC (b), 1200 UTC (c) e 1800 UTC (d).

Espessura 500/1000 hPa (tracejado vermelho), Altura Geopotencial 250 hPa (contornos pretos)
e Divergência em 250 hPa (preenchimento) — 18/02/2023 - 00, 06, 12 e 18 UTC



Fonte: Autor

Figura 11 - Cisalhamento vertical do vento (1000-500 hPa) (barra de cores), da espessura 500-1000 hPa (linhas tracejadas em vermelho) e altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas), para o dia 18/02, nos horários de 0000 UTC (a), 0600 UTC (b), 1200 UTC (c) e 1800 UTC (d).



Fonte: Autor

Na Figura 11 (a-d), o cisalhamento vertical é de 30 m s^{-1} sobre o Atlântico adjacente e o litoral paulista devido a frente fria que está acompanhando esta área, especialmente entre 1800 UTC. Esse forte cisalhamento na camada 1000–500 hPa pode auxiliar a organização e longevidade ao sistema convectivo (Rotunno, Klemp e Weisman, 1988; Houze Jr., 2004), uma vez que a separação entre correntes ascendentes e descendentes dentro das células favorece a regeneração contínua de novas torres convectivas.

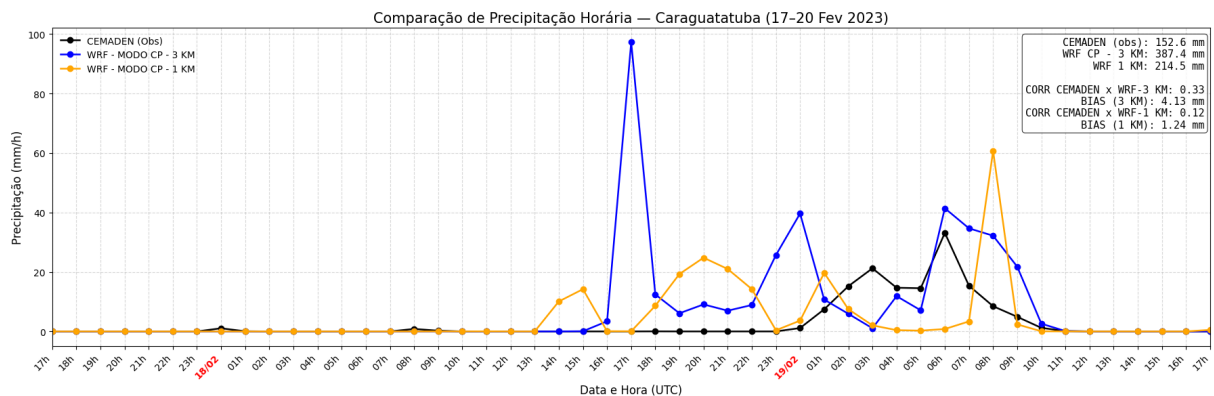
De modo geral, a sinergia entre alta umidade em médios níveis, omega negativo persistente, divergência em altos níveis e cisalhamento intenso delineou um ambiente favorável ao desenvolvimento de sistemas convectivos

3.3.PERFORMANCE DO WRF EM MODO CP

As Figuras 12 a 15 apresentam a comparação entre a precipitação horária observada pelo CEMADEN e as simulações do modelo WRF na resolução espacial

de 3 e 1 km para os municípios de Caraguatatuba, Ilhabela, São Sebastião e Ubatuba, durante o período de 17 a 20 de fevereiro de 2023.

Figura 12 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN (linha preta) e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido - 3 km (linha azul) e Convecção Permitido - 1 km (linha amarela), para o municípios de Caraguatatuba, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.



Fonte: Autor

Para Caraguatatuba, o WRF de 3 km apresentou correlação de 0,33 e bias de 4,13 mm, indicando uma tendência de superestimativa da precipitação. Já o WRF de 1 km obteve correlação de 0,12 e bias de 1,24 mm, também com superestimativa, porém menos pronunciada.

Gráfico de comparação de precipitação horária para Ilhabela (17-20 Feb 2023). O eixo Y representa a precipitação em mm/h (0 a 50), e o eixo X representa a data e hora em UTC (17h a 17h). O gráfico compara observações (Obs) com duas simulações de precipitação (CP 3 KM e CP 1 KM).

Legenda:

- CEMADEN (Obs)
- WRF - CP 3 KM
- WRF - CP 1 KM

Resumo de estatísticas de desempenho (calculadas a partir do gráfico):

- CEMADEN (obs): 264.5 mm
- WRF CP - 3 KM: 223.1 mm
- WRF 1 KM: 99.4 mm
- CORR (Obs x CP 3 KM): 0.04
- BIAS 3 KM: -0.47 mm
- CORR (Obs x CP 1 KM): 0.59
- BIAS 1 KM: -2.25 mm

Em Ilhabela, o modelo WRF 3 km apresentou correlação de 0,04 e bias de -0,47 mm, indicando leve subestimativa. Por sua vez, o WRF 1 km resultou em correlação de 0,59 e bias de -2,25 mm, também com tendência de subestimativa, porém com correlação substancialmente superior.

Comparação de Precipitação Horária — São Sebastião (17-20 Fev 2023)

Legenda:

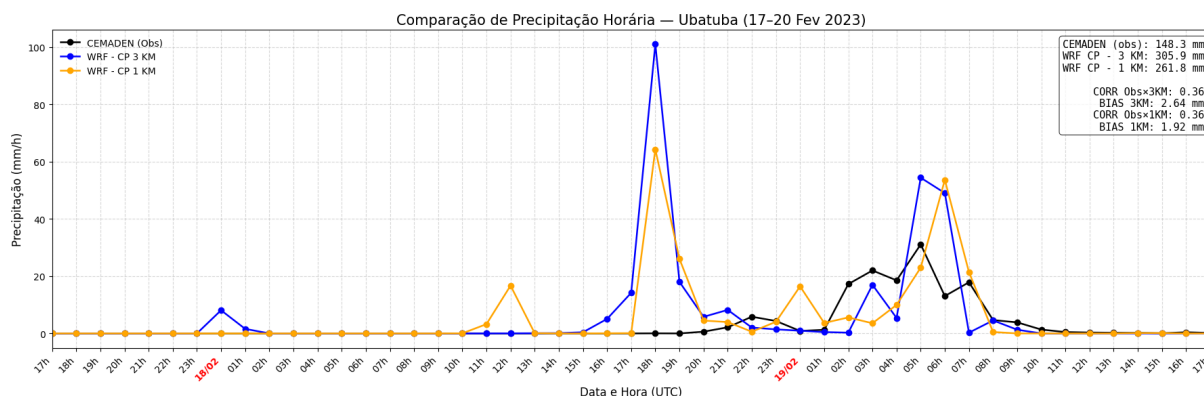
- CEMADEN (Obs)
- WRF CP 3 KM
- WRF CP 1 KM

Box de Estatísticas:

- CERADEN (obs): 311.4 mm
- WRF CP 3 KM: 284.7 mm
- WRF CP 1 KM: 237.1 mm
- CORR Obsx3KM: 0.89
- BIAS 3KM: -0.52 mm
- CORR Obsx1KM: 0.28
- BIAS 1KM: -0.82 mm

Para São Sebastião, o WRF 3 km obteve correlação de 0,09 e bias de $-0,52$ mm, apontando subestimativa da precipitação. O WRF 1 km apresentou correlação de 0,28 e bias de $-0,82$ mm, igualmente com tendência de subestimativa, mas com melhor ajuste temporal.

Figura 15 - Comparação da precipitação horária (mm) observada pelo CEMADEN (linha preta) e simulada pelo modelo WRF nas configurações Convecção Permitido - 3 km (linha azul) e Convecção Permitido - 1 km (linha amarela), para o municípios de São Sebastião, entre os dias 17 (1700 UTC) e 19 (1700 UTC) de fevereiro de 2023.



Fonte: Autor

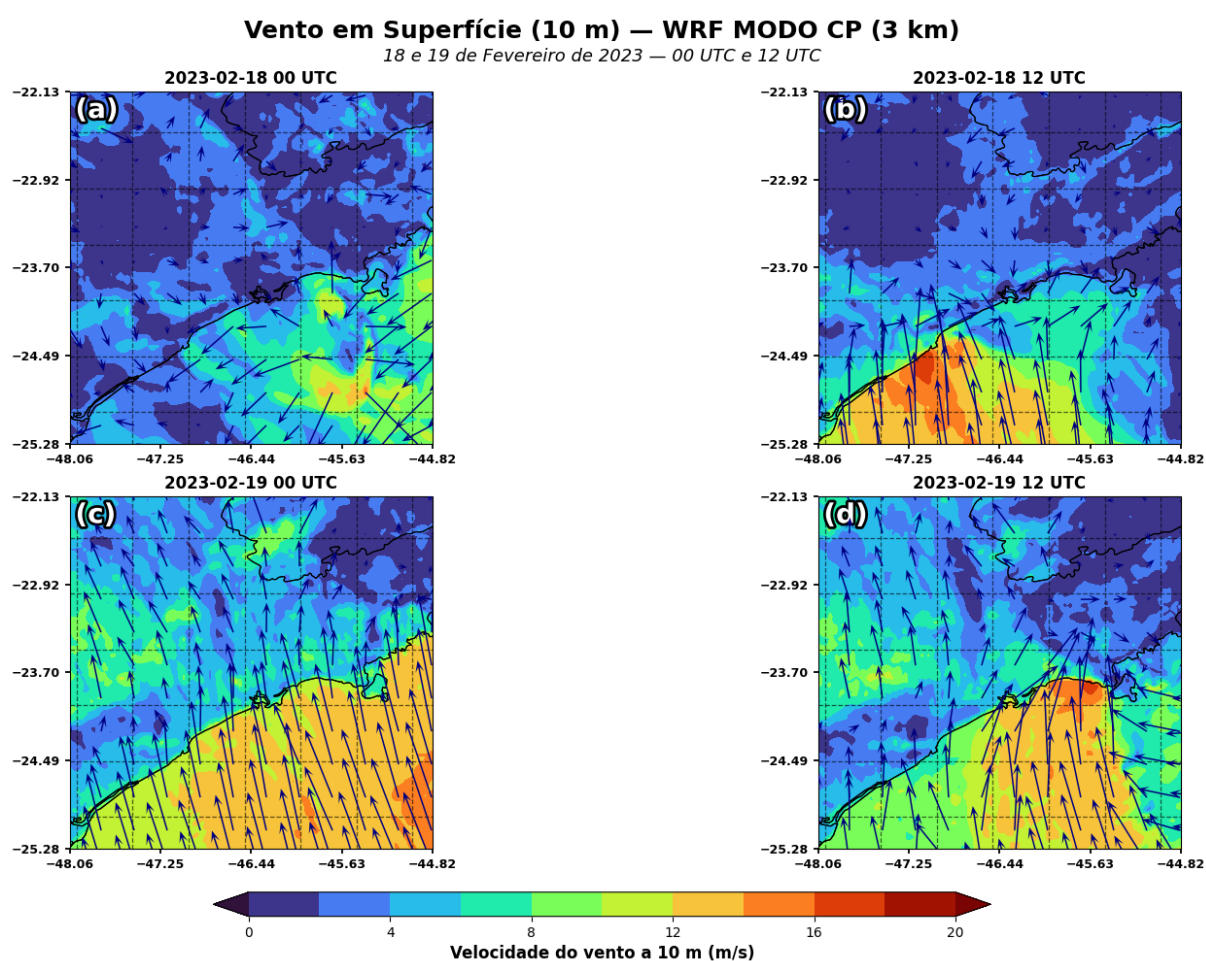
Em Ubatuba, o WRF 3 km apresentou correlação de 0,36 e bias de 2,64 mm, caracterizando superestimativa da precipitação. O WRF 1 km registrou correlação igual a 0,36, porém com bias de 1,92 mm, também com tendência de superestimativa, porém de menor magnitude.

Com base na análise das métricas estatísticas para os municípios do litoral norte, verifica-se que o modelo WRF, tanto na resolução de 1 km quanto em 3 km, não apresentou desempenho satisfatório na representação do evento extremo. Em ambas as configurações, observam-se correlações baixas, vieses elevados e dificuldades em reproduzir a variabilidade temporal das séries observadas. Esses resultados indicam que, apesar da maior resolução espacial do domínio de 1 km, nenhuma das simulações conseguiu representar adequadamente a intensidade e a evolução do sistema precipitante, evidenciando limitações importantes do modelo para esse tipo de evento e reforçando a necessidade de cautela na interpretação e no uso operacional das simulações.

A partir da análise temporal e comparativa das precipitações observadas e simuladas na Figura 12 à 15, evidencia-se que o episódio extremo de 18–19 de fevereiro de 2023 esteve associado não apenas a uma intensa convecção local, mas também a condições dinâmicas favoráveis ao transporte e à convergência de umidade. Para compreender com maior profundidade a influência desses mecanismos de escoamento na gênese e intensificação das chuvas, a Figura 16

apresenta os campos de velocidade do vento em superfície (10 m) simulados pelo modelo WRF em resolução espacial de 3 km, nos horários sinóticos de 0000 UTC e 1200 UTC entre os dias 18 e 19 de fevereiro. Essa análise permite identificar a evolução do padrão de ventos costeiros e oceânicos que atuaram como suporte dinâmico à convecção, evidenciando o papel da interação orográfica com a Serra do Mar na intensificação da precipitação sobre o litoral norte paulista.

Figura 16 – Campos simulados de velocidade do vento em superfície (10 m) obtidos pelo modelo WRF Modo CP (3 km) para os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, nos horários sinóticos de 0000, 1200 UTC.



Fonte: Autor (2025).

Durante o dia 18/02/2023, os ventos próximos à superfície tornam-se mais intensos e organizados, especialmente nas áreas oceânicas adjacentes ao litoral. Às 0000 UTC, o fluxo de nordeste sobre o Atlântico tropical se intensifica e se direciona para o continente, atingindo o litoral paulista. Já às 1200 UTC, esse padrão se torna

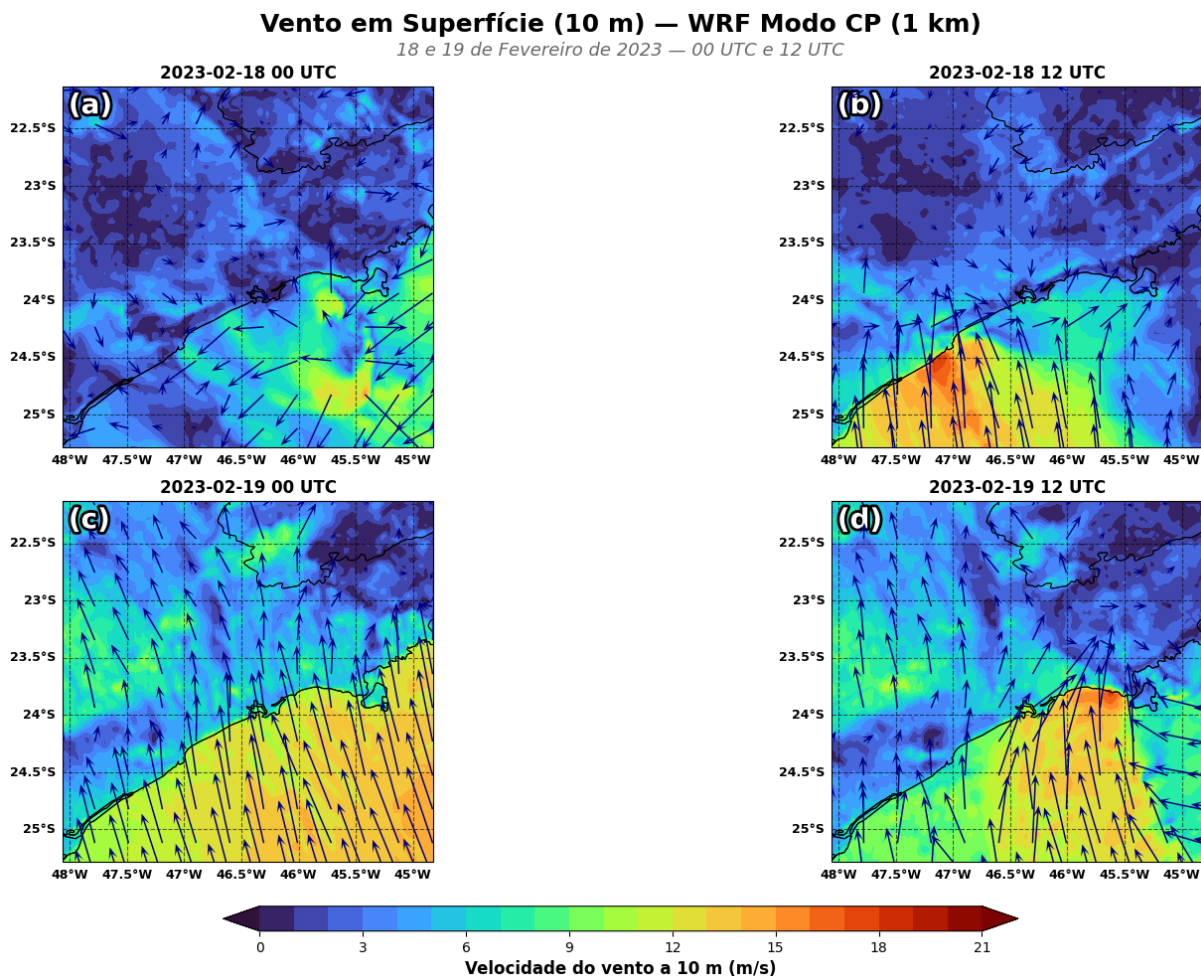
ainda mais expressivo, com ventos superiores a 12 m s^{-1} ao longo da faixa costeira, indicando o forte transporte de umidade marítima em direção à Serra do Mar.

O cenário se acentua no dia 19/02/2023 (0000 UTC), quando se observa o ápice da intensidade dos ventos superficiais, especialmente sobre o oceano adjacente a São Sebastião e Caraguatatuba, com velocidades superiores a 16 m s^{-1} . Esse escoamento intenso, canalizado ao longo da costa, reforça a convergência de umidade e o levantamento forçado das massas de ar úmidas sobre a Serra do Mar, mecanismo fundamental para o desencadeamento das chuvas extremas observadas acompanhado de um ambiente sinótico favorável a extrema precipitação entre 00Z e 09Z nas estações do CEMADEN. Às 1200 UTC do mesmo dia, ainda se nota a presença do jato costeiro, embora mais deslocado para o oceano, sinalizando o enfraquecimento gradual do sistema após o pico do evento.

Portanto, a evolução dos campos de vento em superfície ajuda a entender o impacto da topografia local na intensificação da precipitação no litoral norte paulista. Esses resultados corroboram a análise sinótica e os dados observacionais, demonstrando que o evento extremo foi consequência direta da interação entre sistemas sinóticos de escala regional (como a frente fria e o cavado sobre o Sudeste) e forçantes locais de mesoescala, notadamente a orografia da Serra do Mar e o jato costeiro úmido.

Portanto, a evolução dos campos de vento em superfície evidencia de forma clara o fortalecimento progressivo dos ventos de nordeste ao longo do período, especialmente entre os dias 18 e 19 de fevereiro. Esse padrão é reafirmado na Figura 17, que apresenta a simulação da velocidade do vento a 10 metros pelo modelo WRF modo convecção permitida (1 km), destacando a intensificação do escoamento marítimo em direção à costa e sua contribuição direta para o aporte de umidade e intensificação das precipitações sobre o litoral norte paulista.

Figura 17 – Velocidade do vento em superfície (10 m) simulada pelo modelo WRF com convecção permitida (1 km) para os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, nos horários 0000 UTC e 1200 UTC.



Fonte: Autor.

Verifica-se que os campos de vento simulados pelo modelo WRF com convecção permitida (1 km) indicam um fortalecimento progressivo dos ventos de nordeste entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023. Esse padrão evidencia a intensificação do escoamento marítimo, o qual transporta grandes volumes de umidade do oceano em direção à faixa costeira e à Serra do Mar, especialmente nas proximidades do litoral norte paulista.

Tal configuração atmosférica é coerente com o aumento expressivo da precipitação observado no mesmo período, sugerindo que a convergência dos ventos em superfície desempenhou um papel determinante na manutenção da instabilidade e na intensificação das chuvas extremas registradas sobre a região. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a influência direta da circulação de

baixa camada no aporte de umidade e na organização do sistema precipitante responsável pelo evento analisado.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo descrever o ambiente sinótico e avaliar a habilidade do modelo WRF em modo de Convecção Permitida (CP), na representação do evento extremo de precipitação ocorrido entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023 no litoral norte do estado de São Paulo.

As cartas sinóticas, as imagens do GOES-16 e os campos de reanálise ERA5 mostraram que o episódio da chuva ocorreu sob a interação entre uma frente fria quase estacionária, um cavado em médios níveis, um corredor persistente de umidade marítima e um forte cisalhamento vertical do vento. Essa combinação criou um ambiente sinótico favorável ao desenvolvimento de sistemas convectivos profundos e duradouros, que também teve influência orográfica na Serra do Mar. A convergência costeira de ventos de nordeste, identificada nos campos de 3 km e 1 km do WRF, reforçou continuamente o aporte de umidade, contribuindo para a manutenção de células convectivas organizadas e para a elevada assimetria espacial da chuva.

A avaliação das simulações do WRF em modo de Convecção Permitida revelou diferenças substanciais entre as cidades analisadas e também entre as resoluções de 3 km e 1 km. Em Caraguatatuba, o modelo apresentou correlação baixa em ambas as resoluções (0,33 em 3 km e 0,12 em 1 km), com vieses positivos de 4,13 mm e 1,24 mm. Em Ilhabela, enquanto o WRF 3 km teve correlação praticamente nula (0,04), o domínio de 1 km apresentou maior coerência temporal (0,59), embora com subestimativa expressiva (bias = -2,25 mm). Para São Sebastião, onde foram observados acumulados superiores a 600 mm em 24h, a correlação permaneceu baixa nas duas configurações (0,09 e 0,28), com viés negativo (-0,52 e -0,82 mm). Em Ubatuba, ambos os experimentos mostraram correlação moderada (0,36), porém com viés positivo elevado (2,64 mm em 3 km e 1,92 mm em 1 km).

A integração das métricas evidencia que nenhum dos experimentos conseguiu representar de forma satisfatória a intensidade, a variabilidade horária ou a evolução do sistema precipitante. As correlações sistematicamente baixas (< 0,60), os vieses persistentes (positivos ou negativos dependendo da localidade) e a

dificuldade em reproduzir picos e pausas da chuva observada indicam limitações importantes do modelo para este tipo de evento extremo. Esse resultado é coerente com a literatura internacional, que aponta que eventos severos associados a forçamento multiescalar (frente estacionária, jato de baixos níveis, anomalias oceânicas e topografia complexa) são particularmente difíceis de simular com precisão, mesmo em grades de 1 km (MARENGO et al., 2024; DONNINI et al., 2023).

Embora o domínio de 1 km tenha apresentado desempenho relativamente superior em algumas localidades (como Ilhabela e São Sebastião), ainda assim as simulações não atingiram níveis adequados de acurácia para representação operacional ou prognóstica. O refinamento espacial melhorou a coerência temporal, mas não foi suficiente para capturar a magnitude excepcional do evento, nem sua rápida reorganização estrutural descrita pelos dados de radar e satélite.

Para trabalhos futuros e aprofundamento desta linha de pesquisa, sugere-se testar diferentes configurações físicas do modelo WRF, a fim de avaliar o desempenho em regiões de relevos complexos e regionais que sofreram casos extremos de precipitação.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013..
- BARBOSA, J. P. M. Caracterização do regime pluviométrico do litoral do estado de São Paulo segundo repartições propostas por Monteiro (1973). In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 17., 2007, São Paulo. **Anais**.
- BETTOLLI, M. L. et al. The CORDEX Flagship Pilot Study in southeastern South America: a comparative study of statistical and dynamical downscaling models in simulating daily extreme precipitation events. **Climate Dynamics**, v. 56, p. 1589–1608, 2021. DOI: 10.1007/s00382-020-05543-3.
- BLANCO, Cintia Maria Rodrigues. **Processos de Intensificação Orográfica da Precipitação na Serra do Mar em São Paulo**. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
- CARVALHO, Leila M. V.; JONES, Charles; LIEBMANN, Brant. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, p. 88–108, 2004.
- CAVALCANTI, Iracema F. A.; KOUSKY, V. E. Frentes frias sobre o Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 135–148.
- CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Banco de Dados Hidrometeorológicos**. São José dos Campos: CEMADEN, 2023.
- CHM / MARINHA DO BRASIL. **Cartas Sinóticas de Superfície**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2023.
- CONTI, J. B.; FURLAN, S. A. Geoecologia: o clima, os solos e a biota. In: ROSS, J. L. S. (Org.). **Geografia do Brasil**. São Paulo: EDUSP, 2003. p. 67–198.
- CONTI, José Bueno. Um episódio de chuva em território paulista. **Revista Geográfica**, p. 81–90, 1974.
- COPPOLA, Erika et al. Non-hydrostatic RegCM4 (RegCM4-NH): model description and case studies over multiple domains. **Geoscientific Model Development**, v. 14, n. 12, p. 7705–7723, 2021.
- CORDEX. **Flagship Pilot Study – Southeastern South America (FPS-SESA): Overview and Aims**. Disponível em: <https://cordex.org>. Acesso em: jun. 2025.
- COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and Cloud Dynamics**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2010. 896 p.

CPTEC / INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **MERGE Precipitation Product**. Cachoeira Paulista: INPE, 2023.

CUADRA, Santiago Vianna; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. Simulação numérica do clima de verão sobre o Brasil e sua variabilidade. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 2, p. 271–282, 2006.

DA ROCHA BARTOLOMEI, Fabiana et al. Atmospheric circulation in the Furnas Reservoir Region, MG: sensitivity experiments with RegCM5 in convection-permitting mode. **Journal of Atmospheric Science Research**, v. 7, n. 3, 2024.

DA ROCHA, Rosmeri Porfírio; REBOITA, Michelle S.; RIBEIRO, J. G. M. Modelagem climática: da gênese à escala da convecção permitida. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 3, p. 2289–2311, 2025.

DELWORTH, T. L. et al. Simulated climate and climate change in the GFDL CM2.5 high-resolution coupled climate model. **Journal of Climate**, v. 25, n. 8, p. 2755–2781, 2012.

DIAS, Henrique Boriolo; ALVARES, Clayton A.; SENTELHAS, P. C. Um século de dados meteorológicos em Piracicaba-SP: mudanças do clima pela classificação de Köppen. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**. Juazeiro: Anais, 2017.

DOS SANTOS, D. D.; GALVANI, E. Proposta para determinação de eventos extremos de chuva no litoral norte paulista. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 224–244, 2019.

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. **ERA5 Reanalysis Data Documentation**. Reading, UK: ECMWF, 2023.

FERREIRA, Glauber W. S.; REBOITA, Michelle S. A new look into the South America precipitation regimes: observation and forecast. **Atmosphere**, v. 13, n. 6, p. 873, 2022.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FLATO, G. M. et al. Evaluation of climate models. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, 2013. p. 741–866.

G1. **Estado de SP confirma 19 mortos em decorrência das chuvas no Litoral Norte**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/19/estado-de-sp-confirma-19-mortos-em-decorrencia-das-chuvas-no-litoral-norte.ghtml>. Acesso em: 2025.

G1. **Tragédia de São Sebastião: veja como estão os sobreviventes um ano após**. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2024/02/19/tragedia-de-sao-sebastiao-veja-como-estao-os-sobreviventes-um-ano-apos-temporal-devastador.ghtml>. Acesso em: 2025.

GIORGI, Filippo; MEARNS, Linda O. Introduction to special section: regional climate modeling revisited. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. D6, p. 6335–6352, 1999.

GOES-16 / NOAA. **GOES-16 Imagery Products**. Washington, DC: NOAA, 2023.

HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, p. 1999–2049, 2020.

HOMSI, Rajab et al. Precipitation projection using a CMIP5 GCM ensemble model: a regional investigation of Syria. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 14, n. 1, p. 90–106, 2020.

HOUZE JR, Robert A. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, 2004.

HOUZE, R. A. Jr. **Cloud Dynamics**. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2014. 432 p.

KAYANO, Mary T.; MOURA, Antonio D. O El Niño de 1982–83 e a precipitação sobre a América do Sul. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 4, n. 2, p. 201–214, 2018.

KÖPPEN, W. P.; GEIGER, R. Das geographische System der Klimate. In: **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Borntrager, v. 1, 1936.

LACKMANN, Gary M. **Midlatitude Synoptic Meteorology**. AMS, 2011.

LAVELL, Allan et al. Climate change: new dimensions in disaster risk. In: **Managing the risks of extreme events and disasters**. Cambridge University Press, 2012. p. 25–64.

LEGG, Stephen. IPCC 2021: Climate change—the physical science basis. **Interaction**, v. 49, n. 4, p. 44–45, 2021.

LUCAS-PICHER, Philippe et al. Convection-permitting modeling with regional climate models. **WIRES Climate Change**, v. 12, p. e731, 2021.

MARENGO, Jose A. et al. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. **Natural Hazards**, v. 120, n. 8, p. 7997–8024, 2024.

MARKOWSKI, P.; RICHARDSON, Y. **Mesoscale Meteorology in Midlatitudes**. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2010. 430 p.

MARTINS, Maria Eugénia Graça. Desvio padrão amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, p. 20021, 2013.

MEMÓRIA DO DAEE. **O radar meteorológico e o SAISP**. 2010. Disponível em: <https://memoriadodae.wordpress.com/>. Acesso em: 2025.

MILANESI, Marcos Alexandre. **Avaliação do efeito orográfico na pluviometria da Ilha de São Sebastião**. Tese (Doutorado) — USP, 2007.

MONTEIRO, C. A. F. **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo**: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia/USP, 1973. 138 p.

MONTEIRO, C. A. F. **Análise rítmica e as chuvas no Estado de São Paulo**. São Paulo: IGEOG-USP, 1973.

MONTGOMERY, D. C.; JENNINGS, C. L.; KULAHCI, M. **Introduction to Time Series Analysis and Forecasting**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 671 p.

NETO, Sant'Anna et al. Ritmo climático e a gênese das chuvas na zona costeira paulista. 1990.

NIMER, Edmon. **Climatologia do Brasil**. IBGE, 1989.

NUNES, L.; VICENTE, A.; CANDIDO, D. Clima da Região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 243-258.

PAMPUCH, Luana A. et al. Brazil climate highlights 2023. **Annals of the NY Academy of Sciences**, 2025.

PARKER, M. D.; JOHNSON, R. H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. **Monthly Weather Review**, 2000.

PELLEGATTI, C. H. G.; GALVANI, Emerson. Avaliação da precipitação na Serra do Mar–SP. **GEOUSP**, v. 14, n. 1, p. 147–158, 2010.

POWERS, Jordan G. et al. The Weather Research and Forecasting Model: overview, system efforts, and future directions. **BAMS**, v. 98, p. 1717–1737, 2017.

PREIN, Andreas F. et al. A review on regional convection-permitting climate modeling. **Reviews of Geophysics**, v. 53, p. 323–361, 2015.

REDEMET. **Radar Meteorológico – Produto CAPPI 3,1 km**. Rio de Janeiro: DECEA, 2023.

ROCHA, A. M. G. C.; GANDU, A. W. A Zona de Convergência do Atlântico Sul. **Climanálise**, v. esp., p. 140–142, 1996.

ROTUNNO, R.; KLEMP, J. B.; WEISMAN, M. L. A theory for strong, long-lived squall lines. **JAS**, v. 45, p. 463–485, 1988.

ROZANTE, José Roberto et al. Combining TRMM and surface observations of precipitation. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885–894, 2010.

ROZANTE, José Roberto; ROZANTE, Gabriela. IMERG V07B and V06B: a comparative study over South America. **Remote Sensing**, v. 16, 2024.

RUTLEDGE, S. A.; HOBBS, P. V. The Mesoscale and Microscale Structure of Organized and Quasi-Organized Convection. **Reviews of Geophysics**, v. 22, n. 4, p. 473–531, 1984.

SCOFIELD, Graziela B.; DE ANGELIS, C. F.; SOUSA JR., W. C. Estudo das tendências de precipitação no Litoral Norte. **Geografia**, v. 39, n. 1, 2014.

SILVA, João Pedro R.; REBOITA, Michelle S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da ZCAS em campos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019.

SILVA, Rodrigo Cesar; MARENGO, José Antônio; LEMES, Murilo Ruv. **Analysis of Extreme Rainfall and Landslides in the Metropolitan Region of the Paraíba Valley and North Coast of Sao Paulo, Brazil**. 2023.

SKAMAROCK, W. C. et al. **A description of the Advanced Research WRF Model (Version 4)**. NCAR, 2019.

SKAMAROCK, William C. et al. **A description of the Advanced Research WRF Version 2**. NCAR, 2005.

STOCCHI, Paolo et al. Non-hydrostatic RegCM4-NH: evaluation at convection-permitting scale. **Atmosphere**, v. 13, 2022.

SUN, Wenyi et al. Changes in extreme temperature and precipitation in China. **Atmospheric Research**, v. 168, p. 33–48, 2016.

TAKAHASHI, Hiroshi G. et al. High-resolution modelling and diurnal precipitation cycle. **IJOC**, v. 30, p. 2004–2020, 2010.

TAKAYABU, Izuru et al. Convection-permitting models for climate research. **BAMS**, v. 103, p. E77–E82, 2022.

UNGA – United Nations General Assembly. **Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction**. Proceedings of the Seventy-First Session, Agenda Item 19c, p. 41, 2016.

WEISMAN, M. L.; 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.

