

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

GUSTAVO YUDI MAEDO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO EM
SÃO CARLOS – SP NO VERÃO DE 2024/2025**

BAURU – SP

2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

GUSTAVO YUDI MAEDO

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO EM
SÃO CARLOS – SP NO VERÃO DE 2024/2025**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio
de Mesquita Filho” como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Helber Custódio de Freitas

Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru

Prof. Dr. Demerval Soares Moreira

Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru

Prof. Dr. Luiz Felipe Gozzo

Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru

Suplente: Profa. Dra. Clara Miho Narukawa

Faculdade de Ciências - UNESP - Bauru

M184a Maedo, Gustavo Yudi
Análise da variabilidade espacial e temporal da precipitação na cidade de São Carlos -SP no verão de 2024/2025 / Gustavo Yudi Maedo. -- Bauru, 2025
37 p. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Meteorologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências, Bauru
Orientador: Helber Custódio de Freitas

1. Hidrometeorologia. 2. Meteorologia. 3. Chuvas.
4. Pluviômetros. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Dados fornecidos pelo autor(a).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	iii
LISTA DE ANEXOS.....	iv
RESUMO.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	2
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 JUSTIFICATIVA.....	3
4 METODOLOGIA.....	4
5 RESULTADOS.....	6
6 CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS.....	33
ANEXO A - CARTAS SINÓTICAS.....	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos seis pluviômetros automáticos (P1 a P6) na área de São Carlos, SP. Fonte: Google Earth (2025).....	5
Figura 2. Média dos acumulados mensais de chuva medidos em todos os pontos (P1 a P6) - São Carlos - SP..	7
Figura 3. Perfil diário médio de acúmulo horário (mm/h), desvio padrão (barras pretas) e frequência de chuva em todos os pontos (contagem total de blocos de 1 hora com chuva, número em vermelho) para todos os pluviômetros (P1 a P6) - São Carlos - Sp.....	8
Figura 4. Histograma de frequência de eventos por volume total acumulado em todos os pontos (P1 a P6) - São Carlos - SP.....	9
Figura 5. Perfil de intensidade instantânea para o evento 1 - São Carlos - SP.....	11
Figura 6. Perfil de intensidade instantânea para o evento 2 - São Carlos - SP.....	12
Figura 7. Perfil de intensidade instantânea para o evento 3 - São Carlos - SP.....	12
Figura 8. Perfil de intensidade instantânea para o evento 4 - São Carlos - SP.....	13
Figura 9. Perfil de intensidade instantânea para o evento 5 - São Carlos - SP.....	13
Figura 10. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 1 - São Carlos - SP.....	14
Figura 11. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 2 - São Carlos - SP.....	15
Figura 12. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 3 - São Carlos - SP.....	15
Figura 13. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 4 - São Carlos - SP.....	16
Figura 14. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 5 - São Carlos - SP.....	16
Figura 15. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 1 - São Carlos - SP.....	18
Figura 16. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 2 - São Carlos - SP.....	18
Figura 17. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 3 - São Carlos - SP.....	19
Figura 18. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 4 - São Carlos - SP.....	19
Figura 19. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 5 - São Carlos - SP.....	20
Figura 20. Curva de massas em porcentagem, Evento 1 - São Carlos - SP.....	21
Figura 21. Curva de massas em porcentagem, Evento 2 - São Carlos - SP.....	21
Figura 22. Curva de massas em porcentagem, Evento 3 - São Carlos - SP.....	22
Figura 23. Curva de massas em porcentagem, Evento 4 - São Carlos - SP.....	22
Figura 24. Curva de massas em porcentagem, Evento 5 - São Carlos - SP.....	23
Figura 25. Perfil de intensidade média acumulada para o evento mais longo - São Carlos - SP.....	25
Figura 26. Perfil de intensidade média acumulada para o segundo evento mais longo - São Carlos - SP.....	25
Figura 27. Perfil de intensidade média acumulada para o terceiro evento mais longo - São Carlos - SP.....	26
Figura 28. Perfil de intensidade média acumulada para o quarto evento mais longo - São Carlos - SP.....	26
Figura 29. Perfil de intensidade média acumulada para o quinto evento mais longo - São Carlos - SP.....	27
Figura 30. Curva de massas em porcentagem, evento mais longo - São Carlos - SP.....	28
Figura 31. Curva de massas em porcentagem, segundo evento mais longo - São Carlos - SP.....	28
Figura 32. Curva de massas em porcentagem, terceiro evento mais longo - São Carlos - SP.....	29
Figura 33. Curva de massas em porcentagem, quarto evento mais longo - São Carlos - SP.....	29
Figura 34. Curva de massas em porcentagem, quinto evento mais longo - São Carlos - SP.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação dos 5 maiores eventos em acumulação total por pluviômetro.....	9
Tabela 2. Lag Time entre os pontos.....	9
Tabela 3. Cinco eventos com maiores durações.....	23

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MIET: Mínimo Intervalo de Tempo Entre Eventos

P1 a P6: Identificação dos Pluviômetros

SP: São Paulo (Estado)

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – FIGURA 1: Carta Sinótica de Superfície, 25/04/2025 às 12Z. Fonte: Marinha do Brasil (2025).....	35
ANEXO A – FIGURA 2: Carta Sinótica de Superfície, 07/11/2024 às 12Z. Fonte: Marinha do Brasil (2025).....	36
ANEXO A – FIGURA 3: Carta Sinótica de Superfície, 31/01/2025 às 00Z. Fonte: Marinha do Brasil (2025).....	37

RESUMO

A variabilidade espacial e temporal da precipitação é um importante fator para a gestão de riscos hidrológicos. No entanto, muitas vezes é subestimada devido à falta de conhecimento através de dados de alta resolução. Este trabalho investigou a variabilidade da precipitação na cidade de São Carlos - SP, por dados obtidos por uma rede de seis pluviômetros automáticos com resolução temporal de 5 minutos, durante o período de outubro de 2024 a maio de 2025. A análise se deu na caracterização da sazonalidade, do ciclo diurno, da frequência de eventos por magnitude e a análise detalhada dos cinco eventos de maior volume acumulado, e dos cinco eventos de maior duração. Foram adotados Perfis de Intensidade Instantânea, Perfis de Intensidade Média Acumulada e Curvas de Massa (Absolutas e em Porcentagem), incluindo também o cálculo do *Lag Time* para numerar a heterogeneidade espacial. Os resultados confirmaram a predominância de eventos de chuvas convectivas, em maior número no período da tarde, e revelaram que a maior parte dos eventos possuem baixa magnitude (0-5 mm). Embora os eventos com alta magnitude (>30 mm) ocorram com menos frequência, eles são responsáveis pela maior parte do volume total de precipitação. A análise destacou a significativa variabilidade espacial, com o *Lag time* variando de 5 a 40 minutos entre os pluviômetros e a característica de distribuição temporal, com maior concentração de chuva no início nos eventos de maior volume. Por outro lado, os eventos de maior duração demonstraram maior homogeneidade espacial, sugerindo a ação de sistemas frontais e maior contribuição para a saturação do solo. Conclui-se que a rede de alta resolução foi essencial para captar a heterogeneidade da precipitação em pequena escala e diferenciar os mecanismos de precipitação, gerando informações importantes para o planejamento urbano e gestão de riscos em São Carlos.

PALAVRAS CHAVE: Precipitação; São Carlos; Variabilidade Espacial; Pluviômetro.

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das principais variáveis meteorológicas no contexto da infraestrutura e planejamento urbano, influenciando o suprimento hídrico, equilíbrio ambiental e a gestão de riscos de inundações. Contudo a sua distribuição no espaço e tempo é essencialmente variável, fator amplificado em áreas urbanas, onde a topografia irregular e os diferentes mecanismos de formação de chuva tornam difícil o entendimento da hidrologia urbana, como a sobrecarga nos sistemas de drenagem e a erosão. A dificuldade em obter dados representativos é agravada pelo fato da precipitação intensa, em especial a de origem convectiva, possuir núcleos intensos e curta duração, cuja variabilidade pode se manifestar em pequenas distâncias (TOKAY et al., 2014; SCHRÖER et al., 2018).

A região de São Carlos possui um clima subtropical de altitude (Cwa, segundo a classificação de Köppen), caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos e amenos. A estação chuvosa é bem definida, ocorrendo tipicamente entre os meses de Outubro e Março, com a precipitação média anual historicamente próxima de 1.400 mm.

São Carlos, SP, cidade no interior paulista em constante expansão e históricos de eventos de precipitação intensa, está inserida em um regime pluviométrico dominado por chuvas convectivas locais nos meses de verão, com ocorrências concentradas no período da tarde (CAVALCANTI et al., 2006). Estudos anteriores na região (ex: SANCHES, 2019) utilizaram dados de redes pluviométricas menos densas ou com frequência de coleta menor. Embora esses estudos tenham estabelecido as tendências na precipitação local e os índices climáticos, a baixa resolução temporal e espacial limita a obtenção de algumas informações importantes para a hidrologia urbana, como a análise da assincronia de picos de intensidade e a quantificação do atraso da chuva em diferentes pontos.

Neste estudo, essa carência é suprida pela utilização de dados de uma densa rede de pluviômetros automáticos (P1 a P6) instalados em diferentes pontos da cidade de São Carlos. Esses pluviômetros foram instalados para coleta de dados no âmbito do projeto CNPq 446043/2023-0, intitulado "Avanços em ferramentas de nowcasting aplicadas a inundações urbanas". Essa rede forneceu dados de precipitação acumulada a cada 5 minutos, durante o período da estação chuvosa no Sudeste do estado de São Paulo, entre Outubro de 2024 e Maio de 2025, permitindo a análise detalhada dos mecanismos de precipitação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a variabilidade da chuva no espaço e no tempo em São Carlos - SP, usando dados de pluviômetros de alta precisão coletados entre outubro de 2024 e maio de 2025, procurando identificar padrões de distribuição da chuva e os tipos de eventos associados.

2.2 Objetivos Específicos

A partir da base de dados, este trabalho buscou objetivos específicos que colaborassem para a melhor compreensão do regime pluviométrico local. Em primeiro lugar, buscou-se identificar os padrões temporais de intensidade e duração da chuva nos locais de medição, caracterizando o perfil de precipitação de cada ponto. Logo após, o foco foi comparar o comportamento da chuva entre os diferentes pontos, investigando variações espaciais e heterogeneidade dos sistemas de precipitação em pequena escala, com base em referências bibliográficas existentes e na análise detalhada dos gráficos de intensidade e curvas de massa. Por fim espera-se que os resultados obtidos no trabalho possam auxiliar na formulação de estratégias para a emissão de alertas e auxiliar no planejamento e gestão de drenagem urbana na cidade de São Carlos, além de servir como base teórica para outros trabalhos.

3 JUSTIFICATIVA

Analisar a precipitação detalhadamente no tempo e espaço é crucial para compreender os processos atmosféricos locais, especialmente em áreas urbanas. Em São Carlos - SP, apesar do monitoramento meteorológico básico, faltam estudos que explorem a fundo como a chuva se distribui em diferentes pontos da região. Essa falta prejudica a capacidade de prever e responder a eventos extremos, como as inundações, que tem ocorrido com maior frequência ultimamente.

A precipitação, especialmente a de origem convectiva em áreas urbanas, é caracterizada por uma alta variabilidade espacial e temporal. Estudos observacionais como o de Tokay et al, (2014), mostram que a intensidade e o volume da chuva podem ser totalmente diferentes mesmo em distâncias de alguns quilômetros, demonstrando a dificuldade de representar esses eventos com redes convencionais (pouco densas).

Com a instalação dos seis pluviômetros automáticos pela cidade, podemos investigar a variação da chuva na área urbana com mais precisão (Schröer et al., 2018). Permitindo identificar diferenças na intensidade e duração da chuva entre os pontos, e também entender como ela se forma, seja por sistemas frontais, convecção local ou orografia.

Além disso, os resultados do projeto podem ajudar na criação de políticas públicas de gestão de risco e na defesa civil, ajudando na emissão de alertas meteorológicos. Podendo também servir de base científica para estudos futuros em climatologia urbana e hidrometeorologia, áreas essenciais para o planejamento sustentável das cidades.

4 METODOLOGIA

Foram utilizados dados de precipitação com resolução temporal de 5 minutos, durante o período da estação chuvosa, entre outubro de 2024 e maio de 2025. Essa série foi composta por 6 pluviômetros automáticos (P1 a P6) localizados em diferentes pontos da cidade de São Carlos - SP (Figura 1). A distribuição espacial desses pontos permite garantir a representatividade de diferentes regiões da cidade, possibilitando a análise da variabilidade da precipitação em escala local.



Figura 1. Localização dos seis pluviômetros automáticos (P1 a P6) na área de São Carlos, SP. **Fonte:** Google Earth (2025).

A manipulação dos dados foi realizada principalmente por meio da linguagem de programação Python, com bibliotecas focadas em dados e séries temporais como Pandas e Numpy, e o Matplotlib para a obtenção de gráficos.

Os dados brutos dos pluviômetros foram lidos, tratados e consolidados em um único DataFrame para ser feita a análise conjunta. A unidade de milímetro (mm) de chuva foi mantida, sendo essa alterada quando necessário.

O tempo mínimo entre eventos (MIET), para se separar os eventos de precipitação entre si foi de 30 minutos sem medição de precipitação (período seco), intervalo mais utilizado para estudos do cenário urbano. Na literatura esse intervalo varia de 15 minutos a 24 horas, a depender da necessidade do estudo e características locais (BRASIL et al., 2022).

A seleção dos 5 maiores eventos foi feita com base em uma tabela em ordem decrescente das maiores precipitações acumuladas nos pluviômetros de forma singular, com o horário do início do evento deste ponto como sendo o início regional para o período da análise (cada ponto tem o seu início regional).

Para a classificação dos eventos, com base em seu mecanismo de formação, foram utilizados os gráficos de intensidade, curvas de massas e hietogramas, seguindo as sugestões da literatura (Shuttleworth, 2012, etc): Chuva convectiva, é caracterizada por altos picos de intensidade, e rápido crescimento em sua acumulação;

A precipitação resultante de sistemas de grande escala (como a ZCAS, frentes frias, e cavados) é caracterizada por um crescimento de intensidade gradual e por uma distribuição espacial mais homogênea. Nesses sistemas, a ascensão do ar ocorre de forma gradual, e devido à sua maior escala espacial e maior longevidade, a precipitação tende a apresentar duração prolongada.

5 RESULTADOS

O estudo da pluviosidade na região inicia-se na análise da sazonalidade da precipitação durante o período de monitoramento, as análises que seguirão para as figuras 2, 3 e 4 referem-se a todos os pontos (de P1 a P6). O gráfico de Acúmulo Médio Mensal (Figura 2) demonstra a distribuição da precipitação média acumulada (mm) em todos os pontos de medição, cobrindo o período de outubro de 2024 a maio de 2025, esses dois meses, porém estão com dados incompletos, já que o monitoramento não cobriu a totalidade desses meses.

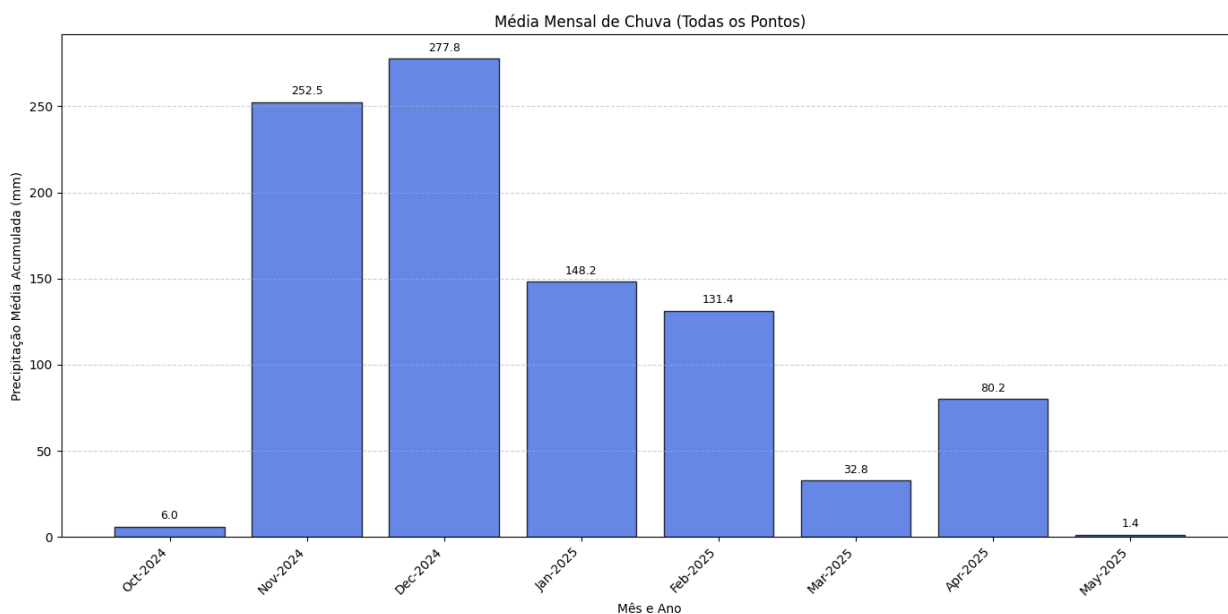


Figura 2. Média dos acumulados mensais de chuva medidos em todos os pontos (P1 a P6) - São Carlos - SP.

A análise do gráfico revela um padrão esperado, coincidente com o clima local, com estações bem definidas, com verão chuvoso (SANCHES et al., 2019; SANTOS; SOUZA; VECCHIA, 2017). A precipitação é maior nos meses de verão, tendo destaque os meses de dezembro de 2024, com a maior média (277,8 mm) e novembro de 2024 (252,5 mm). Os dois primeiros meses de 2025 também confirmaram a elevada precipitação na estação chuvosa, com médias acima de 130 mm. Observa-se, ainda, uma diminuição acentuada nos volumes a partir de março, onde as médias caíram para 32,8 mm, subindo ligeiramente em abril para 80,2.

O gráfico de Frequência de Chuva em todos os pontos (Figura 3) mostra a influência da convecção no ciclo diário da chuva, apresentando maior intensidade de precipitação acumulada média e consistência do número de eventos ocorridos no período da tarde e início da noite (13h às 20h), Contudo com desvio padrão superior, mostrando maior variabilidade. Este padrão indica a predominância de chuvas convectivas nesse período. Semelhantemente as primeiras horas do dia apresentam maiores valores, porém com menos eventos registrados.

Destaca-se que o maior número de eventos registrados ocorre às 16 horas, com 162 ocorrências em um período de 1 hora com chuva, seguido das 19 e 17 horas (152 e 143 contagens respectivamente). Este padrão indica a predominância do mecanismo convectivo na região nestes horários, após os picos de incidência de radiação do Sol, que fornece a energia necessária para a formação de nuvens convectivas. Este é o típico comportamento na região, sendo amplamente registrado na literatura climatológica da região, onde a precipitação de verão é frequentemente associada a sistemas convectivos de pequena escala (CAVALCANTI et al., 2006).

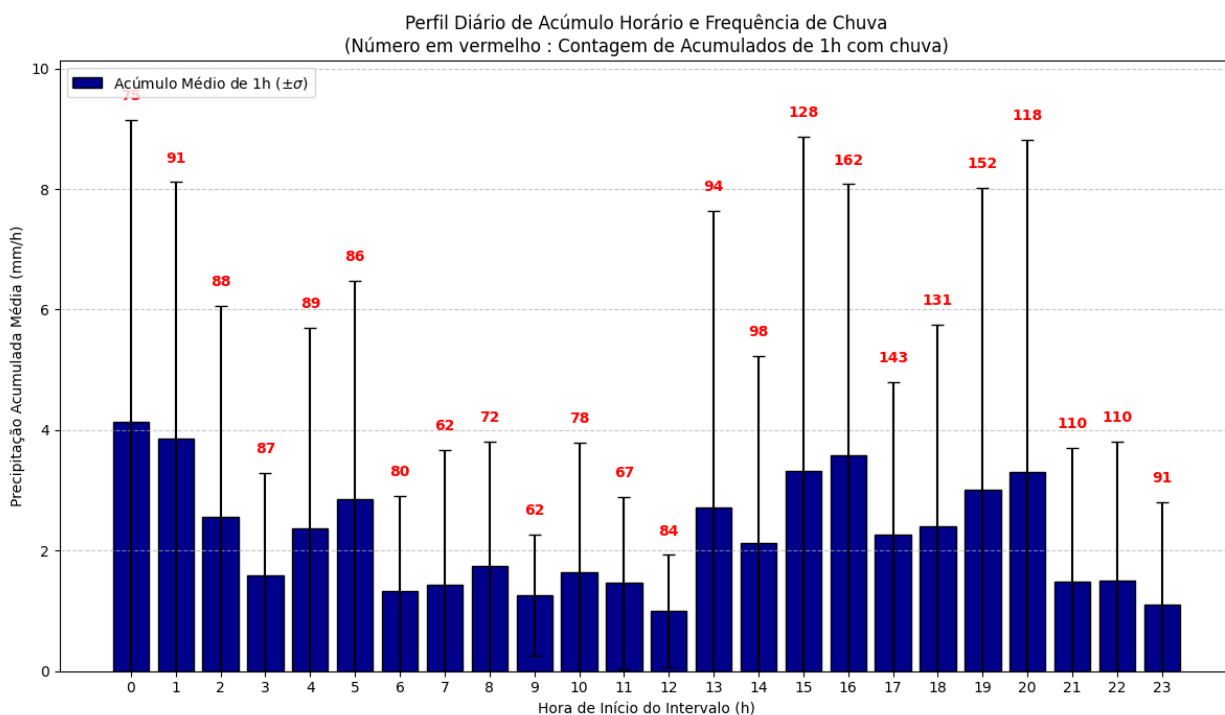


Figura 3. Perfil diário médio de acúmulo horário (mm/h), desvio padrão (barras pretas) e frequência de chuva em todos os pontos (contagem total de blocos de 1 hora com chuva, número em vermelho) para todos os pluviômetros (P1 a P6) - São Carlos - Sp.

A análise temporal, demonstrada na Figura 3, confirma que a maior parte das ocorrências de precipitação é de origem convectiva. Entretanto, o Histograma de Frequência de Eventos por Magnitude (figura 4) revela que o volume da maior parte dos eventos captados é baixo.

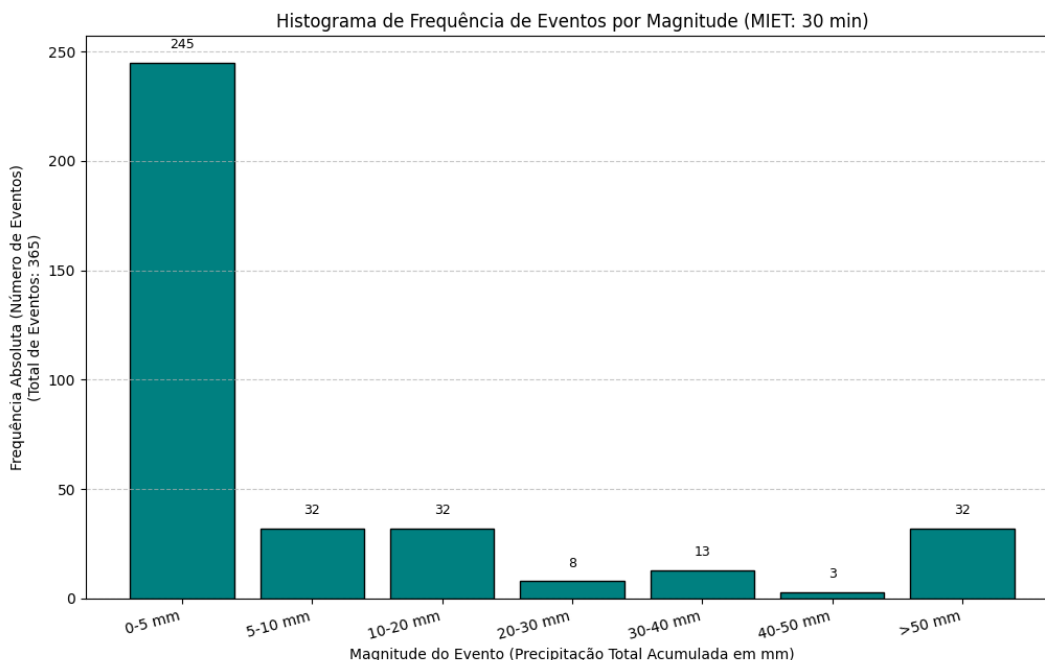


Figura 4. Histograma de frequência de eventos por volume total acumulado em todos os pontos (P1 a P6) - São Carlos - SP.

A Figura 4 destaca que a grande parte das chuvas registradas (67,12%), identificadas com o critério MIET de 30 minutos, acumularam entre 0 e 5 mm de precipitação. Estes eventos de baixa intensidade e curta duração, têm menos impacto no escoamento superficial da bacia. Contrastando, as classes com maior volume acumulado (acima de 30 mm) representam uma pequena parte do número total de eventos (13,15%), porém são elas que respondem pela maior parte do volume no período chuvoso e são os principais causadores de inundações. Isso reforça que para o planejamento e gestão ambiental e urbana, tão importante quanto a frequência diária de chuva é a concentração de volume da chuva.

Tendo o objetivo de ordenar os eventos com maior relevância hidrológica, foi aplicado o critério do Mínimo Intervalo de Tempo Entre Eventos (MIET) de 30 minutos na acumulação de precipitação dos pluviômetros. A tabela 1 resume os cinco eventos com maiores acumulados (entre os pontos, de forma individual) identificados durante o período de estudo.

Tabela 1. Identificação dos 5 maiores eventos em acumulação total por pluviômetro.

Estação	Início do Evento	Duração Total (horas)	Precipitação Acumulada Total (mm)
P2	2025-04-25 15:15:00	2.67	57.91
P5	2024-11-07 04:30:00	9.75	52.83
P4	2025-01-31 01:50:00	4.00	46.48
P5	2024-12-21 19:15:00	3.75	43.94
P4	2024-12-21 19:05:00	3.92	43.18

A análise da variabilidade espacial e deslocamento dos sistemas de precipitação em pequena escala é demonstrada pelo Lag Time (tempo de deslocamento). O Lag Time mede a diferença de tempo entre o início da chuva no pluviômetro de referência (aquele que registrou a maior precipitação acumulada total) e o início da chuva nos demais pontos, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Lag Time entre os pontos.

Evento	Início Chuva P1	Lag Time P1 (min)	Início Chuva P2	Lag Time P2 (min)	Início Chuva P3	Lag Time P3 (min)	Início Chuva P4	Lag Time P4 (min)	Início Chuva P5	Lag Time P5 (min)	Início Chuva P6	Lag Time P6 (min)
Evento 1 (Ref: P2)	15:20:00 25/04	5.0	15:15:00 25/04	0.0	15:20:00 25/04	5.0	15:25:00 25/04	10.0	15:35:00 25/04	20.0	15:40:00 25/04	25.0
Evento 2 (Ref: P5)	03:45:00 07/11	10.0	04:05:00 07/11	30.0	04:10:00 07/11	35.0	04:10:00 07/11	35.0	03:35:00 07/11	0.0	03:35:00 07/11	0.0
Evento 3 (Ref: P4)	01:10:00 31/01	-40.0	01:20:00 31/01	-30.0	01:25:00 31/01	-25.0	01:50:00 31/01	0.0	01:35:00 31/01	-15.0	01:20:00 31/01	-30.0
Evento 4 (Ref: P5)	19:05:00 21/12	-5.0	19:05:00 21/12	-5.0	19:10:00 21/12	0.0	19:05:00 21/12	-5.0	19:10:00 21/12	0.0	19:00:00 21/12	-10.0
Evento 5 (Ref: P4)	19:05:00 21/12	0.0	19:05:00 21/12	0.0	19:10:00 21/12	5.0	19:05:00 21/12	0.0	19:10:00 21/12	5.0	19:00:00 21/12	-5.0

Os resultados de Lag Time da Tabela 2 indicam relativa heterogeneidade espacial dos eventos. No Evento 5, por exemplo, a chuva nos pontos P3, P5 e P6 teve diferença de 5 minutos, indicando uma propagação rápida, quase simultânea desse evento sobre a área compreendida entre os pontos. Por outro lado, nos eventos 2 e 3 houve Lag Time de 35 e 40 minutos, reforçando que os eventos intensos frequentemente são localizados e não uniformes sobre a área. Tais deslocamentos

destacam a importância de se ter uma rede grande e densa de pluviômetros, para o registro de chuvas rápidas e intensas. (Schröer et al., 2018)

A heterogeneidade registrada pelo Lag Time é visível nos Perfis de Intensidade Instantânea (Figuras 5 a 9) gerados para os eventos da Tabela 1.

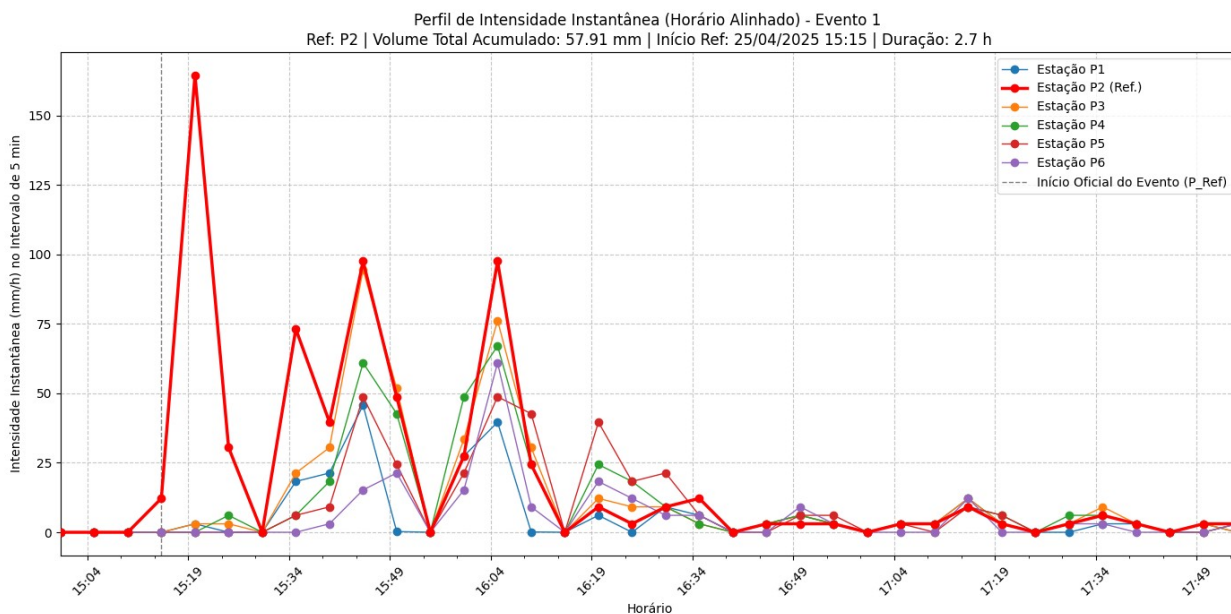


Figura 5. Perfil de intensidade instantânea para o evento 1 - São Carlos - SP.

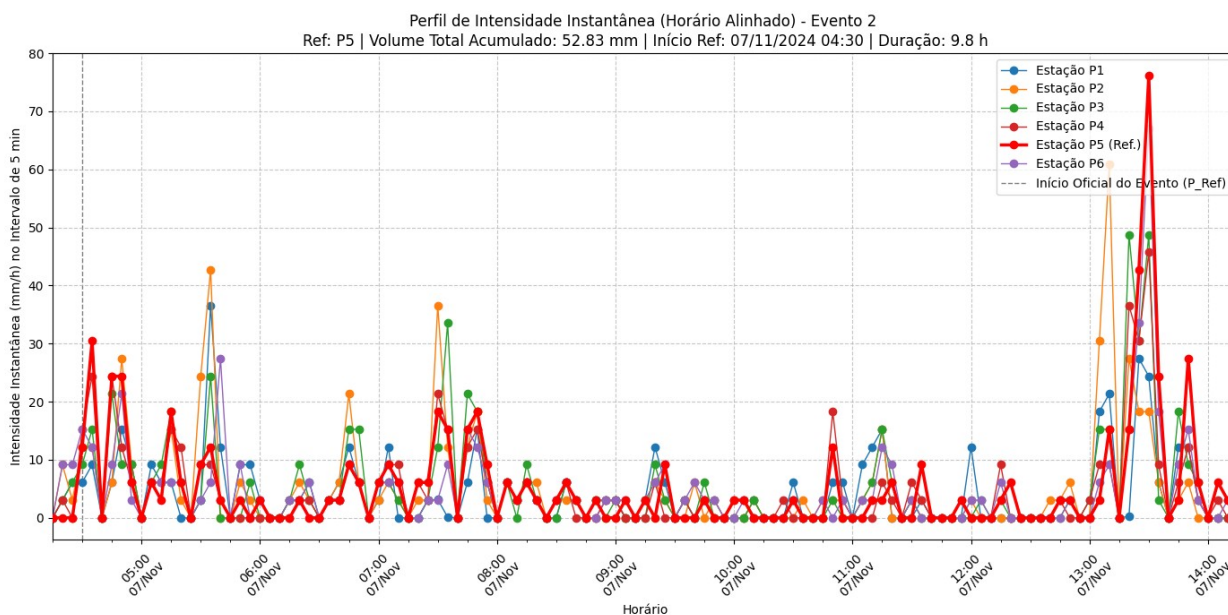


Figura 6. Perfil de intensidade instantânea para o evento 2 - São Carlos - SP.

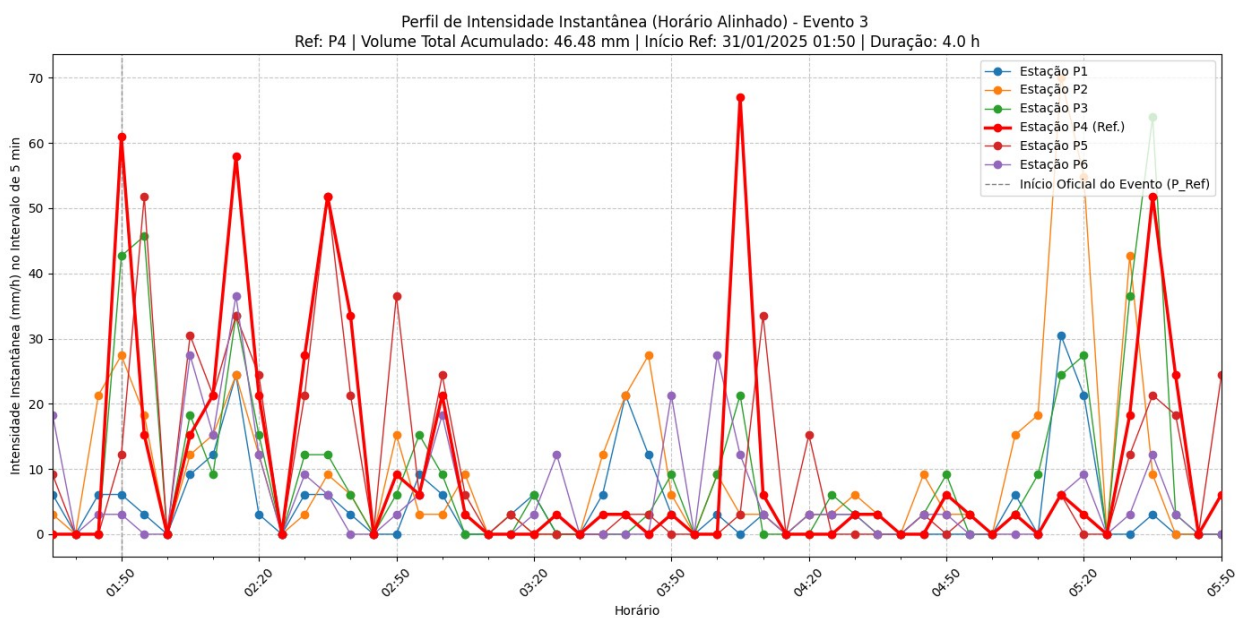


Figura 7. Perfil de intensidade instantânea para o evento 3 - São Carlos - SP.

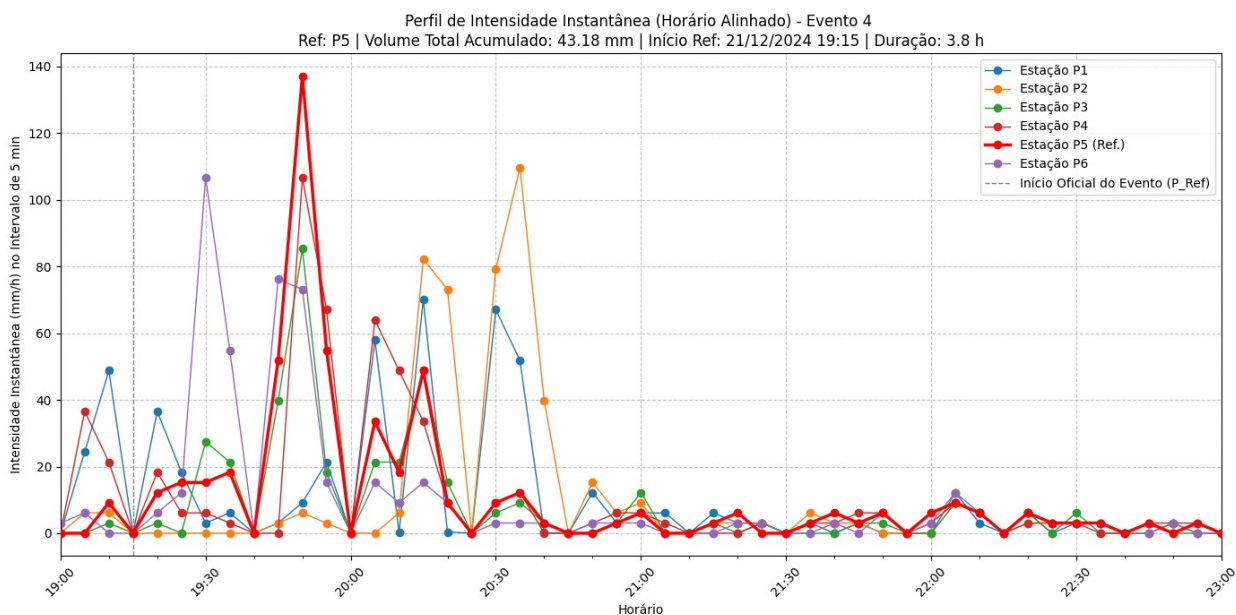


Figura 8. Perfil de intensidade instantânea para o evento 4 - São Carlos - SP.

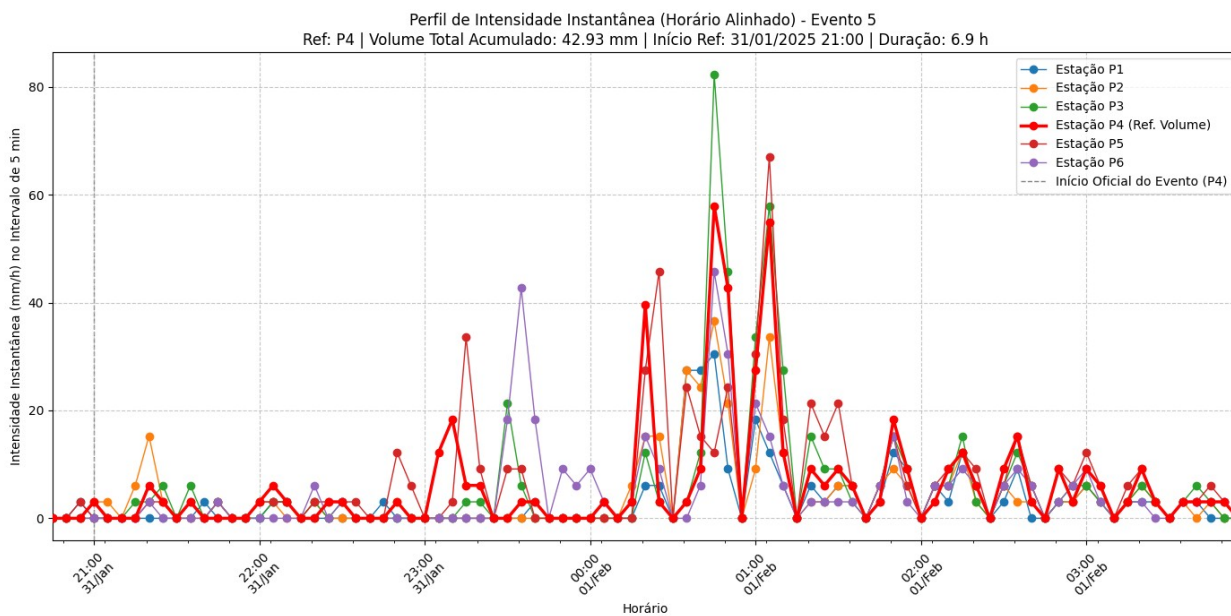


Figura 9. Perfil de intensidade instantânea para o evento 5 - São Carlos - SP.

O Perfil de Intensidade do Evento 1 (Figura 5) ilustra um evento com rápido pico de 165 mm/h no pluviômetro P2, os outros pontos apresentam picos e tempo de início defasados em relação ao ponto de referência. A linha tracejada preta vertical que marca o início da chuva na estação de referência (P2) permite observar os Lag Time mostrados pela tabela 2.

Similarmente, o Perfil do Evento 2 (Figura 6) mostra um evento mais longo, com grande dispersão espacial. O pico máximo foi de 78 mm/h no P5, as outras estações também apresentaram intensidades elevadas (cerca de 40 mm/h), embora menores que o P5. A presença de picos agudos observados em alguns pluviômetros, com ausência em outros no mesmo instante está ligado à dispersão espacial das células convectivas.

Analisando as cartas sinóticas de superfície da Marinha do Brasil (CHM), nos dias 25/04/2024 (ANEXO A - figura 1), correspondente ao evento 1 há a presença de um centro de baixa pressão no litoral paulista, que desencadeou forçantes convectivas em São Carlos. No Evento 2 (07/11/2024, ANEXO A - Figura 2), a Frente Fria principal estava deslocada para o Oceano Atlântico. Contudo, a presença de um Cavado de Baixa Pressão sobre o Sul do Brasil manteve o escoamento de umidade e a instabilidade regional, contribuindo de forma indireta para a duração prolongada e o volume total deste evento. Já no dia 31/01/2025 (ANEXO A - figura 3), os eventos 3 e 5 ocorreram sob a influência de um sistema de grande escala: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS, que é o principal componente sinótico do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS), estabeleceu uma faixa de transporte contínuo de umidade. Embora a ZCAS seja um mecanismo de fornecimento de precipitação mais lento e gradual (escala sinótica), a manutenção do ambiente úmido, em conjunto com a convecção local, favoreceu a ocorrência de picos elevados de intensidade instantânea, mostrando encontro de um sistema de grande escala com mecanismos de pequena escala.

A análise do Perfil de Intensidade Média Acumulada (Figuras 10 a 14), oferece uma perspectiva mais suavizada do comportamento temporal dos eventos, mostrando a taxa média de mm/h acumulada ao longo da duração do evento. Nota-se que os eventos de maior volume acumulado tendem a ter uma maior distribuição no tempo, mas ainda assim, mantendo assimetria característica das chuvas frontais ou convectivas atuantes na região.

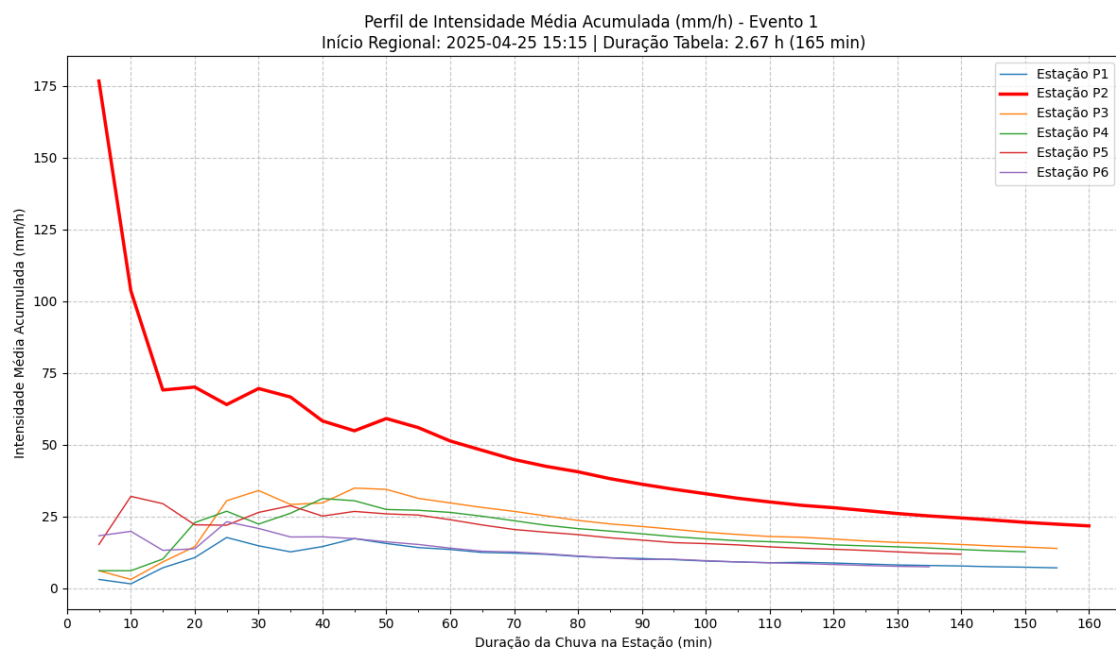


Figura 10. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 1 - São Carlos - SP.

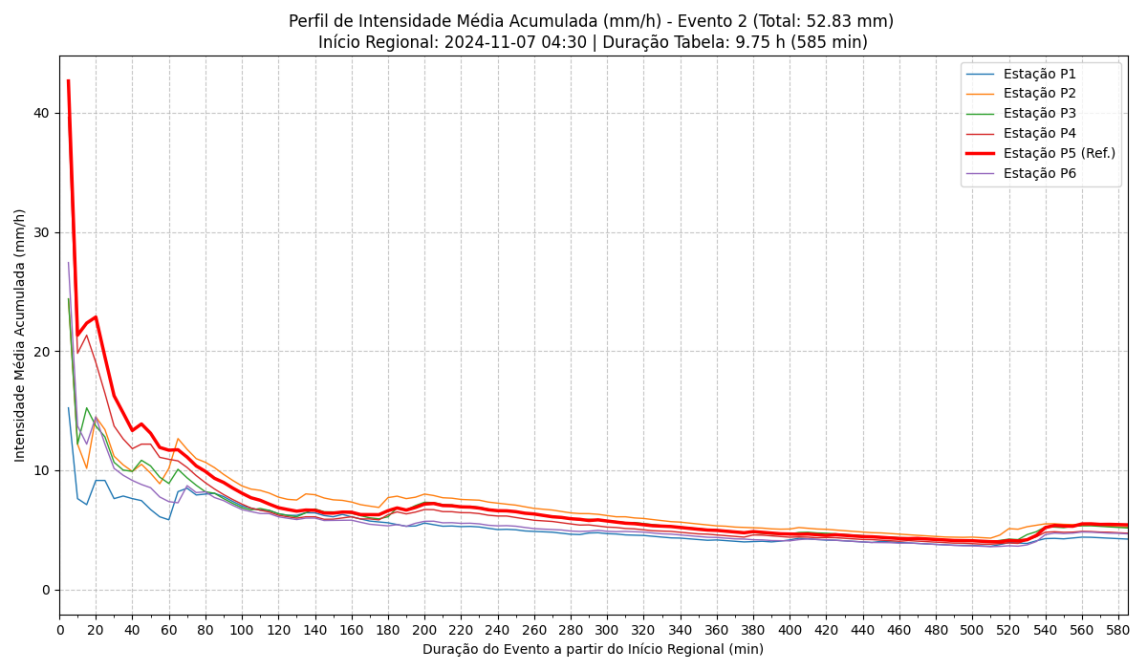


Figura 11. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 2 - São Carlos - SP.

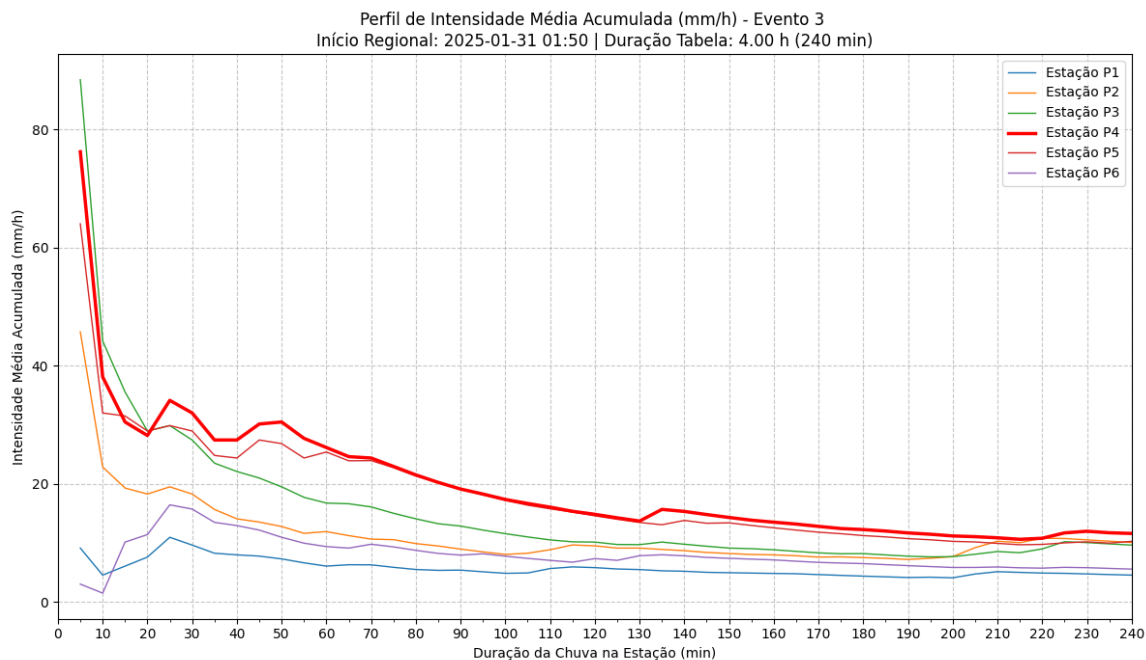


Figura 12. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 3 - São Carlos - SP.

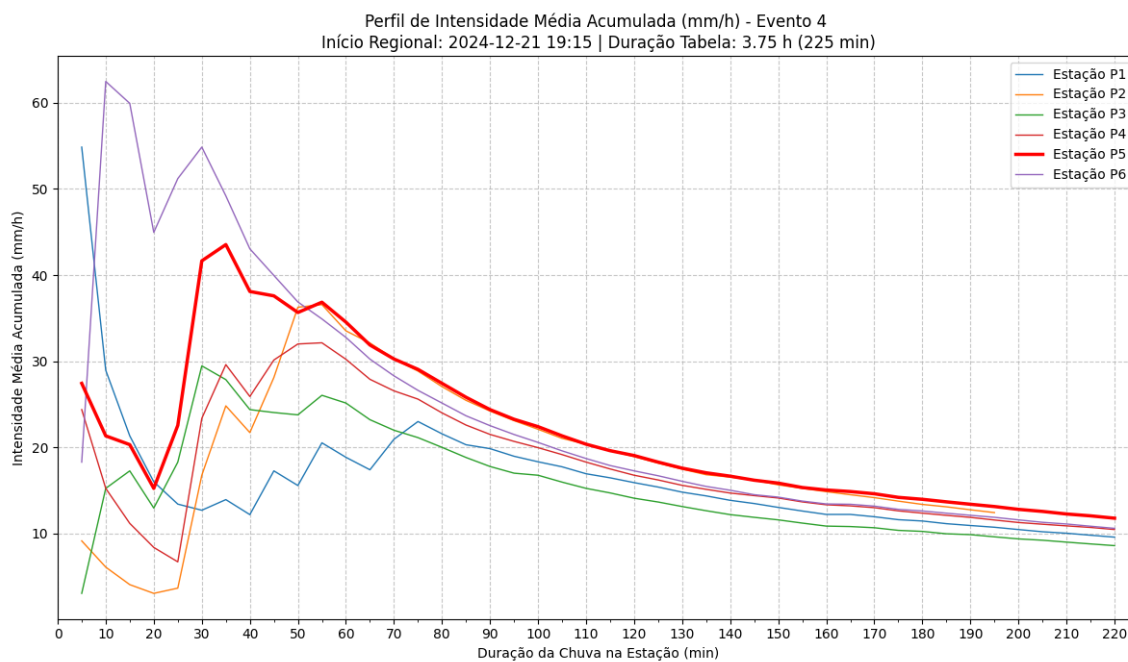


Figura 13. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 4 - São Carlos - SP.

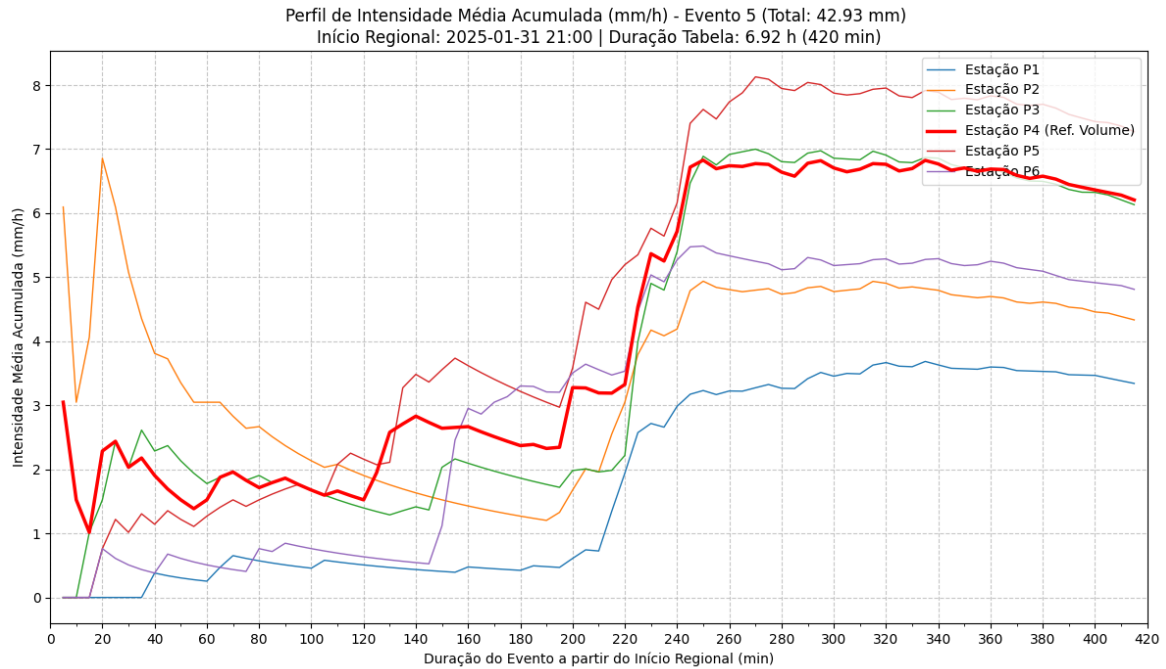


Figura 14. Perfil de intensidade média acumulada para o evento 5 - São Carlos - SP.

Todas as curvas de Intensidade Média Acumulada começam com um pico de intensidade elevado no primeiro intervalo de tempo, seguido por um rápido decaimento. Este padrão evidencia alta concentração de intensidade instantânea nos minutos iniciais dos eventos, corroborando com as informações dos Perfis de Intensidade Instantânea.

Uma relação entre duração e estabilização da intensidade média é notada, observando os eventos de maior duração (como os eventos 2 e 5) apresentam uma intensidade média que tende a se estabilizar antes que os eventos de menor duração.

Embora no momento inicial da precipitação haja grande variabilidade inicial (dispersão) entre os pontos (como nos eventos 1 e 4), as curvas de intensidade média acumulada tendem a uma convergência de forma lenta ao longo do tempo. Essa convergência demorada sugere que há homogeneização da taxa acumulada de precipitação sobre a área, mesmo que em taxas pequenas, após o pico inicial. No evento 5, devido ao fato da intensidade aumentar apenas na metade do tempo total do evento, há uma grande dispersão não tendo a mesma convergência dos 4 primeiros eventos.

As Curvas de Massa em Acumulados (Figuras 15 a 19) complementam essa análise fornecendo o acúmulo da precipitação em milímetros ao longo do tempo. Reforçando que a linha de pico (ponto de maior volume) sempre atinge os maiores volumes de chuva. O pluviômetro 2 (Figura 15), por exemplo, registrou quase 60 mm de precipitação acumulada, enquanto os outros pontos tiveram valores bem menores.

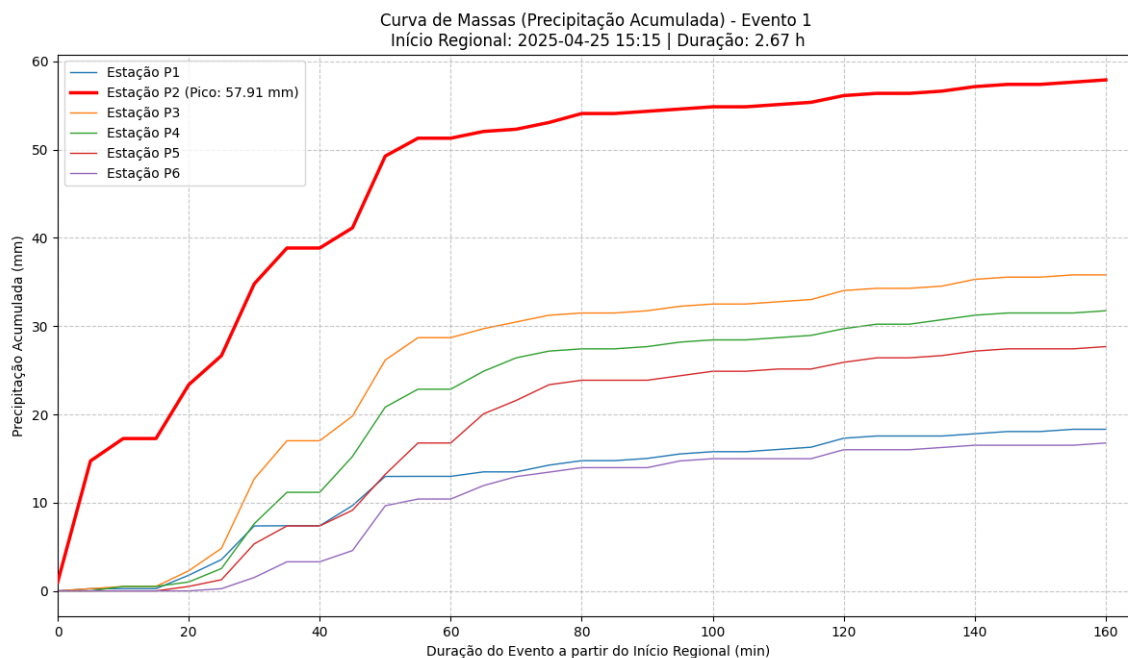


Figura 15. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 1 - São Carlos - SP.

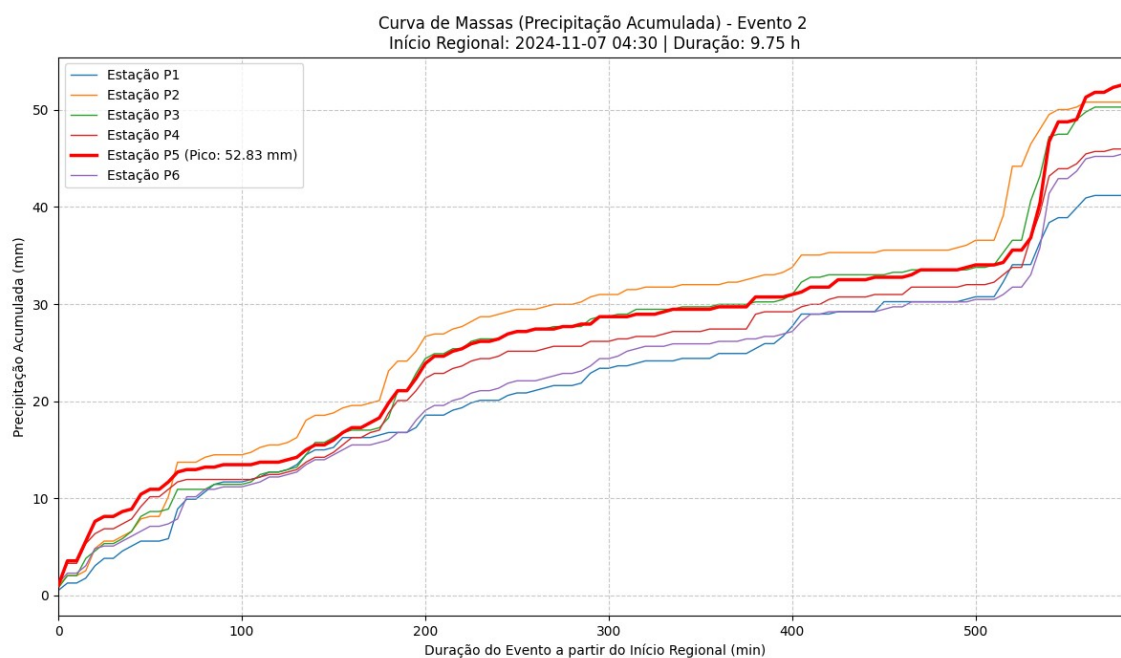


Figura 16. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 2 - São Carlos - SP.

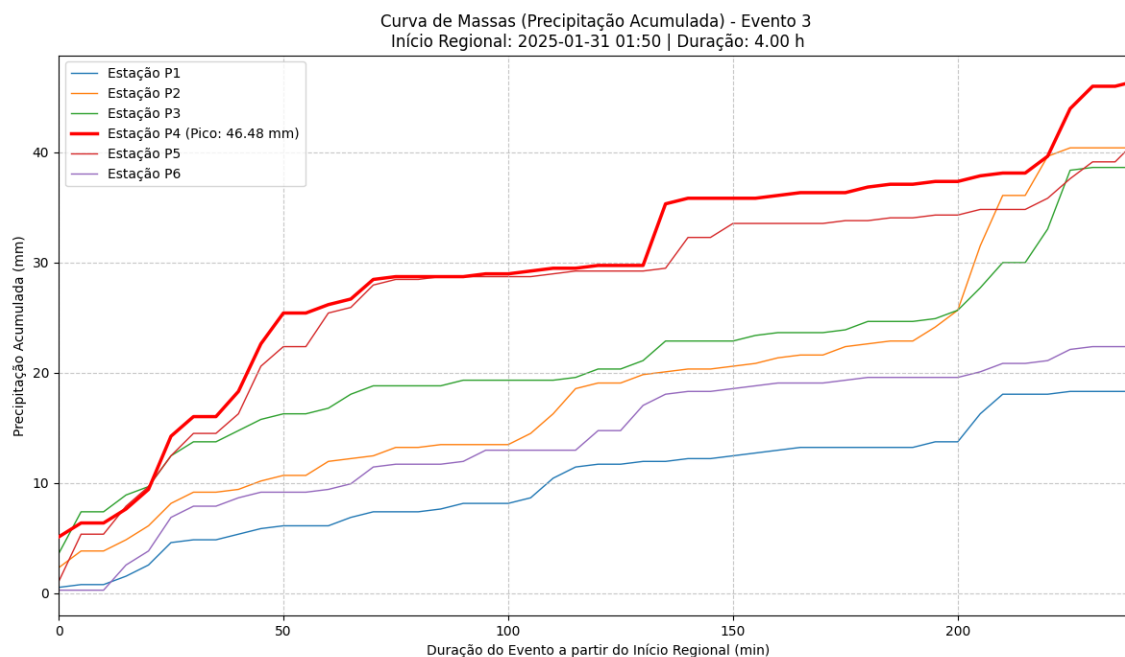


Figura 17. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 3 - São Carlos - SP.

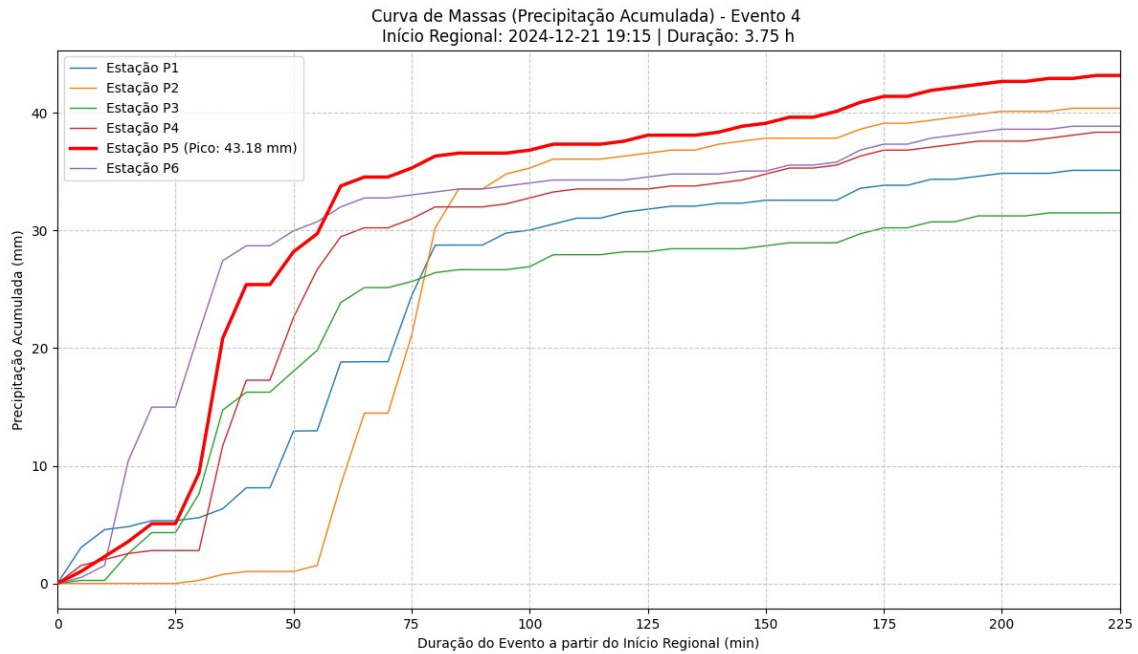


Figura 18. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 4 - São Carlos - SP.

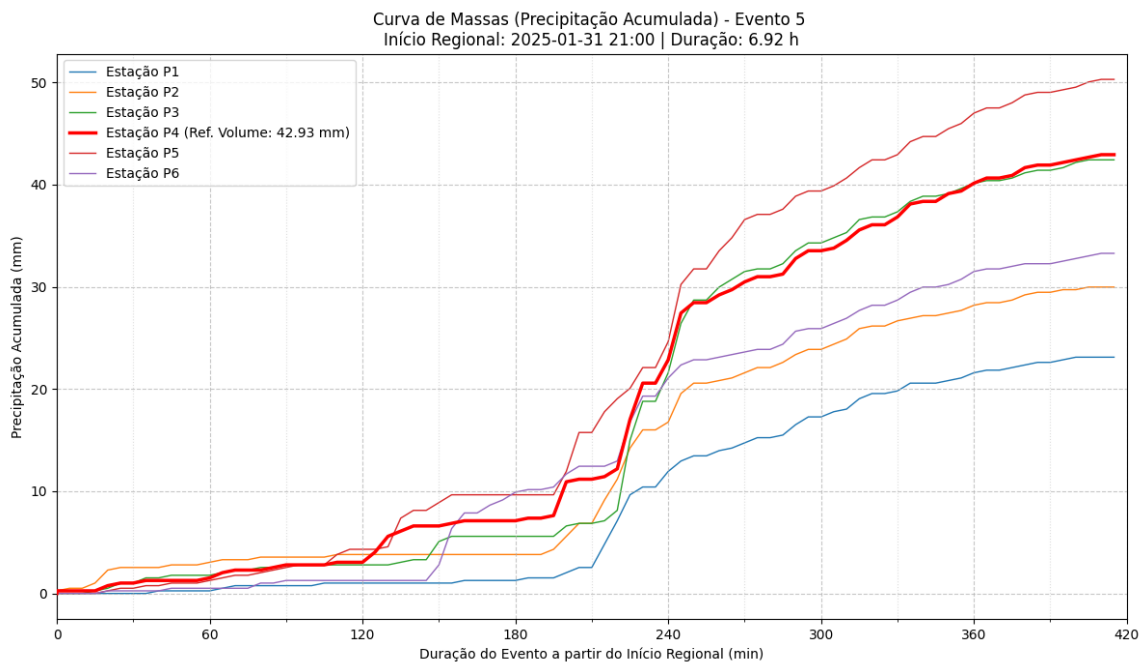


Figura 19. Curva de massas com precipitação acumulada, Evento 5 - São Carlos - SP.

As Curvas de Massa em Porcentagem (Figuras 20 a 24) revelam importantes padrões, normalizando a precipitação e o tempo em escala de 0% a 100%, permitindo a comparação da distribuição temporal relativa entre os eventos, sendo independentes da sua magnitude. Nos eventos de maior volume, nota-se a alta concentração no início da precipitação. As curvas possuem trechos inclinados acentuados nos primeiros 20% a 40% da duração total, indicando que grande parte do total da precipitação do evento acumula-se rapidamente. Por exemplo, nos eventos 1 e 4 há a acumulação de cerca de 80% em cerca de 40% do acumulado de tempo.

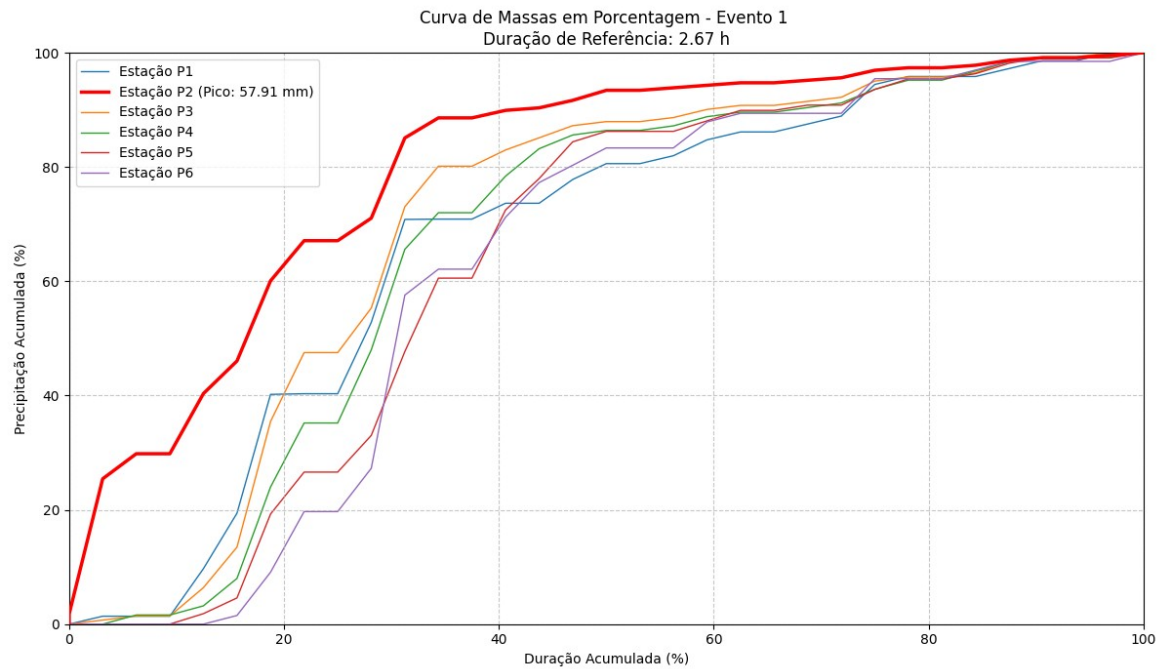


Figura 20. Curva de massas em porcentagem, Evento 1 - São Carlos - SP.

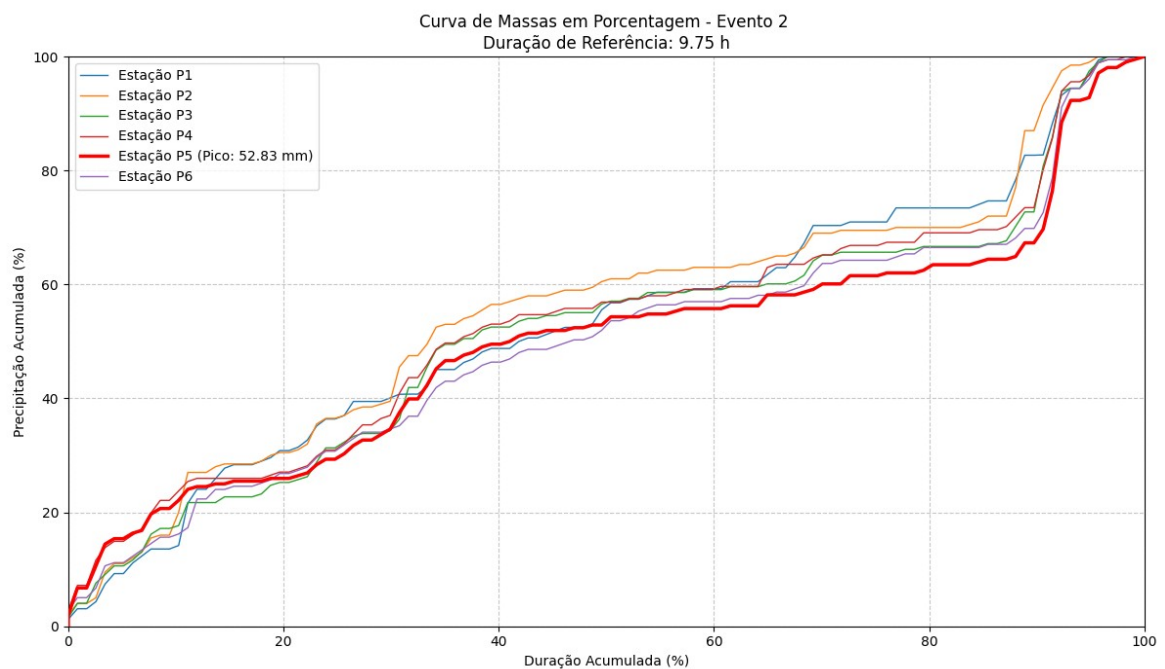


Figura 21. Curva de massas em porcentagem, Evento 2 - São Carlos - SP.

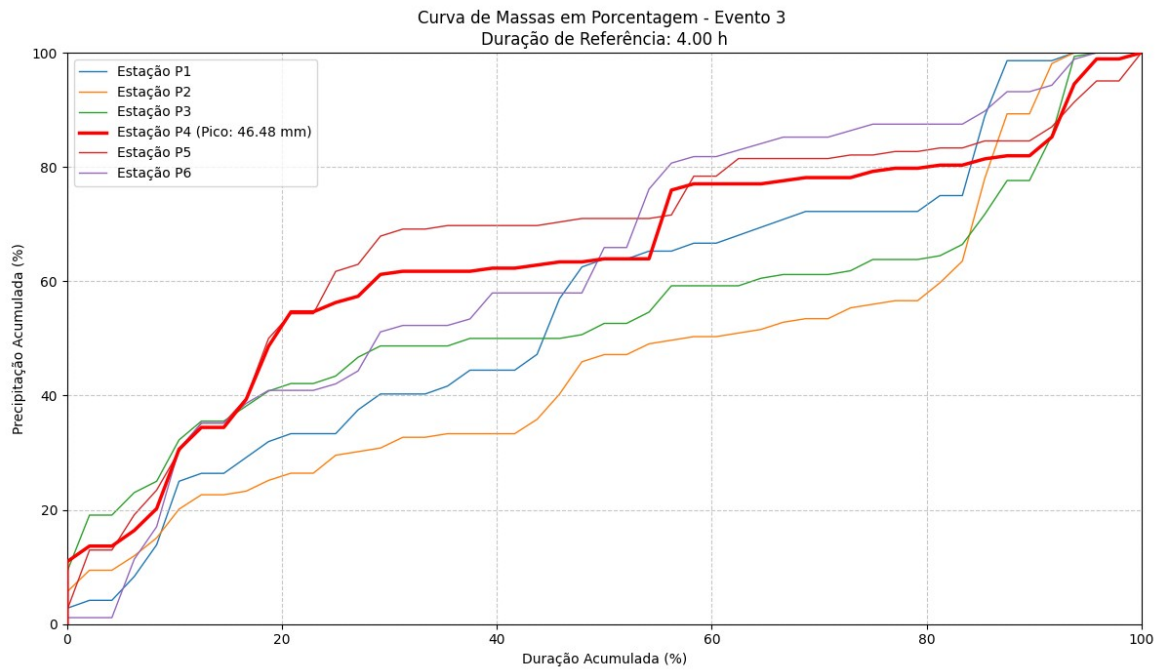


Figura 22. Curva de massas em porcentagem, Evento 3 - São Carlos - SP.

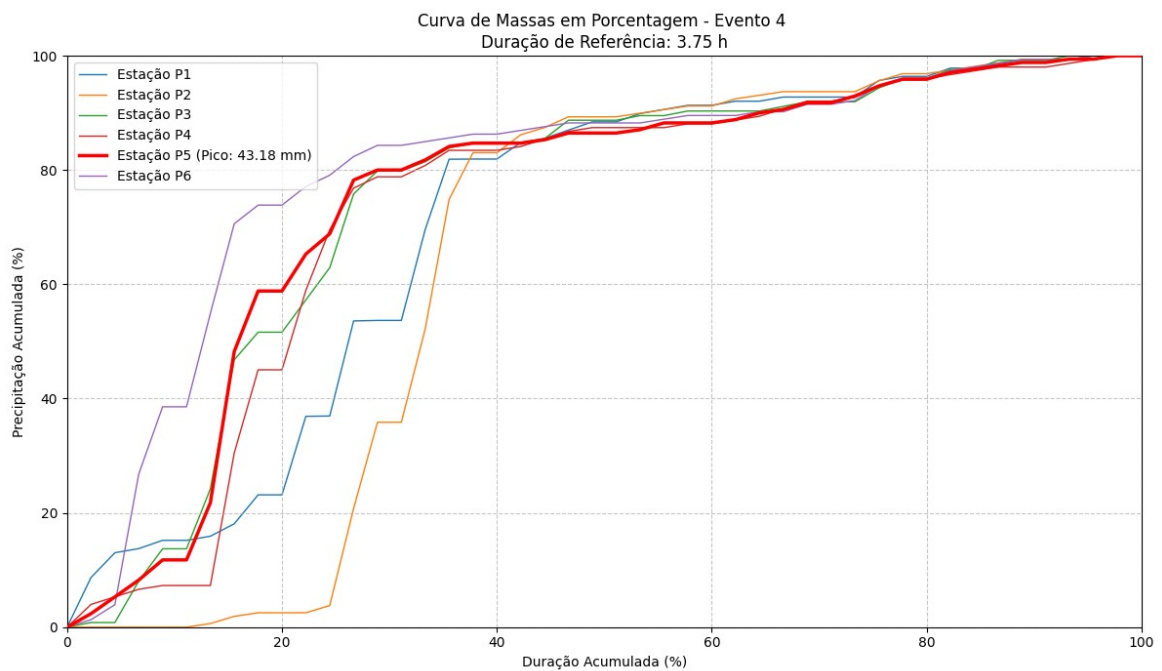


Figura 23. Curva de massas em porcentagem, Evento 4 - São Carlos - SP.

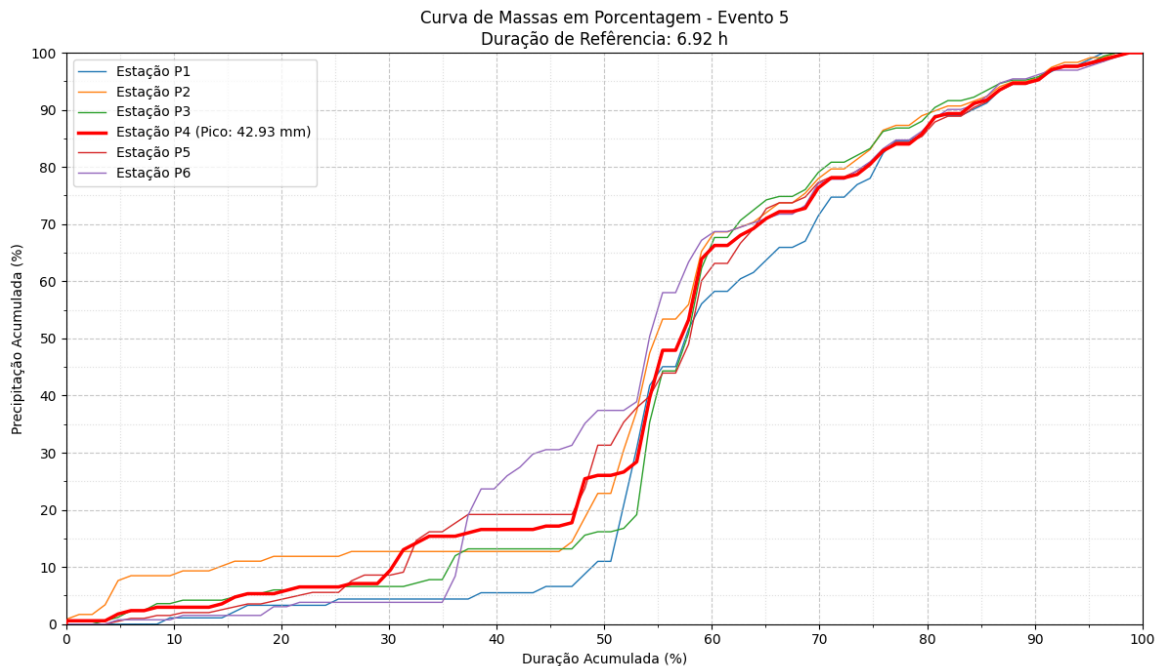


Figura 24. Curva de massas em porcentagem, Evento 5 - São Carlos - SP.

Esta distribuição assimétrica, com começo íngreme, seguido por uma gradual diminuição da inclinação em direção ao fim (100% de tempo e acumulado), como nos eventos 1, 4 e 5 reforça o caráter convectivo das chuvas (SHUTTLEWORTH, 2012). Junto a isso, a diferença entre as curvas dos diferentes pluviômetros no mesmo evento mostra a heterogeneidade espacial da precipitação. Embora a estação que registrou o pico (destacada em vermelho) mostra uma acumulação mais rápida, com picos mais pronunciados, as outras distribuições registram acumulados menos intensos e mais distribuídos, mesmo que a distância real entre os pontos seja relativamente curta (TOKAY et al., 2014).

É fundamental ressaltar que as análises realizadas abrangeram apenas o período chuvoso de 2024/2025, utilizando dados inéditos. Idealmente, a identificação de padrões meteorológicos e hidrológicos exigiria a análise de uma série temporal mais extensa, cobrindo o maior número de verões possível. Contudo, mesmo com a limitação da curta série temporal, e utilizando apenas 5 eventos, foi possível identificar os padrões descritos na literatura. Permitindo a identificação da maior frequência de eventos no período da tarde (13h até 20h), e que a maioria dos eventos são de baixo volume de precipitação.

Juntamente aos eventos com maiores acumulados, foi realizada uma análise dos cinco eventos de maior duração registrados (Tabela 3), também hidrologicamente relevantes. A inclusão desta análise é fundamental para identificar eventos que podem estar relacionados a sistemas mais homogêneos, que embora possam ter menor intensidade, são responsáveis pela maior saturação do solo, devido ao seu período maior.

Tabela 3. Cinco eventos com maiores durações.

Ranking (Duração)	Estação	Início do Evento	Duração Total (horas)	Duração Total (minutos)	Precipitação Acumulada Total (mm)
1	P5	2024-11-07 04:30:00	9.75	585	52.83
2	P1	2024-11-07 03:45:00	8.33	499	34.82
3	P6	2024-11-07 03:15:00	8.25	495	34.54
4	P2	2024-11-07 04:05:00	7.92	475	39.12
5	P2	2024-11-04 05:30:00	7.83	469	14.99

Os Perfis de Intensidade Média Acumulada para os eventos mais longos (Figuras 25 a 29) apresentam um padrão que contrasta significativamente com a assimetria acentuada observada nos eventos com maiores volumes (exceto o evento mais longo, que também está presente com o segundo maior acumulado). O pico inicial é menor e o decaimento a seguir é mais lento e gradual, havendo estabilização da intensidade média por um período prolongado. Este comportamento, em que a intensidade é mais uniforme ao longo do tempo, está mais associado à atuação de sistemas de maior escala, como a ZCAS.

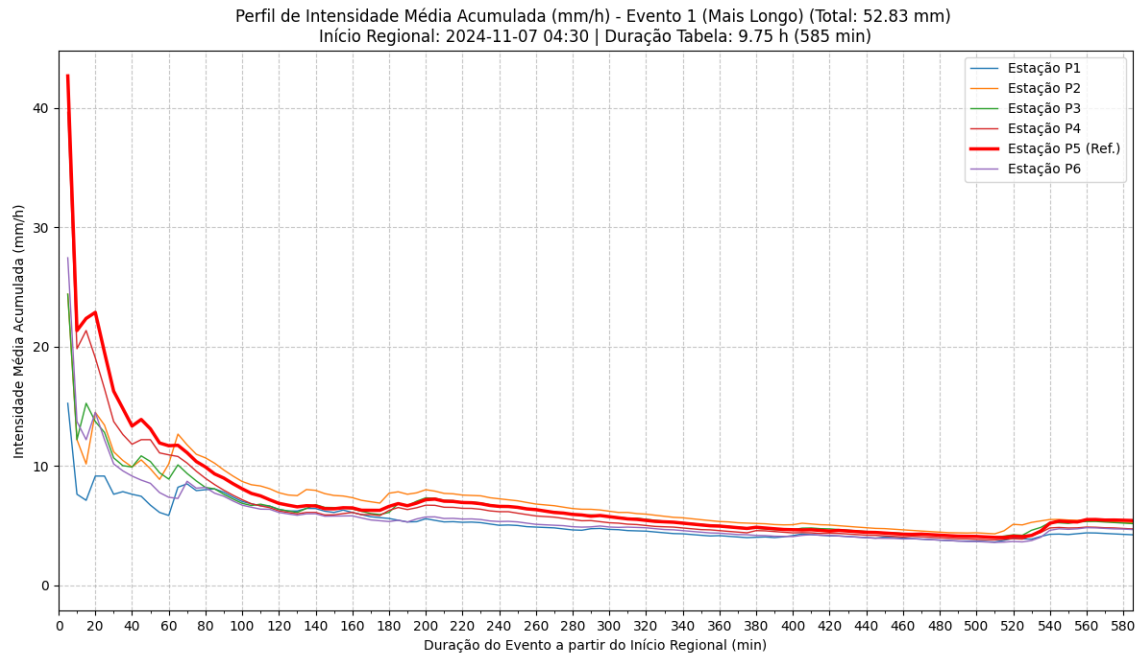


Figura 25. Perfil de intensidade média acumulada para o evento mais longo - São Carlos - SP.

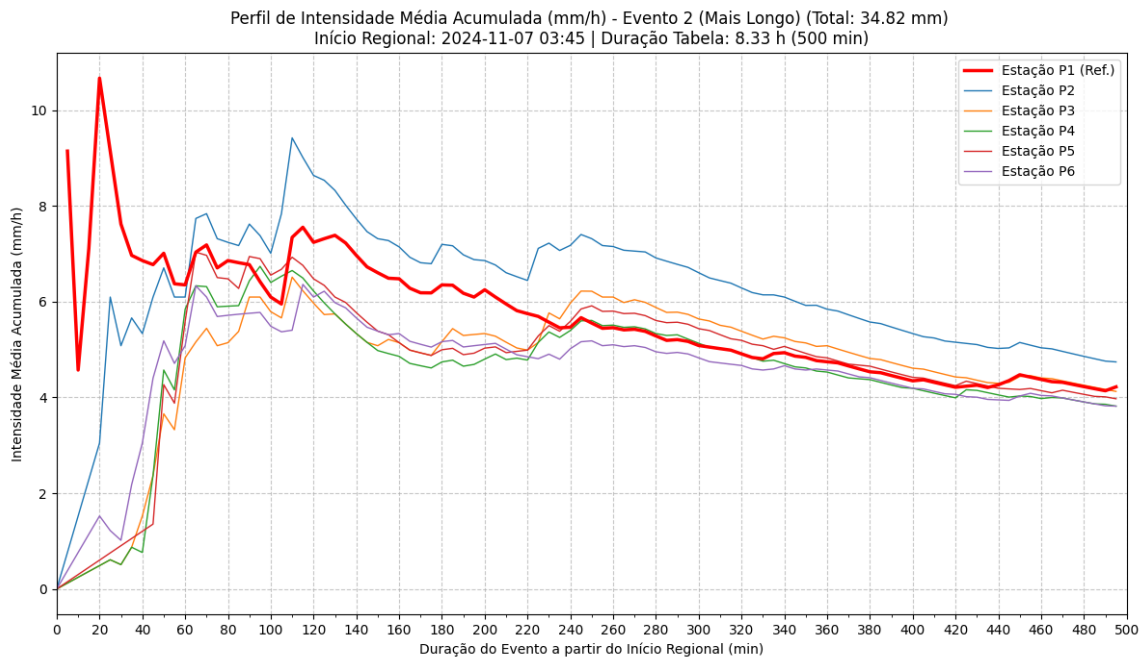


Figura 26. Perfil de intensidade média acumulada para o segundo evento mais longo - São Carlos - SP.

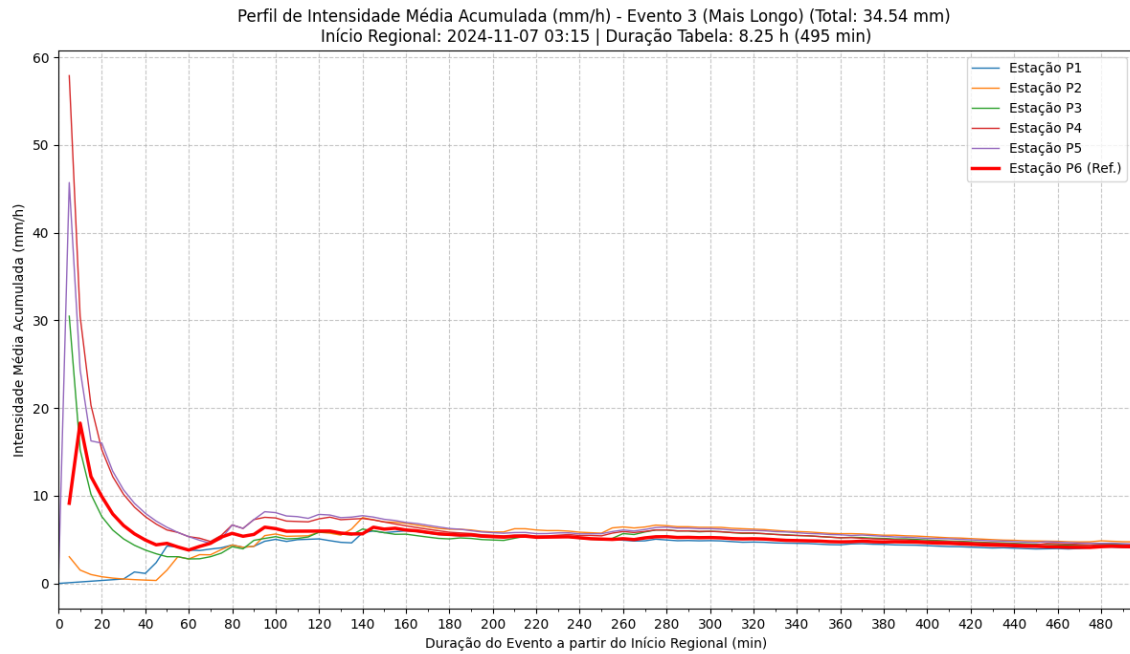


Figura 27. Perfil de intensidade média acumulada para o terceiro evento mais longo - São Carlos - SP.

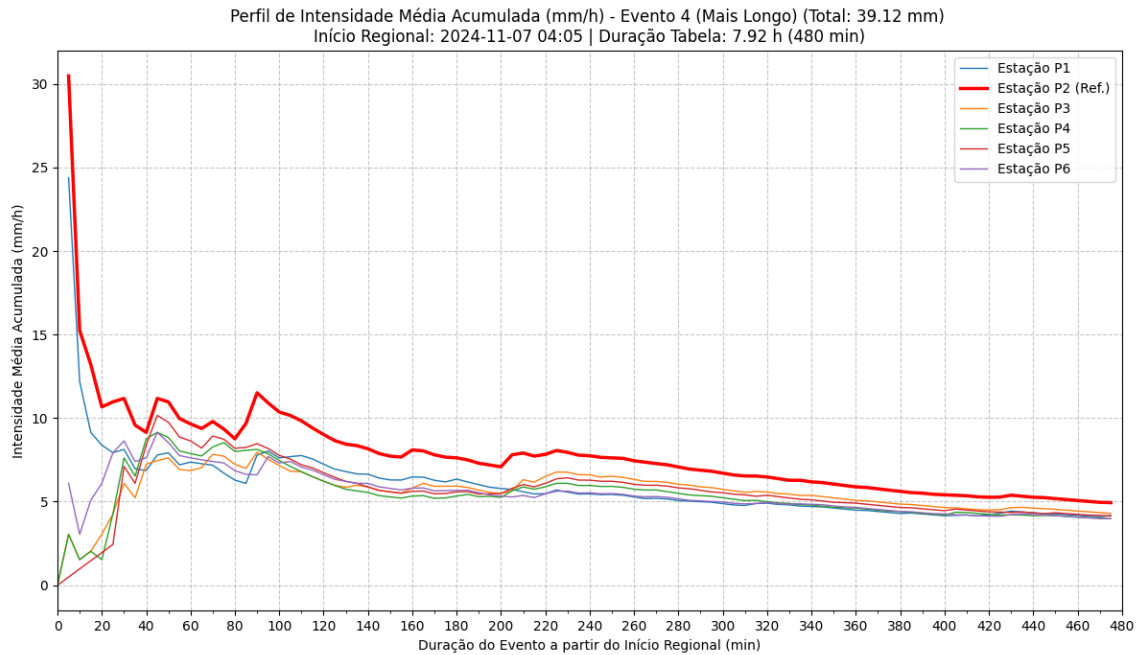


Figura 28. Perfil de intensidade média acumulada para o quarto evento mais longo - São Carlos - SP.

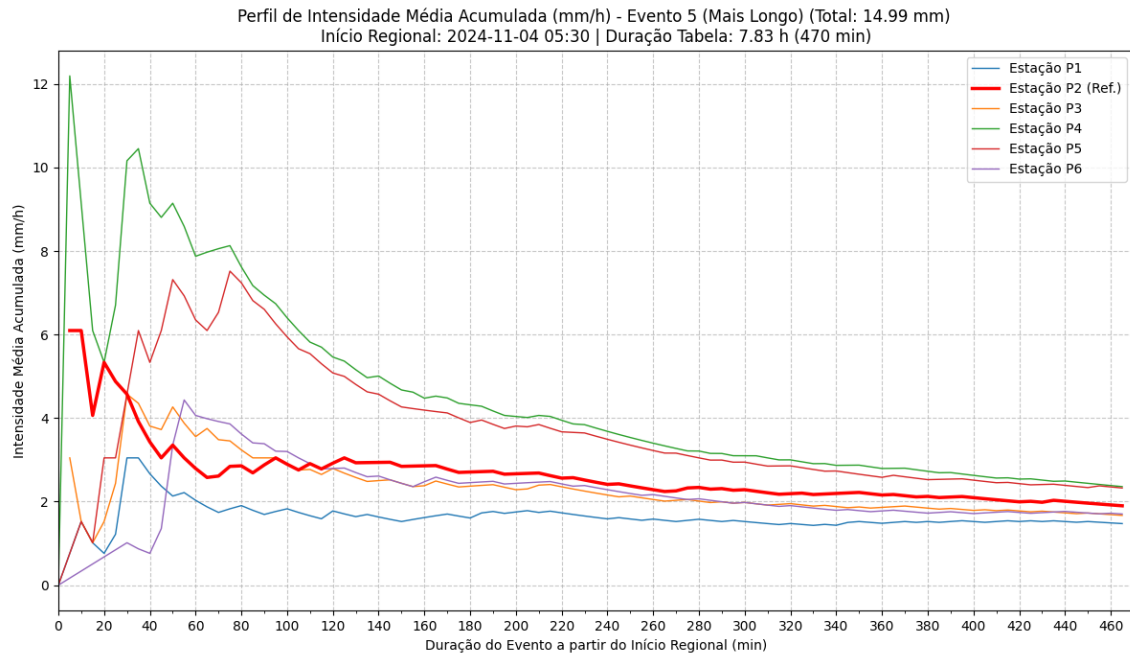


Figura 29. Perfil de intensidade média acumulada para o quinto evento mais longo - São Carlos - SP.

As Curvas de Massas em Porcentagem para os eventos de maiores durações (Figuras 30 a 34) também contrastam com as curvas dos eventos de maior volume, que mostravam perfis com alta concentração inicial, nos eventos mais longos as curvas exibem inclinações mais constantes, em relação a linha de 45 graus. Isto indica uma distribuição temporal intermediária, onde o volume acumulado é distribuído de forma homogênea.

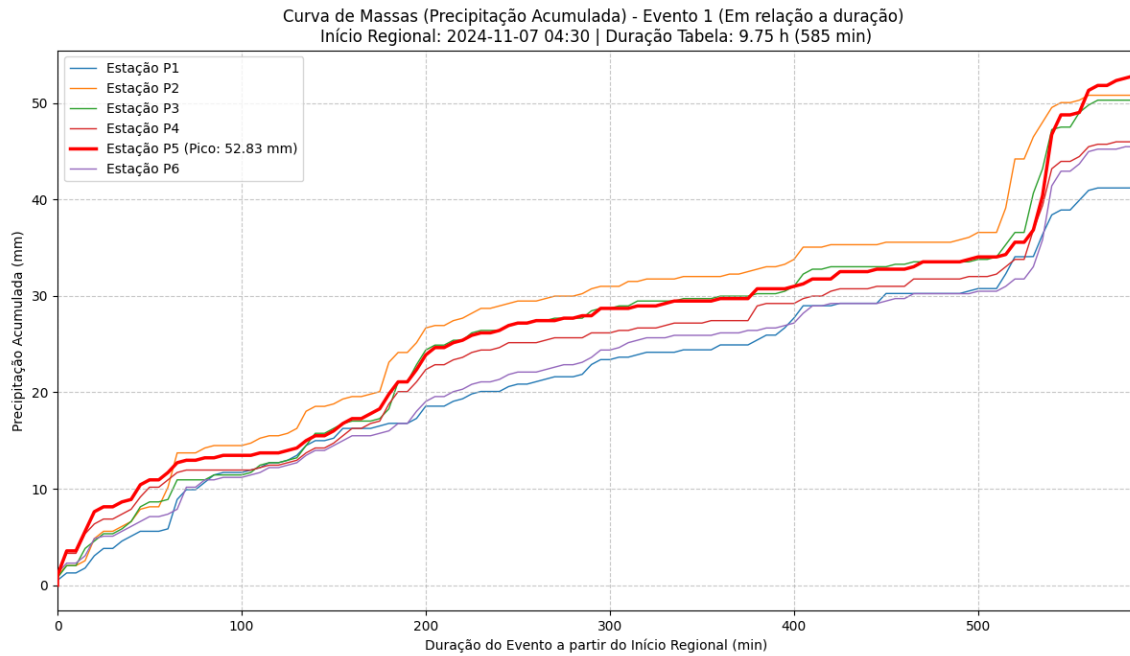


Figura 30. Curva de massas em porcentagem, evento mais longo - São Carlos - SP.

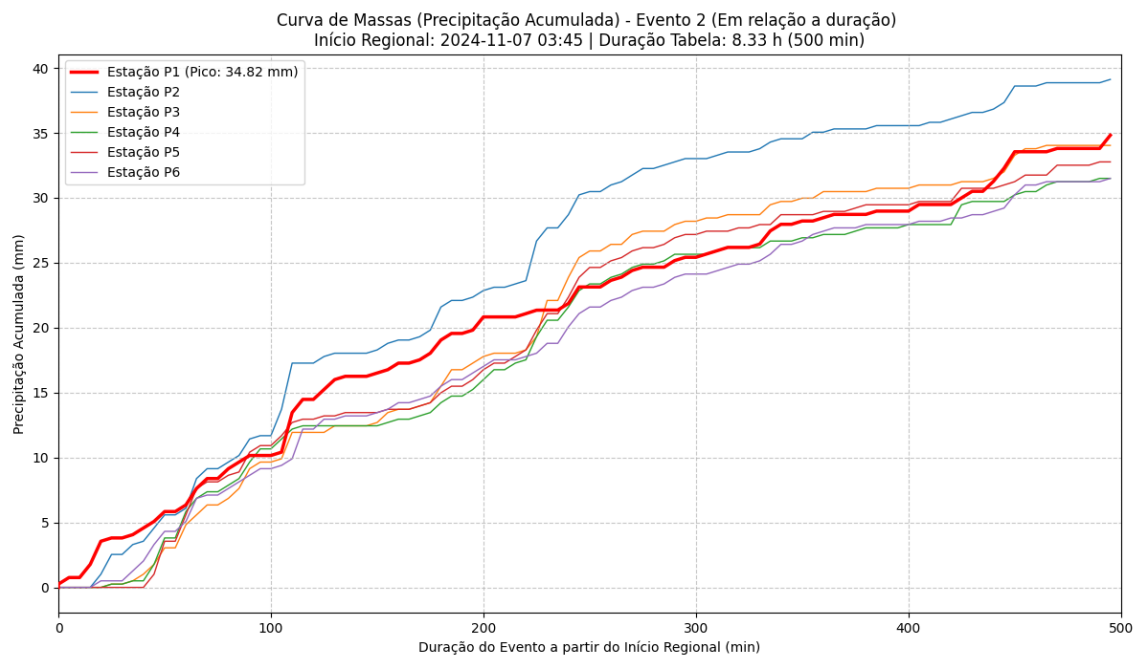


Figura 31. Curva de massas em porcentagem, segundo evento mais longo - São Carlos - SP.

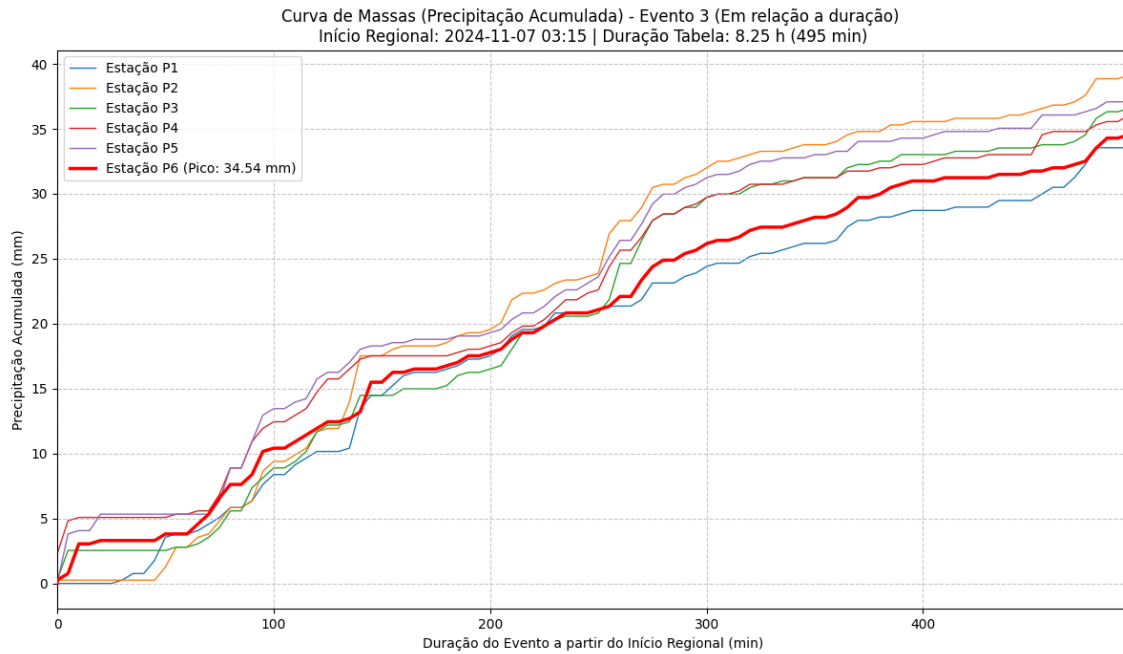


Figura 32. Curva de massas em porcentagem, terceiro evento mais longo - São Carlos - SP.

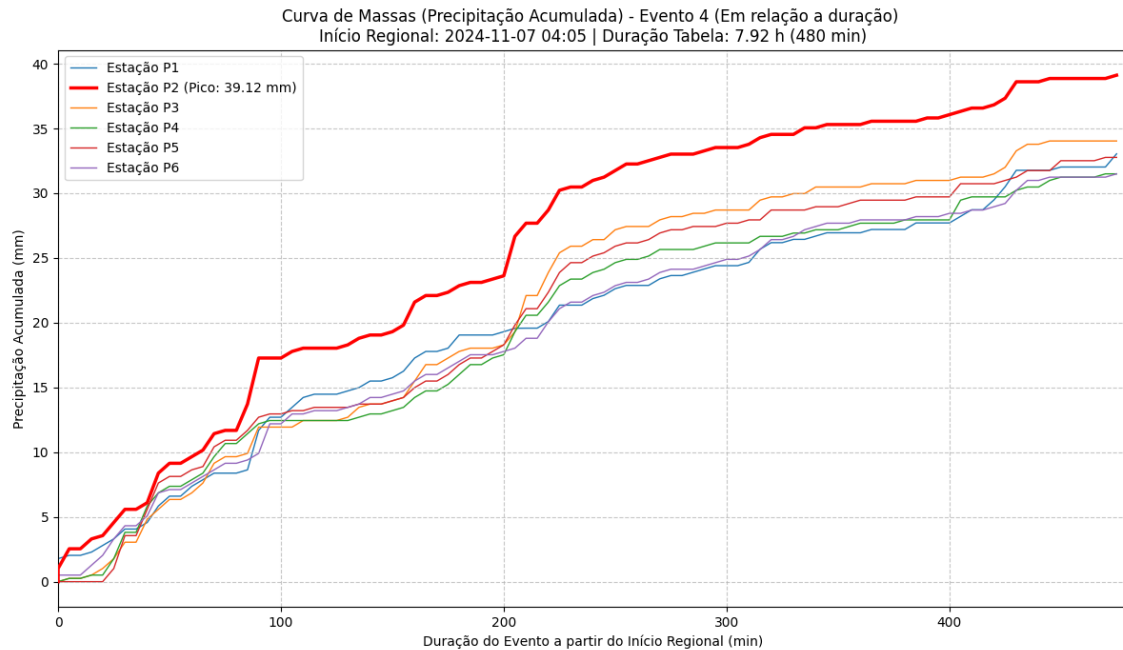


Figura 33. Curva de massas em porcentagem, quarto evento mais longo - São Carlos - SP.

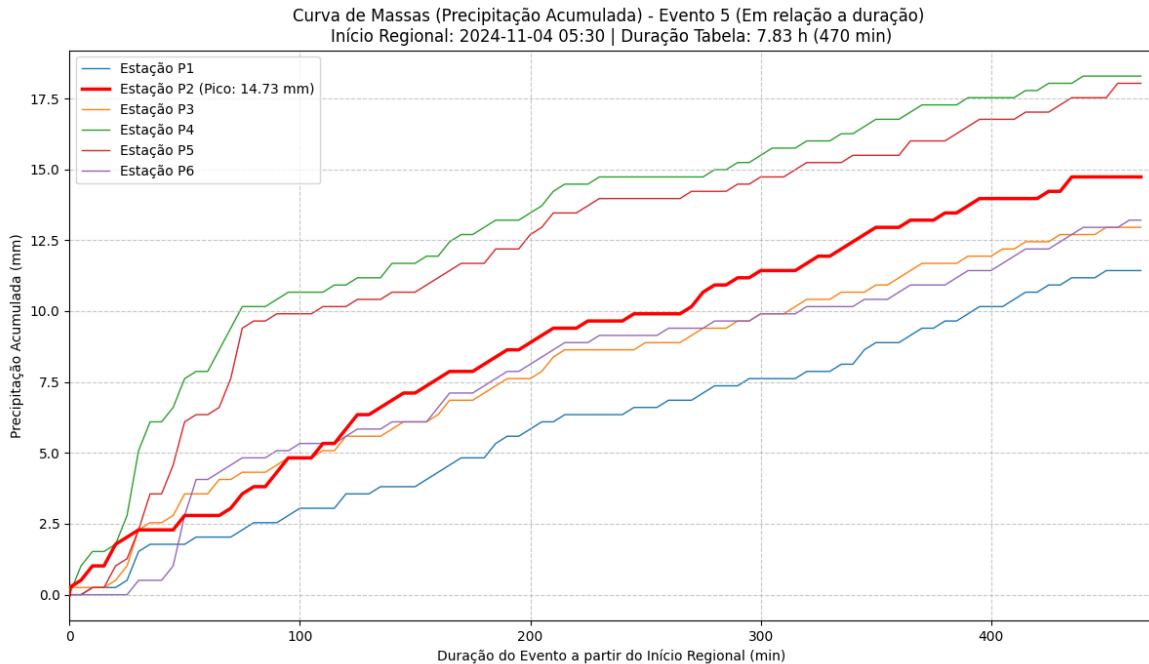


Figura 34. Curva de massas em porcentagem, quinto evento mais longo - São Carlos - SP

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade espacial e temporal da precipitação no município de São Carlos - SP, a partir de dados de uma rede de pluviômetros automáticos com medidas a cada 5 minutos, durante a estação chuvosa de 2024/2025. Essa análise permitiu a caracterização do regime pluviométrico local e o detalhamento da estrutura dos eventos mais intensos e dos mais longos.

Os resultados foram condizentes com o padrão sazonal da região, com maior concentração nos meses de verão, sendo o período da tarde responsável pelo maior número de ocorrências, indicando a predominância do mecanismo convectivo. Os dados de frequência por magnitude revelaram que apesar dos eventos de baixo volume serem mais frequentes, os eventos de grande magnitude, são mais relevantes por concentrarem a maior parte do volume total precipitado.

A análise dos eventos de maior volume, pelos Perfis de Intensidade e Curvas de Massa, demonstrou significativa heterogeneidade espacial da precipitação em pequena escala. Os valores de *Lag Time* variaram de 0 a 40 minutos para os eventos analisados, mostrando que eventos intensos podem não ocorrer de forma uniforme sobre a área, reforçando a importância de uma rede densa de monitoramento. Junto a isso, as Curvas de Massa em porcentagem indicaram uma distribuição temporal antecedente, com a maior parte da precipitação ocorrendo nos estágios iniciais dos eventos, o que agrava o rápido escoamento superficial, que causa inundações e erosões.

Por outro lado, a análise dos eventos de maior duração, revelou um perfil distinto, com uma distribuição temporal Intermediária. Isso demonstra que a variabilidade da precipitação no período chuvoso em São Carlos abrange tanto os eventos convectivos de pico (com maior escoamento superficial), quanto eventos de longa duração, geralmente associados a sistemas de maior escala (maior saturação do solo e escoamentos subsuperficiais).

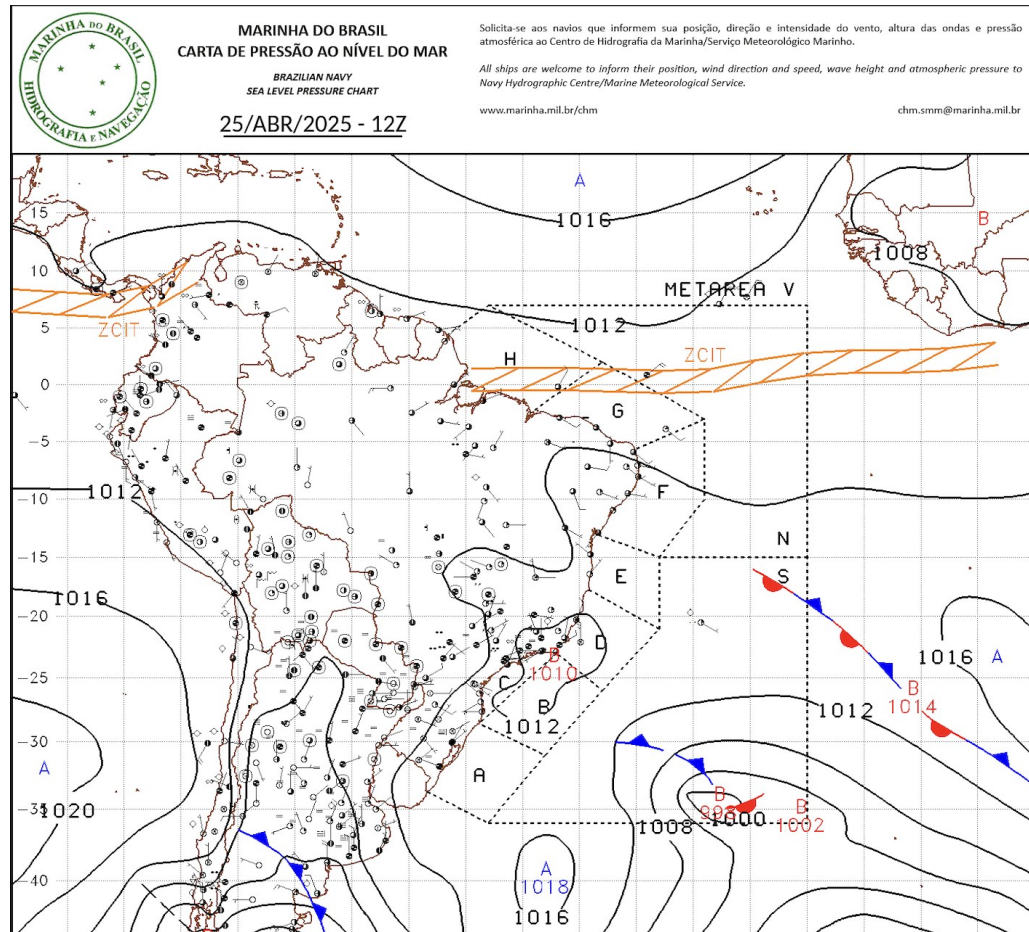
Uma limitação que este estudo teve consiste na curta duração da série de dados, impedindo a realização de análises de frequência robustas, como curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência). No entanto, esses dados de alta resolução permitiram um olhar detalhado da estrutura dos eventos intensos observados. Dessa forma, conclui-se que a utilização de uma rede de pluviômetros densa e com alta frequência de amostragem foi fundamental para capturar a dinâmica dos mecanismos de precipitação em escala local na cidade de São Carlos.

REFERÊNCIAS

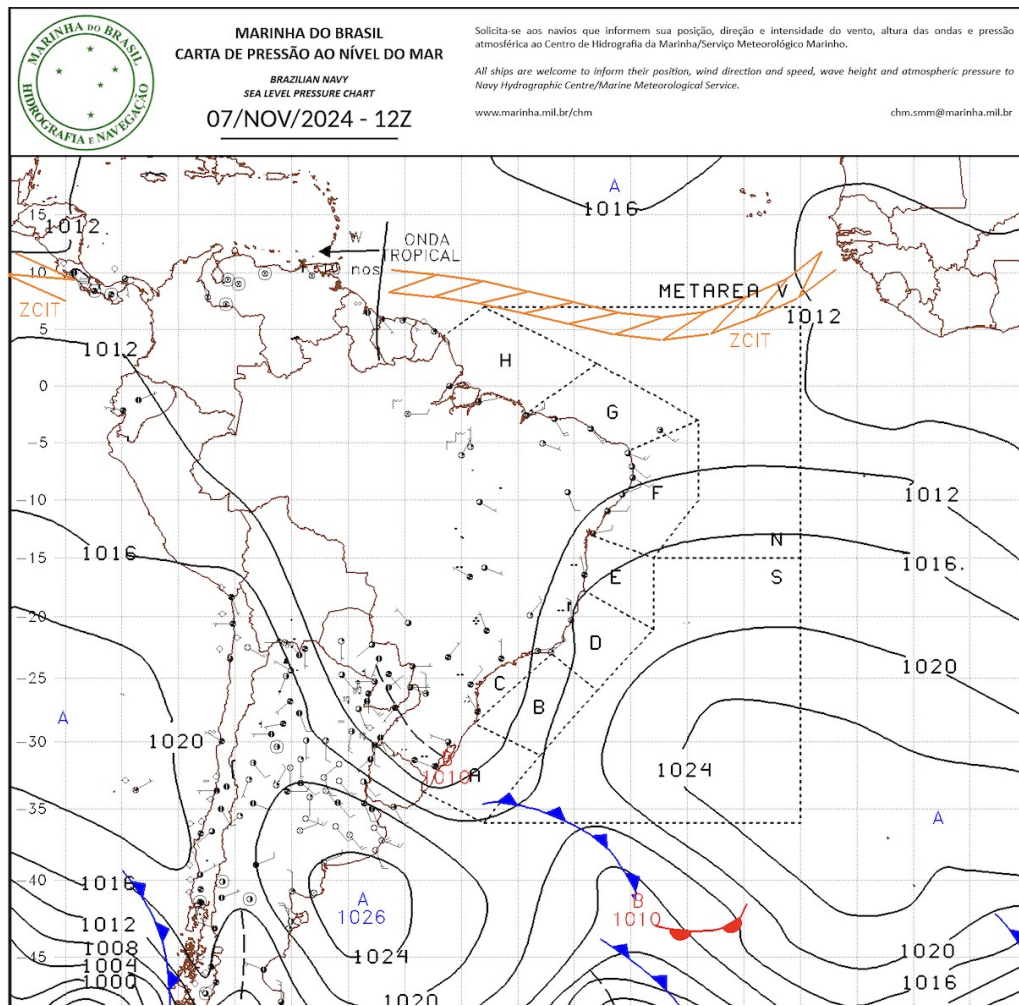
- BONAN, Gordon B. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805530>.
- BRASIL, J. B. et al. Minimum Rainfall Inter-Event Time to Separate Rainfall Events in a Low Latitude Semi-Arid Environment. *Water*, Basel, v. 14, n. 3, p. 467, fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14030467>.
- CARBONE, Marco et al. Minimum Inter-Event Time to Identify Independent Rainfall Events in Urban Catchment Scale. *Advanced Materials Research*, [S. l.], v. 1073-1076, p. 1630-1633, dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1073-1076.1630>. Acesso em: 15 out. 2025.
- CAVALCANTI, Iracema Fonseca Albuquerque et al. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- CECIL, Daniel J. et al. The CHUVA Project: How does convection vary across Brazil? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 95, n. 9, p. 1365–1380, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1>.
- SANCHES, Rafael Grecco. *Análise das chuvas diárias na região de São Carlos/SP por meio de índices climáticos e das tendências pluviométricas*. 2019. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-20082019-093802/publico/TeseSanchesRafaelGreccoCorrig.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.
- SANTOS, Bruno César dos; SOUZA, Paulo Henrique de; VECCHIA, Francisco Arthur da Silva. A caracterização da precipitação do ano hidrológico de 2013-2014 na região de São Carlos/SP e sua repercussão no espaço geográfico. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 21, n. 1, p. 135-155, jul./dez. 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/51505>. Acesso em: 15 out. 2025.
- SCHRÖER, Katharina; KIRCHENGAST, Gottfried; O, Sungmin. Strong dependence of extreme convective precipitation intensities on gauge network density. *Geophysical Research Letters*, v. 45, n. 16, p. 8752–8760, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018GL077994>.
- SHUTTLEWORTH, W. James. *Terrestrial hydrometeorology*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012.
- TOKAY, Ali et al. An experimental study of spatial variability of rainfall. *Journal of Hydrometeorology*, v. 15, n. 2, p. 801–812, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-031.1>.

VIEIRA, Gláuber da Silva et al. Um índice para avaliação da variabilidade espaço-temporal das chuvas no Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 24, p. 145–163, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786332002>.

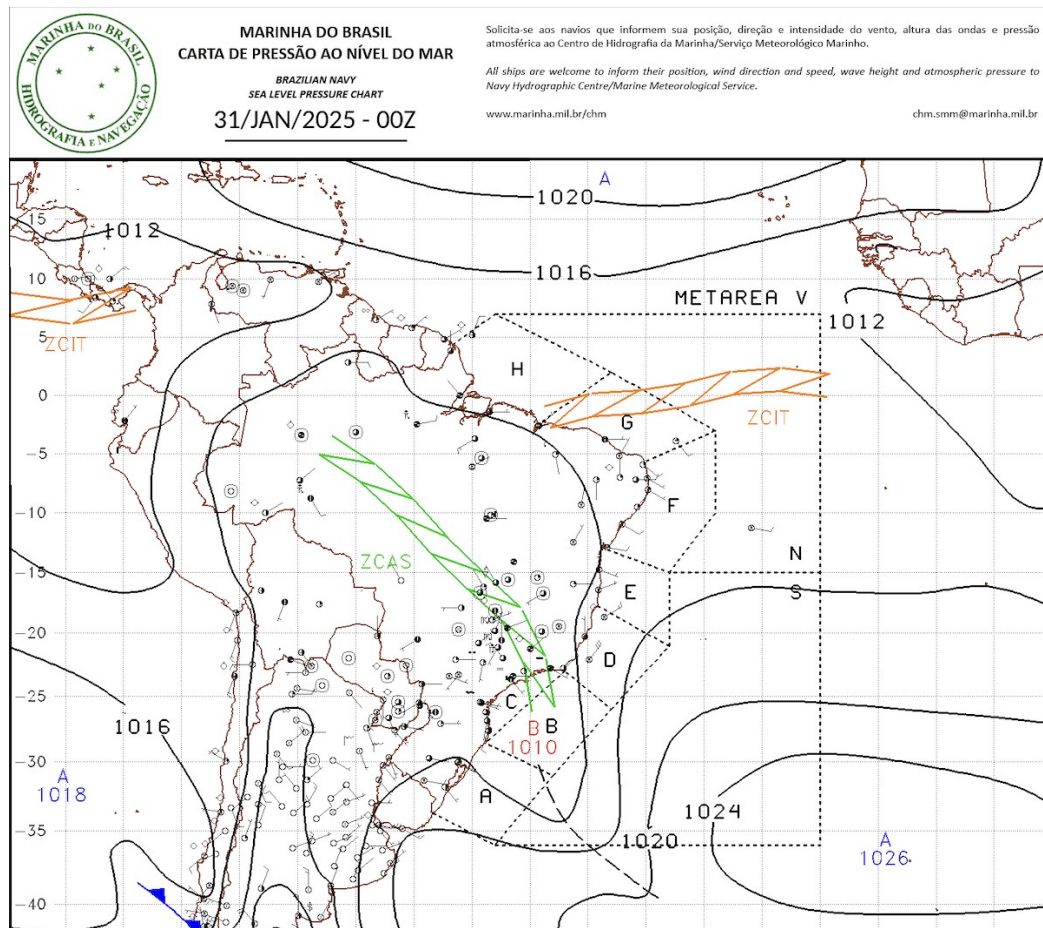
ANEXO A - CARTAS SINÓTICAS



ANEXO A – FIGURA 1: Carta Sinótica de Superfície, 25/04/2025 às 12Z. **Fonte:** Marinha do Brasil (2025).



ANEXO A – FIGURA 2: Carta Sinótica de Superfície, 07/11/2024 às 12Z. **Fonte:** Marinha do Brasil (2025).



ANEXO A – FIGURA 3: Carta Sinótica de Superfície, 31/01/2025 às 00Z. **Fonte:** Marinha do Brasil (2025).