

RISCO CLIMÁTICO E PLUVIOMETRIA NA CIDADE DE SÃO PAULO 2010 – 2025: uma análise econométrica

Mario Antonio Margarido¹

Rogério Acca²

Resumo: Este estudo analisa o comportamento da precipitação pluviométrica na cidade de São Paulo entre 2010 e 2025, propondo uma previsão para o ano de 2026. Através de modelos de regressão linear e Modelos Aditivos Generalizados (GAMM) com distribuição *Tweedie*, a investigação procurou identificar tendências e instabilidades climáticas que afetam a infraestrutura urbana e o planejamento hídrico. Os resultados demonstram que, embora o volume anual acumulado apresente estabilidade estatística (p -valor $> 0,05$), a variabilidade mensal e a ocorrência de eventos extremos representam riscos socioeconômicos elevados. O modelo preditivo estimou para 2026 um regime de normalidade sazonal, com picos em fevereiro (253,21 mm) e recuperação em março (184,03 mm). Conclui-se que o "Risco São Paulo" está associado à concentração da precipitação e à impermeabilização do solo, exigindo políticas públicas focadas na resiliência urbana e na gestão eficiente dos reservatórios, que em 2026 operam em níveis críticos.

Palavras-chave: Pluviometria, Modelo *Tweedie*, Planejamento Urbano, Risco Climático, São Paulo.

Climate Risk and Rainfall Patterns in São Paulo City (2010–2026): An Econometric Analysis

Abstract: This study analyzes the rainfall behavior in São Paulo city from 2010 to 2025 and proposes a forecast for 2026. Using linear regression and Generalized Additive Models (GAMM) with Tweedie distribution, the research aimed to identify climate instabilities affecting urban infrastructure and water planning. Results show that while annual rainfall remains statistically stable (p -value > 0.05), monthly variability and extreme events pose high socio-economic risks. The predictive model estimates a seasonal normalcy for 2026, with peaks in February (253.21 mm) and recovery in March (184.03 mm). We conclude that "São Paulo Risk" is linked to rainfall concentration and soil sealing, requiring public policies focused on urban resilience and efficient reservoir management.

Keywords: Pluviometry, Tweedie Model, Urban Planning, Climate Risk, São Paulo.

INTRODUÇÃO

¹ Pós Doutor em Economia (EESP/FGV), Doutor em Economia Aplicada (ESALQ/USP), Mestre em Economia de Empresas (EAESP/FGV), Economista (FEA/USP). Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics. Pesquisador do PSP Hub. Email: mario.margarido@pezco.com.br

² Doutor (PhD) em Políticas Públicas (Cornell University), Mestre em Sociologia (FFLCH/USP), Cientista Social (FFLCH/USP). Consultor do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Consultor Associado da Fractal Assessoria Desenvolvimento de Negócios. Email: ra239@cornell.edu

Este artigo analisa o comportamento da precipitação urbana na Cidade de São Paulo. O foco principal é identificar a instabilidade climática que impacta a infraestrutura municipal, como sistemas de drenagem e defesa civil. Mais precisamente, entender o comportamento das chuvas na Cidade de São Paulo não é apenas uma curiosidade meteorológica, é uma questão, sobretudo, de sobrevivência urbana, planejamento econômico e saúde pública. A capital paulista possui características geográficas e urbanas que tornam a gestão da água um dos seus maiores desafios.

Historicamente, a Cidade de São Paulo sofre com o processo de urbanização acelerada e a impermeabilização do solo. Conhecer os índices pluviométricos permite, prever alagamentos e inundações. Permite identificar quando o volume de chuva excederá a capacidade de escoamento de rios como o Tietê e o Pinheiros. Também, monitorar áreas de risco, possibilitando dessa forma, prever deslizamentos de terra em encostas, especialmente em comunidades periféricas, salvando vidas através de alertas precoces.

Sob o ponto de vista de engenheiros e urbanistas, os dados históricos de chuva são fundamentais para o cálculo de Períodos de Retorno, pois contribuem para projetar, por exemplo, diâmetro de galerias pluviais, construção de "piscinões" (reservatórios de retenção), pavimentação permeável e jardins de chuva.

Muito além da própria Cidade de São Paulo, o conhecimento do regime de chuvas é uma questão de segurança hídrica, ou seja, também, é sobre o abastecimento de água para a cidade. Embora a chuva na cidade ajude, o foco principal são as cabeceiras dos sistemas que abastecem a metrópole (como o Sistema Cantareira)³. Também, entender se os índices estão abaixo da média histórica ajuda o governo a decidir sobre racionamentos ou bônus de economia de água antes que o nível dos reservatórios atinja o volume morto.

Também, o conhecimento do comportamento dos índices pluviométricos se reveste de uma questão de saúde pública e meio ambiente. O comportamento das chuvas impacta diretamente o bem-estar da população. Em relação a qualidade do ar, em períodos de seca (baixos índices), a concentração de poluentes aumenta, elevando casos de doenças respiratórias. Quanto a ao espectro relacionado com doenças tropicais, o acúmulo de água pós-chuvas intensas aumenta o potencial de proliferação do mosquito *Aedes aegypti* (Dengue, Zica e Chikungunya).

³ Detalhes sobre o Sistema Cantareira podem ser encontrados em COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2026).

Finalmente, tem-se a questão das ilhas de calor. Neste caso, o correto conhecimento dos padrões climáticos permite, não somente, o monitoramento, mas também, ajuda a entender como a falta de chuva acentua o calor extremo no centro urbano. O Quadro 1 apresenta um resumo levando-se em consideração o segmento econômico e a relevância do seu respectivo monitoramento em áreas urbanas.

Quadro 1. Setor e Relevância do Monitoramento dos Índices Pluviométricos

Setor	Relevância do Monitoramento
Mobilidade	Previsão de caos no trânsito e interrupção de linhas de trem/metrô.
Energia	Planejamento da geração hidrelétrica e risco de quedas de árvores na rede elétrica.
Economia	Impacto no comércio local e custos de logística devido a atrasos.

Fonte: CET⁴, ANEEL⁵, FECOMERCIO SP⁶ e CNT⁷.

Entender esses dados é, portanto, a base para transformar São Paulo em uma cidade resiliente às mudanças climáticas que veem alterando o regime de chuvas em todo o Sudeste.

Para analisar o cenário atual, é preciso observar que a Cidade de São Paulo viveu um ano de 2025 marcado por extremos, variando desde recordes históricos de inundação em abril até uma seca severa que deixou os reservatórios em níveis críticos no final do ano.

Atualmente, em fevereiro de 2026, apesar do auge do período chuvoso, seu comportamento se apresenta irregular. Com base em dados do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE)⁸ de janeiro até 03 de fevereiro de 2026, o acumulado atual é de 27,8 mm, o que representa cerca de 12,8% do esperado para o mês (217,2 mm). A tendência para os próximos dias é de pancadas de chuvas típicas de verão (tarde e noite). Quanto ao mês de janeiro de 2026, foi caracterizado por irregularidade. Semanas de calor intenso (máximas de 34°C) e baixa umidade, seguidas por alertas de tempestades extremas no final do mês (com previsões superando 120 mm em curtos períodos).

⁴ COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (2025).

⁵ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2025).

⁶ FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2024).

⁷ CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2023)

⁸ CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA PREFEITURA DE SÃO PAULO (2026).

Em relação ao ano de 2025, o Quadro 2, apresenta uma síntese, com base na linha de tempo, dos principais eventos climáticos para o referido ano para a Cidade de São Paulo.

Quadro 2. Período, Acumulado de Chuvas, Média Histórica, Cidade de São Paulo

Mês	Acumulado Registrado	Média Histórica (Normal)	Observação
janeiro/2025	332,7 mm	292,2 mm	+13,9% acima da média.
abril/2025	145,8 mm	87,0 mm	Recorde histórico: O abril mais chuvoso em 30 anos.
setembro/2025	~15,0 mm	83,3 mm	Extrema seca: Apenas 2 dias de chuva no mês.
dezembro/2025	Abaixo da média	231,0 mm	Reservatórios atingiram o nível mais baixo desde a crise de 2014.

Fonte: Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas da Prefeitura de São Paulo (CGE).

Como o final de 2025 foi muito seco, os reservatórios do Sistema Integrado (como o Cantareira), começaram 2026 com apenas 26,1% de volume útil. Em função desta situação, é necessário que as chuvas de fevereiro e março fiquem dentro ou acima da média para evitar racionamento no próximo inverno.

Por outro lado, no início de 2025, dado o excesso de chuvas, o solo da Cidade de São Paulo está frequentemente saturado pelas tempestades de verão. Mesmo que o acumulado mensal pareça "baixo", chuvas concentradas (como os 144 mm em 24h vistos em janeiro de 2025) causam o transbordamento imediato de córregos.

Portanto, acompanhar o índice pluviométrico diário é essencial para quem transita pela cidade, já que o CGE (Centro de Gerenciamento de Emergências) utiliza esses dados para decretar estados de atenção e alerta por bairros.

OBJETIVOS

O principal objetivo desse texto consiste em determinar o padrão pluviométrico da Cidade de São Paulo para o período de 2010 até 2025, assim, como, fazer previsões para o volume de chuva para 2026. A expectativa é que esse estudo ao identificar o padrão e analisar o comportamento da quantidade de chuva para a Cidade de São Paulo, possa contribuir para melhor planejamento da cidade no que concerne aos efeitos dos denominados efeitos climáticos severos, contribuindo assim, para mitigar esses riscos.

CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS

O Risco faz parte de qualquer decisão financeira, sendo assim, a avaliação do risco torna-se relevante para determinação de preço e alocação dos ativos. No entanto, em função das mudanças climáticas severas, além dos tradicionais riscos incorporados aos ativos financeiros, torna-se premente a adição de mais um tipo de risco, qual seja, o risco climático.

Como estabelecido no Acordo de Basileia, segundo TSAY (2013 e 2005), o risco financeiro é classificado em três categorias: 1) Risco de Mercado; 2) Risco de Crédito; 3) Risco Operacional.

Especificamente, o Risco de Mercado se refere as alterações nos preços de ações, taxas de juros, câmbio e *commodities*. O Risco de Crédito é conhecido como risco de *default*. Ocorre quando o mutuário não paga o empréstimo. Envolve, crédito de risco ao consumidor, empresas, países etc. Dado que é difícil obter esses dados, existem as agências de risco para exercerem tal tarefa. Outra categoria de risco, consiste no Risco Operacional, conforme o Acordo de Basileia II, envolvendo o risco de perda pela inadequação ou falha interna de processos, pessoas, sistemas ou eventos externos. Riscos políticos e legais são exemplos de riscos operacionais.

Conforme os produtos e transações financeiras se tornam mais sofisticadas e os mercados tornam-se mais integrados, torna-se relevante entender os riscos financeiros.

Um quarto tipo de risco, se refere ao risco climático, isto é, a probabilidade de ocorrência de impactos negativos resultantes de interações entre perigos relacionados ao clima, a exposição e a vulnerabilidade de um sistema (seja ele humano, econômico ou natural).

Para entender o risco climático de forma técnica, como no contexto do Sistema Cantareira é geralmente definido pela combinação de três pilares fundamentais:

- 1) Perigo (*Hazard*): Refere-se aos eventos climáticos em si, como secas extremas, chuvas torrenciais ou ondas de calor;
- 2) Exposição: É a presença de pessoas, infraestrutura ou ecossistemas em locais que podem ser afetados. Neste caso, o Sistema Cantareira está "exposto" à variação pluviométrica da sua bacia;

- 3) Vulnerabilidade: É a propensão ou predisposição a ser afetado negativamente. Um reservatório com níveis baixos é muito mais vulnerável a uma interrupção de chuva do que um reservatório cheio.

Na gestão moderna e financeira, o risco climático é dividido em:

- 1) Risco Físico: Corresponde aos danos diretos causados por eventos climáticos. Por exemplo, a quebra da previsibilidade de chuva;
- 2) Risco de Transição: São os riscos que surgem da mudança para uma economia de baixo carbono, incluindo mudanças na legislação, tecnologia e mercado.

Outros tipos de riscos são os ambientais e sociais. De forma sucinta, O risco ambiental é a probabilidade de ocorrência de eventos adversos (sejam eles naturais ou causados pelo homem) que resultem em danos à saúde humana, ao patrimônio ou ao equilíbrio dos ecossistemas. Em termos simples, o risco ambiental é a combinação da ameaça (o perigo em si) com a vulnerabilidade (a fragilidade do alvo atingido). Também, tem-se o risco social, o qual, é a probabilidade de uma pessoa ou grupo sofrer danos ou violações de seus direitos fundamentais devido a fatores sociais, econômicos ou culturais. Diferente do risco ambiental, que foca na natureza, o risco social foca na integridade e dignidade humana dentro da sociedade.

É necessário realçar que, esse texto foca no risco climático, exclusivamente.

O regime de chuvas da Cidade de São Paulo é fortemente influenciado pela "ilha de calor" e pela brisa marítima, diferindo significativamente do regime da Serra da Cantareira onde o regime pluviométrico é afetado pelo clima de altitude e cabeceiras dos rios. Em outras palavras, diferente das represas, onde a chuva precisa ser constante e suave para infiltrar no solo, na cidade a chuva é frequentemente convectiva, ou seja, caracterizada por pancadas rápidas e intensas.

MÉTODO

Foi utilizado o modelo desenvolvido por WOOD (2017), denominado Modelo Aditivo Generalizado (*Generalized Additive Model – GAM*), essa é a ferramenta ideal para modelar relações não lineares entre variáveis sem ter que adivinhar a forma exata da curva (como se é um polinômio de segundo ou terceiro grau).

Diferente de uma regressão linear tradicional, onde se assume que o efeito de uma variável é uma linha reta, o GAM permite que os dados "digam" qual é a forma da relação através de *splines* (suavizadores). No caso de um Modelo de Regressão Tradicional, utiliza-se a seguinte equação:

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 x_t + \varepsilon_t$$

onde, y_t é a variável dependente, β_0 é a constante, β_1 é a inclinação da reta, x_t é a variável independente e ε_t são os resíduos. Nesse caso, as hipóteses relacionadas com os resíduos são: a relação entre a variável dependente e a(s) independente(s) deve(m) ser linear; a média dos resíduos deve tender a zero; a variância dos resíduos deve ser constante para todos os níveis das variáveis independentes; os resíduos não devem ser correlacionados entre si e os resíduos seguem uma Distribuição Normal.

No caso do Modelo GAM, ele pode ser multivariado, assim como, univariado. No caso desse texto, será utilizado um Modelo Univariado. Sendo assim, tal modelo, matematicamente é representado como:

$$y_t = \beta_0 + f(t) + \varepsilon_t$$

sendo que, os resíduos não devem ser correlacionados entre si, t indica que as observações possuem uma ordem cronológica e, muito provavelmente, uma dependência temporal (o que aconteceu em $t - 1$ influencia o período t).

Muitas vezes, em modelos de séries temporais, utiliza-se o GAM para decompor o sinal. Por exemplo, pode-se utilizar o GAM univariado para modelar a demanda de energia em função de seus próprios valores passados. Nesse caso, se pode ter um modelo "univariado" em relação ao tempo que, na verdade, captura várias sazonalidades. Matematicamente, esse modelo é representado como:

$$y_t = \beta_0 + f_{tendência}(t) + f_{sazonalidade}(mês) + \varepsilon_t$$

Caso os resíduos do GAM apresentem autocorrelação, é necessário estimar o GAMM (*Generalized Additive Mixed Model*) univariado, o qual, tem a vantagem de combinar flexibilidade da função de suavização com a estrutura de efeitos aleatórios. Sua representação matemática é:

$$g(E[Y_{ij}]) = \beta_0 + f(x_{ij}) + Z_{ij} b_j + \varepsilon_{ij}$$

onde: $g(\cdot)$ é a função de ligação (*link function*), a qual, permite que o modelo lide com dados que não são Normais (como contagens ou binários). Caso os dados sejam contínuos e Normais, g é a função identidade; Y_{ij} é a variável de resposta para a i -ésima observação do j -ésimo grupo; β_0 é o intercepto fixo, ou seja, representa o valor médio global quando os demais termos são iguais a zero; $f(x_{ij})$ é a função de suavização (*smooth function*) da variável independente x . Ao contrário de um coeficiente fixo (βx), aqui f é geralmente uma combinação de *splines* que permite capturar curvas complexas; $Z_{ij}b_j$ representa os efeitos aleatórios, sendo que, b_j é o efeito específico do grupo j , assumindo que $b_j \sim N(0, \sigma_b^2)$, o qual, captura, ao contrário de um coeficiente fixo (βx), aqui f é geralmente uma combinação de *splines* que permite capturar curvas complexas; ϵ_{ij} representa o erro residual (ruído branco), onde $\epsilon_{ij} \sim N(0, \sigma^2)$.

Para finalizar, matematicamente, a função $f(x)$ é construída como a soma de funções de base (b_k), ou seja:

$$f(x) = \sum_{k=1}^K \gamma_k b_k(x)$$

sendo que, K é o número de funções de base (que define a complexidade da curva) e γ_k são os coeficientes a serem estimados. No GAMM, esses coeficientes são penalizados para evitar que a curva fique "excessivamente ondulada".

DADOS

Foi utilizada a série dos índices pluviométricos diários com base na estação meteorológica da Cidade de São Paulo, a qual, está localizada no Mirante de Santana na Zona Norte. No total, são 5.814 observações, a série tem início em 31 de janeiro de 2010 e termina em 31 de dezembro de 2025. Os dados básicos foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia — BRASIL (2025), cujo endereço é <https://bdmep.inmet.gov.br/>. A seguir, os dados diários foram transformados em mensais.

ANÁLISE DE DADOS

A Figura 1 apresenta a Precipitação Diária no Mirante de Santana, a principal estação meteorológica da Cidade de São Paulo, cobrindo o período de 2010 a 2025. Esta série histórica é fundamental para entender a volatilidade climática da capital.

A Figura 1 revela a ocorrência frequente de chuvas extremas, onde o volume diário ultrapassa a marca dos 80 mm. O recorde da série ocorreu com um pico proeminente por volta de 2020/2021, superando os 120 mm em um único dia. Esse tipo de evento é o principal causador de transbordamentos de rios e caos na mobilidade urbana.

É necessário enfatizar que os picos não são isolados, ocorrem quase anualmente, confirmando a tendência de tempestades severas e concentradas mencionadas anteriormente. A base da Figura 1 (os "vales") mostra a alternância rítmica entre as estações. O "Chão" da figura mostra as áreas onde a linha toca ou se aproxima do zero, representam os meses de inverno (junho a agosto), evidenciando a seca característica da região. Também, é possível notar visualmente que, entre 2014 e o início de 2015, a densidade de picos altos é menor, refletindo o período crítico que levou ao quase colapso do Sistema Cantareira. No final da série, observa-se uma alta densidade de chuvas significativas. A Figura 1 mostra que os dados de 2025 teve eventos volumosos (como o pico próximo a 80 mm no início do ano), seguidos por uma queda brusca, o que explica a variação entre inundações e a baixa dos reservatórios citada anteriormente.

Em suma, a Figura 1 demonstra que a média mensal de São Paulo é composta, muitas vezes, por poucos dias de chuva muito intensa, em vez de chuvas leves distribuídas. Para a gestão da cidade, isso significa que, a infraestrutura precisa estar preparada para vazões súbitas (picos superiores a 60 mm). A variabilidade anual é alta, o que torna o planejamento hídrico baseado apenas em médias "normais" perigoso.

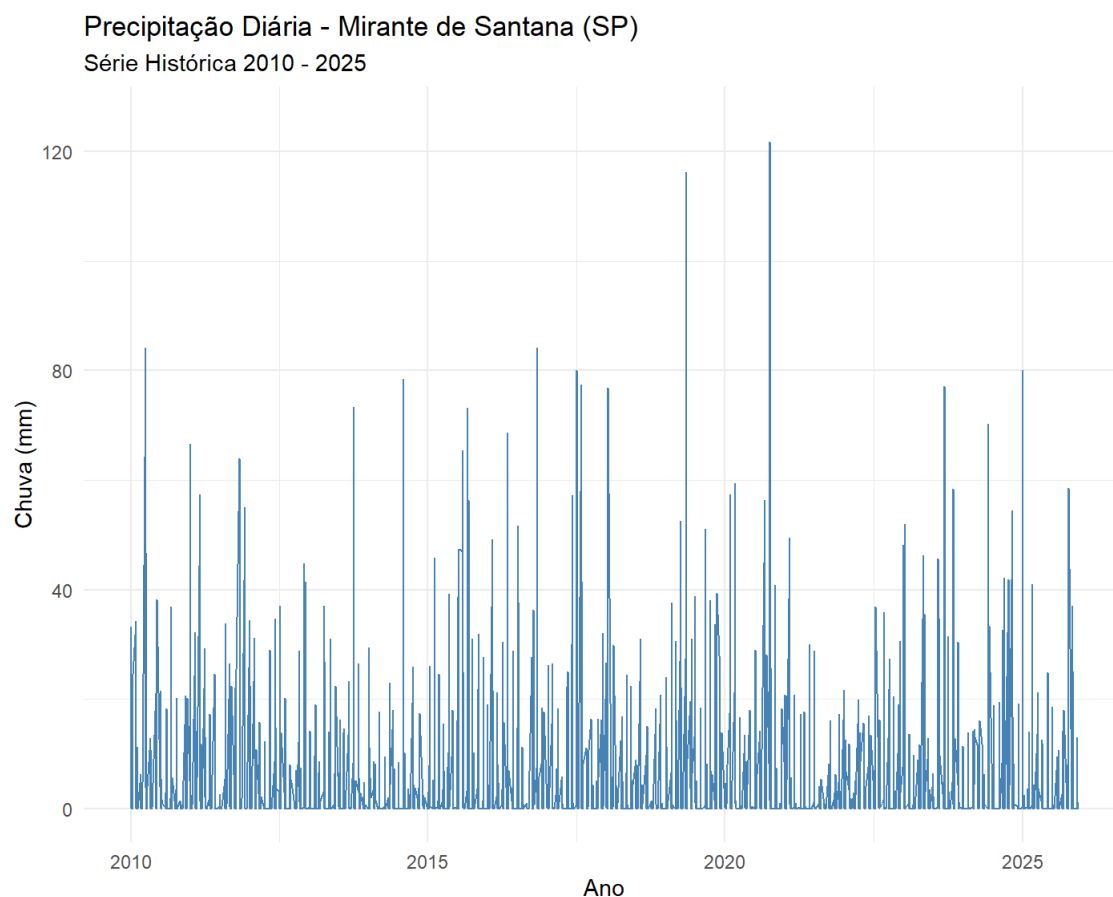


Figura 1. Evolução Diária da Quantidade de Chuva, Cidade de São Paulo, 31 de Janeiro de 2010 – 31 de Dezembro de 2025.

Fonte: INMET/BDMEP.

Foram utilizados vários métodos para modelar a chuva diária na Cidade de São Paulo, no entanto, nenhum desses métodos conseguiu “domar” o comportamento “selvagem” dos índices pluviométricos diários. Em função disso, a saída consistiu em tornar os dados diários em mensais.

A comparação entre a Figura 1 de Precipitação Diária e o de Precipitação Mensal Acumulada (Figura 2) no Mirante de Santana revela o comportamento clássico, porém cada vez mais extremo, do clima paulistano. Enquanto a Figura 1 mostra a "violência" das tempestades isoladas, o mensal na Figura 2 revela a saúde dos reservatórios e os ciclos de seca.

Ao observar Figura 1, verifica-se picos que ultrapassam 120 mm em 24 horas (como visto por volta de 2020/2021). Na Figura 2, esses mesmos picos elevam o acumulado do mês para quase 500 mm, o que é quase o dobro da média histórica para

meses de verão. Isso indica que, na Cidade de São Paulo, poucos eventos de chuva extrema são responsáveis por quase todo o volume de água do mês, o que sobrecarrega instantaneamente o sistema de drenagem urbana.

Focando na Figura 2, com os dados mensais (com preenchimento azul), torna a "pulsação" da Cidade de São Paulo muito clara, ou seja, picos altos nos meses de verão (janeiro/fevereiro) e vales que tocam o zero no inverno (julho/agosto). Também, na Figura 2, observam-se as "ondas" entre 2014 e 2015, as quais, são significativamente mais baixas e estreitas. Foi esse déficit acumulado que gerou a maior crise hídrica da história recente da cidade. É possível observar que entre 2023 e 2025, os picos estão se tornando mais irregulares. Também, os meses de 2025 apresentam volumes baixos seguidos por recuperações abruptas, o que dificulta o planejamento da Defesa Civil.

A Figura 1 é ideal para identificar riscos de desastres imediatos (alagamentos e deslizamentos). Cada linha vertical alta representa um dia de caos na mobilidade paulistana. Por outro lado, a Figura 2 é ideal para gestão de recursos hídricos. Ela suaviza o "ruído" diário e mostra se o ano foi "seco" ou "chuvoso" no balanço geral, permitindo prever o nível de racionamento ou abundância nos mananciais.

O Quadro 3 apresenta um resumo dos fenômenos tanto em termos diários, quanto mensais, relacionados com os principais impactos da quantidade de chuva.

Quadro 3. Fenômeno, Escala Diária e Mensal e Impacto Principal

Fenômeno	Escala Diária (Máximos)	Escala Mensal (Máximos)	Impacto Principal
Tempestade Extrema	> 100 mm/dia	~ 500 mm/mês	Inundações e queda de energia.
Estiagem Severa	0 mm por vários dias	< 20 mm/mês	Crise hídrica e má qualidade do ar.
Média Comum	10 - 30 mm/dia	200 - 300 mm/mês	Chuvas de verão sem grandes alertas.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET (2026).

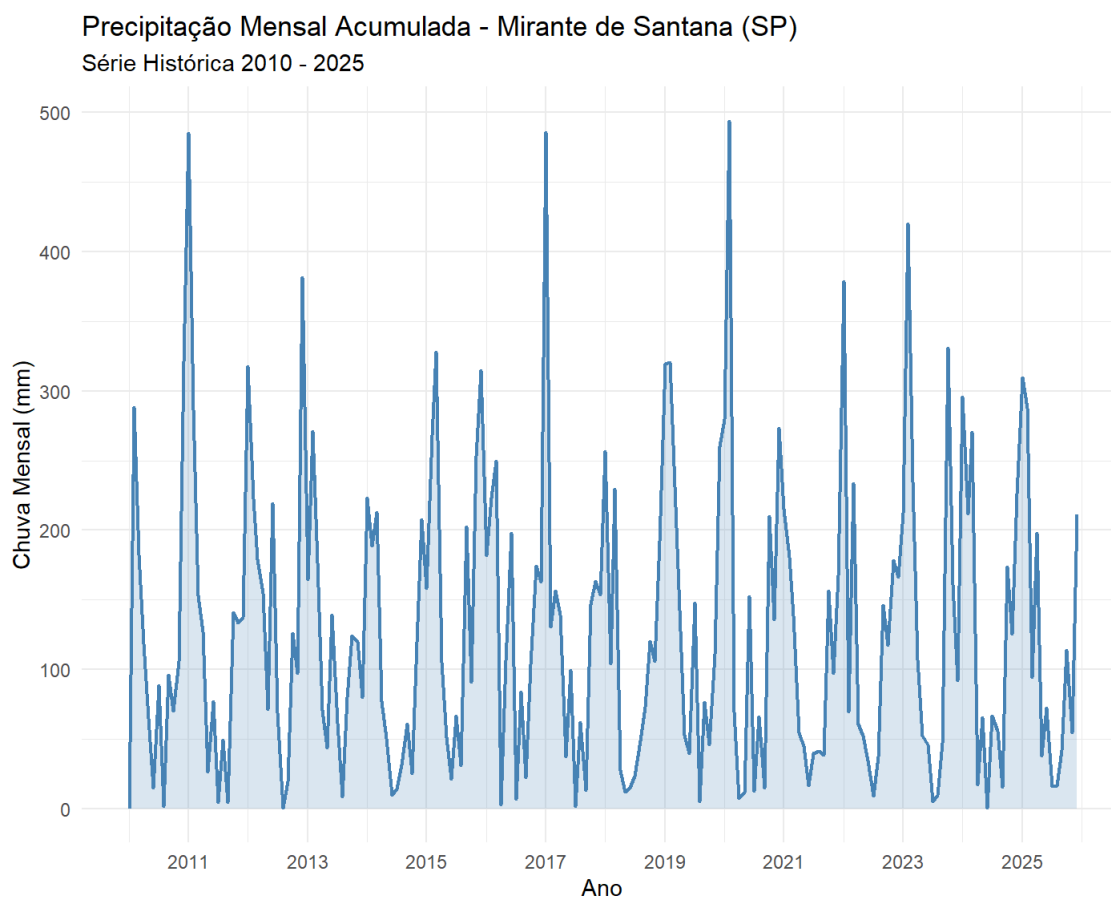


Figura 2. Evolução Mensal da Quantidade de Chuva, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025.

Fonte: INMET/BDMEP.

Uma vez analisada a sazonalidade, agora, é a vez da tendência, ou seja, abandona-se o curto prazo, e envereda-se pelo longo prazo.

Estudos indicam que, embora a média anual possa apresentar estabilidade em algumas séries, há uma tendência de aumento na intensidade dos eventos extremos (chuvas muito volumosas em poucos dias) na região metropolitana de São Paulo. Na análise de séries temporais climáticas, a linha de tendência ajuda a identificar se o "clima" está mudando ou se está apenas observando variações sazonais comuns.

A Figura 3, apresenta a tendência da precipitação mensal dos índices pluviométricos da Cidade de São Paulo entre janeiro de 2010 e dezembro de 2025. Essa tendência foi construída com base em um modelo de regressão, onde a variável tempo (tendência) é o regressor.

Com base nos resultados estatísticos do modelo de regressão⁹ da Tabela 1 e na comparação visual entre as figuras de precipitação diária, mensal e de tendência, pode-se extrair conclusões profundas sobre o comportamento hídrico da Cidade de São Paulo (Mirante de Santana) no período de 2010 a 2025. Em primeiro lugar, tem-se a estabilidade da média *versus*. intensidade dos eventos. O dado mais revelador do modelo é o p-valor de 0,7768 para o coeficiente associado ao tempo. Como esse p-valor está acima do nível de significância de 10%, pode-se inferir que não existe uma tendência estatisticamente significativa de aumento ou diminuição no volume total de chuva mensal na Cidade de São Paulo. O coeficiente da tendência, cujo valor de estimativa é igual -0,001285, indica uma redução teórica de apenas $\sim 0,47^{10}$ mm por ano, um valor desprezível diante da variabilidade natural.

Tabela 1. Parâmetros Estimados, Modelo de Regressão, Índices Pluviométricos Mensais, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Parâmetro	Estimativa	Erro Padrão	t valor	Pr(> t)
Intercepto	149.787563	79.66043	1.88	0.0616
Tendência	-0.001285	0.004527	-0.284	0.7768

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Em relação a Figura 3, a linha de tendência vermelha é quase horizontal (estável), enquanto a figura com dados diários mostra picos frequentes acima de 80 mm e 120 mm. Isso prova que o "clima" de São Paulo está se tornando mais concentrado, isto é, o volume total permanece o mesmo, mas cai em tempestades mais violentas e isoladas. Quanto a sazonalidade e riscos setoriais, ao se observar a "pulsção" da figura mensal acumulado, identifica-se os períodos críticos para a infraestrutura urbana. No caso da mobilidade urbana (Verão), os picos que chegam a 500 mm/mês coincidem com os episódios de caos no trânsito e interrupção de linhas ferroviárias. A estabilidade da média não reduz o risco de enchentes, pois estas dependem da intensidade diária, não do total mensal. Quanto ao segmento de energia (Inverno), os vales que tocam o zero no gráfico (estação seca) representam o desafio para a geração hidrelétrica e o aumento de incêndios em vegetação, que afetam a rede elétrica. Para a economia da cidade como um todo, a irregularidade (observada pelos picos e vales acentuados) gera custos logísticos imprevisíveis. O "Custo São Paulo" aumenta quando a cidade fica com o sistema de mobilidade prejudicado devido a uma chuva de 100 mm que ocorre em apenas 2 horas.

⁹ Detalhes sobre o modelo de regressão contra o tempo podem ser encontrados em RAMANATHAN (1993).

¹⁰ Para se obter esse valor, basta multiplicar por 365 dias.

Portanto, embora a regressão linear não aponte uma alteração significativa no volume mensal acumulado para o período 2010-2025 ($p\text{-valor} = 0,77$), a análise visual das séries diárias revela uma perigosa concentração da precipitação. O desafio para a gestão pública da Cidade de São Paulo não é o aumento da chuva total, mas a resiliência frente a eventos extremos de curta duração que paralisam a mobilidade e sobrecarregam os sistemas de drenagem, mobilidade e energia."

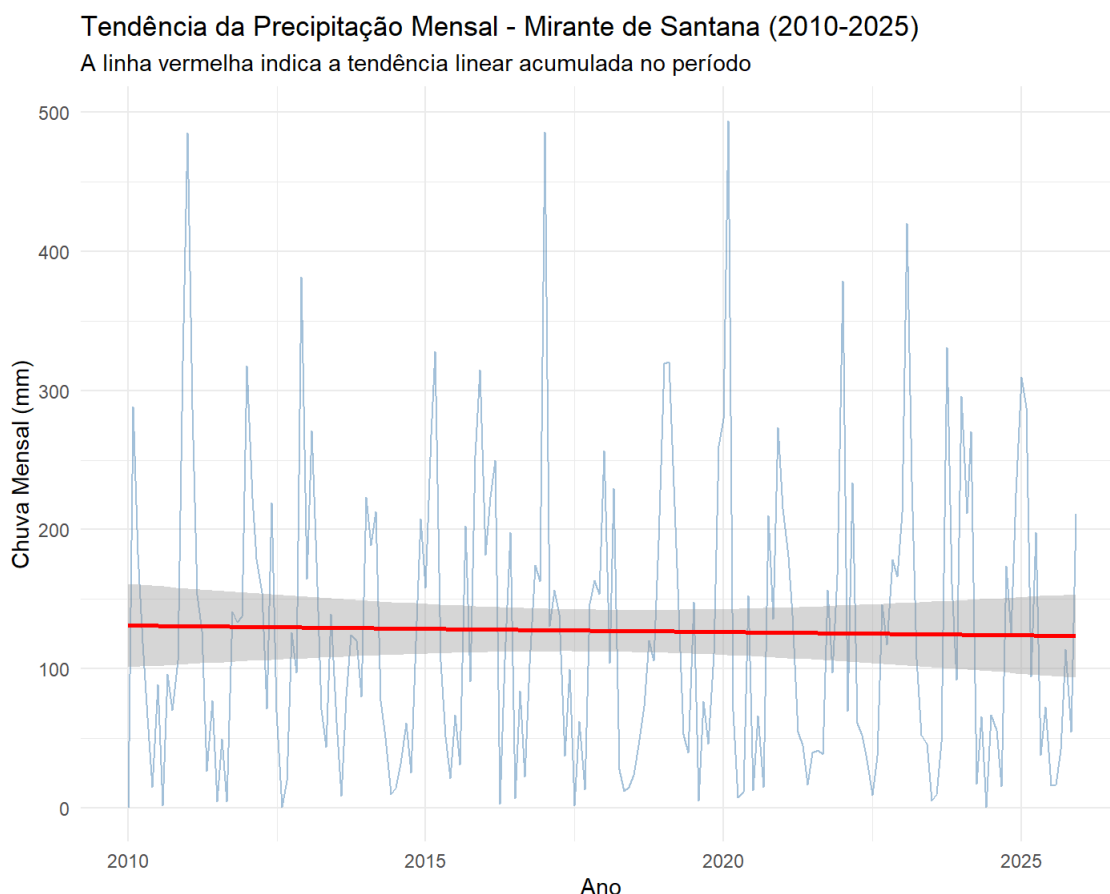


Figura 3. Evolução Mensal da Tendência de Chuva, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025.

Fonte: INMET/BDMEP.

A seguir, para visualizar a instabilidade de cada mês foi utilizado o Boxplot, o qual não mostra apenas a média, mas sim a amplitude da chuva, ou seja, o quanto a chuva varia entre o ano mais seco e o mais chuvoso para aquele mês específico.

Ao observar o Boxplot na Figura 4, notam-se três padrões fundamentais para fundamentar os impactos da chuva na Cidade de São Paulo. Os meses de verão (Dez-Jan-Fev) possuem caixas mais altas e longas. Isso indica uma alta incerteza, por exemplo, em

um ano, janeiro pode ter 150 mm e no outro 450 mm. É aqui que o planejamento da mobilidade e da defesa civil é mais desafiado pelo "caos" imprevisível. Também, há *outliers*¹¹ (Pontos Vermelhos), os quais, são os meses "fora da curva", como abril de 2025 que foi mencionado anteriormente. Eles representam eventos atípicos que fogem completamente ao planejamento hídrico padrão. Finalmente, os meses de inverno (Jun-Jul-Ago), sendo que, nesse caso, as caixas são "esmagadas" próximas ao zero. A variabilidade é baixa, o que confirma a previsibilidade da seca, mas acentua os problemas de qualidade do ar e energia (baixa geração hidrelétrica).

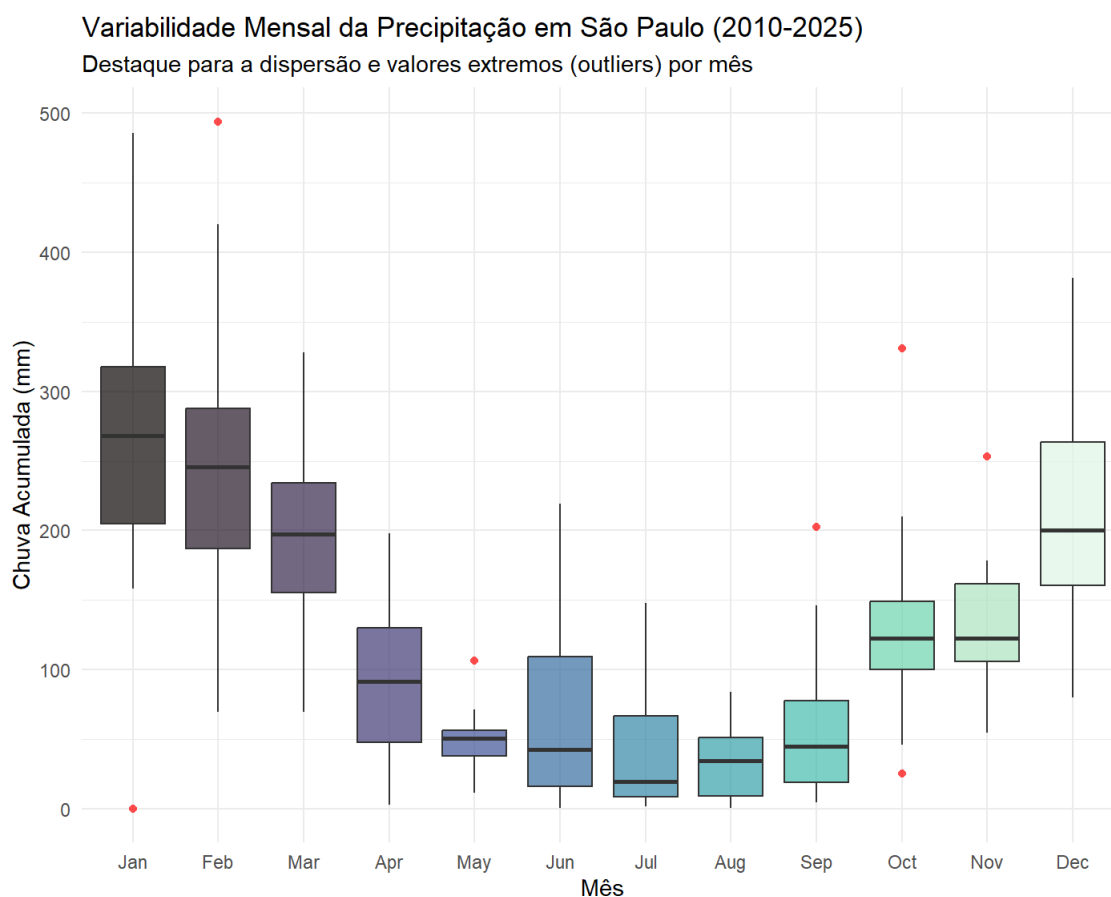


Figura 4. Boxplot, Índices Pluviométricos Mensais, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025.

Fonte: INMET/BDMEP.

O Quadro 4 sobre sazonalidade, sintetiza como o comportamento das chuvas impacta os serviços essenciais na Cidade de São Paulo. Ela cruza os dados técnicos aqui analisados com as vulnerabilidades urbanas descritas pelos órgãos oficiais.

¹¹ Detalhes sobre os tipos de *outliers* e seus efeitos podem ser encontrados em BOX e TIAO (1975).

Quadro 4. Estação, Meses, Nível de Chuva, Impacto na Mobilidade, Energia e Saúde Pública

Estação / Meses	Nível de Chuva	Impacto na Mobilidade	Impacto na Energia	Impacto na Saúde Pública
Verão (Dez - Mar)	Muito Alto (Picos > 80mm)	Crítico: Alagamentos, interrupção de comboios e caos no trânsito.	Alto: Quedas de árvores e descargas elétricas na rede.	Risco de Doenças: Leptospirose, arboviroses (Dengue) e traumas por desastres.
Outono (Abr - Mai)	Moderado (Transição)	Médio: Congestionamentos pontuais por chuvas isoladas.	Moderado: Início da descida do nível dos reservatórios.	Respiratório: Aumento de síndromes gripais e viroses sazonais.
Inverno (Jun - Ago)	Muito Baixo (Estiagem)	Baixo: Trânsito flui melhor, mas poluição é visível.	Crítico (Gestão): Baixa geração hídrica; acionamento de térmicas.	Muito Alto: Doenças respiratórias agravadas pela baixa humidade e poluição.
Primavera (Set - Nov)	Crescente (Trovoada)	Médio/Alto: Tempestades de fim de tarde afetam a volta a casa.	Muito Alto: Início da temporada de raios e ventos fortes.	Alergias: Pólen e mudanças bruscas de temperatura.

Fontes: SÃO PAULO (2024), CLIMATEMPO (2025), MINISTÉRIO DA SAÚDE (2025) e JOTA (2024).

A Figura 5 apresenta a anomalia de precipitação em 2024, quando comparada, entre o realizado em 2024 e a média histórica para o período 2010-2025.

Para analisar a Figura 5, o ponto de partida é a Figura 1, a qual apresenta os dados diários de chuva para a Cidade de São Paulo.

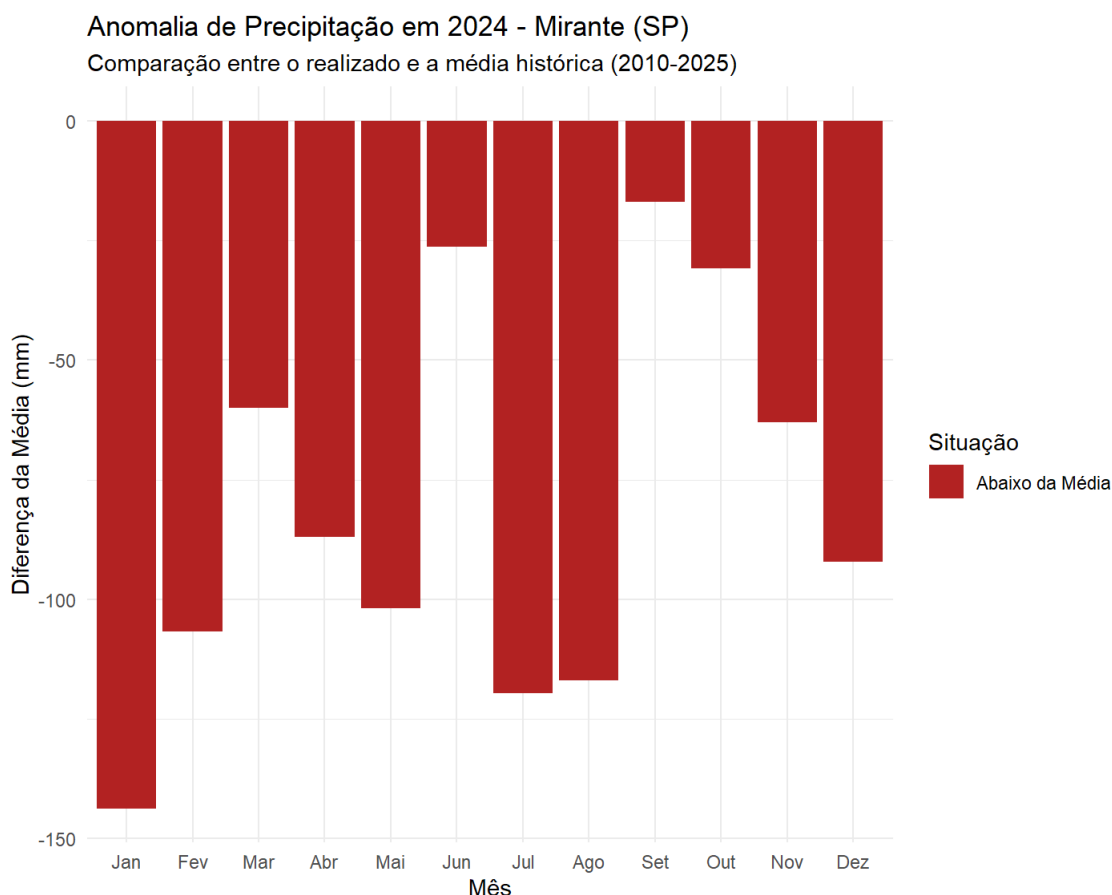


Figura 5. Anomalias de Precipitação em 2024, Comparação entre o Realizado e a Média Histórica 2010-2025, Cidade de São Paulo.

Fonte: INMET/BDMEP.

A figura de precipitação diária mostra uma série marcada por eventos de curtíssima duração, mas de altíssima intensidade. É possível observar diversos picos que ultrapassam os 80 mm em um único dia, com um evento histórico próximo a 2021 chegando perto da marca de 120 mm. Esses picos são os principais causadores de alagamentos repentinos e paralisia na mobilidade da cidade, já que o volume de água despejado em poucas horas frequentemente supera a capacidade de drenagem local.

Agora, com base na Figura 2, a visão mensal acumulada suaviza o "ruído" diário e permite enxergar a saúde dos reservatórios ao longo do tempo. A Figura 2 mostra um padrão rítmico claro, com picos de verão atingindo frequentemente entre 300 mm e 500 mm por mês, contrastando com invernos onde a precipitação beira o zero. Nota-se que o período entre 2014 e 2015 apresenta picos mensais visivelmente menores, o que corresponde à grande crise hídrica que afetou o sistema de abastecimento de São Paulo.

A figura de tendência linear (linha vermelha) traz uma conclusão fundamental para o planejamento urbano, pois a linha de tendência é praticamente horizontal ao longo dos 15 anos. Isso indica que, estatisticamente, o volume total de chuva anual em São Paulo não está aumentando nem diminuindo de forma significativa. O problema não é a falta ou o excesso de água no acumulado do ano, mas sim a sua distribuição. Tem-se a mesma quantidade de água, mas ela está caindo em intervalos mais curtos e violentos (conforme os picos diários sugerem).

A Figura 5, registra anomalia para todos o ano de 2024, sendo particularmente preocupantes seus resultados. Todas as barras do gráfico estão abaixo do eixo zero (cor vermelha), indicando que todos os meses de 2024 registraram chuvas abaixo da média histórica. Meses como janeiro apresentaram um déficit superior a 140 mm. Essa sequência ininterrupta de meses secos explica a pressão atual sobre o setor de energia (baixos níveis em hidrelétricas) e a piora na qualidade do ar (saúde pública) e comprometimento do fornecimento de água para a população em 2025.

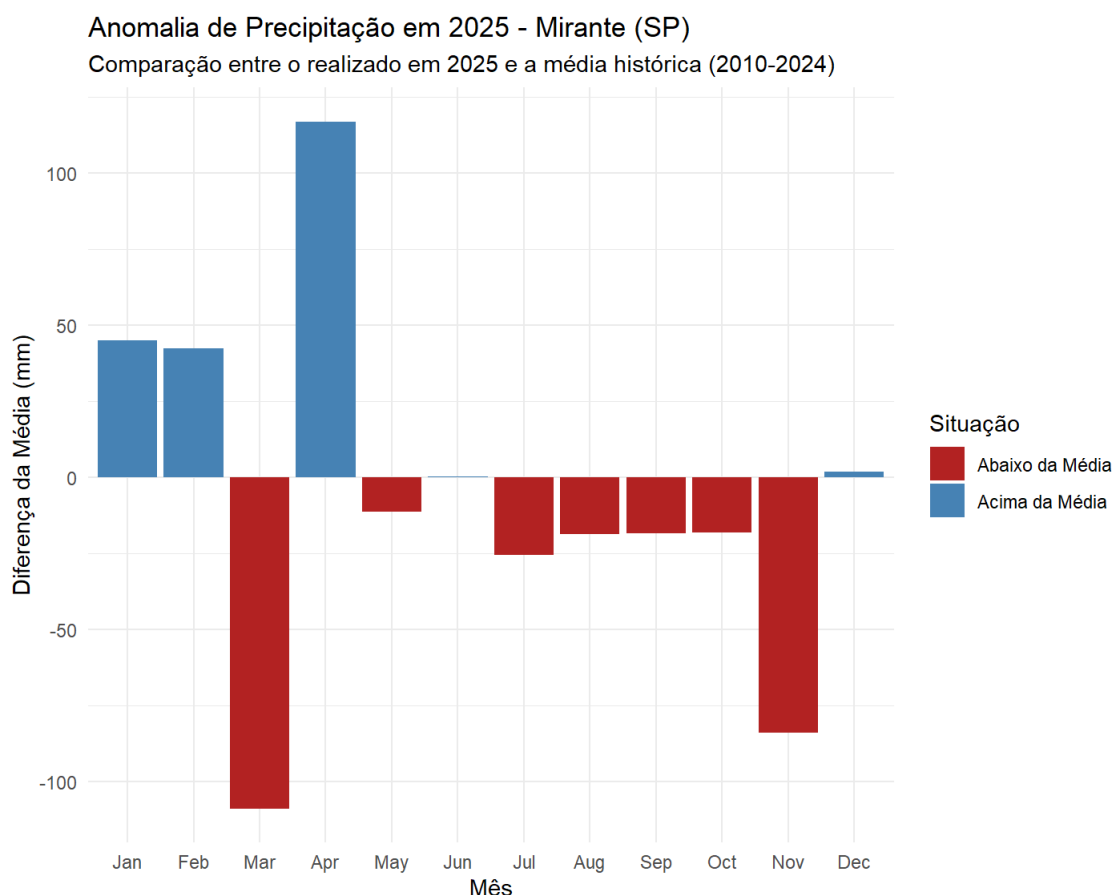


Figura 6. Anomalias de Precipitação em 2025, Comparação entre o Realizado e a Média Histórica 2010-2025, Cidade de São Paulo.

Fonte: INMET/BDMEP.

Com base na Figura 6 de Anomalia de Precipitação em 2025, a análise revela um ano de extremos e forte irregularidade climática para a Cidade de São Paulo. Ao contrário de 2024, que apresentou déficit em todos os meses, 2025 foi marcado por alternâncias bruscas entre excesso e escassez.

O mês de abril foi o grande destaque positivo, apresentando uma anomalia superior a 110 mm acima da média histórica. Este volume indica a ocorrência de eventos extremos de chuva concentrada, o que, historicamente, resulta em sérios problemas de mobilidade urbana e alagamentos fora do período convencional.

Os meses de janeiro e fevereiro, também, registraram chuvas acima da média (cerca de 45 mm a 50 mm extras), o que ajuda a manter os reservatórios em níveis, ainda operacionais, no início do ano.

Logo após um início de ano úmido, março apresentou um déficit severo, com quase 110 mm a menos do que o esperado. Essa quebra no padrão de chuvas de verão impacta diretamente o planejamento da segurança hídrica.

Com exceção de um dezembro ligeiramente acima da média, quase todo o segundo semestre (julho a novembro) ficou no "vermelho". O destaque negativo é novembro, com um déficit próximo a 80 mm, o que agrava a situação de estiagem antes da virada do ano.

A irregularidade demonstrada — com meses muito secos intercalados por picos, dificulta o planejamento da geração de energia hidrelétrica e gera custos logísticos imprevisíveis devido aos danos causados pelos picos de inundações (como o visto em abril).

A sequência de meses abaixo da média no segundo semestre (julho-outubro) favorece a concentração de poluentes, elevando o risco de doenças respiratórias na capital.

O Quadro 6, apresenta um resumo para o ano de 2025, levando em consideração os principais eventos climáticos detectados.

Quadro 6. Síntese das Anomalias Pluviométricas, Cidade de São Paulo, 2025, Comparativamente a Média Histórica de Chuvas (2010-2025)

Período	Tendência em 2025	Impacto Principal
Jan - Fev	Acima da média	Alerta para alagamentos e transporte. Risco alto de desastres naturais e paralisia viária.
Abril	Pico Extremo (>110mm)	
Jul - Nov	Déficit Contínuo	Pressão sobre reservatórios e qualidade do ar.

Fonte: INMET/BDMEP.

O Quadro 7, apresenta um resumo de todos os resultados até aqui obtidos.

Quadro 7. Indicador, Resultado Estatístico, Interpretação Técnica, Impacto Principal, Quantidade de Chuva, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025.

Indicador	Resultado Estatístico	Interpretação Técnica	Impacto Principal
Tendência Linear	-0,46 mm/ano (p=0,77)	Estabilidade: Não há aumento ou redução sistemática no volume total mensal.	Planejamento hídrico de longo prazo deve focar na gestão de extremos, não na média.
Variabilidade (Boxplot)	Alta Dispersão (Verão)	Instabilidade: Meses de janeiro e fevereiro são imprevisíveis e concentram o volume anual.	Caos na Mobilidade Urbana e saturação do sistema de drenagem (piscinões).
Anomalia 2024	Negativa (Déficit em 12 meses)	Seca Severa: Todos os meses ficaram abaixo da média histórica.	Crise hídrica e aumento do custo de Energia (bandeiras tarifárias).
Previsão 2025	Irregular (Recuperação lenta)	Estresse Acumulado: Baixa resiliência do solo e dos reservatórios após a seca de 2024.	Risco à Saúde Pública por baixa qualidade do ar e doenças respiratórias.

Fonte: INMET/BDMEP.

A seguir, foi estimado o Modelo Aditivo Generalizado Misto (*Generalized Additive Mixed Model - GAMM*). Neste ponto é necessário realçar que foram estimados dois tipos de modelos. Além do modelo mencionado anteriormente, também, foi estimado o Modelo Aditivo Generalizado (*Generalized Additive Model - GAM*). No entanto, o modelo GAMM obteve estimativas mais robustas comparativamente ao modelo GAM.

No caso do modelo GAMM, foi incorporado um parâmetro autorregressivo de ordem um (AR (1)), o qual, contribui para melhorar os resultados.

A Tabela 2 apresenta as estimativas do modelo GAMM. O Modelo Aditivo Generalizado Misto (GAM), é uma ferramenta estatística avançada que permite capturar relações não lineares entre a chuva e o tempo. Foi utilizada a família *Tweedie*¹², que é a escolha técnica perfeita para dados de precipitação, pois lida bem com a grande quantidade de "zeros" (dias sem chuva) e a assimetria dos dados.

Com base nos resultados da Tabela 2, observa-se que a sazonalidade corresponde ao fator dominante, dado que, o termo $s(\text{mes})$ é altamente significativo ($p\text{-value} < 2e-16$). Dado que, a variável chuva apresenta sazonalidade, para fechar o ciclo, foi utilizado o $bs = "cc"$ (splines cíclicas) para garantir que o modelo entenda que dezembro e janeiro estão conectados, tratando o ano como um ciclo contínuo. Com um edf (graus de liberdade efetivos) de 5.902, o modelo detectou uma curvatura complexa, o que explica a forte variação entre os picos de verão e os vales de inverno que foram visualizado nas figuras anteriores.

Em relação a Tendência ao Longo dos Anos, o termo $s(\text{ano})$ apresenta um edf de 1.000 e um p-valor de 0.64. Um edf igual a 1 indica que a relação com o tempo é perfeitamente linear (uma reta), não apresentando flutuações complexas de longo prazo. O p-valor de 0.64 confirma estatisticamente que a regressão linear anterior já sugeria, não há uma tendência de mudança no volume total de chuva ao longo dos anos (2010-2025), como pode ser visualizado na Tabela 2. A variação observada é puramente aleatória ou sazonal.

Quanto a qualidade do modelo, R^2 ajustado ($R\text{-sq.}(\text{adj}) = 0.541$), informa que o modelo explica 54,1% da variação da chuva na Cidade de São Paulo (Tabela 2). Para dados meteorológicos (que são inerentemente caóticos), este é um valor muito bom, indicando que a sazonalidade mensal é o principal motor do clima em São Paulo. Sobre a Família *Tweedie*, a escala estimada de 3.9479 sugere que o modelo está lidando corretamente com a dispersão dos dados, evitando erros comuns de subestimação em meses extremamente chuvosos como abril de 2025 (Tabela 2).

¹² Em linhas gerais, a Família *Tweedie* é uma classe especial de distribuições de probabilidade que pertence à grande família dos Modelos Lineares Generalizados (GLMs).

Tabela 2. Coeficientes Paramétricos e Significância dos Termos de Suavização, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Coeficientes Paramétricos				
	Estimativa	Erro Padrão	t valor	Pr(> t)
Intercepto	4.6334	0.03871	119.7	<2e-16 ***
Significância aproximada de termos de suavização				
	edf	Ref.df	F	p-value
s(mes)	5.902	10	29.894	<2e-16***
s(ano)	1	1	0.219	0.64
R-sq.(adj) = 0.541	Scale est. = 3.9479		n = 192	

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Após a estimação do modelo GAMM, foi elaborada a Figura 7, qual é dividida em quatro quadrantes. O primeiro quadrante apresenta o gráfico QQ Plot dos resíduos. O segundo quadrante apresenta o gráfico dos resíduos contra o preditor linear (no topo a direita). O terceiro quadrante apresenta o histograma dos resíduos. Finalmente, o quarto quadrante, na parte de baixo, a direita, mostra os valores observados contra os valores ajustados.

O gráfico QQ Plot of Resíduos (topo esquerdo), compara os resíduos do modelo com o que seria esperado de uma distribuição teórica perfeita. Os pontos seguem a linha vermelha quase perfeitamente, inclusive nas "caudas" (pontas). Isso indica que a distribuição *Tweedie* está conseguindo lidar com a forma dos dados (assimetria e massa de zeros) de maneira muito precisa. Não há sinais de subestimação ou superestimação sistemática (Figura 7).

O gráfico no topo, a direita, verifica a questão da homoscedasticidade, ou seja, se a variação dos erros é constante ao longo do tempo. Os pontos estão distribuídos de forma razoavelmente aleatória em torno da linha zero. Não se observa aquele formato de "funil" (comum quando a variância aumenta com a média) nem padrões em forma de "U". A distribuição *Tweedie* corrigiu bem a relação média-variância. Note-se que há faixas verticais de pontos, sendo que, isso é normal no modelo GAMM, quando se têm variáveis categóricas ou fatores aleatórios (Figura 7).

O histograma, na parte de baixo a esquerda da Figura 7, tem formato de sino, bem centralizado no zero. Os resíduos de desvio (*deviance residuals*) estão se comportando

de forma aproximadamente normal, o que é o objetivo ideal para validar a qualidade do ajuste.

Finalmente, o gráfico localizado a esquerda, na parte inferior da Figuras 7, consiste no teste de realidade, isto é, o quanto o valor que o modelo previu (*Fitted*) bate com o que realmente aconteceu (*Response*). Existe uma correlação positiva clara, ou seja, conforme o valor previsto aumenta, o observado também aumenta.

Figura 7.

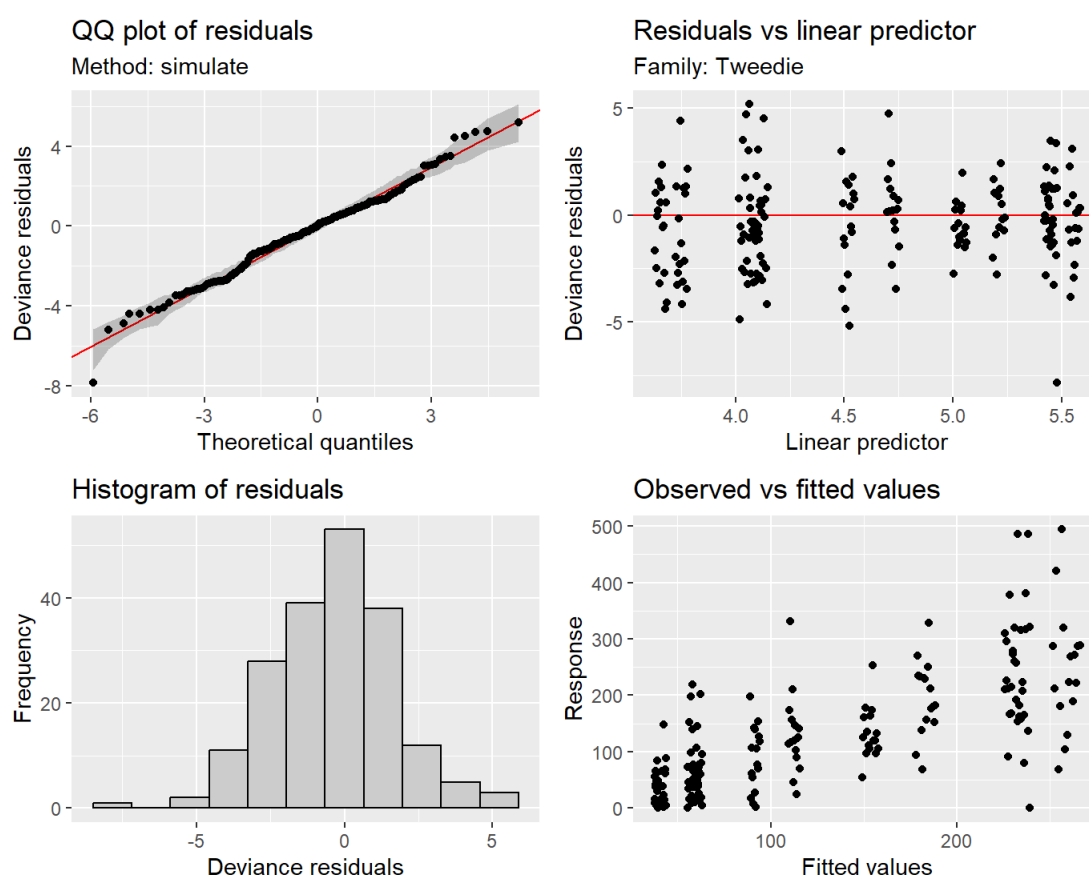


Figura 7. Gráfico QQ Plot dos Resíduos, Family *Tweedie*, Histograma dos Resíduos e Valores Observados e Ajustados, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Além dos resultados apresentados na Figura 7, também foi realizado o teste Ljung-Box sobre os resíduos do modelo GAMM estimado, cujos resultados estão na Tabela 3. Neste caso, o objetivo consiste em confirmar que os resíduos do modelo são ruído branco, ou seja, isentos de autocorrelação. O teste Ljung-Box, conforme LJUNG e

BOX (1978), utiliza uma distribuição χ^2 pois é um teste de hipótese conjunto, sendo que, nesse caso, pelo fato de os dados serem mensais, foram utilizadas 12 defasagens, por isso, o grau de liberdade é 12. O P-valor do teste é igual a 0.8665, ou seja, há 88.65% de rejeitar a hipótese nula de que os resíduos não têm autocorrelação e errar se for rejeitada. Dado que, a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula e errar está muito acima do nível de significância de 10%, não se rejeita a hipótese nula e pode-se inferir que os resíduos são ruído branco (sem autocorrelação).

Tabela 3. Resultados do Teste Ljung-Box, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Estatística	Valor da Estatística	Graus de Liberdade	P-valor
χ^2	6.863	12	0.8665

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Finalmente, para completar a análise dos resíduos do modelo GAMM, a Figura 8 apresenta a Função de Autocorrelação¹³ dos Resíduos pelo modelo corrigido pelo parâmetro autorregressivo de ordem 1 (AR (1)). Como pode ser observado na Figura 8, todas as barras verticais posteriores a defasagem de ordem zero encontram-se na região estabelecida pelas linhas horizontais (superior e inferior) vermelhas.

O parâmetro autorregressivo de ordem um (AR (1)) estimado assumiu valor igual a -0.1793. Para que um processo AR (1) seja considerado estacionário (ou estável)¹⁴, o valor absoluto do parâmetro autorregressivo deve ser menor que 1. Matematicamente, tem-se:

$$|\phi_1| < 1$$

Dado que, o valor estimado é -0,1793, ele está bem dentro do intervalo de estabilidade (entre -1 e 1). Também, Indica uma correlação negativa fraca entre observações consecutivas.

Um parâmetro negativo sugere um comportamento oscilatório (ou de "zigue-zague"). Se um resíduo é positivo em t , há uma tendência leve de que ele seja negativo em $t + 1$. Quanto a sua magnitude, Como o valor está próximo de zero, a dependência

¹³ Detalhes sobre a Função de Autocorrelação (FAC), podem ser acessados em MARGARIDO (2025).

¹⁴ Detalhes específicos sobre a questão envolvendo raízes unitárias e estacionariedade podem ser encontrados em MARGARIDO e ANEFALOS (1999).

temporal nos erros não é extremamente forte. Isso é bom, pois indica que a parte suavizada (as funções *splines* do GAMM, provavelmente já capturou a maior parte da estrutura dos dados. Esse resultado indica que os resíduos são estacionários, confirmando, novamente, que os resultados do Modelo GAMM são robustos.

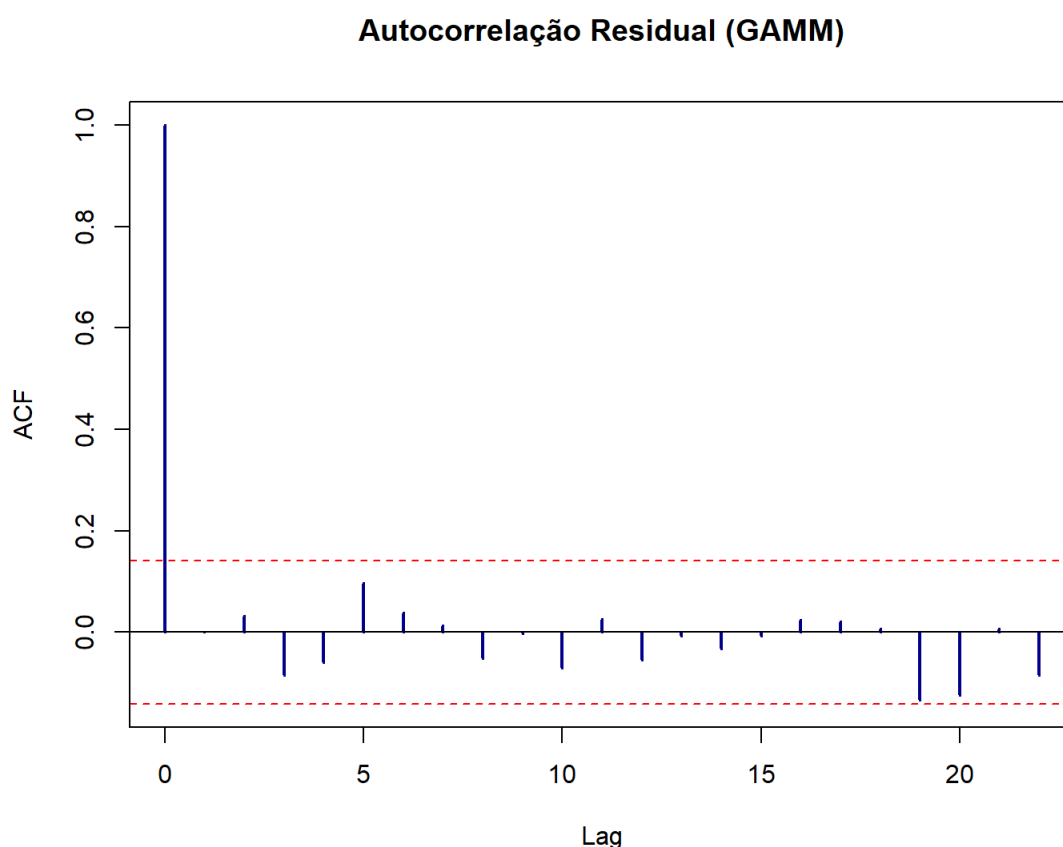


Figura 8. Função de Autocorrelação dos Resíduos, Modelo GAMM Corrigido, Parâmetro Autorregressivo de Ordem Um.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Para finalizar a questão dos resíduos, a Figura 9 apresenta os Resíduos de Pearson em relação aos Valores Ajustados (preditos). A linha vermelha (suavização/*loess*) está bastante próxima da linha pontilhada horizontal no zero. Isso indica que o modelo capturou bem a tendência central dos dados. Não há um padrão de curvatura óbvio (como um "U" ou um "S"), o que sugere que a relação funcional definida no modelo está adequada.

A questão da homocedasticidade (Variância dos Erros) é o ponto que exige mais atenção. Observa-se que a dispersão vertical dos pontos verdes não é uniforme, ou seja, há baixos valores ajustados (< 100 mm). Também, há uma concentração alta de dados e

alguns resíduos bem elevados (chegando a 7.5). Mais uma vez, também, verificam-se altos valores ajustados (> 200 mm), ou seja, a dispersão parece aumentar novamente, o que é comum em dados de chuva (eventos extremos). Portanto, há uma leve sugestão de heterocedasticidade. Em dados pluviométricos, é muito comum que a variância aumente conforme a média da chuva aumenta. Outro aspecto a ser realçado é a presença de *outliers* (valores atípicos), uma vez que, tem vários pontos acima de 5.0 no eixo dos resíduos. Na estatística, resíduos de Pearson acima de (3) costumam ser considerados *outliers*. No caso do clima da Cidade de São Paulo, isso representa aqueles dias de chuvas torrenciais "fora da curva" que o modelo não conseguiu prever apenas com as variáveis explicativas atuais. Quanto a estrutura dos dados (agrupamento), os pontos estão organizados em "colunas" verticais. Isso sugere que as variáveis explicativas são categóricas (como meses do ano ou estações) ou que os dados foram coletados em intervalos fixos discretos (Figura 9). Em resumo, o modelo está bem encaminhado quanto à média (linha vermelha no zero), mas sofre para lidar com a variabilidade extrema da chuva em São Paulo.

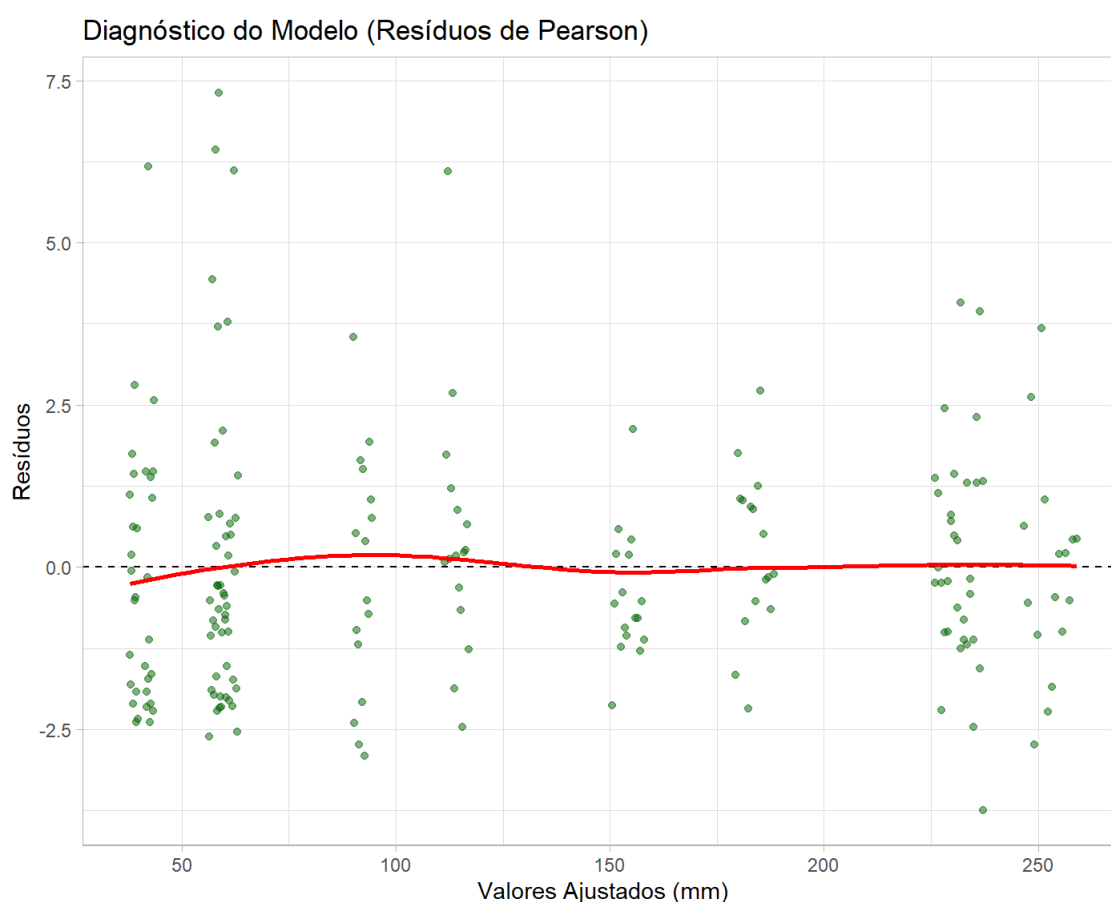


Figura 9. Evolução dos Resíduos de Pearson, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025
Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

A Figura 10, a esquerda, apresenta as funções de suavização (*splines*) do componente $s(\text{mes})$. O eixo X (mês), representa os meses de 1 até 12. O eixo Y ($s(\text{mes}, 5.9)$), representa a contribuição do mês para o modelo na escala da função de ligação (*link function*). O "5.9" é o edf (grau de liberdade efetivo), confirmando uma curvatura moderada (nem uma linha reta, nem uma flutuação caótica). A Figura 9 mostra uma oscilação clara, o que confirma que o mês é um preditor fundamental para o fenômeno climático precipitação pluviométrica na Cidade de São Paulo. O modelo identifica que o valor máximo ocorre no início do ano, em fevereiro. O valor no eixo Y é positivo, indicando que, este período contribui para aumentar a variável resposta acima da média geral. Também, se observa uma redução contínua de março até agosto, onde atinge seu valor mínimo da série. Como o valor no eixo Y está próximo de -1.0, significa que, em agosto, a variável resposta tende a ficar significativamente abaixo da média anual. A seguir, se inicia o período de recuperação a partir de setembro, uma vez que, os valores voltam a subir rapidamente até o final do ano.

O Eixo X (mes) representa os meses de 1 a 12, ou seja, de janeiro até dezembro, enquanto o Eixo Y ($s(\text{mes}, 5.9)$) representa a contribuição do mês para o modelo na escala da função de ligação (*link function*). O "5.9" é o edf¹⁵, confirmando uma curvatura moderada (nem uma linha reta, nem uma flutuação caótica). As bandas de Confiança (Linhas Tracejadas), linhas tracejadas azuis representam o erro padrão do ajuste. Observa-se que a banda é mais estreita perto do mês 2 e do mês 8, indicando que o modelo tem mais certeza sobre o comportamento nesses picos e vales. A banda se alarga um pouco nos meses de transição, onde a variabilidade dos dados originais (aqueles pontos verdes que vimos nos gráficos de resíduos) costuma ser maior. Ao cruzar a Figura 10 a esquerda com os resíduos da Figura 9, pode-se inferir que o modelo descreve muito bem a "forma" do ano (a tendência sazonal). Apesar dos bons resultados encontrados, o modelo ainda "apanha" para prever os valores extremos. Ele sabe que em fevereiro os valores são altos, mas ele não consegue prever quão altos são os temporais ou eventos atípicos que geraram aqueles resíduos acima de 7.5. Isso decorre das mudanças climáticas severas que têm sido observadas nos últimos anos, o que torna extremamente complexo que o modelo consiga antever tais eventos.

¹⁵ Lembrando que, o edf representa os Graus de Liberdade Efetivos. De forma simples, o edf indica o nível de complexidade ou "curvatura" que o modelo escolheu para uma variável suavizada. Quando $\text{edf} > 2$, a relação é não-linear e complexa. Quanto maior o número, mais "ondulada" é a curva para tentar se ajustar aos dados.

Quanto a Figura 10, a direita, representa o Efeito Temporal ($s(\text{ano})$), tenta responder a seguinte questão, a chuva em São Paulo está aumentando ou diminuindo com o passar dos anos? A linha preta mostra uma suave inclinação para baixo de 2010 a 2025. A área cinza (intervalo de confiança) é muito larga e cruza a linha do zero em quase toda a figura. Com base nesse comportamento, pode-se inferir que não há uma tendência de queda estatisticamente significativa dos índices pluviométricos da Cidade de São Paulo. Para o modelo, a quantidade de chuva hoje é essencialmente a mesma de 2010, e a pequena queda observada pode ser apenas uma flutuação natural dos dados (ruído).

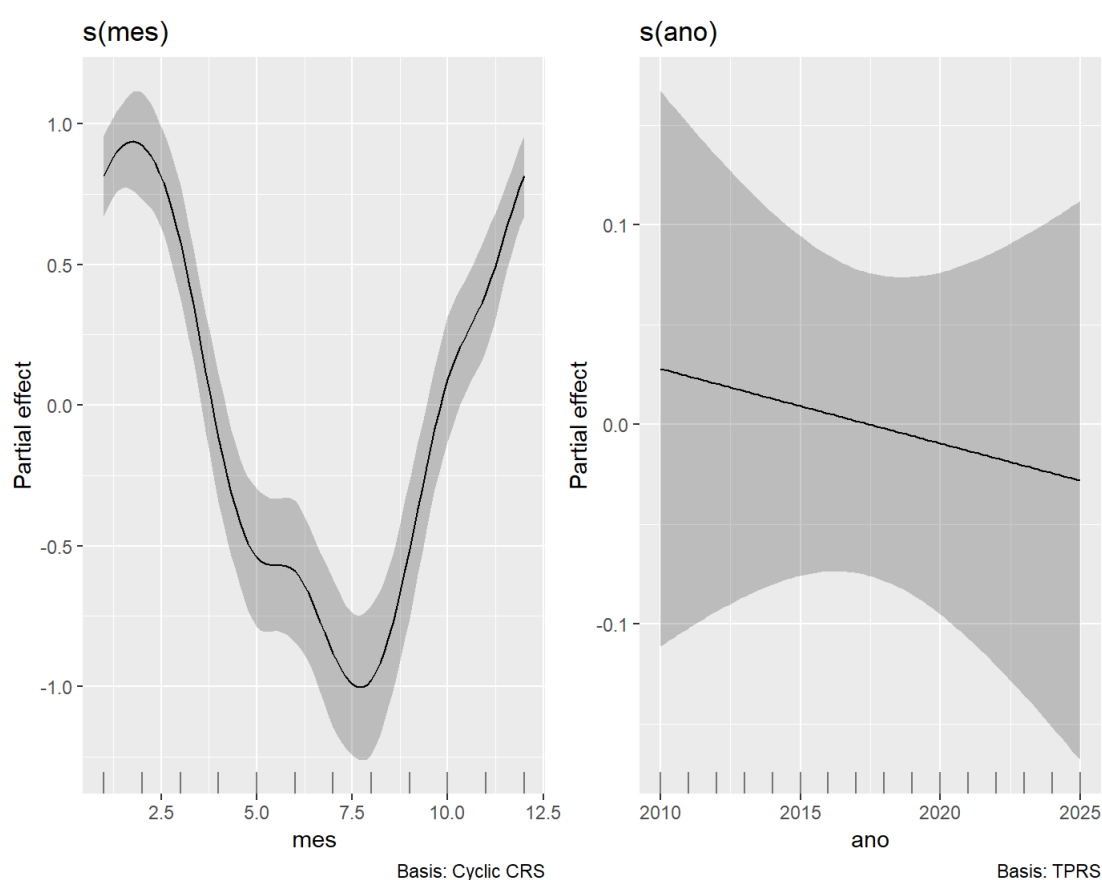


Figura 10. Efeitos Sazonal (Mês) a esquerda e Ano a direita, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

A Figura 11 combina os dados brutos com a modelagem estatística, permitindo uma análise muito mais rica sobre o regime de chuvas na Cidade de São Paulo. Esta figura é mais informativa para entender a realidade prática. A "Assinatura" da Cidade de São Paulo é representada pela linha azul, a qual, mostra claramente o regime de chuvas da

cidade. O pico ocorre entre janeiro (1) e fevereiro (2), com médias estimadas acima de 250 mm. Por outro lado, o ponto mais seco ocorre em agosto (8), com valores médios caindo para próximo de 50 mm. Os pontos cinzas (dados reais de cada ano) estão muito espalhados. Isso mostra que, embora a tendência seja chover mais em fevereiro, tem-se anos com fevereiro seco e anos com *outliers* extremos (pontos chegando a 500 mm). Em relação ao efeito sazonal ($s(\text{mes})$), a Figura 11 isola apenas a "forma" da variação mensal, removendo o ruído de outros anos. Pelo fato de se usar a base *Cyclic CRS*, o modelo força matematicamente que dezembro termine onde janeiro começa. Como o intervalo cinza não engloba o zero em quase nenhum momento, a sazonalidade é o fator que mais explica a chuva na Cidade de São Paulo neste modelo. Conjuntamente, com a Tendência Temporal ($s(\text{ano})$), esta figura responde se o clima está mudando sistematicamente ou não. A linha da Figura 10 a direita é quase horizontal. Portanto, não há evidência estatística de uma tendência de aumento ou redução na média anual de chuvas entre 2010 e 2025. O clima de São Paulo, em termos de volume total, permanece estável dentro dessa janela de 15 anos, apesar da alta variabilidade mensal. Em suma, as duas figuras mostram um modelo de ótimo ajuste. A sazonalidade é o componente dominante. O fato de os pontos reais estarem bem distribuídos em torno da linha azul indica que o modelo GAMM capturou com sucesso a "pulsção" climática da cidade.

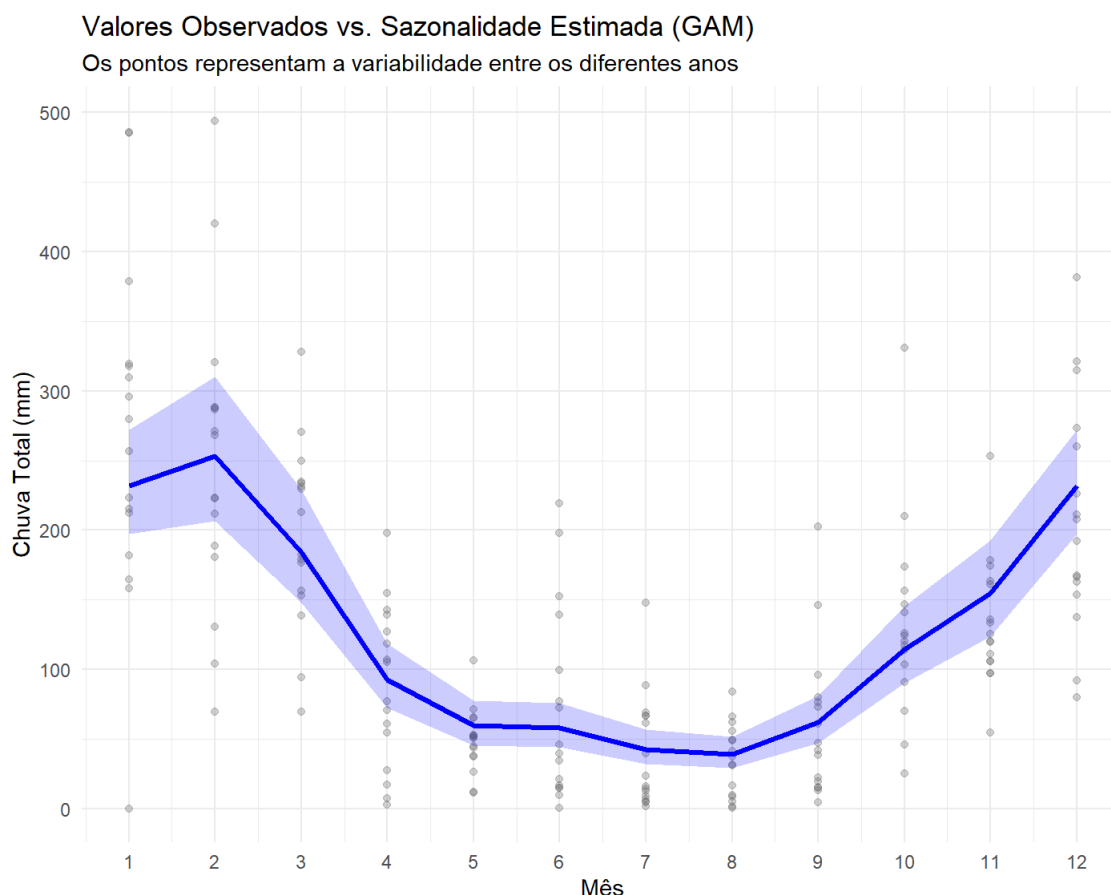


Figura 11. Valores Observados *versus* Sazonalidade entre Diferentes Anos, Modelo GAMM, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

A Figura 12 apresenta as comparações entre as médias reais (observadas) e os valores suavizados (previstos) pelo modelo GAMM. A linha azul representa o modelo com a distribuição *Tweedie*, o qual, segue quase perfeitamente as barras azul-claras (Média Real). Isso prova que o modelo capturou a "assinatura" climática da cidade de São Paulo. Embora, janeiro tenha uma média histórica ligeiramente superior em alguns anos, o modelo suavizado coloca o pico de intensidade em Fevereiro (~260 mm). O modelo confirma que agosto é o mês com menor expectativa de chuva (abaixo de 50 mm).

Retornando a Figura 11, os pontos cinzas espalhados, representam *outliers* severos. Verifica-se que em Janeiro (1) e Fevereiro (2), existem registros reais que encostam nos 500 mm. Em relação ao denominado "Risco São Paulo, o modelo prevê 260 mm para Fevereiro, mas a variabilidade mostra que é comum chover o dobro do esperado. A faixa azul (intervalo de confiança) é mais larga no verão justamente porque

a incerteza é maior nesses meses. Quanto a tendência de longo prazo (efeito ano na Figura 10), mostra uma leve inclinação negativa, mas com uma área de incerteza (cinza) muito ampla. Portanto, pode-se reforçar que não há uma mudança climática drástica no volume total de chuva nestes 15 anos analisados para a Cidade de São Paulo. A queda visual na linha preta não tem "força" estatística para ser considerada uma tendência real de secamento da cidade, ou seja, pode-se concluir que o clima permanece em equilíbrio dinâmico.

Finalmente, por que a *Tweedie* foi a melhor escolha? Diferente da distribuição Normal, a distribuição *Tweedie* (Figura 12) consegue lidar com valores nulos, ou seja, meses em que quase não choveu (comum no inverno da Cidade de São Paulo). O fato de que é muito mais fácil ter um mês com "muito mais" chuva que a média do que um mês com "muito menos" (já que o limite mínimo é zero).

A Figura 13 apresenta um comparativo do volume anual de chuva (precipitação total em mm) entre os anos de 2010 e 2025, com foco especial no desempenho do ano de 2024 em relação à média histórica. A linha tracejada vermelha indica a Média Histórica, que está posicionada aproximadamente na marca de 1500 mm. O ano de destaque (em laranja) fechou praticamente em cima da média, com um volume ligeiramente superior a 1500 mm. Ele não foi um ano de extremos (nem muito seco, nem excessivamente chuvoso). Os anos acima da média foram 2011, 2012, 2015, 2017, 2019, 2020 e 2023. Por outro lado, os anos abaixo da média foram 2010, 2013, 2014, 2016, 2018, 2021, 2022 e 2025. Em termos de extremos, iniciando com o ano mais chuvoso, observa-se que o pico de precipitação ocorreu em 2015, aproximando-se da marca de 1900 mm. O ano de 2012 também apresenta um volume expressivo. Em contrapartida, o ano mais seco, ou seja, com o menor volume registrado foi em 2021, ficando pouco acima dos 1100 mm. Também, 2014 e 2018 também foram anos consideravelmente secos.

No período mais recente, 2023 foi um ano bastante chuvoso, bem acima da média histórica. Porém, em 2024, houve uma redução em relação ao ano anterior, retornando ao patamar da média. Já, para 2025, a Figura 13 mostra uma projeção ou fechamento de queda, com o volume ficando abaixo da média histórica (estimado em torno de 1450 mm).

Em suma, 2024 pode ser considerado um ano de normalidade climatológica para esta região específica representada pela Cidade de São Paulo, servindo como um ponto

de equilíbrio entre o ano muito chuvoso de 2023 e a queda observada em 2025 (Figura 13).

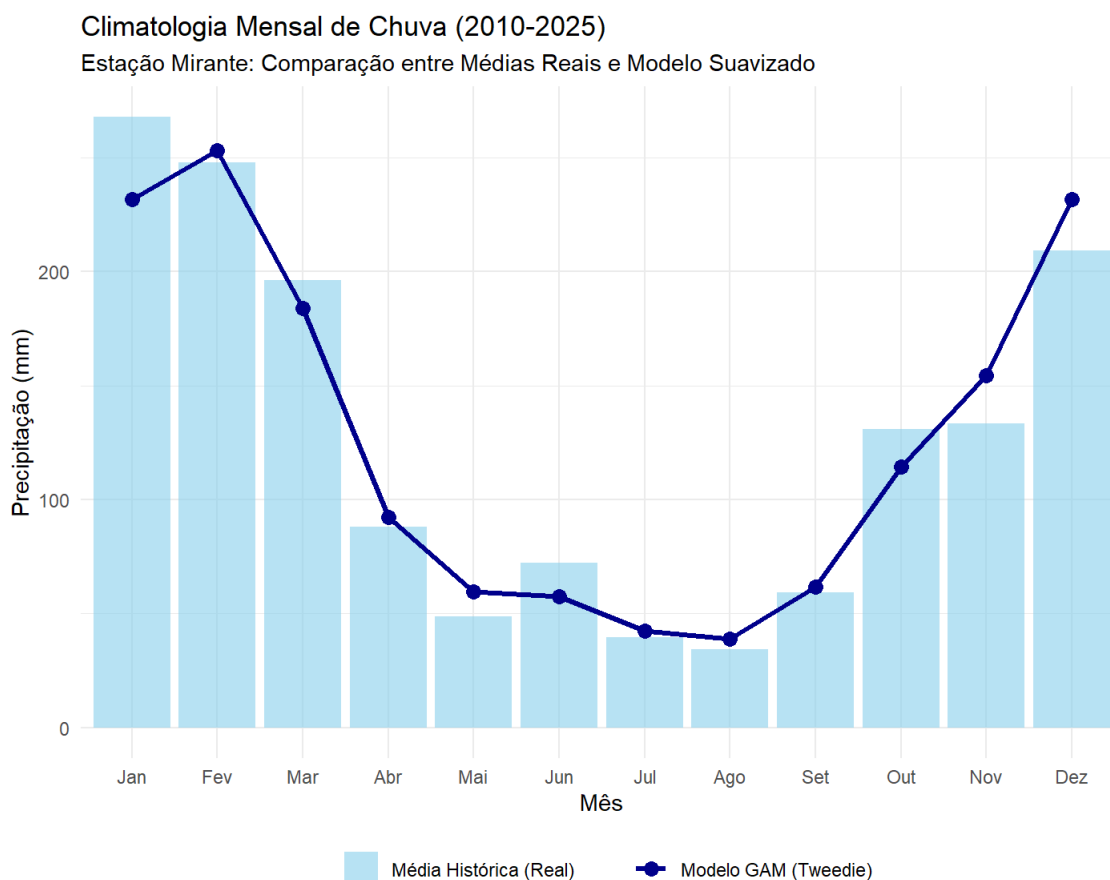


Figura 12. Comparação entre as Médias Reais (Observadas) e Resultados Estimados pelo Modelo GAMM Utilizando a Família *Tweedie*, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, Janeiro de 2010 – Dezembro de 2025

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

A Figura 14 apresenta uma análise comparativa da precipitação acumulada no mês de março entre os anos de 2020 e 2025, além de uma projeção estatística para março de 2026.

Visto com mais detalhes, na Figura 14, as barras azuis representam a chuva real acumulada em milímetros (mm). Observa-se uma variabilidade significativa no período de 2020-2025. Também, observa-se tendência de alta para o período 2020-2024, ou seja, houve um crescimento constante no volume de chuvas, culminando no pico em 2024, que ultrapassou a marca dos 250 mm. Em contrapartida, observa-se queda abrupta em 2025. O último ano registrado mostra uma redução drástica, com a precipitação ficando abaixo de 100 mm, sendo um dos janeiros mais secos do período analisado.

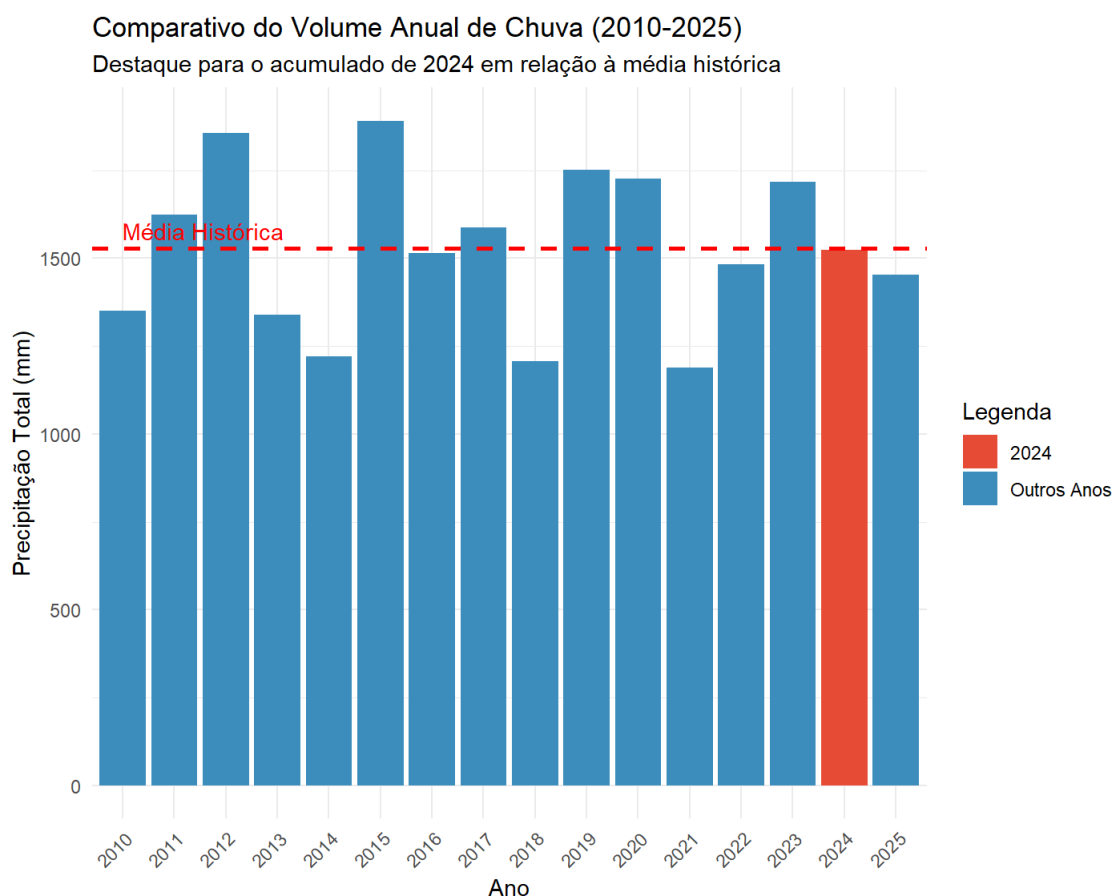


Figura 13. Comparativo do Volume Anual de Chuva, Cidade de São Paulo, 2010 – 2025.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Ainda, com base na Figura 14, o ponto vermelho com as hastes verticais representa a estimativa para o próximo ano. O modelo prevê uma recuperação de 2026 em relação a 2025, estimando algo em torno de 180 mm. As linhas vermelhas (hastes) indicam a margem de erro ou incerteza do modelo. Isso significa que, embora a aposta principal seja 180 mm, há uma probabilidade estatística de o valor real oscilar aproximadamente entre 140 mm e 220 mm.

Em suma, a Figura 14 sugere que, após um 2025 atipicamente seco, o cenário para março de 2026 é de retorno à média histórica recente. A previsão não indica um recorde de chuvas (como em 2024), mas aponta para um volume consideravelmente maior do que o registrado no ano anterior.

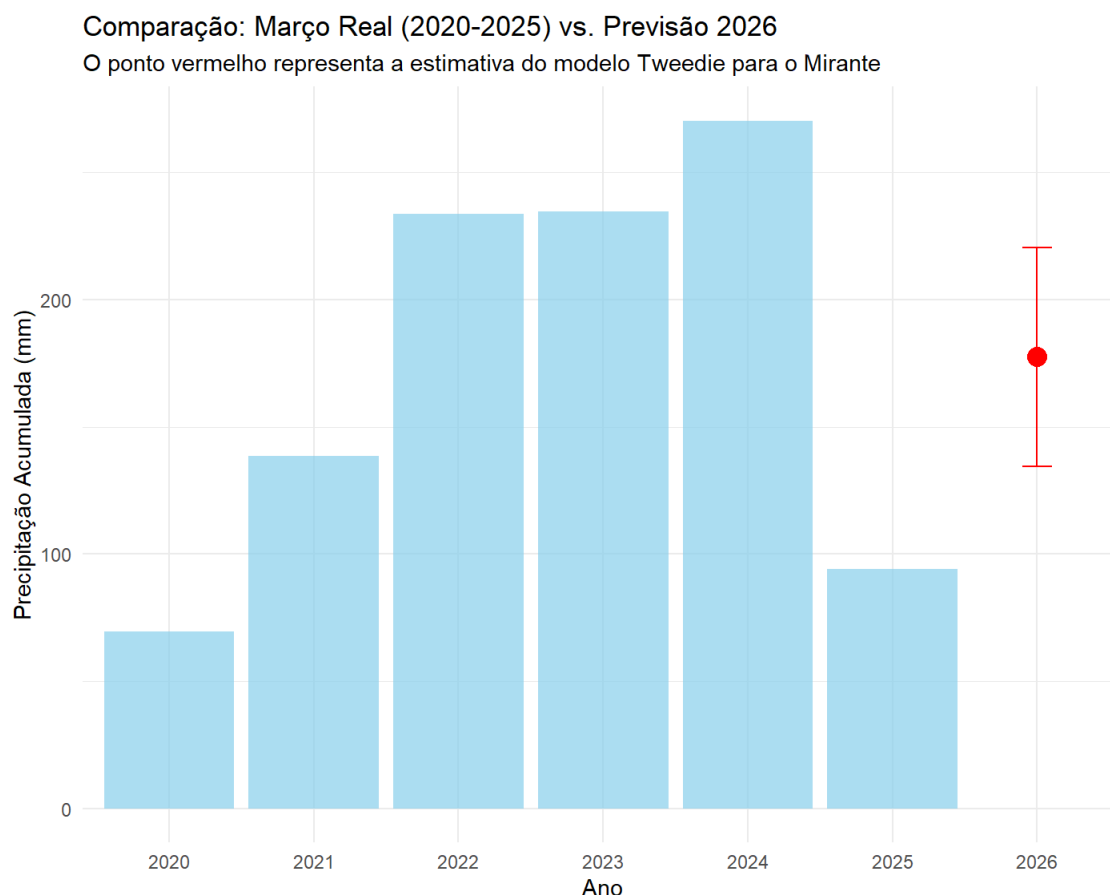


Figura 14. Comparação Índices Pluviométricos para os Meses de Março Observados (2020-2025) e Previsto (2026), Cidade de São Paulo.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Também, foram calculados o volume de chuvas para 2024 e 2025, bem como, a média histórica para o período 2010-2023. O volume de chuvas em 2024 foi igual a 1524 mm, enquanto, em 2025 foi de apenas 1453mm, ou seja, -4,65% quando se compara os resultados de 2025 em relação a 2024. A média histórica para o período de 2010-2023 foi igual a 1532.81 mm. Comparando-se o volume de chuvas de 2025 em relação à sua média histórica, isso representou redução de 5.21%.

Ainda, sob o enfoque da previsão, com base no modelo GAMM, foi realizada a previsão para o volume de chuva para 2026. A Figura 15 apresenta os valores médios previstos, bem como, os respectivos limites inferior e superior.

Os resultados das previsões mostram que, fevereiro é projetado como o mês mais chuvoso do ano, com uma estimativa de 253,21 mm. O trimestre inicial (Janeiro a Março) mantém volumes elevados, todos acima de 180 mm, refletindo a neutralidade

climática esperada após o enfraquecimento do La Niña no início de 2026. Em janeiro de 2026, a capital paulista já registrou chuvas influenciadas pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o que corrobora a tendência de altos volumes exibida na Figura 15.

Também, a Figura 15 mostra uma queda acentuada a partir de Abril (92,36 mm), entrando no período de seca. O ponto mínimo de chuva é previsto para Agosto, com apenas 38,82 mm. Entre Maio e Setembro, os volumes permanecem baixos, refletindo o padrão sazonal de inverno na região Sudeste.

Finalmente, a partir de Outubro (114,35 mm), observa-se o retorno gradual das chuvas. Dezembro encerra o ano com uma previsão de 231,87 mm, sinalizando o retorno ao padrão de verão úmido (Figura 15).

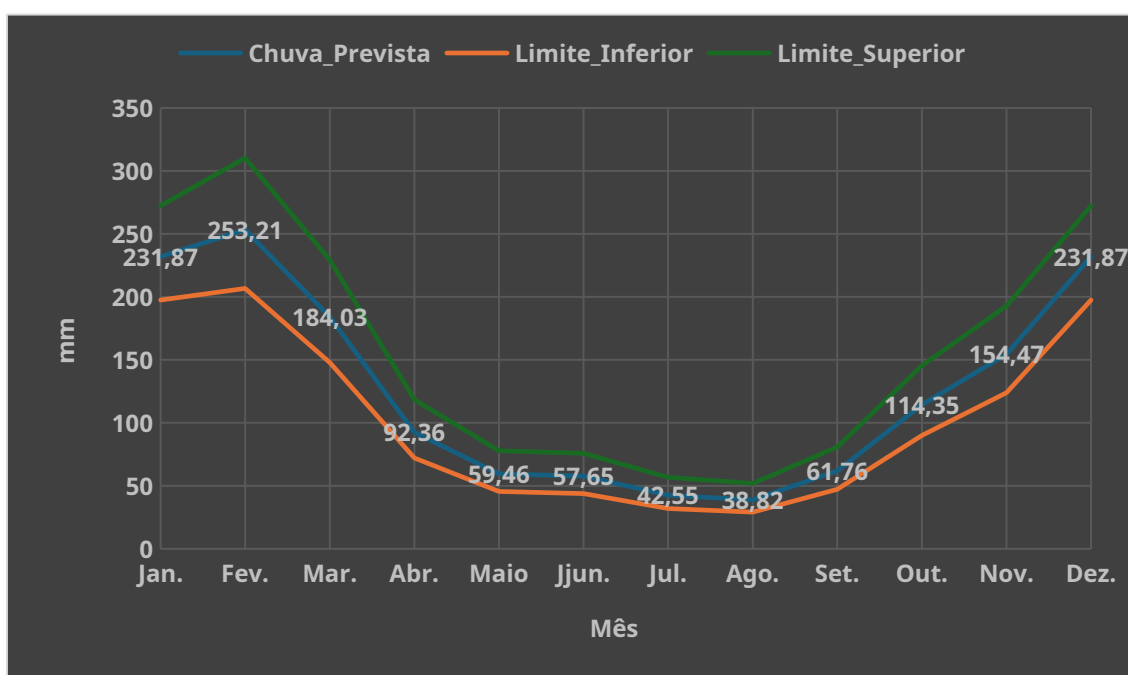


Figura 14. Previsões, Índices Pluviométricos, Cidade de São Paulo, 2026.
Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

Para comparar as previsões de 2026 com as médias históricas da cidade de São Paulo, no geral, o modelo prevê um ano com chuvas dentro ou levemente acima da média para os meses de verão, e um inverno dentro da normalidade climatológica.

A Tabela 4 apresenta um comparativo envolvendo as previsões mensais para 2026 *versus* as médias históricas dos respectivos meses, também.

Tabela 4. Índices Pluviométricos, Comparativo, Previsões de 2026 e Médias Históricas, Cidade de São Paulo

Mês	Previsão 2026 (mm)	Média Histórica (mm)	Diferença Estimada
Janeiro	231,87	288	-20% (Abaixo)
Fevereiro	253,21	246	+3% (Na Média)
Março	184,03	214	-14% (Abaixo)
Julho	42,55	48	-11% (Na Média)
Dezembro	231,87	224	+3% (Na Média)

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

A análise dos desvios com base na Tabela 4 mostram que, no caso do período do verão (Jan.-Mar.), tem-se que, embora janeiro e março apresentem valores previstos menores que a média histórica de longo prazo, fevereiro se destaca como o mês mais úmido, podendo superar os 310 mm no limite superior. Isso sugere uma concentração de chuvas em meados do trimestre.

Quanto ao inverno, ou período de estiagem (Jun.-Ago.), a previsão de 38,82 mm para agosto está muito próxima da média histórica (que gira em torno de 32 mm a 40 mm). Isso indica que o modelo espera um inverno com o padrão seco tradicional da capital paulista, sem anomalias severas de seca ou chuva excessiva nessa estação.

Em relação à primavera (Out.-Nov.), as previsões mostram que o aumento gradual de 114,35 mm em outubro para 154,47 mm em novembro acompanha bem a transição para o período úmido, mostrando que o modelo GAMM com distribuição *Tweedie* capturou a sazonalidade típica da região.

Portanto, o cenário para 2026 na Cidade de São Paulo parece ser de regularidade. Não há sinais de um ano extremamente seco (como foi 2025 para o mês de março), nem de um ano com excessos descontrolados, embora o limite superior de fevereiro acenda um alerta para possíveis eventos de enchentes pontuais.

A seguir, com base nos resultados do modelo de previsão, foi estabelecido o cenário de 2026 para os reservatórios que fornecem água para a Cidade de São Paulo.

A análise do impacto das chuvas de 2026 nos reservatórios que abastecem a Grande São Paulo (como o Sistema Cantareira) é positiva, mas exige cautela devido à distribuição irregular ao longo do ano.

O volume previsto de 253,21 mm para fevereiro e 231,87 mm para janeiro é fundamental para a "fase de enchimento" dos reservatórios. Como esses valores estão próximos ou ligeiramente acima das médias históricas, espera-se que os níveis das represas comecem o ano em patamares confortáveis. No entanto, a previsão de 184,03 mm para março (abaixo da média histórica) sugere que o período de recarga pode terminar um pouco mais cedo do que o ideal. A queda brusca para 38,82 mm em agosto confirma um inverno seco. Nesse período, os reservatórios entram na "fase de depleção" (uso da água estocada). Com a previsão dentro da normalidade, não há indícios de uma crise hídrica severa, desde que o verão anterior tenha sido aproveitado para o armazenamento. O retorno consistente das chuvas em novembro (154,47 mm) e dezembro (231,87 mm) é o cenário ideal para interromper a queda dos níveis antes que atinjam estados críticos.

Embora o volume total pareça adequado, o modelo GAMM com distribuição *Tweedie*, indicar um limite superior alto em fevereiro (~310 mm). Isso pode significar chuvas muito concentradas em poucos dias, o que é menos eficiente para os reservatórios (gera mais escoamento superficial e transbordamentos) do que uma chuva bem distribuída.

Após a estimação do modelo de previsões, o próximo passo foi avaliar o grau de acurácia das previsões. Foram utilizadas duas métricas o Erro Absoluto Médio (MAE) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

No caso do MAE, o valor obtido foi de 50.42, ou seja, em média, as previsões do modelo variam cerca de 50 mm (para mais ou para menos) em relação ao que realmente acontece no Mirante de Santana. Para uma cidade onde meses chuvosos superam 200 mm, um erro médio de 50 mm é considerado aceitável para previsões sazonais de longo prazo.

O valor do RMSE é igual a 69.94 indica que esse indicador penaliza erros grandes com mais rigor. Como o RMSE¹⁶ (69.94) é significativamente maior que o MAE (50.42), isso indica que o modelo ocasionalmente comete erros maiores (erra por muito em alguns meses específicos), provavelmente em meses de chuvas extremas de verão.

Já, o BIAS (vício) tem valor igual a 0.59. O valor próximo de zero (e levemente positivo) indica que o modelo é equilibrado. Ele não tem uma tendência sistemática forte de "otimismo" (prever sempre mais chuva) ou "pessimismo" (prever sempre menos), embora tenda a superestimar levemente os volumes reais por uma margem mínima.

Finalmente, retornando a parte histórica, ou seja, deixando-se de lado o futuro e focando no passado, a Figura 15, apresenta o *ranking* em ordem decrescente da série histórica do volume de chuvas para a Cidade de São Paulo desde 2010 até 2025. Como pode ser observado na Figura 15, o ano da série histórica que apresentou maior volume de chuvas foi 2015 com 1891 mm, enquanto, o ano com menor volume de chuva foi 2021 foi de 1189 mm, ou seja, variação de 59.04% quando se compara o maior valor em 2015 com o menor valor em 2021.

Os resultados mostram um modelo robusto e realista. Ele não promete precisão milimétrica (o que seria impossível em meteorologia), mas oferece uma margem de segurança (MAE de 50 mm) que permite o planejamento urbano e hídrico com base em tendências sólidas, e não apenas em médias simples.

¹⁶ Detalhes sobre os indicadores de acurácia MAE e RMSE, podem ser encontrados em CHAI e DRAXLER (2014).

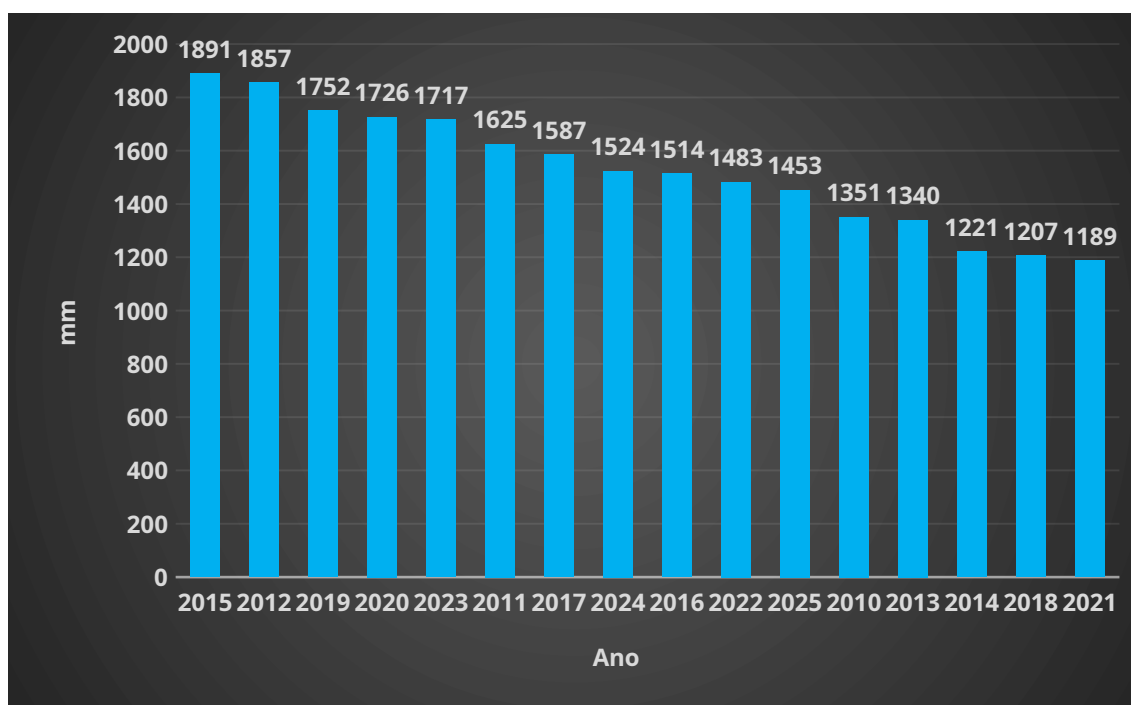


Figura 15. *Ranking* do Volume de Chuva, Cidade de São Paulo, 2010 – 2015.

Fonte: Elaborada a partir de dados do INMET/BDMEP.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo permitiu concluir que o desafio da gestão pluviométrica em São Paulo não reside na alteração do volume total acumulado anual, mas sim na sua distribuição e intensidade. A estabilidade estatística da série histórica (2010–2025) mascara riscos interanuais severos derivados da impermeabilização do solo e da urbanização acelerada.

As projeções para 2026, obtidas através do modelo GAMM com distribuição *Tweedie*, sinalizam um ano de retorno à normalidade climática, com picos de precipitação em fevereiro (253,21 mm). Esta previsão é de suma importância para a mitigação de desastres naturais e para a gestão do abastecimento, visto que os reservatórios iniciaram o período em níveis de restrição.

Em suma, a utilização de modelos econométricos avançados para a previsão de índices pluviométricos revela-se uma estratégia essencial para a sobrevivência urbana. A capacidade de prever, com margens de erro aceitáveis, o comportamento das chuvas permite uma transição de uma gestão de crise reativa para um planejamento preventivo,

minimizando impactos socioeconômicos, perdas materiais e, fundamentalmente, preservando vidas humanas.

LITERATURA CITADA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Indicadores de Continuidade (DEC e FEC): Relatório de Desempenho das Distribuidoras (Enel SP). Brasília: ANEEL, 2025.

BOX, G.E.P. and TIAO, G.C. Intervention Analysis with Applications to Economic and Environmental Problems. *Journal of the American Statistical Association (JASA)*, Vol. 70, No. 349, pp. 70-79. 1975.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. BDMEP: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Brasília, DF, [ano]. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 9 fev. 2026.

CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS DA PREFEITURA DE SÃO PAULO (CGE). Dados Mensais e Históricos. São Paulo: CGE, 2026. Disponível em: <https://www.cge.sp.gov.br>. Acesso em: 03 fev. 2026.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.

CLIMATEMPO. Raios fora de época em São Paulo acendem alerta para setores chaves. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br>.

COMPANHIA DE ENGENHARIA DE TRÁFEGO (CET). Relatório Anual de Mobilidade e Trânsito. São Paulo: CET, 2025. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br>. Acesso em: 03 fev. 2026.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Situação dos Mananciais: Monitoramento dos Sistemas de Abastecimento. São Paulo: SABESP, 2026. Disponível em: <https://mananciais.sabesp.com.br>. Acesso em: 03 fev. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). Boletim de Logística Urbana: Gargalos e Custos Adicionais em Regiões Metropolitanas. Brasília: CNT, 2023.

FEDERAÇÃO DO COMÉRCIO DE BENS, SERVIÇOS E TURISMO DO ESTADO DE SÃO PAULO (FECOMERCIO SP). O Impacto Econômico das Inundações no Varejo Paulistano. São Paulo: Fecomercio, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). BDMEP: Séries Históricas de Precipitação (Estação 83781). Brasília: INMET, 2026. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em: 03 fev. 2026.

JOTA. Mudanças climáticas e perda de padrões sazonais: o novo desafio energético. 2024.

LJUNG, Greta M.; BOX, George E. P. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*, [s. l.], v. 65, n. 2, p. 297-303, 1978.

MARGARIDO, Mario Antonio. *Teoria e Aplicações de Modelos de Séries Temporais em Economia*. 2ed. São Paulo: Pezco Editora. 2025.

MARGARIDO, M. A.; ANEFALOS, L. C. Testes de raiz unitária e o software SAS. *Agricultura em São Paulo*, São Paulo, v. 46, n. 2, p. 19-45, 1999.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. Plano de Contingência Nacional para Emergências em Saúde Pública por Chuvas Intensas. Brasília: MS, 2025.

RAMANATHAN, Ramu. *Statistical Methods in Econometrics*. United States of America. Academic Press. 1993.

SÃO PAULO (Cidade). Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas (CGE). Relatório Executivo: Operação Chuvas de Verão. São Paulo: CGE, 2024.

TSAY, Ruey S. *An Introduction to Analysis of Financial Data with R*. United States of America: John Wiley & Sons, 2013.

TSAY, Ruey S. *Analysis of Financial Time Series*. 2. ed. United States of America: John Wiley & Sons, 2005.

WOOD, S. N. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. 2nd Edition. Chapman and Hall/CRC. (2017).