

ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TAMANDUATEÍ, SÃO PAULO

Matheus José Gomes – Cemaden & UNIFEI

Rebeca Ferreira do Nascimento – UFAL

Lidiane dos Santos Lima – Cemaden & UFRJ

Leonardo Bacelar Lima Santos - Cemaden

Elton Vicente Escobar-Silva - Cemaden

1) INTRODUÇÃO

A intensificação de eventos extremos de precipitação, potencializada pelas mudanças climáticas, impõe riscos significativos a centros urbanos (MARENGO et al., 2012). A compreensão dos mecanismos atmosféricos que originam tais eventos é crucial. A literatura aponta que os regimes de precipitação na América do Sul são modulados por uma complexa interação de sistemas de diferentes escalas, incluindo Frentes Frias (FF), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e a circulação de brisa local (REBOITA et al., 2010). A análise sinótica individualizada de cada evento permite identificar qual desses padrões foi o principal condicionante para a precipitação extrema. Neste contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia para selecionar e analisar os eventos mais intensos na bacia na última década, classificando-os de acordo com sua origem sinótica.

2) OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

Objetivo geral é desenvolver uma abordagem metodológica para a identificação e análise de eventos extremos de precipitação, com base em limiares estatísticos e na investigação das condições sinóticas que os antecedem e acompanham.

Os objetivos específicos deste trabalho são (i) desenvolver um método de seleção de eventos baseado em limiares estatísticos (percentil 98) para diferentes janelas de

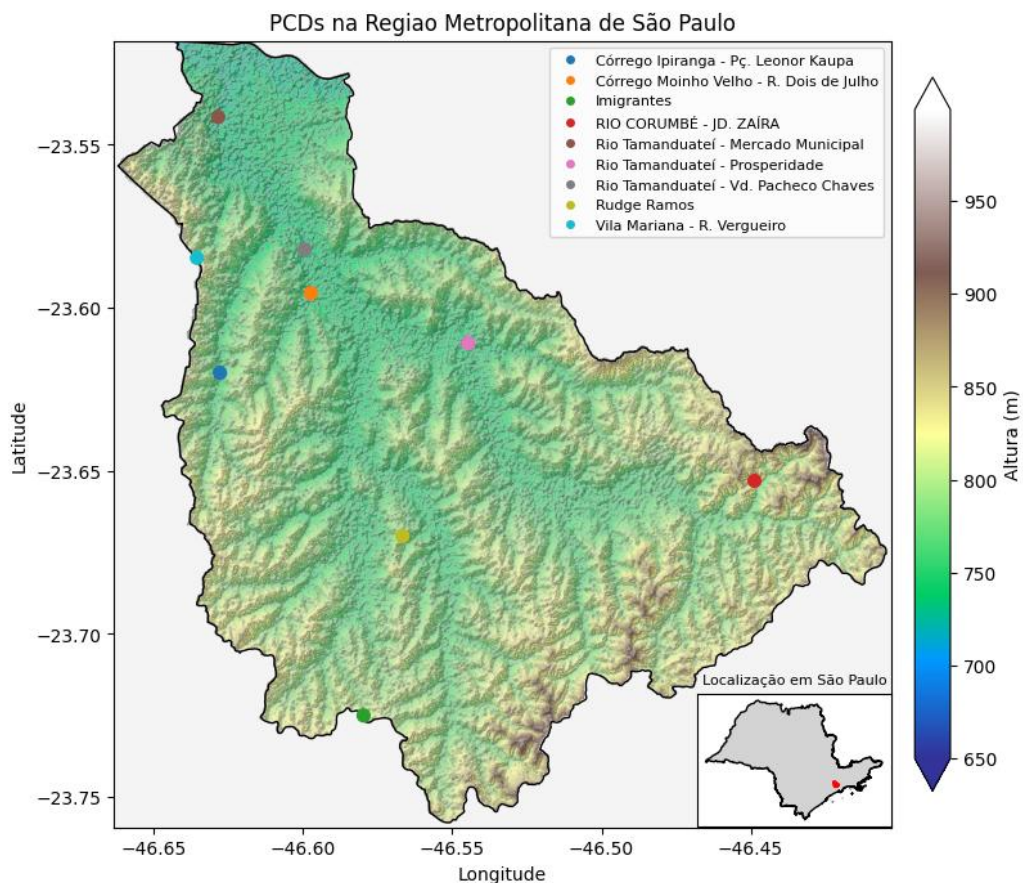
acumulação; e (ii) realizar a análise sinótica dos eventos selecionados, investigando as condições atmosféricas precursoras e atuantes.

3) METODOLOGIA

3.1) Área de Estudo e Dados

A área de estudo é a Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí, inserida na Região Metropolitana de São Paulo (Figura 1). Esta bacia é um exemplo notório de vulnerabilidade, onde chuvas intensas frequentemente resultam em inundações com severos impactos socioeconômicos (ESCOBAR-SILVA et al., 2023; MARENGO et al., 2020).

Figura 1 - Posição PCDs na Região metropolitana de São Paulo.



Foram utilizados dados de precipitação horária da década de 2015 a 2025 de estações meteorológicas do Sistema de Alerta a Inundações do Estado de São Paulo (SAISP) e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Para a análise atmosférica, foram empregados dados da reanálise ERA5 do ECMWF (HERSBACH et al., 2020), divergência do vento, geopotencial, umidade relativa, temperatura, componente zonal e meridional do vento, velocidade vertical do vento, em 12 níveis de pressão (250, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 775, 800, 825, 850, e 1000 hpa), e em apenas um nível a temperatura a 2 metros, pressão ao nível médio do mar (PNMM), e energia potencial convectiva disponível (CAPE). Ambos com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

3.2) Tratamento de Dados e Definição de Limiares

As séries de precipitação foram submetidas a um controle de qualidade para remoção de dados negativos, faltantes ou espúrios. Em seguida, foram calculadas médias móveis com janelas de 1, 4 e 24 horas. O limiar de evento extremo foi definido como o percentil 98 (P_{98}) (DA ROCHA FILHO, 2022), calculado anualmente para cada estação e janela, a fim de capturar a variabilidade interanual.

3.3) Seleção dos Eventos

Para garantir a independência entre os eventos, a série temporal foi analisada em blocos de 7 dias. Uma “semana” foi marcada como contendo um evento potencial se qualquer valor de precipitação acumulada ultrapassasse seu respectivo limiar P_{98} . Dentro de cada semana marcada, o dia com o maior acumulado foi selecionado como o “dia do evento”.

3.4) Análise Sinótica e de Mesoescala

Para cada evento selecionado, foram geradas figuras nos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC) em intervalos de 6 horas. A seleção das variáveis meteorológicas analisadas baseou-se em estudos anteriores relevantes e seus respectivos focos de

pesquisa. Um conjunto significativo de variáveis (Altura Geopotencial em 250 hPa, Jatos em 250 hPa, Umidade Relativa [UR] média entre 850 e 500 hPa, Ômega em 500 hPa, Espessura entre 500 e 1000 hPa, CAPE, Cisalhamento entre 500 e 1000 hPa, e Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar [PNMM]) foi escolhido com base na análise de eventos extremos de precipitação (DA ROCHA BARTOLOMEI et al., 2023). Adicionalmente, a Altura Geopotencial em 500 hPa e a Temperatura a 2 metros do solo foram incluídas, seguindo a metodologia empregada na análise de ondas de frio (CAPUCIN et al., 2022). Variáveis como o Índice de Levantamento e os Ventos em 850 hPa foram consideradas com base em um estudo sobre ventos intensos e destrutivos (FRANCO, 2017). Por fim, a Divergência Positiva em 250 hPa foi adicionada devido à sua reconhecida relação com a cobertura de nuvens e precipitação (LAURENT, 2003).

Os dados utilizados no estudo foram extraídos como variáveis primárias em níveis de pressão. A partir dessas variáveis primárias, foi possível realizar o cálculo das demais variáveis necessárias para a análise sinótica. Para otimizar a visualização e a interpretação dos resultados, as variáveis analisadas foram agrupadas nas seguintes configurações de figuras:

- Figura 1: Divergência positiva em 250hPa [$1/s$], altura geopotencial em 250hPa [Dam], e Jatos em 250hPa (> 30 [m/s]);
- Figura 2: Umidade Relativa média entre 850 e 500hPa [%], Altura geopotencial em 500hPa [Dam], e movimento vertical ômega em 500hPa [Pa/s];
- Figura 3: Temperatura em 2 metros [$^{\circ}C$], Vento em 850hPa;
- Figura 4: Jatos em 250hPa (> 30 [m/s]), Espessura da Camada entre 500 e 1000hPa;
- Figura 5: CAPE [J/kg], e Índice Lifted (LFTX) [< -2];
- Figura 6: Cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa[m/s], e CAPE (>1000 [J/Kg]) e Pressão Média ao Nível do Mar (PNMM) [hPa].

A análise conjunta destes campos permitiu a classificação da gênese de cada evento, seguindo critérios da literatura.

4) RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1) *Eventos Selecionados*

A aplicação da metodologia de seleção (Seção 3.3) sobre a série de dados resultou na identificação de um conjunto amplo de eventos extremos ao longo da década (Tabela 1). Optou-se por detalhar dois estudos de caso que ilustram de forma representativa a aplicação do método de análise sinótica e a classificação dos diferentes sistemas atmosféricos geradores de chuva extrema na bacia.

Tabela 1 - Datas dos eventos extremos selecionados.

Ano	Datas dos Eventos Selecionados
2015	25/02/2015
2016	21/02/2016; 11/03/2016
2017	07/04/2017
2018	26/02/2018; 01/12/2018
2019	04/02/2019; 11/03/2019
2020	09/02/2020
2021	17/02/2021; 19/11/2021
2022	12/03/2022
2023	07/02/2023; 11/03/2023
2024	25/12/2024
2025	01/02/2025

O primeiro caso, de 09/02/2020, exemplifica um evento de origem convectiva associado à passagem de uma frente fria, enquanto o segundo, de 01/02/2025, representa uma configuração clássica de ZCAS.

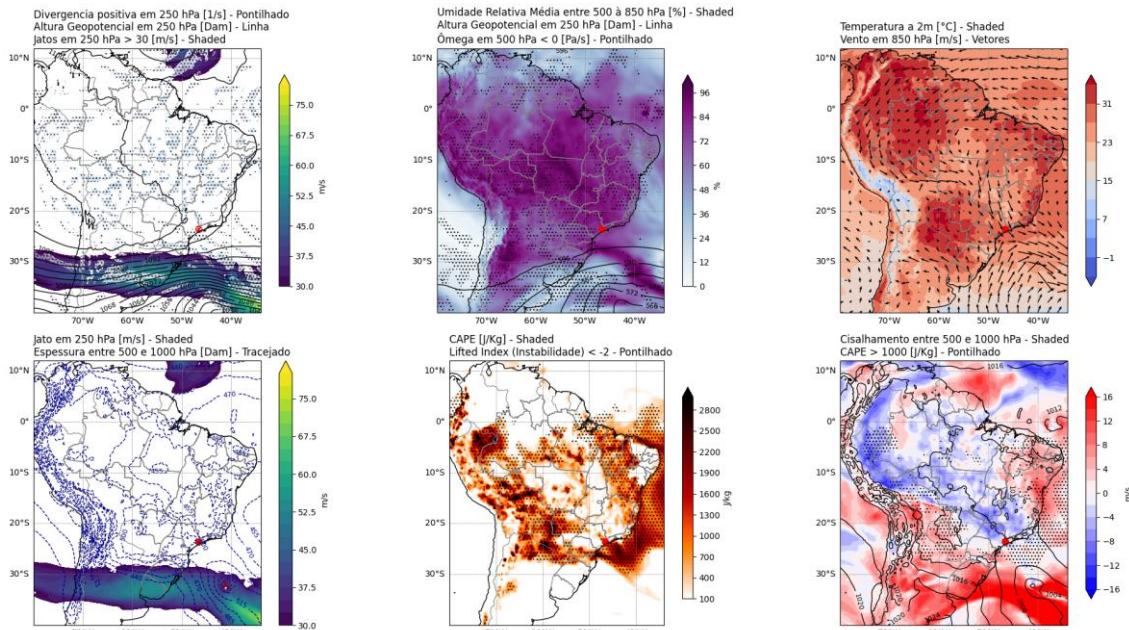
4.2) Análise Sinótica

A análise da configuração sinótica para o dia 09 de fevereiro de 2020, às 18:00 UTC (Figura 2), revela um acoplamento dinâmico-termodinâmico altamente favorável para a ocorrência de precipitação intensa e eventos extremos na área de estudo. A intensidade do evento está diretamente associada à combinação e sobreposição de diversos fatores atmosféricos críticos. Em termos de instabilidade termodinâmica, a região de São Paulo apresenta elevados valores de CAPE, com núcleos acima de 2000 J/kg, indicando grande potencial energético para o desenvolvimento de convecção profunda. Paralelamente, o Índice de Levantamento (LFTX) exibe valores negativos menores que -2, confirmando a atmosfera altamente instável e o baixo esforço necessário para iniciar o movimento ascendente.

O fator determinante para a severidade do evento é o eficiente transporte de umidade em baixos níveis. O campo de Vento em 850 hPa evidencia um escoamento bem intensificado de umidade, que se origina na Região Norte do Brasil e é direcionado para o Sudeste. Essa injeção de vapor d'água, somada à alta umidade relativa em médios níveis e à convergência em baixos níveis associados à baixa pressão de superfície e uma frente fria, estabelece o cenário clássico para a ocorrência de precipitação extrema.

Figura 2 - Configuração Sinótica para o dia 09 de fevereiro de 2020, às 18:00 UTC, detalhando o campo de circulação, termodinâmica e umidade.

Análise Sinótica - Válido: 2020-02-09 18:00Z

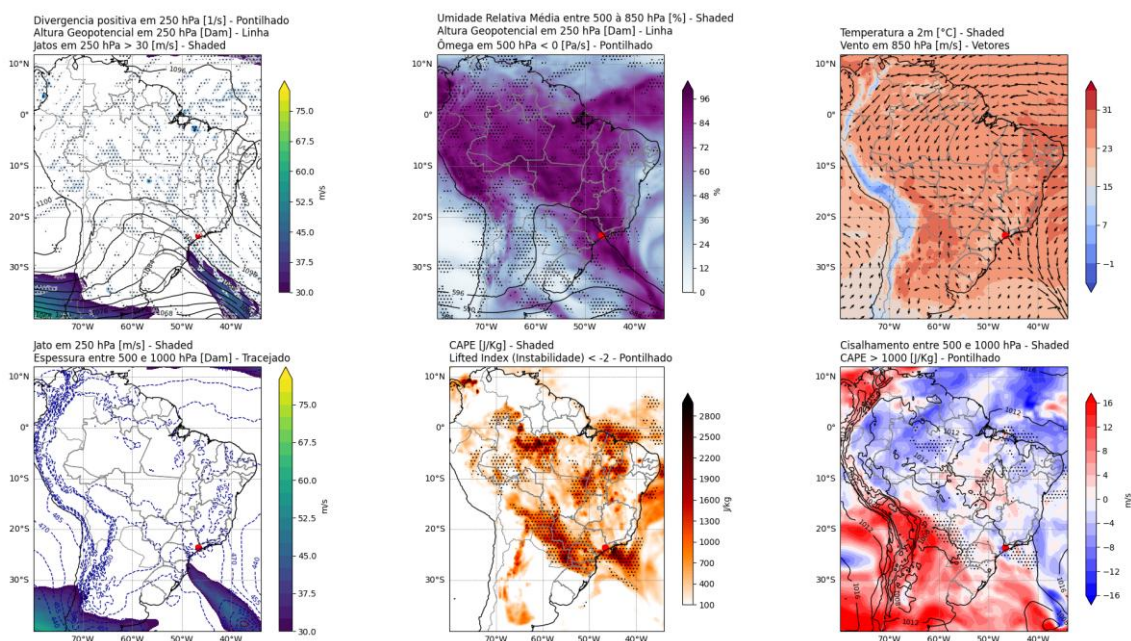


O cenário sinótico de 01 de fevereiro de 2025, às 12:00 UTC (Figura 3), é característico de um evento de ZCAS (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA; 2025), que atua como o principal mecanismo para a precipitação contínua e volumosa sobre a Região Sudeste, afetando significativamente a Bacia do Rio Tamanduateí. A principal evidência da ZCAS é observada no Vento em 850 hPa, que exibe um intenso escoamento de umidade do Noroeste do Brasil em direção ao Sudeste. Esse fluxo persistente é o componente chave que alimenta a convergência. Em médios níveis, o campo de Umidade Relativa média entre 850 e 500 hPa corrobora essa configuração, apresentando uma vasta e contínua faixa de umidade elevada (acima de 90% que se estende da Amazônia até o Atlântico, atravessando o estado de São Paulo). A sobreposição dessa faixa de umidade com o Ômega negativo (ascensão) em 500 hPa confirma a zona de convergência ativa e seu potencial para precipitação. Embora os valores de CAPE sejam moderados (em torno de 1000 a 1600 J/kg, o Índice de Levantamento (LFTX) negativo indica instabilidade suficiente para que o levantamento sinótico de grande escala promovido pela ZCAS sustente a precipitação intensa, diferentemente de eventos puramente convectivos. Em

altos níveis, a região está sob a influência de divergência de massa em 250 hPa, que atua como mecanismo que sustentação da ascensão.

Figura 3 - Configuração Sinótica para o dia 01 de fevereiro de 2025, às 12:00 UTC, detalhando o campo de circulação, termodinâmica e umidade.

Análise Sinótica - Válido: 2025-02-01 12:00Z



5) CONCLUSÃO

O presente trabalho implementou e validou uma metodologia robusta para a seleção e análise de eventos extremos de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Tamanduateí, São Paulo. A abordagem metodológica, que combina a definição de limiares estatísticos (percentil 98) para múltiplas janelas de acumulação com uma análise sinótica detalhada usando dados da reanálise ERA5, mostrou-se eficaz em identificar os eventos mais significativos.

Os estudos de caso exemplificaram a capacidade da metodologia em discernir padrões sinóticos distintos. O evento de 09 de fevereiro de 2020 foi caracterizado como um episódio convectivo severo, impulsionado por elevada instabilidade termodinâmica ($CAPE > 2000 \text{ J/kg}$) e intenso transporte de umidade em baixos níveis, associado à atuação de uma frente fria. Em contrapartida, o evento de 01 de fevereiro de 2025 foi

classicamente associado a uma configuração de ZCAS, onde o forçamento sinótico de grande escala e o fluxo persistente de umidade da região amazônica foram os fatores dominantes para a precipitação volumosa, mesmo com valores moderados de CAPE. A distinção desses mecanismos é fundamental para a gestão de riscos na Região Metropolitana de São Paulo, visto que indicam processos físicos diferentes (convecção de curta duração e alta intensidade vs. precipitação estratiforme persistente e volumosa).

Como trabalhos futuros, esta metodologia será aplicada a toda a série de eventos selecionados na última década, permitindo uma climatologia dos padrões sinóticos que geram extremos na bacia. Isso fornecerá um subsídio valioso para aprimorar sistemas de alerta e estudos de adaptação às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Este trabalho teve apoio do Projeto nº 446053/2023-6 financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Projeto nº 24/02748-7 financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

REFERÊNCIAS

- CAPUCIN, Bruno César et al. Análise sinótica e de grande escala de ondas de frio extremas no sudeste do Brasil no século XX. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, p. 1-15, 2022.
- DA ROCHA BARTOLOMEI, Fabiana; RIBEIRO, João Gabriel Martins; REBOITA, Michelle Simões. Eventos extremos de precipitação no sudeste do Brasil: Verão 2021/2022. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 16, n. 05, p. 2658-2676, 2023.
- DA ROCHA FILHO, Kleber Lopes et al. Identificação e distribuição temporal de extremos de precipitação horária nos últimos 15 anos na região metropolitana de São Paulo. **Abrhidro: XIV Encontro Nacional de Águas Urbanas/IV Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos, Brasília**, v. 4, n. 14, p. 1-10, 2022.
- ESCOBAR-SILVA, Elton Vicente; ALMEIDA, Cláudia Maria de; SILVA, Gutavo Barbosa Lima da; BURSTEINAS, Ingobert; ROCHA FILHO, Kleber Lopes da;

- OLIVEIRA, Cleber Gonzales de; FAGUNDES, Marina Refatti; PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias De. Assessing the Extent of Flood-Prone Areas in a South-American Megacity Using Different High Resolution DTMs. **WATER**, no. 6 (2023): 1127.
- FRANCO, R. M.-C.; MENEZES, W. F.; VASCONCELLOS, F. C. Análise Sinótica e de Mesoescala de Ventos Intensos com Impacto Destrutivo em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica no Paraná. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 07, p. 3177, 11 dez. 2020.
- HERSBACH, Hans et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. **Copernicus climate change service (c3s) climate data store (c3s)**, v. 10, p. 24381, 2023.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. (2025). EVENTOS EXTREMOS DE FEVEREIRO DE 2025 NO BRASIL [Nota técnica]. [https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#Instituto Nacional de Meteorologia. \(2025\)](https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#Instituto Nacional de Meteorologia. (2025))
- LAURENT, Henri. A divergência do vento em altos níveis e sua relação com a cobertura de nuvens e a precipitação, durante o WETAMC/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 18, n. 2, p. 105-117, 2003.
- MARENGO, José 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.
- MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.
- REBOITA, Michelle Simões et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.