



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

**ESTUDO DE CASO DA TEMPESTADE OCORRIDA
NA CIDADE DE SÃO PAULO NO DIA 12 DE MARÇO
DE 2025**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Marília Freitas de Oliveira

Itajubá, MG, Brasil

2025

ESTUDO DE CASO DA TEMPESTADE OCORRIDA NA CIDADE DE SÃO PAULO NO DIA 12 DE MARÇO DE 2025

por

Marília Freitas de Oliveira

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.

Orientador: 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

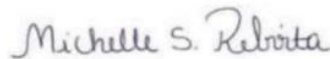
**ESTUDO DE CASO DA TEMPESTADE OCORRIDA NA
CIDADE DE SÃO PAULO NO DIA 12 DE MARÇO DE 2025**

elaborada por

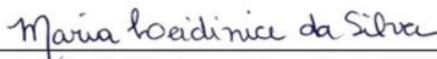
Marília Freitas de Oliveira

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

Comissão Examinadora:



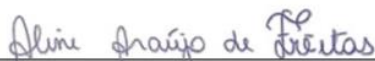
Michelle Simões Reboita, Dr^a. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



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

Em primeiro lugar, dedico minha profunda gratidão a Deus, que é a fonte da minha fé, que me concedeu a força, a sabedoria e a perseverança para superar os desafios e me conduziu até esta importante etapa da vida.

Meu mais sincero e especial agradecimento à minha mãe, Neiva, que, com a resiliência e a força de uma mãe solo, acreditou em meu potencial e foi meu pilar. Seu apoio emocional e financeiro ao longo destes anos foi o fator primordial que permitiu que eu chegasse até aqui.

À minha avó, Nilce, a quem considero minha segunda mãe, agradeço pelos ensinamentos de vida e pelo carinho constante. Agradeço também ao restante de minha família, incluindo meu falecido pai, meu avô Zé também falecido e minha tia Silvania, por todo o apoio.

Expresso minha imensa gratidão à minha família de consideração — Carla, Waldir, Thaís, Thales e aos "Maciel". O encorajamento, a influência positiva e o impulso determinante para buscar o ensino superior em uma instituição de qualidade foram essenciais para moldar meu futuro. Seus sinceros incentivos representaram um apoio emocional que jamais esquecerei.

Agradeço imensamente aos amigos que compartilharam essa trajetória, tornando-a mais leve e memorável, em especial à Ana Clara e à Lívia (Pavorô).

Reconheço o valioso papel da República Laranjinhas, que foi meu lar por seis anos. Lá, tive o ambiente propício para errar, aprender, acertar e, sobretudo, desenvolver-me pessoalmente.

Por fim, no âmbito acadêmico, agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) por toda a infraestrutura e apoio. Minha gratidão se estende especialmente à minha professora e orientadora, Dra. Michelle Simões Reboita e aos professores Dr. Enrique e Dra. Vanessa, meu reconhecimento por despertarem meu interesse pelo curso, por me transmitirem conhecimentos valiosos e pelo apoio essencial que recebi.

Dedico
a todos que dedicam o seu tempo
para estudar ciências no planeta terra.

RESUMO

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

ESTUDO DE CASO DA TEMPESTADE OCORRIDA NA CIDADE DE SÃO PAULO NO DIA 12 DE MARÇO DE 2025

AUTOR(A): MARÍLIA FREITAS DE OLIVEIRA
ORIENTADORA: MICHELLE SIMÕES REBOITA
Local e data da defesa: Itajubá, 12 de novembro de 2025.

No dia 12 de março de 2025 a cidade de São Paulo foi atingida por uma tempestade com duração de cerca de 60 minutos, que provocou rajadas de vento acima de 50 km/h (~ 15 m/s) e chuvas intensas localizadas, resultando em quedas de árvores, falta de energia e uma morte. Portanto, os objetivos deste estudo são caracterizar a tempestade através de dados observados em estações meteorológicas e descrever os fatores meteorológicos em escala sinótica que contribuíram para o evento. A metodologia utilizou dados observacionais de 16 estações meteorológicas do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas (CGE) localizadas na cidade de São Paulo, dados do satélite GOES-16 e reanálise ERA5. De acordo com as imagens do GOES-16, as células convectivas se intensificaram sobre as Zonas Oeste e Central de São Paulo e depois se deslocaram para sudeste. De fato, as estações meteorológicas do GCE registraram o maior volume de precipitação na Zona Central de São Paulo (24,6 mm), bem como os ventos mais intensos (~ 17 m/s). Em grande parte das estações, as rajadas de vento antecederam os picos de precipitação. O ambiente sinótico que favoreceu a tempestade esteve associado à atuação de um cavado em altitude e de um cavado invertido em superfície entre o oceano e a costa sudeste do país, juntamente com condições de instabilidade atmosférica ($\text{CAPE} > 1000$ J/kg, Total Totals > 44 K e cisalhamento vertical do vento de ~ 30 m/s). Esse estudo contribui no entendimento do ambiente associado com tempestades na capital paulistana e destaca a necessidade de uma malha mais densa de estações meteorológicas para uma melhor caracterização espaço-temporal das tempestades.

Palavras-chave: Tempestade, São Paulo, ventos fortes, chuva, danos à população

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Temporal no dia 12 de março de 2025 atingindo a capital de São Paulo.....	5
FIGURA 2 - Árvore caiu em cima de carro de taxista no episódio de precipitação extrema dia 12 de março de 2025, na Zona Central de São Paulo motorista não resistiu e faleceu.....	6
FIGURA 3 - Mapa espacial de São Paulo dividido por 5 Zonas, sendo elas, Zona Norte, Leste, Central, Oeste e Sul, com as estações identificadas pelo índice e o aeroporto do Campo de Marte).....	7
FIGURA 4 - Localização das estações meteorológicas no município de São Paulo e precipitação acumulada no dia 12 de março de 2025 das 00:00 às 23:59 (local).....	13
FIGURA 5 - Localização das estações meteorológicas no município de São Paulo e rajada de vento no dia 12 de março de 2025 das 00:00 (local) às 23:59 (local).....	14
FIGURA 6 - Precipitação acumulada em mm e rajadas de vento (m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Sul de SP.....	15
FIGURA 7 - Precipitação acumulada em mm e rajadas de vento (m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Oeste de SP.....	16
FIGURA 8 -Precipitação acumulada em mm e rajadas de vento (m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Central de SP.....	16
FIGURA 9 - Precipitação acumulada em mm e rajadas de vento (m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Norte de SP.....	17

FIGURA 10 - Precipitação acumulada em mm e rajadas de vento (m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Leste de SP.....	17
FIGURA 11 – Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho (Banda 13) realçado, referentes ao dia do evento.....	19
FIGURA 12 - Ventos em 250 hPa, espessura da camada 1000-500 hPa e pressão ao nível médio do mar.....	21
FIGURA 13 - Altura geopotencial em 500 hPa, Umidade específica em 850 hPa e vento em 500 hPa.....	23
FIGURA 14 – Umidade relativa em 850 hPa, Ômega em 850 hPa e Altura geopotencial em 850 hPa.....	24
FIGURA 15 – Advecção de temperatura e ventos em 850 hPa.....	26
FIGURA 16 – Divergência em 250 hPa, Altura Geopotencial em 250 hPa e Espessura da camada 1000-500 hPa.....	27
FIGURA 17 - Cisalhamento do vento (m/s) e pressão a nível médio do mar (hPa).....	28
FIGURA 18 - Energia Potencial Convectiva Disponível (CAPE, J/kg) e cisalhamento vertical do vento (m/s).....	29
FIGURA 19 - Índice Total Totals (TT) e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa).....	30

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Nome das estações com suas respectivas longitudes e latitudes.....	8
---	---

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CAPE – Convective Available Potential Energy (Energia Potencial Convectiva Disponível).

CGE SP – Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas de São Paulo.

dBZ – Decibéis (unidade logarítmica de refletividade utilizada em radares meteorológicos).

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo).

ERA5 – Reanálise Atmosférica de Quinta Geração do ECMWF.

G1 – Portal de notícias da Globo.

GDAS – Global Data Assimilation System (Sistema Global de Assimilação de Dados).

GMT – Greenwich Mean Time (Hora Média de Greenwich).

g/kg – Grama por quilograma (unidade de razão de mistura).

hPa – Hectopascal (unidade de pressão atmosférica).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IK – K-Index (Índice K, utilizado para medir a instabilidade atmosférica).

IL – Lifted Index (Índice de Levantamento, indicador de instabilidade convectiva).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

J/kg – Joule por quilograma (unidade de energia específica).

K – Kelvin (unidade de temperatura absoluta).

LCL – Lifting Condensation Level (Nível de Condensação por Elevação).

m/s – Metro por segundo (unidade de velocidade).

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos).

PA/s – Pascal por segundo (unidade de taxa de variação de pressão).

PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar.

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo.

SP – São Paulo.

TT – Total Totals Index (Índice Total Totals, indicador de instabilidade atmosférica).

UTC – Coordinated Universal Time (Tempo Universal Coordenado).

VIL – Vertically Integrated Liquid (Líquido Verticalmente Integrado).

VIL-Ice – Vertically Integrated Ice (Gelo Verticalmente Integrado).

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
2.1. ÁREA DE ESTUDO.....	6
2.2. Dados <i>IN SITU</i>	7
2.3. Reanálise.....	9
2.4. Imagens de Satélite (GOES-16).....	9
2.5. Análises Sinóticas.....	10
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
3.1 Registros das estações meteorológicas do CGE.....	12
3.2 Análise espacial GOES-16.....	18
3.2 Análises sinóticas.....	20
4. CONCLUSÃO.....	30
5. REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, eventos extremos de precipitação vêm se intensificando em diversas regiões do mundo, como no Brasil e, especialmente, em centros urbanos (SOUZA; RANGEL; CATALDI, 2017). Esses locais, muitas vezes, estão vulneráveis a desastres hidro-geo-meteorológicos¹ (MARENGO et al., 2021). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, 2023), cerca de 90% dos desastres naturais relacionados ao clima, como inundações e deslizamentos, têm como causa principal eventos de precipitação intensa concentrada em curtos períodos. Tais eventos são recorrentes no Brasil (MARENGO et al., 2021; ODA et al. 2024). Nos locais onde a urbanização é desordenada e sem malha de drenagem adequada, como, por exemplo, na cidade de São Paulo (SP), com casas em locais de risco de deslizamento de terra, os impactos socioeconômicos dos eventos extremos, são ainda mais drásticos (DE CASTRO & ALVIM, 2022).

A cidade de São Paulo, localiza-se no Sudeste do Brasil e se caracteriza como uma região de clima tropical que apresenta durante a estação do verão, chuvas abundantes e temperaturas elevadas (SANT'ANNA NETO, 2005). Alves et al. (2005) apontam que 80% das chuvas na região Sudeste do Brasil acontecem entre os meses de outubro e março. Sendo uma das maiores metrópoles do mundo, São Paulo apresenta um contexto urbano altamente suscetível aos impactos dos eventos extremos de precipitação (MARENGO et al., 2020), especialmente entre meados da primavera e verão, quando se caracteriza a estação chuvosa na região, influenciada pelo Sistema de Monção da América do Sul e pela ilha de calor urbana (GRIMM et al., 2005; OBREGÓN et al. 2014; RIBEIRO et al. 2015; REBOITA, 2022).

A partir da década de 2000, as características de precipitação da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) tem se alterado devido ao crescimento desenfreado da urbanização. Nesse contexto, a RMSP apresenta menos dias chuvosos, mas uma frequência maior de eventos de precipitação intensa (SOUZA; RANGEL; CATALDI, 2017).

¹ Desastres hidro-geo-meteorológicos são catástrofes originadas da interação de fenômenos atmosféricos, hidrológicos e geológicos, como inundações, deslizamentos e secas (ADAPTABRASIL, 2024; CEMADEN, 2025).

As tempestades severas (TS) são classificadas comumente na literatura como tempestades que geram queda de granizo de diâmetro superior a 2 cm e ventos intensos com capacidade de ocasionar danos estruturais aos centros urbanos (MOLLER, 2001). A partir dessa definição para identificar casos de TS, estudos como o de Beltran (2017) mostraram que as TS na RMSF apresentam diferenças em variáveis derivadas de varreduras de radar, como a máxima refletividade, o *Vertically Integrated Liquid* (VIL), o *Vertically Integrated Ice* (VIL-Ice) e a altura máxima da refletividade de 45 dBZ, em comparação com tempestades ordinárias, que são eventos simples, isolados e de curta duração, formados por uma única célula convectiva. Além disso, essas tempestades exibem maior atividade elétrica (≥ 17 raios/minuto), estrutura de carga predominantemente tripolar e uma maior intensidade do centro de carga positiva em níveis médios, que tende a enfraquecer após a queda de granizo.

Os eventos extremos de chuva podem ser modulados pela atuação de sistemas atmosféricos em diferentes escalas espaciais e temporais (REBOITA et al., 2024). O estudo desses eventos em escala local ou regional é uma tarefa complexa (CARVALHO; JONES; LIEBMANN; 2002), pois além das diferentes escalas do movimento ainda pode ocorrer interação com o relevo. Entre os principais elementos que contribuem para o desenvolvimento destas, destacam-se: presença de mecanismos de levantamento do ar, presença de umidade e a existência de instabilidade atmosférica (WALLACE & HOBBS, 2006). Para formação e sustentação de nuvens convectivas profundas estão condicionadas à interação dinâmica entre o cisalhamento vertical do vento (5000 e 1000 hPa, por exemplo) e a instabilidade termodinâmica do ambiente, esta última representada pela *Convective Available Potential Energy* (CAPE). O cisalhamento vertical do vento trata-se da mudança na velocidade e/ou direção do vento com a altitude, sendo um dos principais fatores que, combinados com a instabilidade atmosférica, modulam as correntes verticais e favorecem o desenvolvimento de tempestades convectivas severas (BENDER, 2018).

As estimativas de rajadas de vento não são fáceis de serem modeladas e podem trazer implicações em vários setores (BRASSEUR, 2001). Estas rajadas representam picos de velocidade de curta duração que, apesar dessa característica, são os principais responsáveis por danos estruturais, riscos à segurança operacional, impactos na infraestrutura civil e, principalmente, riscos à vida humana (RADZKA; OLSZEWSKA, 2022). A medição operacional de rajadas de vento, historicamente

realizada por redes globais de estações meteorológicas fixas, baseia-se predominantemente em anemômetros instalados a 10 metros de altura, seguindo recomendações internacionais de tempo de amostragem (*World Meteorological Organization*, WMO, 2024). Estas rajadas, são afetadas por características específicas da topografia, cobertura do solo e as elevações de vento na superfície, que induzem vórtices turbulentos da atmosfera (LUDWIG, 2015).

O CAPE representa a Energia Potencial Disponível e é uma variável para analisar a variabilidade da precipitação convectiva (RIEMANN-CAMPE et al, 2009). Segundo Bluestein (1993), valores de CAPE acima de 1000 J kg^{-1} indicam um ambiente de instabilidade moderada; apesar disso, esse valor é frequentemente utilizado como um limiar para o prognóstico de convecção profunda e tempestades severas em estudos regionais (NARDIN et al., 2012). Em ambientes com CAPE elevado ($\geq 2500 \text{ J kg}^{-1}$), as correntes ascendentes podem ser suficientes para superar a inibição convectiva (CIN) e transportar ar úmido rapidamente para a troposfera superior, onde temperaturas abaixo de 0°C permitem a formação de cristais de gelo, graupel e gotas super-resfriadas, fundamentais para os processos microfísicos que levam à precipitação e à eletrificação das nuvens (MARKOWSKI; RICHARDSON, 2010). Já a forma como os hidrometeoros se distribuem e em que fase se encontram dentro das nuvens também desempenha um papel importante no desenvolvimento da precipitação.

Hallak e Pereira Filho (2012) avaliaram índices de instabilidade na previsão de convecção severa na RMSF entre 28/01/2004 e 04/02/2004. Tempestades ocorreram em cinco dos oito dias, mas os índices mostraram limitações: IK (*K-Index*, [adimensional]) < 31 em todos os casos (potencial moderado para trovoadas), TT (*Total Totals*, [adimensional]) < 44 em três eventos (baixo potencial de tempestades) e IL (*Lifted Index*, [adimensional]) entre $-4,9$ e $-4,3$ (forte instabilidade). Dados pluviométricos e de radar confirmaram precipitações intensas e localizadas, como os 110 mm observados nos dias 30/01/2004 e 04/02/2004 em Mauá. O estudo evidencia as dificuldades na previsão convectiva em ambiente urbano. O estudo de Bender (2018) simulou cenários futuros de expansão urbana e verticalização, e concluiu que o aumento da mancha urbana é o principal fator a gerar instabilidade e cisalhamento vertical entre 500 e 1000 hPa, resultando em mais chuvas sobre a região. Esses trabalhos destacam como a urbanização potencializa as condições favoráveis à

ocorrência de tempestades severas, o que se reflete em eventos recentes que impactaram intensamente a cidade.

No dia 12 de março de 2025, por volta das 16 horas e 38 minutos (horário local), a cidade de São Paulo foi atingida por uma tempestade de curta duração, com aproximadamente uma hora (na Figura 1 é mostrada a situação atmosférica no início da tempestade). De acordo com os dados do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGESP, 2025), o evento apresentou em alguns setores da cidade acumulados de precipitação superiores a 20 mm e rajadas de vento acima de 50 km/h (~15 m/s). Esse tipo de ocorrência pode gerar impactos significativos sobre a infraestrutura urbana, com prejuízos socioeconômicos e risco à população. De fato, foram registradas quedas de árvores (Figura 2), desabamentos, danos a infraestruturas devido aos ventos e ocorrência de granizo e uma vítima fatal, segundo informações do portal G1 (G1, 2025). Conforme o boletim da Enel Distribuição São Paulo, cerca de 173,7 mil unidades consumidoras ficaram sem fornecimento de energia elétrica.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é caracterizar a tempestade que afetou a cidade de São Paulo no dia 12 de março de 2025, através de dados observados, e descrever o ambiente sinótico que favoreceu sua ocorrência.

Figura 1 - Temporal no dia 12 de março de 2025 atingindo a capital de São Paulo.



Fonte: Climatempo, 2025

Figura 2 - Árvore caiu em cima de carro de taxista no episódio de precipitação extrema dia 12 de março de 2025, na Zona Central de São Paulo motorista não resistiu e faleceu.



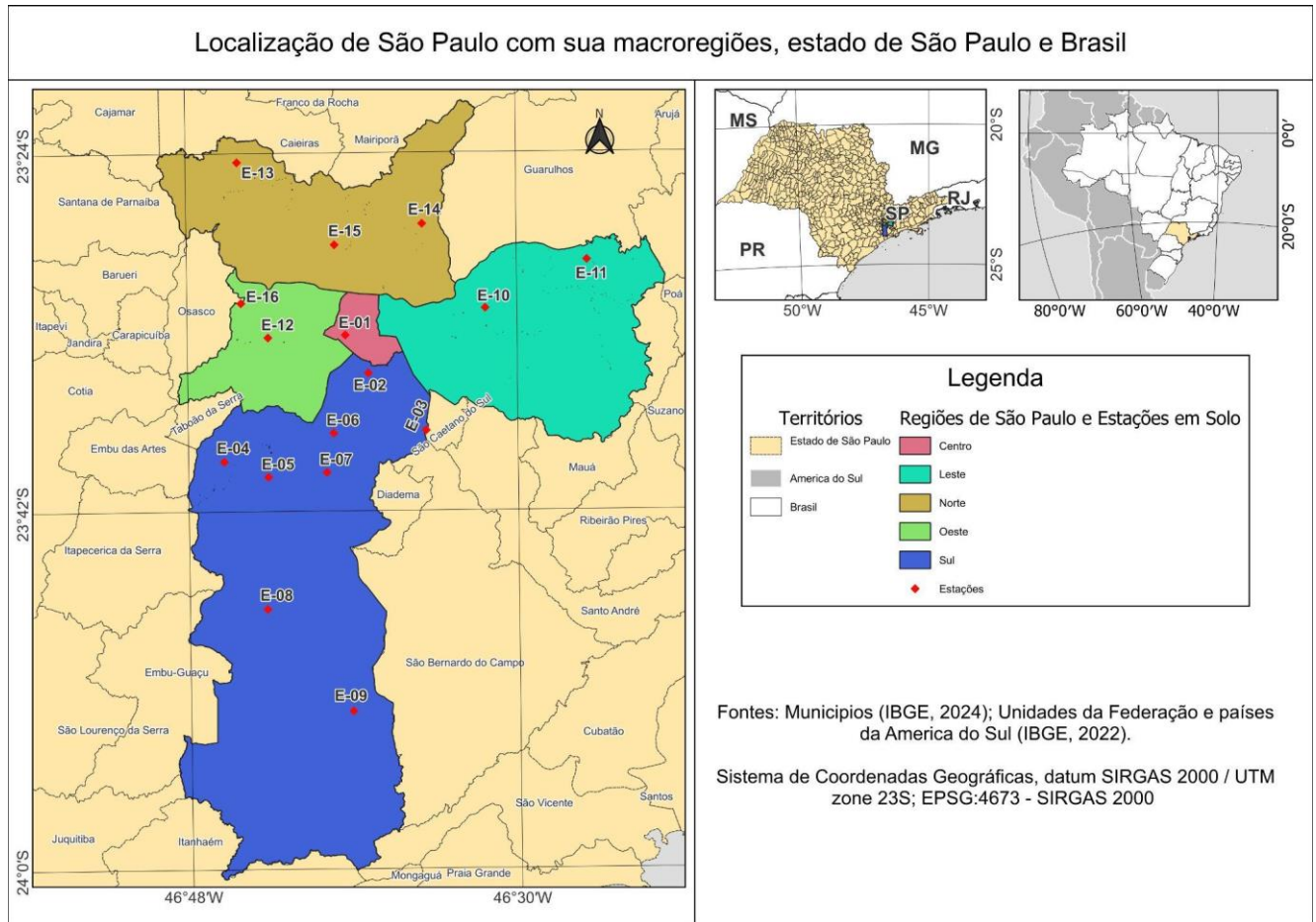
Fonte: G1-Globo, 2025

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A cidade de São Paulo está localizada entre as latitudes 23° 32' 56" Sul e longitudes 46° 38' 20" Oeste. A cidade abrange uma área de aproximadamente 1.521,202 km², segundo o Instituto Nacional de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) e é dividida por 5 Zonas, sendo elas, Zona Norte, Leste, Central, Oeste e Sul (Figura 3). É a cidade mais populosa do país e está sobre um maciço elevado e alongado, com altitudes que chegam a 820 metros, cerca de 100 metros acima das planícies circundantes. Este maciço é isolado pelas várzeas dos rios Tietê, Tamanduateí e Pinheiros, mas se conecta a outras elevações na sua extremidade leste (JÚNIOR, 1983). Segundo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) a estação chuvosa compreende de outubro a março. A dinâmica do clima local é marcada pela interação entre a brisa marítima e o efeito de ilha de calor urbana, que frequentemente intensifica tempestades convectivas durante a estação chuvosa (LOMBARDO, 1985; MARENGO et al., 2013).

Figura 3 – Mapa espacial de São Paulo dividido por 5 Zonas, sendo elas, Zona Norte, Leste, Central, Oeste e Sul, com as estações identificadas pelo índice (E-) e o aeroporto do Campo de Marte.



2.2. Dados *in situ*

O Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE), disponibiliza no seu site (https://arquivos.saisp.br/nextcloud/index.php/s/qikdinFyAM33MJK?path=%2FBOLETIM_PLUVIOMETRICO) apenas dados de estações meteorológicas na cidade de São Paulo com frequência horária. Portanto, para esse estudo foi preciso solicitar os dados a cada 10 minutos através de email (cge.pmsp@fcth.br).

Para análise, foram usados os dados de precipitação e rajada do vento das estações meteorológicas disponibilizadas, sob solicitação, ao Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE), distribuídas em diferentes regiões do município de São Paulo. Esses dados possuem frequência de 10 min e são registrados com horário UTC. Portanto, nesse estudo,

primeiramente, a informação temporal foi convertida para hora local. Na sequência, os dados de chuva foram acumulados por hora, enquanto para as rajadas de vento buscou-se o maior valor registrado dentro de 1 hora. O total diário de chuva foi acumulado das 00:00 às 00:00 horal local. Como inicialmente os dados foram agregados por hora, a chuva entre 00:01h e 01:00h fica armazenada no horário 01:00 h e a chuva das 23:00 até 23:59h fica armazenada no horário das 00:00 h do dia seguinte. Assim, acumulou-se a chuva armazenada das 01:00 h do dia até 00:00 h do dia seguinte para a representar a chuva do dia de interesse.

A tabela 1 mostra todas as estações usadas no estudo (que são aquelas que possuem registro tanto de chuva quanto de rajadas de vento).

Tabela 01 – Nome das estações com suas respectivas longitudes e latitudes

ID	Estação	Lon (°W)	Lat (°S)
1	Sé - CGE (PMSP/SE-01)	46,656168	23,552718
2	Vila Mariana (PMSP/VM-01)	46,635560	23,584720
3	Ipiranga (PMSP/IP-01)	46,583518	23,632978
4	Campo Limpo (PMSP/CL-03)	46,767490	23,658180
5	M' Boi Mirim (PMSP/MB-01)	46,727361	23,671266
6	Santo Amaro (PMSP/SA-01)	46,667657	23,634789
7	Cidade Ademar - (PMSP/AD-01)	46,674160	23,667670
8	Capela do Socorro (PMSP/PA-01)	46,729470	23,781945
9	Parelheiros - Barragem (PMSP/PA-01)	46,652222	23,867777
10	Penha - Rincão (PMSP/PE-01)	46,528744	23,530763
11	Itaim Paulista (PMSP/IT-01)	46,435990	23,490670
12	Butantã (PMSP/BT-02)	46,726570	23,554516

13	Perus (PMSP/PR-01)	46,753125	23,407443
14	Tremembé (PMSP/JT-01)	46,585572	23,459841
15	Freguesia do Ó (PMSP/FO-01)	46,665375	23,477062
16	Lapa (PMSP/LA-01)	46,750832	23,525564

2.3. Reanálise

Foram obtidos dados da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF, Hersbach et al., 2020). Os dados da ERA5 são disponibilizados por hora e para os níveis de 1000, 850, 500 e 250 hPa, com resolução espacial de 0,25°.

As variáveis utilizadas neste trabalho foram pressão ao nível médio do mar (hPa), divergência (1/s), geopotencial (m²/s²), umidade relativa (%), umidade específica (kg/kg), temperatura (K), componentes zonal e meridional do vento (m/s) em 850 e 250 hPa, velocidade vertical (Pa/s), CAPE (J/kg) e, adicionalmente, foram calculadas a advecção horizontal de temperatura (°C/3h) (equação 1) a partir da temperatura em superfície com ventos em 850 hPa e, também, o índice *Total Totals* (equação 2).

Equação 1: Cálculo da Advecção

$$Adv.H.Temp. = -u(\delta T / \delta x) - v(\delta T / \delta y)$$

onde u refere-se à componente zonal (direção Leste-Oeste), onde valores positivos indicam ventos de oeste, v refere-se à componente meridional (direção Norte-Sul), onde valores positivos indicam ventos de sul e $\delta T / \delta x$ e $\delta T / \delta y$ termo quantifica a mudança de temperatura ao longo da longitude e da latitude, respectivamente.

Equação 2: Cálculo do Total Totals

$$\begin{aligned} Vertical Totals &= VT = Temp.(850 hPa) - Temp.(500 hPa) \\ Cross Totals &= CT = Temp.D.(850 hPa) - Temp.(500hPa) \\ Total Totals &= TT = VT + CT \end{aligned}$$

2.4. Imagens de Satélite (GOES-16)

Para o monitoramento e análise das condições atmosféricas e da evolução dos sistemas convectivos, foram utilizados dados provenientes do satélite geoestacionário GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite - Série R*), operado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) (SCHMIT et al., 2017). O satélite encontra-se posicionado a 75,2°W, cobrindo as Américas e o Oceano Atlântico, sendo a principal ferramenta para monitoramento meteorológico na América do Sul (NOAA, 2019).

Para este estudo, utilizou-se especificamente o Canal 13 (Infravermelho Termal - *Clean IR Longwave Window*), centrado no comprimento de onda de 10,3 μm (SCHMIT et al., 2017). A escolha deste canal justifica-se pela sua eficiência na detecção de topos de nuvens e na estimativa da Temperatura de Brilho (T_b). Valores baixos de (T_b) (geralmente inferiores a -40°C ou -60°C) no canal infravermelho são indicativos de nuvens com grande desenvolvimento vertical, associadas a cumulonimbus e convecção profunda (MACHADO et al., 1998; SCHMIT et al., 2005).

As características dos dados utilizados são de resolução espacial de 2 km no ponto sub-satélite, para o canal infravermelho, e resolução temporal de imagens disponíveis a cada 10 minutos (modo *Full Disk*), permitindo o acompanhamento do ciclo de vida dos sistemas meteorológicos (NOAA, 2019). Os dados brutos foram adquiridos através do banco de dados da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC/INPE (DSA-CPTEC) e processados para a conversão das contagens digitais em valores físicos de temperatura de brilho, possibilitando a identificação das áreas de instabilidade com menores valores de temperatura de brilho (INPE, 2024).

2.5. Análises Sinóticas

Inicialmente serão apresentados mapas mostrando o acumulado diário da chuva e da máxima rajada de vento no dia 12 de março. Na sequência é mostrada a evolução horária dessas variáveis atmosféricas. Essa análise, é seguida pela apresentação dos campos sinóticos:

(a) Jatos em 250 hPa, Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) e Espessura da camada entre 500 e 1000 hPa. Este campo permite a identificação de sistemas

frontais (através dos gradientes de espessura), a posição dos centros de alta e baixa pressão na superfície (PNMM) e a configuração dos Jatos Subtropical e Polar em altos níveis, fundamentais para a dinâmica de sistemas sinóticos.

(b) Umidade Específica e Vetores de Vento em 850 hPa e Altura Geopotencial em 500 hPa. A análise conjunta da umidade e circulação permite inferir sobre o possível transporte de umidade.

(c) Umidade Relativa em 850 hPa, Velocidade Vertical (Ω) e Altura Geopotencial em 500 hPa. A variável Ω indica a presença de movimentos ascendentes (Ω negativo) ou subsidentes (Ω positivo). A altura geopotencial auxilia na verificação de cavados e cristas que dão suporte dinâmico aos movimentos verticais.

(d) Advecção de Temperatura e Vetores de Vento em 850 hPa. Calculada a partir do vento e do gradiente térmico em baixos níveis, esta variável permite identificar regiões onde está ocorrendo transporte de ar quente (advecção positiva/aquecimento) ou transporte de ar frio (advecção negativa/resfriamento), sendo uma variável que influencia a estabilidade atmosférica.

(e) Divergência de Massa, Altura Geopotencial em 250 hPa e Espessura da Camada. A divergência em altos níveis (250 hPa) é um mecanismo que induz movimentos ascendentes na coluna atmosférica, favorecendo a convecção profunda. A análise combinada com o geopotencial e a espessura auxilia no entendimento do acoplamento entre os sistemas de superfície e de altitude.

(f) Cisalhamento Vertical do Vento e Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM). O cisalhamento entre 500-1000 hPa é essencial para a organização e longevidade de tempestades severas. A sobreposição com a PNMM permite associar áreas de forte cisalhamento à posição de ciclones extratropicais ou zonas frontais.

(g) CAPE e Cisalhamento Vertical do Vento. Em conjunto, essas duas variáveis servem para verificar o potencial para a ocorrência de tempestades severas. O CAPE quantifica a flutuabilidade positiva (energia termodinâmica), enquanto o cisalhamento (isolinhas) indica o suporte dinâmico para a organização da convecção.

(h) Índice Total Totals (TT) e PNMM. O índice TT é utilizado para avaliar a estabilidade atmosférica com base nos gradientes verticais de temperatura e umidade. Valores

elevados indicam maior probabilidade de ocorrência de tempestades elétricas e tempo severo, analisados aqui no contexto da circulação de superfície (PNMM).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente são examinados os registros de precipitação e intensidade do vento obtidos nas 16 estações meteorológicas do CGE, usadas nesse estudo, distribuídas pelo município de São Paulo. Em seguida, são analisadas as imagens do GOES-16 e, por fim, os campos atmosféricos obtidos com a reanálise ERA5.

3.1 Registros das estações meteorológicas do CGE

A Figura 4 mostra a localização das estações meteorológicas no município de São Paulo com a chuva acumulada do dia 12 de março de 2025. Os maiores acumulados diários de chuva ocorreram nas zonas Central (E-1), Oeste (E-12 e E-16) e Leste (E-10); sendo que o maior acumulado diário ocorreu na estação E-1 (Sé): 24,6 mm.

Nas mesmas estações citadas também foi onde se registraram as rajadas de vento mais intensas (Figura 5). Entretanto, um diferencial em relação ao padrão espacial da chuva é que a Zona Sul também teve registros de ventos intensos (E-3, E-4 e E-5).

Figura 4 - Localização das estações meteorológicas no município de São Paulo e precipitação acumulada (mm) no dia 12 de março de 2025 das 00:00 às 23:59 (hora local).

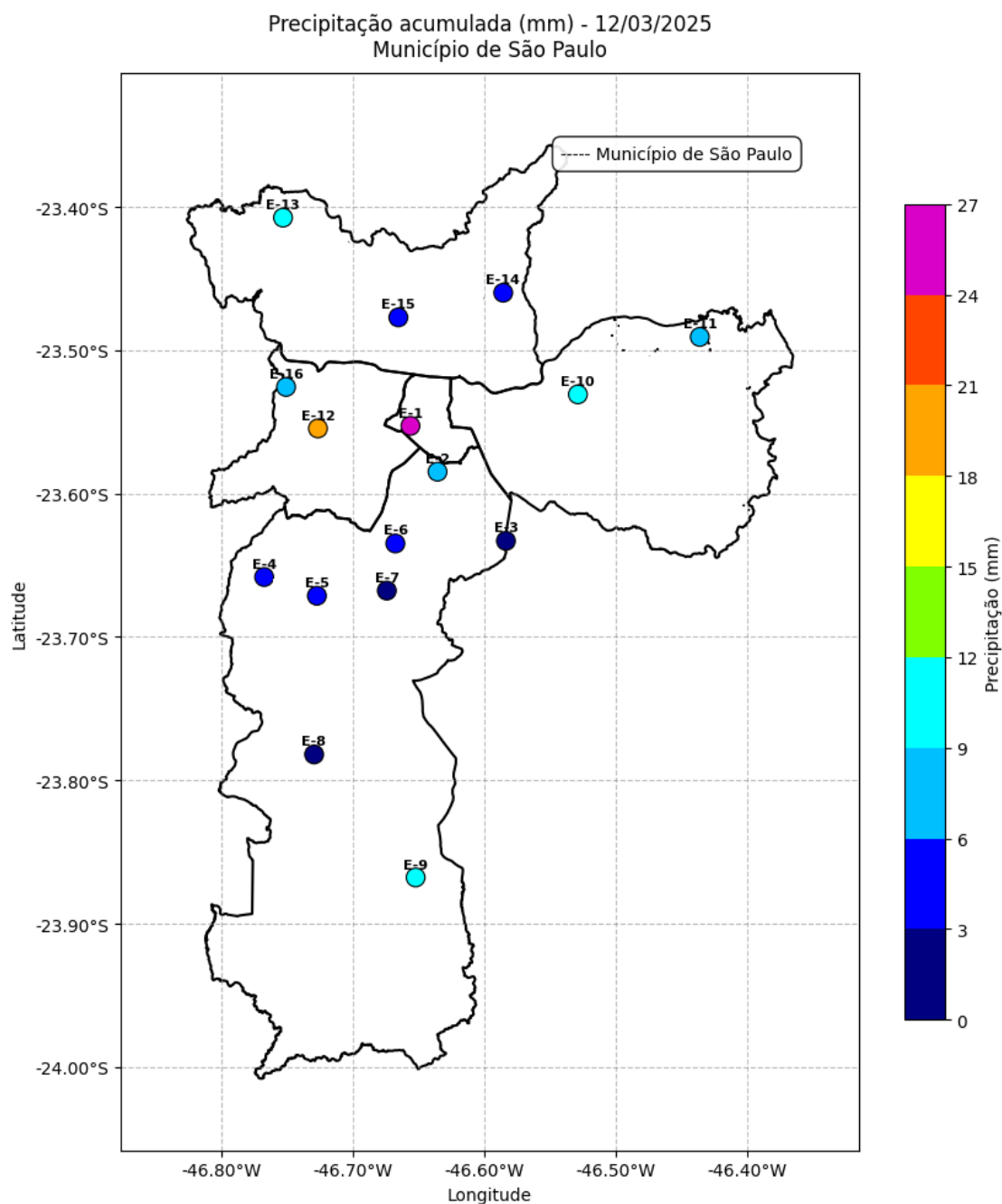
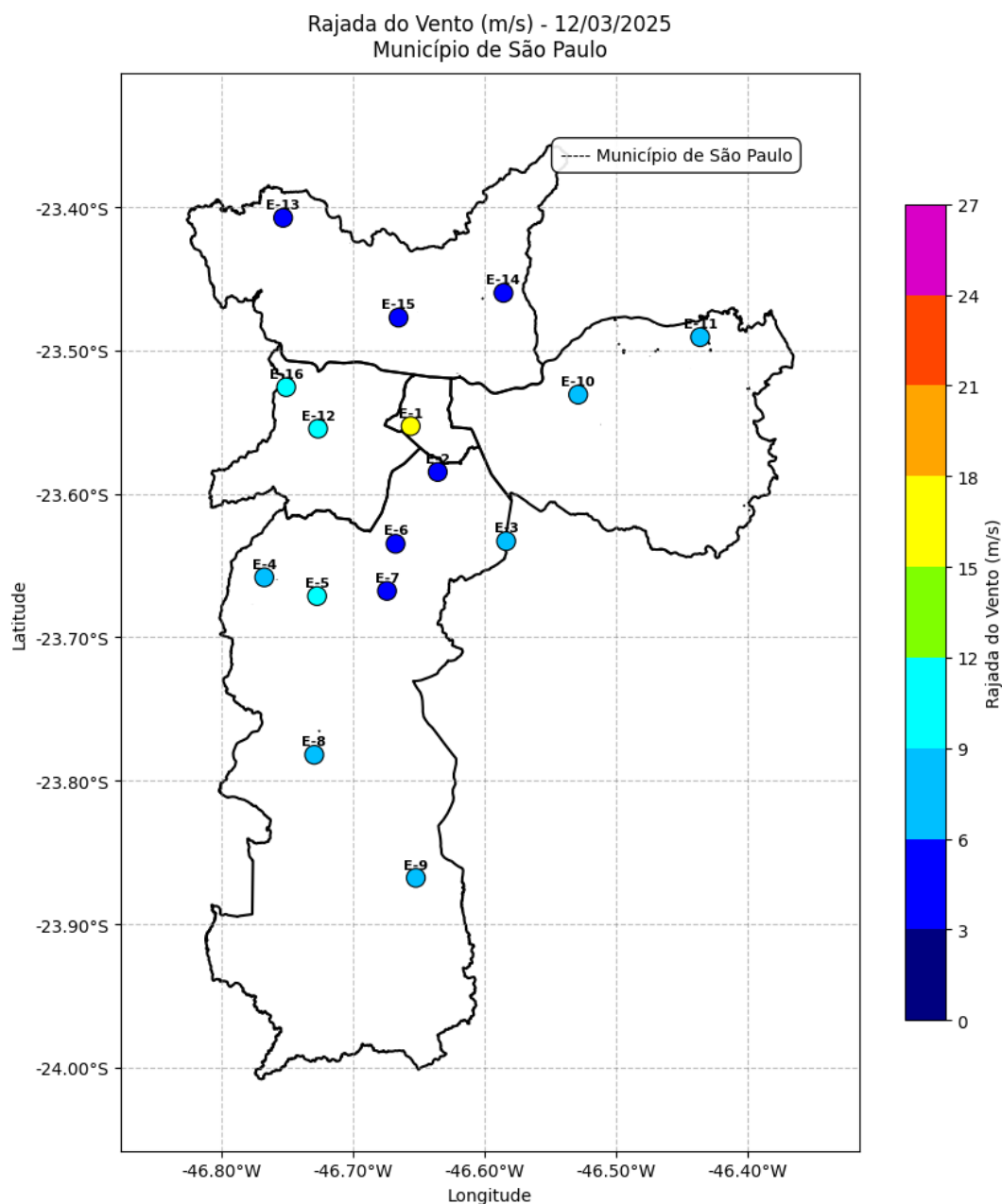


Figura 5 - Localização das estações meteorológicas no município de São Paulo e máximo valor das rajadas de vento (m/s) no dia 12 de março de 2025 entre 00:00 e 23:59 (hora local).



As Figuras 6 a 10 mostram a pluviosidade horária para as diferentes Zonas de São Paulo entre os dias 11 e 12 de março. Como já mostrado na Figura 4, a chuva não foi distribuída de forma homogênea no espaço pela capital. A maioria das estações registrou pico de precipitação no dia 12 de março durante a tarde, entre 17:00 e 18:00 horas (horário local).

Na Zona Sul (Figura 6), na maioria das estações a chuva ocorre entre 17:00 e 18:00 horas local, mas há outro máximo no final do dia. Para o presente estudo, o interesse é no primeiro máximo, que está associado com os ventos máximos. Em geral, as rajadas mais intensas de vento ocorrem no horário anterior aos de máximos acumulados de chuva do período da tarde. O padrão descrito para a Figura 6 praticamente se repete nas Figuras 7 e 8, Zona Oeste e Central, respectivamente. Entretanto, nessas zonas, a hora em que ocorre os máximos de vento e chuva são coincidentes. Na Zona Norte (Figura 9), as rajadas de vento antecedem os máximos de chuva e, na Zona Leste (Figura 10), na E-10, que é mais próxima da Zona Central, a chuva e o vento ocorrem em fase, enquanto na E-11, a localizada a nordeste da E-10, os ventos antecedem a chuva.

É interessante ressaltar que na Zona Sul (Figura 6), os volumes de chuva foram menores do que 8 mm no período da tarde, ou seja, a que recebeu menos precipitação durante o evento em estudo. Por outro lado, nessa zona, as estações E-4, E-5 e E-9 começaram a registrar precipitação já no horário das 16 horas. Nesse mesmo horário foi registrado cerca de 7 mm na E-12, na Zona Oeste. Segundo o G1 (2005), às 16:50 horas, na região do Butantã (E-12) foi registrado queda de granizo.

Figura 6 - Precipitação acumulada (barras azuis, mm) e rajadas de vento (linha contínua vermelha, em m/s) por hora (local) das estações meteorológicas da Zona Sul de São Paulo.

Zona Sul - Precipitação e Rajadas de vento 12/03/2025

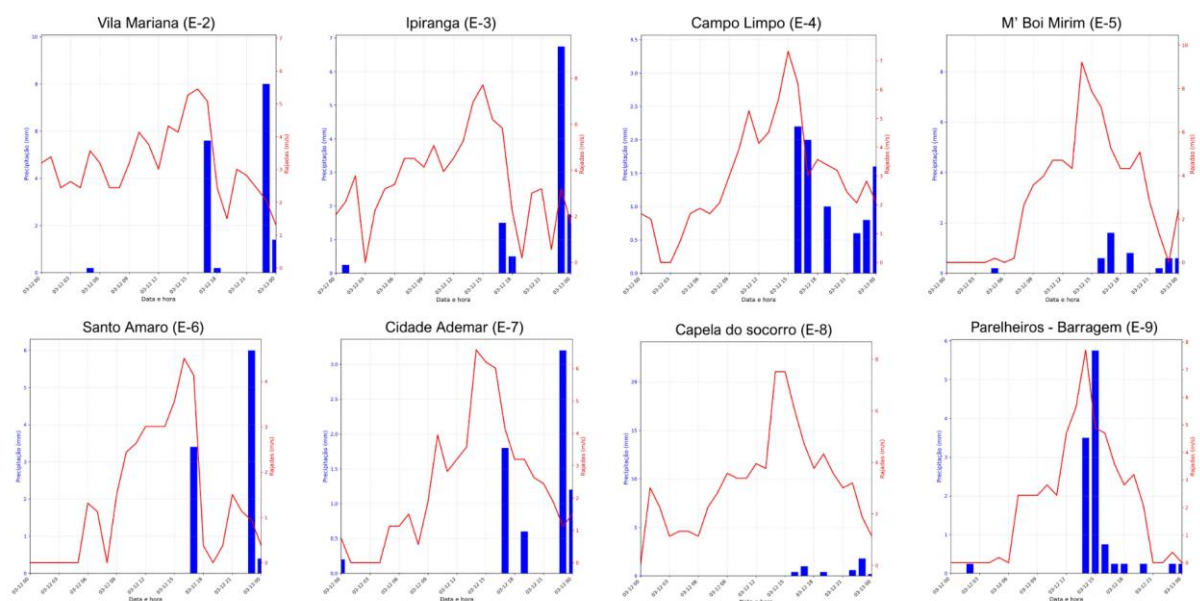


Figura 7 - Similar à Figura 6, mas para a Zona Oeste.

Zona Oeste - Precipitação e Rajadas de vento 12/03/2025

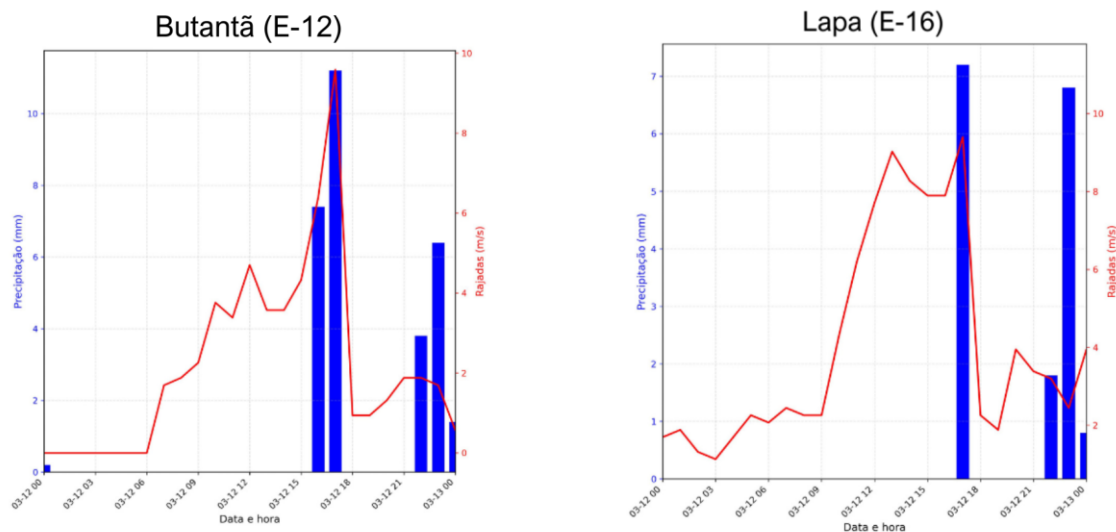


Figura 8 - Similar à Figura 6, mas para a Zona Central.

Zona Central - Precipitação e Rajadas de vento 12/03/2025

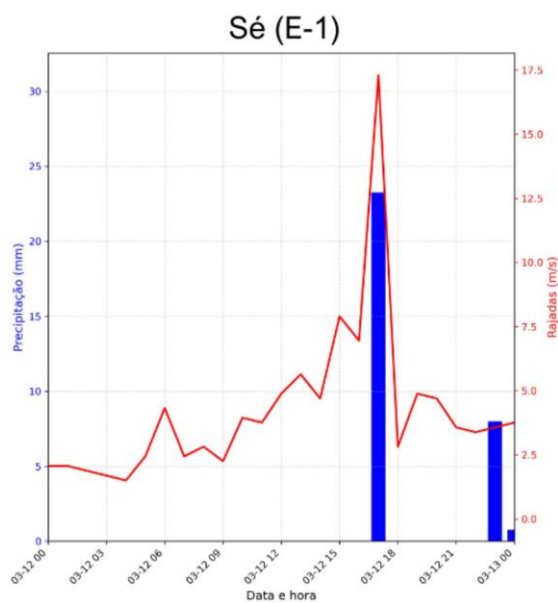


Figura 9 - Similar à Figura 6, mas para a Zona Norte.

Zona Norte - Precipitação e Rajadas de vento 12/03/2025

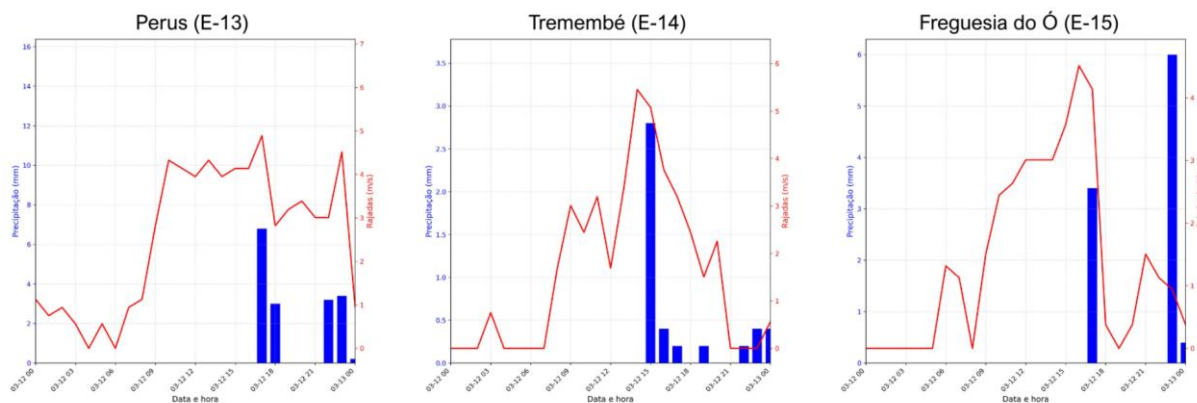
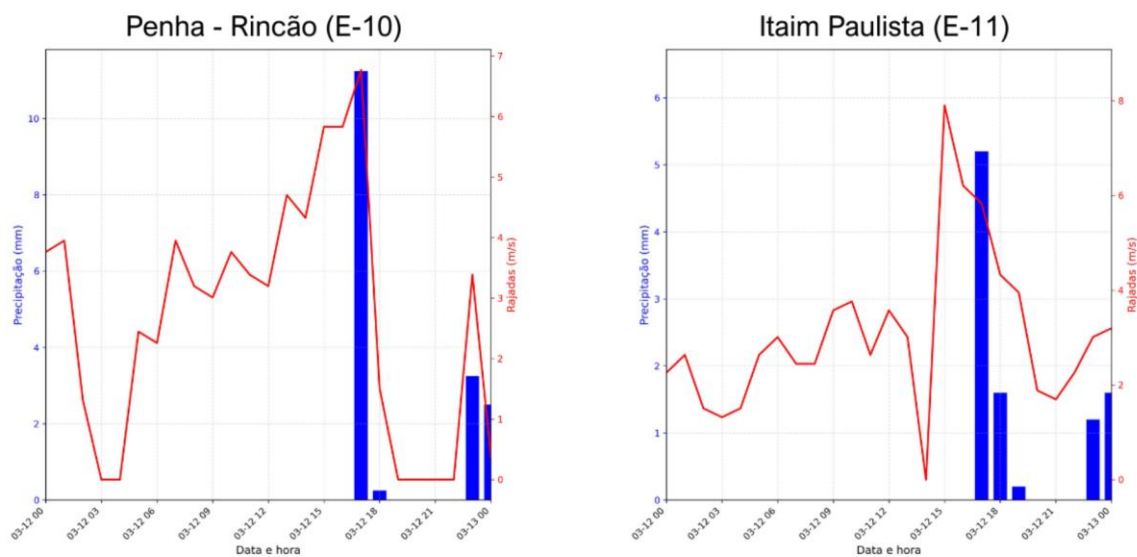


Figura 10 - Similar à Figura 6, mas para a Zona Leste.

Zona Leste - Precipitação e Rajadas de vento 12/03/2025

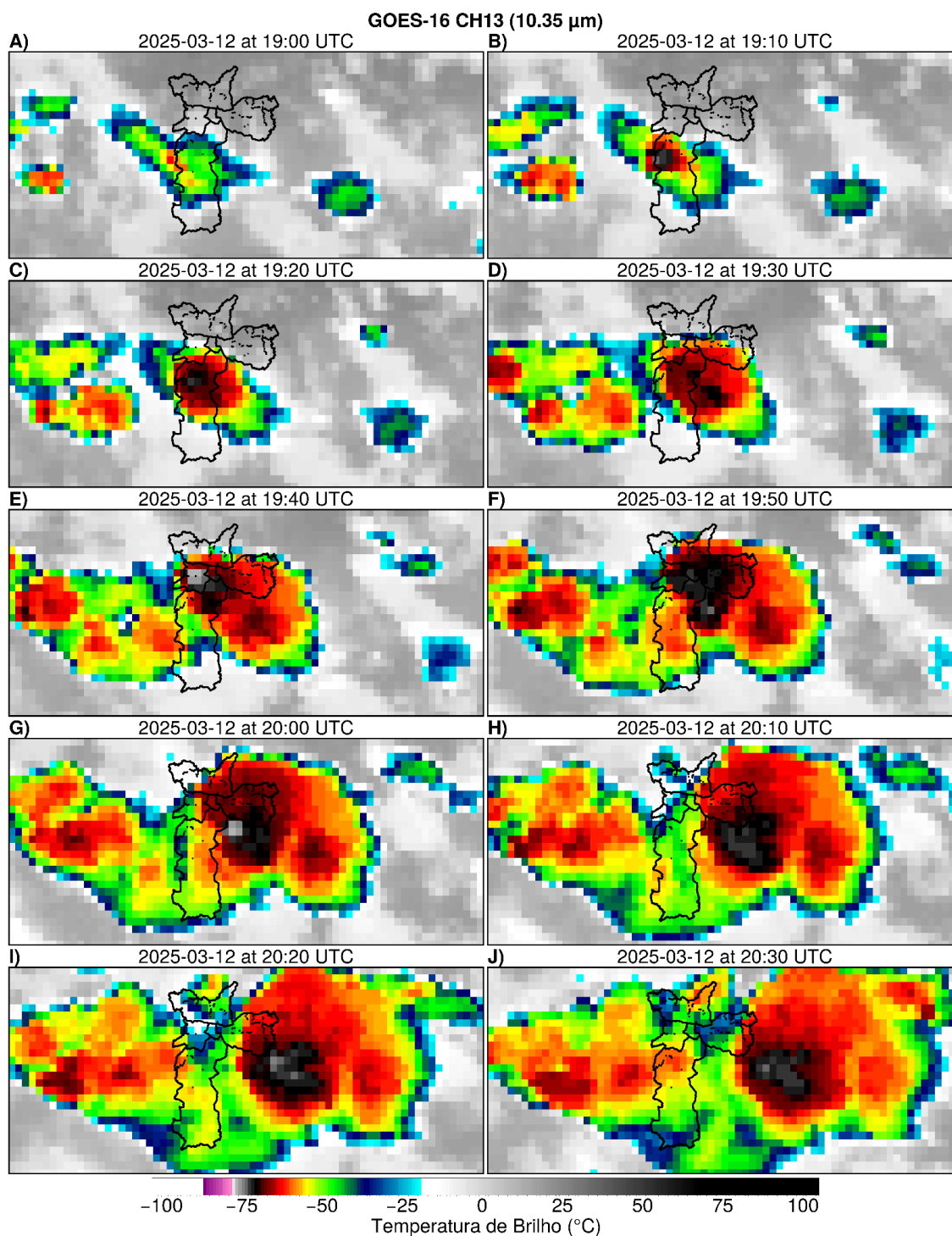


3.2 Análise espacial GOES-16

A análise da evolução espaço-temporal do evento foi realizada por meio de imagens do canal infravermelho (Banda 13) do satélite GOES-16, que permite estimar a temperatura de brilho no topo das nuvens. Na Figura 11, observa-se um sistema convectivo com topos de nuvens atingindo temperaturas inferiores a -60°C (representadas nas tonalidades variando do vermelho ao preto), indicativo de alto desenvolvimento vertical e potencial para tempestades severas.

O sistema inicialmente encontra-se sobre a Zona Sul de São Paulo (19:00 UTC = 16 horas local) e ganha intensidade à medida que se desloca para a Zona Oeste, indicado pelas temperaturas de brilho mais frias (tons de preto e branco) - Figura 11A-E, então, expande-se horizontalmente e atinge a Zona Central e Leste (Figura 11F). Posteriormente, o sistema se desloca para sudoeste, saindo da cidade de São Paulo (Figura 11G-J). Às 19:40 UTC (16:40 horas local), a temperatura de brilho atinge o seu valor mais intenso (mais negativo) sobre as Zonas Oeste e Central da capital paulistana. No G1 (2025) foi reportada a ocorrência de granizo às 16:50 horas local na região do Butantã (Zona Oeste). Portanto, tanto os relatos quanto à informação de satélite são condizentes.

Figura 11 – Imagens do satélite GOES-16 no canal infravermelho (Banda 13) realizado, referentes ao dia 12 de março de 2025.



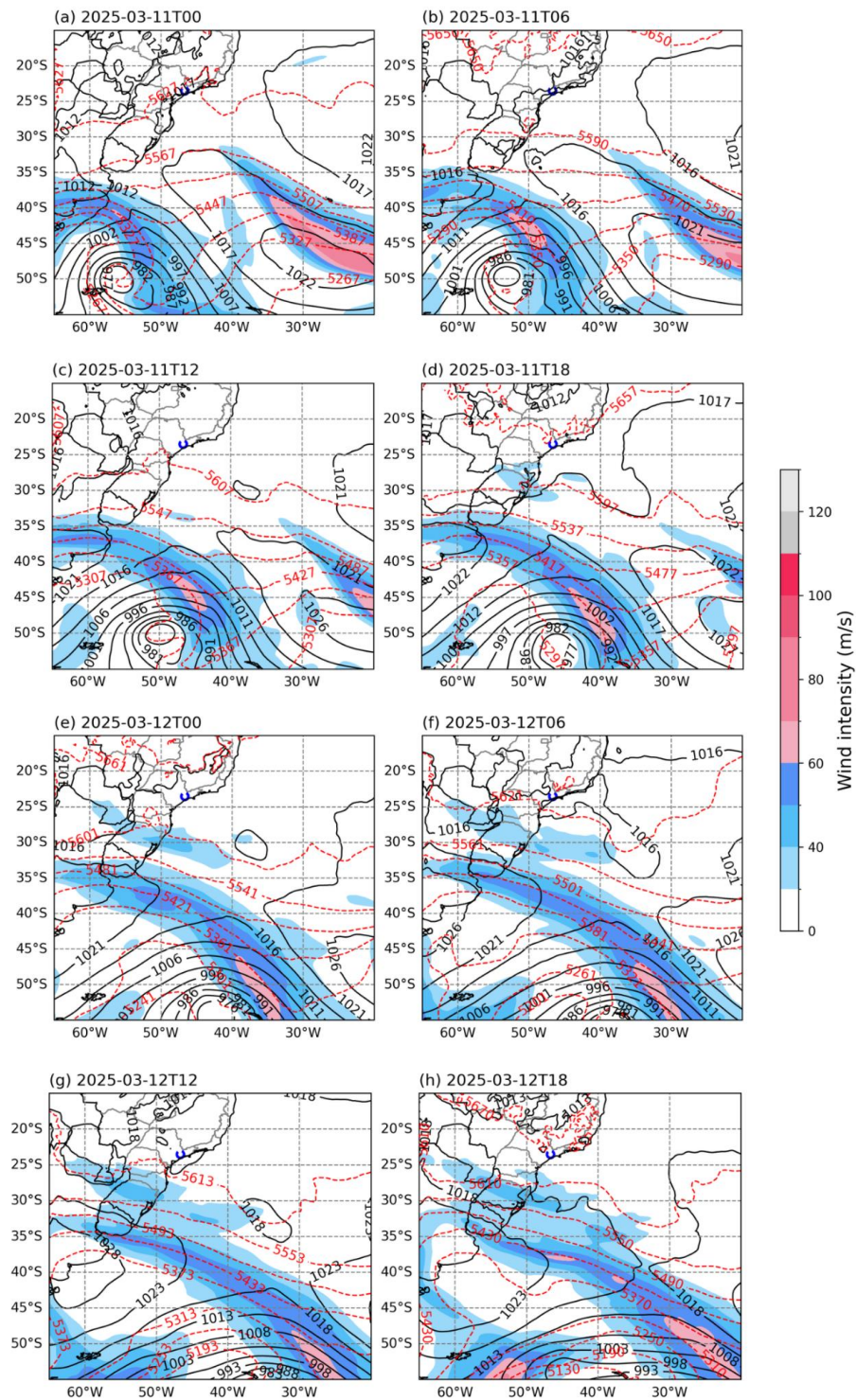
A assinatura espectral observada é característica de tempestades com alto potencial de precipitação convectiva conhecidas popularmente como pancadas de chuva, corroborando os impactos registrados na infraestrutura urbana da capital paulista. A ocorrência das rajadas de vento antes da precipitação em algumas estações é explicada pela dinâmica de correntes de densidade. Conforme descrito por

Markowski e Richardson (2010), o ar resfriado pela evaporação e o arrasto da precipitação formam uma 'piscina fria' que, ao atingir a superfície, espalha-se horizontalmente impulsionada por um gradiente de pressão hidrostática. Essa fronteira de ar denso, conhecida como frente de rajada, avança com velocidade superior à do deslocamento da nuvem, atingindo o local de observação antes da chegada dos hidrometeoros.

3.3 Análise sinótica

Antes de iniciar a descrição sinótica, é importante ressaltar que nas Figuras 12 a 19, a localização da região de estudo (cidade de São Paulo) está indicada com símbolo na cor azul. A Figura 12 apresenta os campos atmosféricos em diferentes níveis verticais entre 00:00 UTC do dia 11/03/2025 e 1800 Z do dia 13/03/2025. A PNMM mostra um centro de baixa pressão de cerca de 980 hPa, em aproximadamente 50°S no dia 11 e mais deslocado para sul no dia 12. Associado a essa baixa tem uma frente fria que no dia 11 às 00:00 UTC está sobre a Argentina, mas que se desloca com o passar do tempo e se localiza sobre o Rio Grande do Sul no dia 12. Portanto, essa frente não é potencial para o evento na cidade de São Paulo. Já a costa sudeste do Brasil encontra-se numa região em que se configura um cavado invertido e a sudeste deste há formação uma baixa (30°S-38°W) no dia 12 às 06:00 UTC (Figura 12f).

Figura 12 – Ventos em 250 hPa (colorido, m/s), espessura da camada 1000-500 hPa (linhas vermelhas tracejadas, m) e pressão ao nível médio do mar (linha preta contínua, em hPa).



A menor pressão na região costeira do Sudeste é importante para auxiliar no processo de convergência de massa em baixos níveis da atmosfera, o que pode favorecer o desenvolvimento de tempestades na cidade de São Paulo. De fato, o campo de vento em 850 hPa na Figura 13 mostra que nos dias 11 e 12 o escoamento tende a se dirigir para a região de baixa pressão no oceano e acaba em alguns horários passando pelo sul de Minas Gerais e São Paulo. Além disso, o escoamento é importante para transportar umidade. A umidade específica em 850 hPa supera 13 g/kg nas regiões mencionadas (Figura 13) e a umidade relativa em 850 hPa é de 100% (Figura 14). Já o campo de advecção horizontal de temperatura do ar em 850 hPa mostra valores ligeiramente positivos sobre a região sudeste e sua costa (Figura 15).

É interessante ressaltar que nos dois dias em estudo há um cavado em altitude de grande amplitude entre o continente e o oceano, e com o setor norte oscilando entre São Paulo e o Paraná, que pode contribuir em parte para os movimentos ascendentes indicados ($\omega < 0$) em 500 hPa na maior parte do dia 12 (Figura 12).

Figura 13 – Altura geopotencial em 500 hPa (linha pretas contínuas, m), umidade específica (colorido, g/kg) e vento em 850 hPa (setas pretas, m/s).

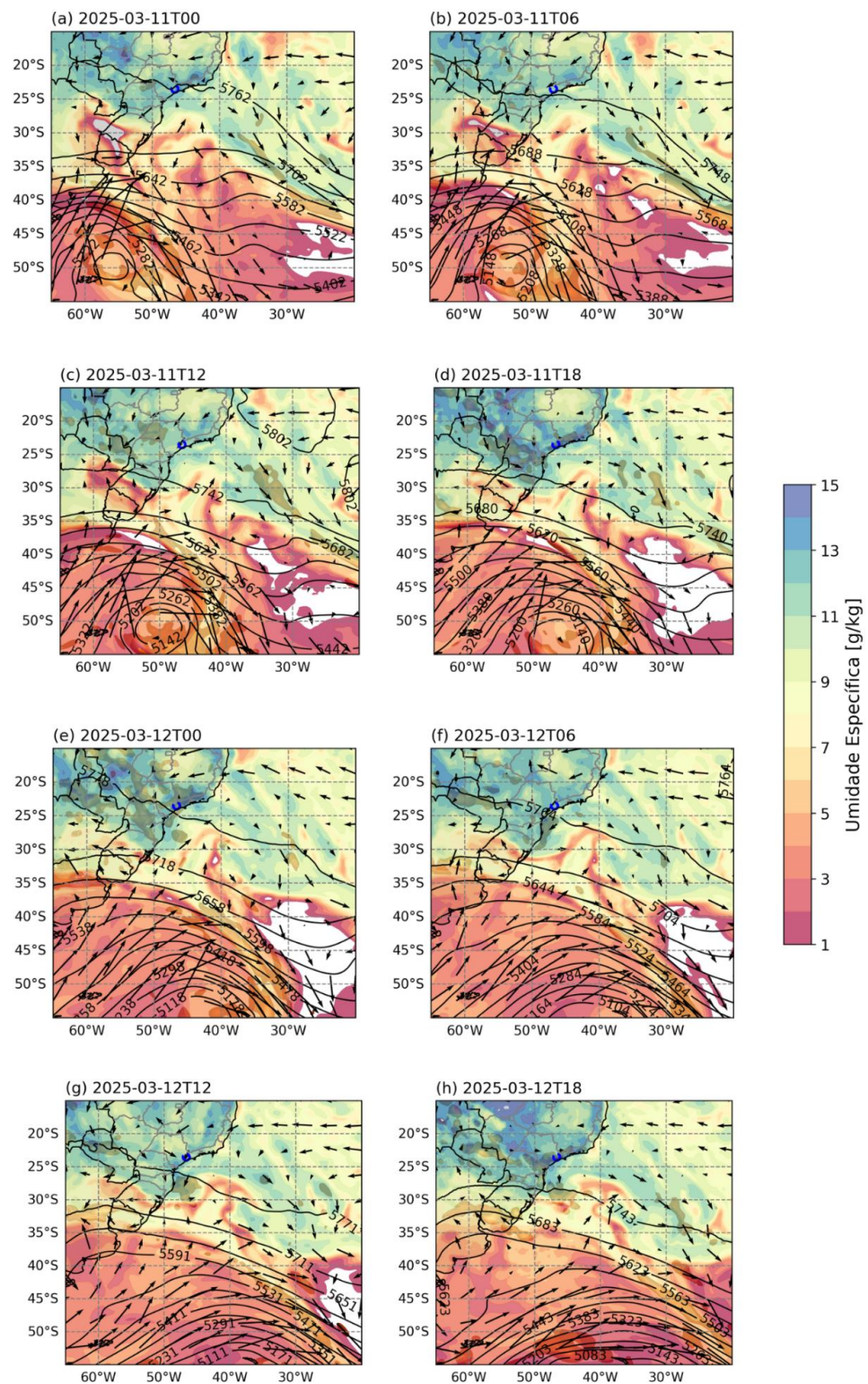
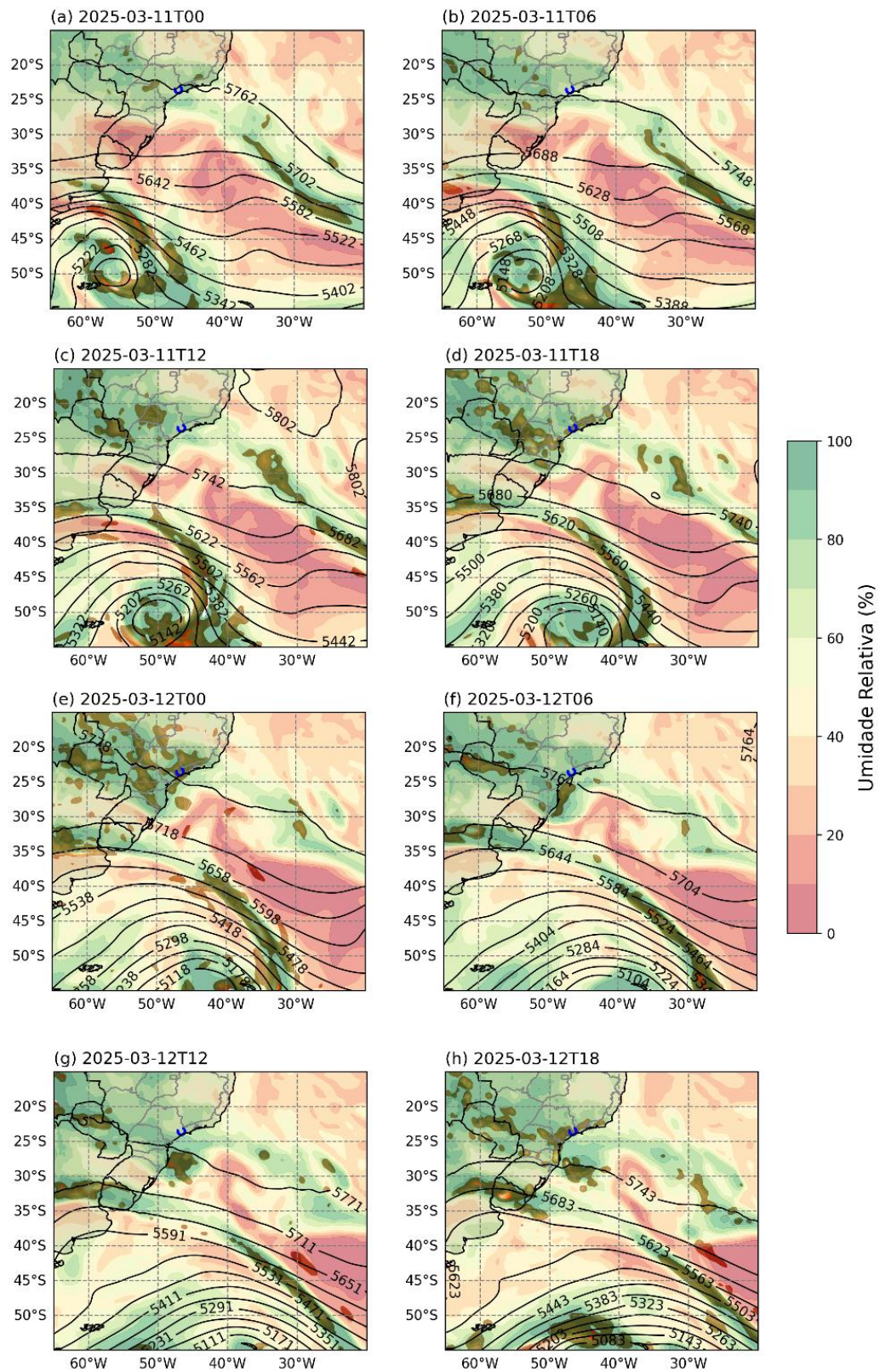


Figura 14 – Umidade relativa em 850 hPa (colorido na escala de cores de vermelho e verde, %), $\omega < 0$ em 500 hPa (colorido em tons de verde musgo mais fortes) e altura geopotencial em 500 hPa (linhas pretas contínuas).



Embora predominem movimentos ascendentes no dia 12, o campo da divergência de massa em 250 hPa é mais evidente no dia 11 sobre o centro-leste do estado de São Paulo, o que inclui a região de estudo. Já no dia 12 é um pouco mais fraca (Figura 16).

Em relação ao cisalhamento vertical do vento entre 500–1000 hPa sobre São Paulo, observam-se valores próximos de 30 m/s (Figuras 17). Esse cisalhamento elevado é um fator essencial para a sustentação e organização de tempestades, pois impede que as correntes ascendentes e descendentes se anulem dentro da célula convectiva, prolongando sua duração e favorecendo sua intensificação (WEISMAN & KLEMP, 1982; DOSWELL, 1987; WALLACE & HOBBS, 2006; GARCIA et al., 2025). Segundo Markowski e Richardson (2010, p. 22) e Thompson et al. (2003), magnitudes de cisalhamento vertical entre os níveis de 500-1000 hPa superiores a 20 m/s (aproximadamente 40 nós) já são suficientes para suportar a formação de supercélulas e tempestades severas organizadas.

Nesse estudo, o CAPE é usado como proxy da instabilidade atmosférica (Figura 18). Nos dois dias de estudo havia CAPE sobre o setor leste do estado de São Paulo e a região costeira. No dia 12 os valores de CAPE superam os 1000 J/kg. Conforme demonstrado no estudo seminal de Weisman e Klemm (1982), o equilíbrio dinâmico entre a energia de empuxo (termal) e a energia cinética do fluxo cisalhado é determinante para a longevidade e severidade do sistema.

Outro proxy usado para indicar a presença de instabilidade atmosférica é o índice TT. Esse índice acima de 44 indica uma atmosfera termodinamicamente instável e favorável à formação de tempestades, conforme Hallak e Pereira Filho (2012). A Figura 19 mostra a persistência de $TT > 44$ em ambos os dias em estudo nas cercanias da cidade de São Paulo.

Figura 15 - Advecção horizontal de temperatura (colorido, °C/3h) e ventos em 850 hPa (setas pretas).

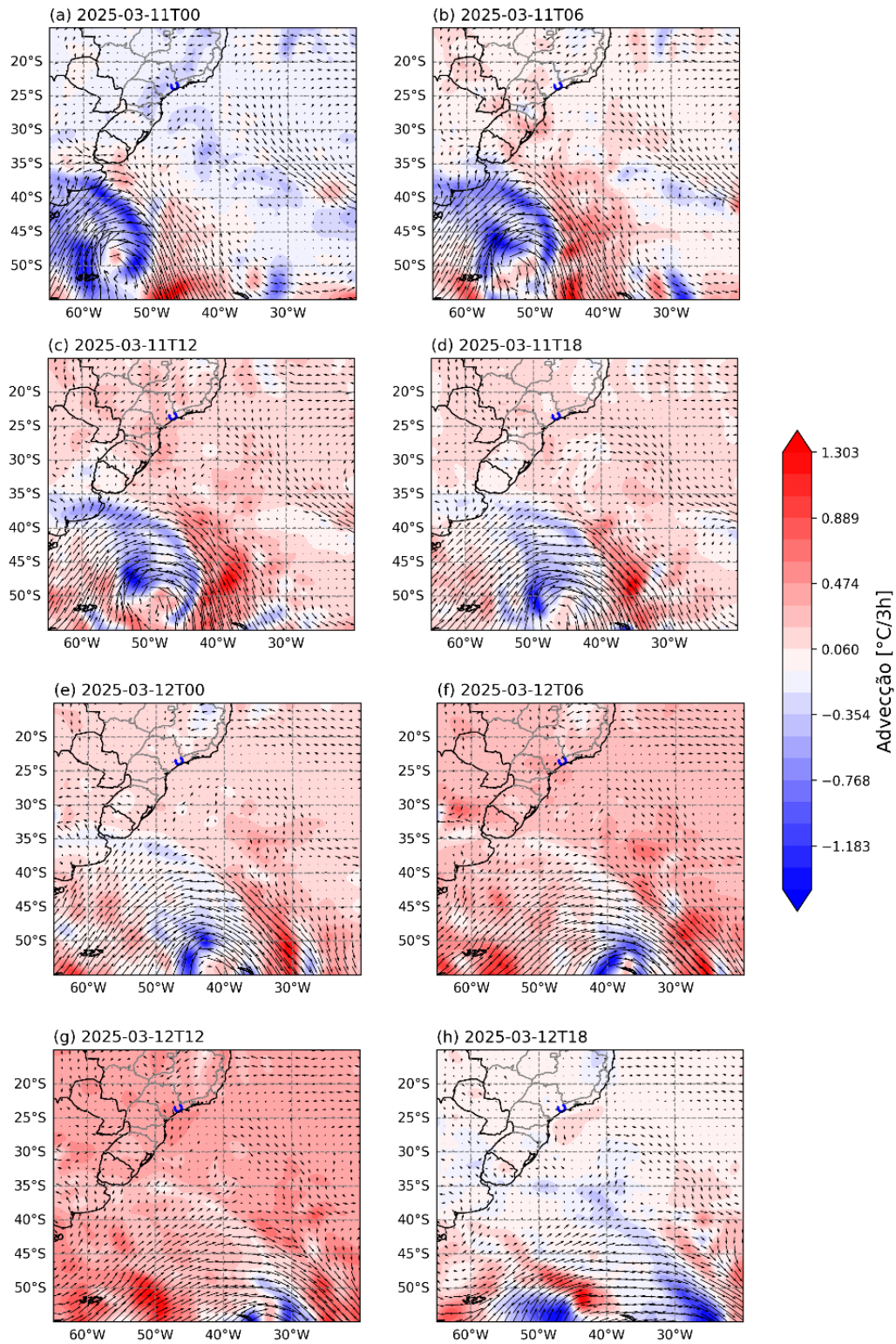


Figura 16 – Divergência em 250 hPa (colorido, $1/\text{s}$), altura geopotencial em 250 hPa (linhas pretas contínuas) e espessura da camada 1000-500 hPa (linhas vermelhas tracejadas).

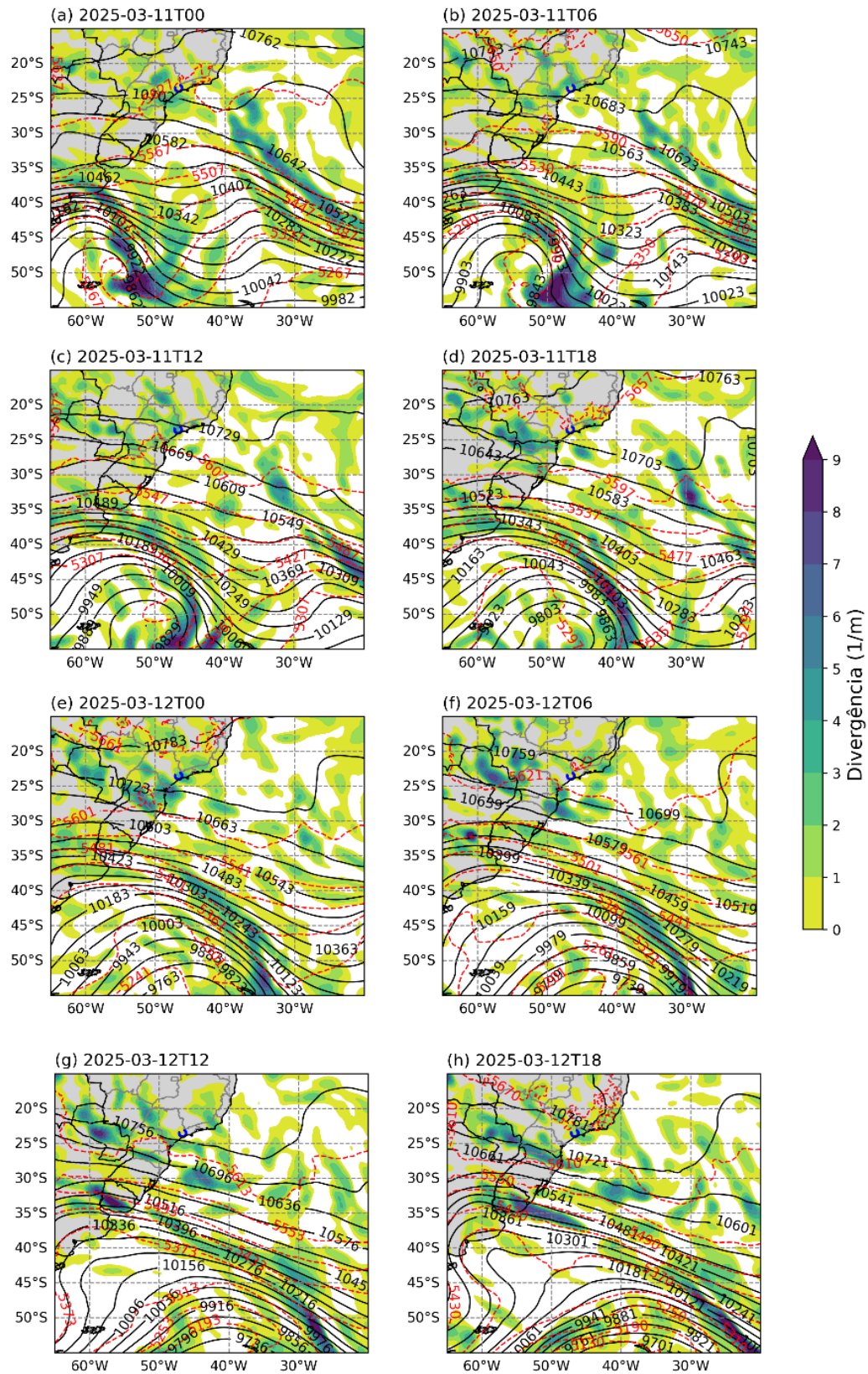


Figura 17 – Cisalhamento vertical do vento entre os níveis de 500-1000 hPa (colorido, m/s) e pressão a nível médio do mar (linhas pretas contínuas, hPa).

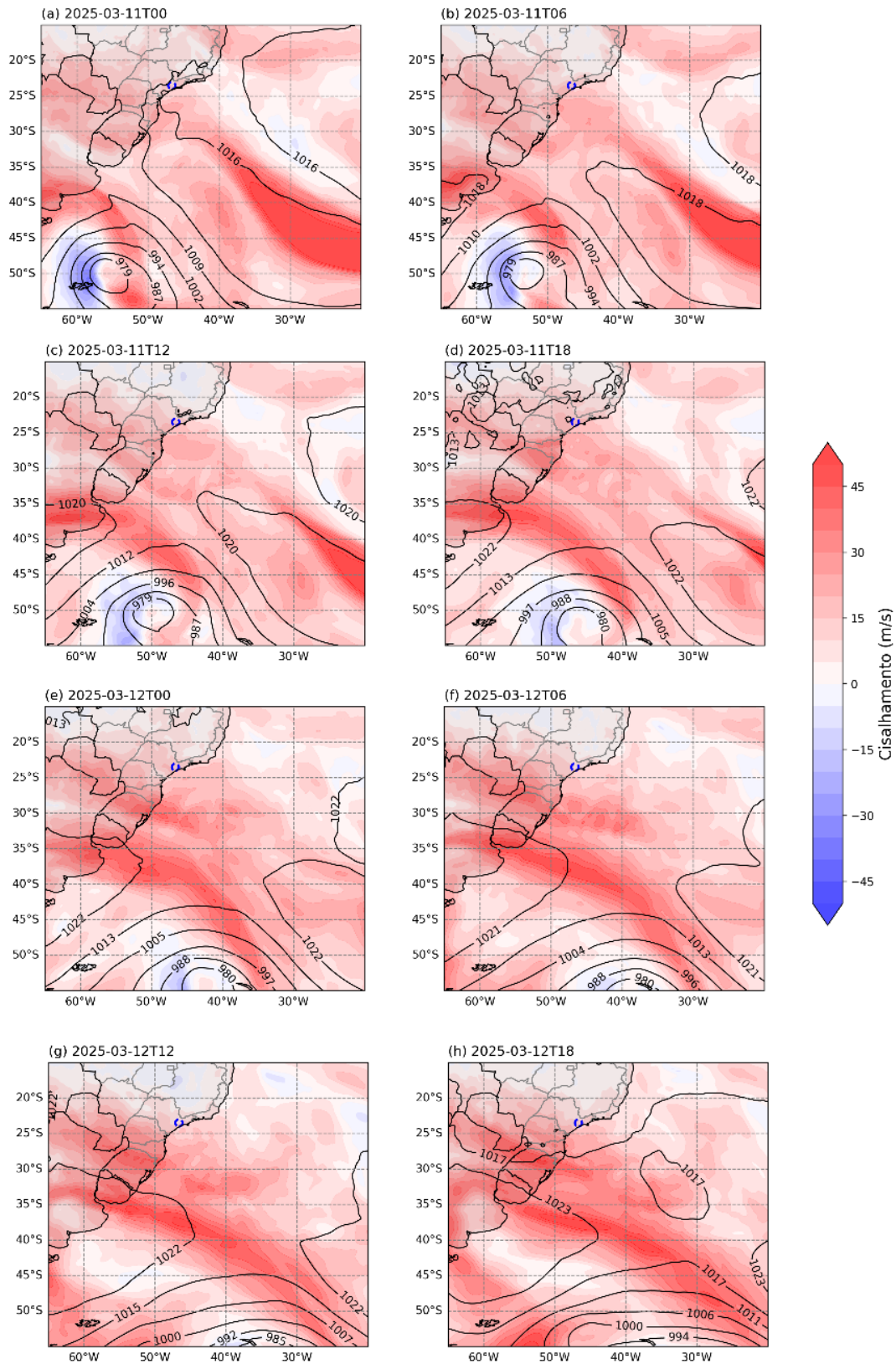


Figura 18 – CAPE (colorido, J/kg) e cisalhamento vertical do vento entre níveis de 500-100 hPa (linhas azuis e vermelhas, m/s).

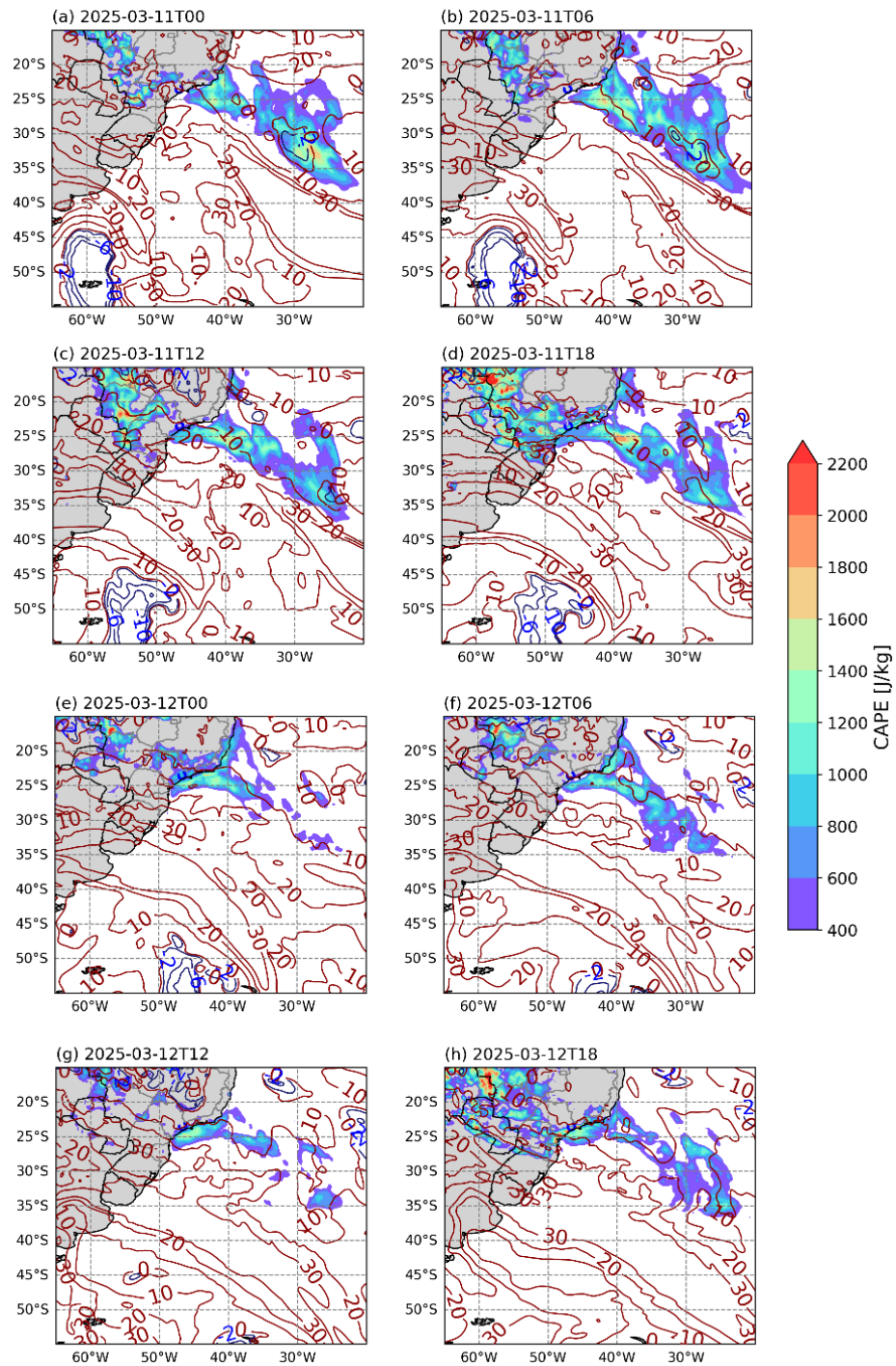
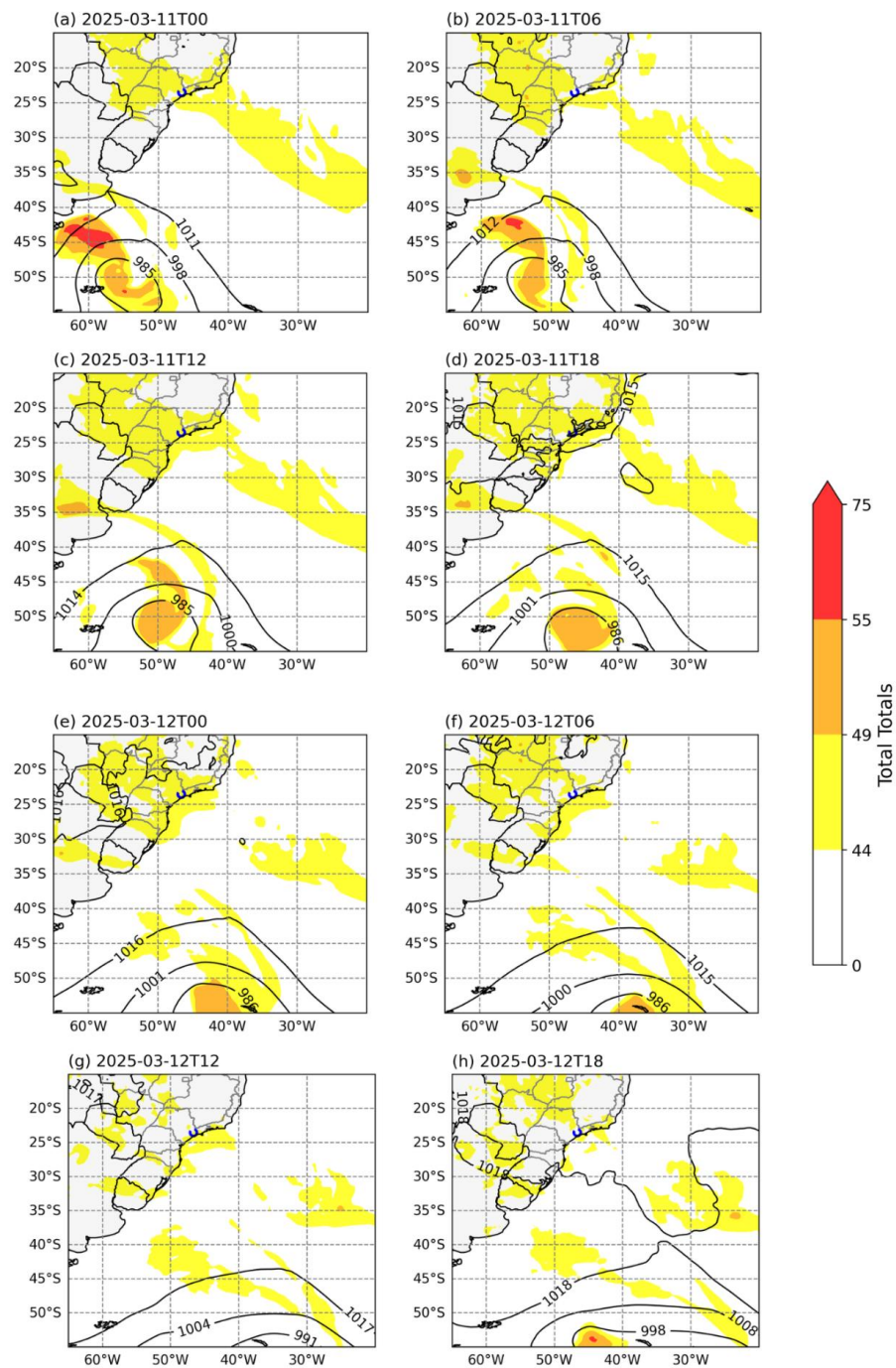


Figura 19 - Índice TT (colorido) e PNMM (linhas pretas contínuas, hPa).



4. CONCLUSÃO

A tempestade ocorrida em São Paulo no dia 12 de março de 2025 foi marcada principalmente pela intensidade dos ventos com rajadas de ~ 15 m/s registradas em algumas estações meteorológicas do CGE, enquanto a chuva atingiu cerca de 25 mm em 24 horas em poucas estações. As Zonas mais impactadas foram as Zonas Sul,

Central e Oeste, onde se registraram as maiores rajadas e acumulados de precipitação localizados.

A análise sinótica mostrou que o principal mecanismo dinâmico responsável pelo ambiente em que a tempestade se organizou foi a presença de um cavado em altos níveis, combinado com a formação de um cavado invertido em baixos níveis entre a costa do Sudeste do Brasil e o oceano Atlântico. A divergência associada ao cavado em altos níveis foi importante para a ocorrência dos movimentos ascendentes que auxiliaram na sustentação da região de baixa pressão em superfície. Já a análise dos índices de instabilidade termodinâmica evidencia um ambiente atmosférico predisposto ao desenvolvimento de convecção, pois os valores de CAPE foram superiores a 1000 J/kg indicando a existência de moderada a forte energia de empuxo, suficiente para sustentar vigorosas correntes ascendentes que são capazes de sustentar grandes sistemas.

Simultaneamente, o comportamento do índice *Total Totals* (TT), mantendo-se acima do limiar de 44, corrobora com a instabilidade da coluna troposférica, combinando o gradiente térmico vertical com o teor de umidade em baixos níveis. Segundo a literatura clássica (MILLER, 1972), esta configuração conjunta sugere uma alta probabilidade para a ocorrência de tempestades elétricas com potencial para eventos severos pontuais, uma vez que a atmosfera possui tanto a energia necessária para a aceleração vertical quanto a estrutura térmica favorável ao crescimento de nuvens *cumulonimbus*.

O forte cisalhamento vertical do vento entre 1000 e 500 hPa, com valores de ~30 m/s, proporcionou a sustentação e organização necessárias para o desenvolvimento de tempestades severas.

Este estudo reforça a importância do monitoramento sinótico e da análise detalhada das condições termodinâmicas e dinâmicas da atmosfera, especialmente em regiões urbanas densamente povoadas como São Paulo, onde eventos de curta duração e alta intensidade podem causar impactos socioeconômicos significativos.

A análise detalhada deste evento extremo em São Paulo evidenciou que, a despeito da magnitude dos impactos urbanos, a atual rede de observação apresenta limitações significativas para o monitoramento de fenômenos que impactam a metrópole dessa forma. Essa lacuna na disponibilidade de dados de alta resolução espacial e temporal compromete a aplicação eficaz do *Nowcasting* como a previsão imediata de 0 a 6 horas (WMO, 2017). Visto que tempestades severas, impulsionadas

por forte cisalhamento e instabilidade, possuem evolução rápida e não-linear, torna-se imperativo o investimento em um sistema integrado que combine radares meteorológicos, sensoriamento remoto e uma densa rede de superfície. Tal infraestrutura é o pré-requisito fundamental para operacionalizar técnicas de *Nowcasting* capazes de detectar precursores de tempo severo e emitir alertas precisos, mitigando os riscos à população da metrópole.

Como desdobramento deste estudo, futuras pesquisas poderiam integrar a análise de dados de radar meteorológico para caracterizar de forma mais detalhada as propriedades físicas das tempestades, como intensidade, estrutura de precipitação e distribuição de partículas de gelo. Além disso, seria relevante investigar a interação entre os padrões sinóticos identificados e a microfísica das nuvens, possibilitando maior compreensão sobre a formação de eventos extremos de chuva e aprimorando a previsão de tempestades severas na região estudada.

5. REFERÊNCIAS

ADAPTABRASIL. Desastres geo-hidrológicos: Inundações, enxurradas e alagamentos. Plataforma de Informações sobre Adaptação à Mudança do Clima. **MCTI/INPE**. Disponível em: <https://adaptabrasil.mcti.gov.br>. Acesso em: 25 agosto 2025.

ALVES, L. M et. al Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 - Estudos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 385-394, 2005.

ALVES, L. M. et al. Histórico de secas na Amazônia. **Secas na Amazônia: causas e consequências**, v. 53, n. 9, 2013.

BELTRAN, R. P. Características da precipitação e atividade elétrica de tempestades severas da Região Metropolitana de São Paulo. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – **Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo**, São Paulo, 2017.

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

BLUESTEIN, H. B. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: Observations and Theory of Weather Systems*. New York: **Oxford University Press**, 1993.

BRASSEUR, O., 2001. Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. **Monthly Weather Review** **129**, 5–25. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2)

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, n. 17, p. 2377–2394, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2377:EPEISS>2.0.CO;2)

CEMADEN. Boletim de Impactos de Extremos de Origem Hidro-Geo-Climático em Atividades Estratégicas para o Brasil – 13/03/2025 ANO 08 Nº 76 **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais**. São José dos Campos: CEMADEN, 2025.

CGESP – CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS. [Boletim meteorológico de 12 de março de 2025]. São Paulo: **CGESP**, 2025. Disponível em: <https://www.cgesp.org/v3/noticias.jsp?data=2025-03-12>. Acesso em: 17 maio 2025.

DE CASTRO, A.C.V; ALVIM, A.T.B. Sustainable Urbanization in Valley-Bottom Areas in Urban Settings: The Case of the Jaguaré Stream Basin, São Paulo, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 7, p. 3018, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16073018>

DOSWELL, C. A. The Distinction Between Large-Scale and Mesoscale Contribution to Severe Convection: A Case Study Example. **Weather and Forecasting**, v. 2, n. 1, p. 3–16, 1987.

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

G1. Chuva em SP deixa um morto e 170 mil imóveis sem luz; moradores sofrem com granizo, quedas de árvores e desabamento. **G1 São Paulo**, 12 mar. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2025/03/12/chuva-deixa-parte-da-capital-em-estado-de-atencao-para-alagamentos-54-mil-imoveis-estao-sem-luz-na-grande-sp.ghtml>. Acesso em: 17 maio 2025.

GARCIA, D. W. et al. Sensitivity Analysis and Performance Evaluation of the WRF Model in Forecasting an Extreme Rainfall Event in Itajubá, Southeast Brazil. **Atmosphere**, v. 16, n. 5, p. 548, 2025.

GRIMM, A. M.; VERA, C. S.; MECHOSO, C. R. The South American Monsoon System. The Global Monsoon System: Research and Forecast. C.-P. Chang, B. Wang and N.-C. G. Lau, Eds., WMO/TD n. 1266 – TMRP Report n. 70, p. 219-238, 2005.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na

região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 173-206, 2012.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. ***Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society***. Vol. 146, n.º 730 (2020), p. 1999-2049.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Tabela 8418 - Áreas urbanizadas, Loteamento vazio, Área total mapeada e Subcategorias. SIDRA - Banco de Dados Agregados. **IBGE**. Acesso em: 4 ago. 2025.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA). **Banco de Dados de Imagens de Satélite**. 2024. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 25 nov. 2025.

IPCC, 2023: Mudanças Climáticas 2023: Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas [Equipe Principal de Redação, H. Lee e J. Romero (eds.)]. **IPCC**, Genebra, Suíça, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).

JÚNIOR, C. P. A cidade de São Paulo: geografia e história. **São Paulo**: Editora Brasiliense, 1983.

LOMBARDO, M. A. Ilha de calor nas metrópoles o exemplo de são paulo. **São Paulo: Hucitec**. Acesso em: 28 agosto 2025. , 1985

LUDWIG, Patrick. European winter storms: Dynamical aspects and wind gust estimation based on results of regional climate model simulations. 2015. Tese de Doutorado. **Universität zu Köln**.

MACHADO, L. A. T. et al. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998.

MARENGO, J. A. et al. *Extreme rainfall and hydro-geo-meteorological disaster risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C global warming scenarios: an analysis for Brazil*. **Frontiers in Climate**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.610433>.

MARENGO, J. A. et al. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 5-20, 2020. <https://doi.org/10.1111/nyas.14307>

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

MILLER, R. C. *Notes on analysis and severe-storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central*. Scott Air Force Base, IL: Air Weather Service, 1972. (Technical Report 200)

MOLLER, A. R. *Severe local storms forecasting*. In: *Severe convective storms*. Boston, MA: **American Meteorological Society**, 2001. p. 433-480.

NARDIN, J. P.; HALLAK, R.; AMORIM, A. C. B. Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 197-206, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/fpwL3WDVVHWxMM6VvdxVGpf/>.

NOAA. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. GOES-R Series Data Book. Greenbelt, MD: **NASA/NOAA**, 2019. Disponível em: <https://www.goes-r.gov/resources/docs.html>.

OBREGÓN, G. O. et al. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research**, v. 61, n. 2, p. 93-107, 2014.

ODA, P. S. S. et al. Disasters in Petrópolis, Brazil: political, urban planning, and geometeorological factors that contributed to the event on February 15, 2022. **Urban Climate**, v. 50, 101849, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101849>.

RADZKA, E.; OLSZEWSKA, E.. Assessment of hazard from damaging wind gusts in the Siedlce area. **Journal of Ecological Engineering**, v. 23, n. 7, 2022.

REBOITA, M. S. et al. A multi-scale analysis of the extreme precipitation in Southern Brazil in April/May 2024. **Atmosphere**, v. 15, n. 9, p. 1123, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15091123>.

RIBEIRO, F.N.D., et al. (2015). *Urban heat island in the metropolitan area of São Paulo and the influence of warm and dry air masses during summer*. **ICUC9–9th International Conference on Urban Climate**, disponível em : <http://www.meteo.fr/icuc9//>, acesso em: 10 agosto 2025.

RIEMANN-CAMPE, K. et al. *Global climatology of convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis*. **Atmospheric Research**, v. 93, n. 1-3, p. 534-545, 2009.

SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo de climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.

SCHMIT, T. J. et al. A closer look at the ABI on the GOES-R series. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 4, p. 681-698, 2017.

SCHMIT, T. J. et al. Introducing the next-generation advanced baseline imager on GOES-R. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 8, p. 1079-1096, 2005.

SOUZA, C. V. F.; RANGEL, R. H. O.; CATALDI, M. Avaliação numérica da influência da urbanização no regime de convecção e nos padrões de precipitação da Região Metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 495–508, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786324001>.

THOMPSON, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. **Wea. Forecasting**, 18, 1243–1261

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. *Atmospheric science: an introductory survey*. 2. ed. **Canada: Elsevier Academic Press**, 2006. 483 p.

WEISMAN, M. L.; KLEMP, J. B. The dependence of numerically simulated storm structure on vertical wind shear and buoyancy. *Monthly Weather Review*, v. 110, n. 6, p. 504–520, 1982.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. 8. ed. Geneva: **WMO**, 2024. (WMO-No. 8). Disponível em: <https://wmo.int/guide-instruments-and-methods-of-observation-wmo-no-8-0>. Acesso em: 19 de maio 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guidelines for Nowcasting Techniques. WMO-No. 1198. Geneva: **World Meteorological Organization**, 2017. Disponível em: <https://library.wmo.int/idurl/4/55666> Acesso em: 25 nov. 2025.