

REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

APLICAÇÃO DA TEORIA DOS VALORES EXTREMOS NA ANÁLISE DE TEMPERATURA MÁXIMA EM SÃO PAULO (SP)

EXTREME VALUE THEORY APPLIED TO THE ANALYSIS OF MAXIMUM TEMPERATURE IN SÃO PAULO (SP)

APLICACIÓN DE LA TEORIA DE LOS VALORES EXTREMOS EN LA ANÁLISIS DE TEMPERATURA MÁXIMA EN SAN PAULO (SP)

Maria Clara de Oliveira Carneiro Sassaki[1], Sílvio De Liberal[2]

e511287
https://doi.org/10.63026/acertte.v5i11.287

PUBLICADO: 11/2025

RESUMO

O presente estudo aplicou a Teoria dos Valores Extremos (TVE) na análise das temperaturas máximas observadas na cidade de São Paulo (SP), visando identificar e caracterizar eventos de calor extremo. Foram utilizadas séries históricas diárias do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) referentes ao período de 1990 a 2024, considerando apenas os meses mais quentes do ano. Após o tratamento dos dados, os valores máximos mensais foram extraídos e ajustados à Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) por meio do método da Máxima Verossimilhança (MV). A estimativa dos parâmetros indicou valor de forma próximo de zero ($\xi = -0{,}1378 \pm 0{,}1246$), caracterizando a distribuição de Gumbel como a mais adequada para representar os máximos sazonais. O gráfico QQ-plot demonstrou bom ajuste do modelo até cerca de 35°C, enquanto os níveis de retorno estimados apontaram temperaturas de 36°C, 36,8°C e 37,6°C para períodos de 5, 10 e 20 anos, respectivamente. O recorde de calor na cidade de São Paulo poderá se repetir em aproximadamente 22 anos. Os resultados indicam que valores acima do limiar adotado pelo INMET para definir ondas de calor devem ocorrer ao menos uma vez nos próximos cinco anos, evidenciando tendência de aquecimento gradual na série histórica. A metodologia mostrou-se eficiente na quantificação do risco de novos recordes térmicos e reforça o potencial da TVE como ferramenta de apoio ao planejamento e à adaptação aos efeitos das ondas de calor severas.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria dos Valores Extremos (TVE). Distribuição Generalizada dos Valores Extremos (GEV). Gumbel. Ondas de calor.

ABSTRACT

The present study applied the Extreme Values Theory (TVE) in the analysis of the maximum temperatures observed in the city of São Paulo (SP), aiming to identify and characterize extreme heat events. Daily historical series of the National Institute of Meteorology (INMET) were used for the period from 1990 to 2024, considering only the hottest months of the year. After data treatment, the monthly maximum values were extracted and adjusted to the Generalized Distribution of Extremous Values (GEV) using the Maximum Verisimilitude (MV) method. The estimate of the parameters indicated a value close to zero (The QQ-plot chart showed good model adjustment up to about 35°C, while the estimated return levels indicated temperatures of 36°C, 36.8°C and 37.6°C for periods of 5, 10 and 20 years, respectively. The heat record in the city of São Paulo may be repeated in approximately 22 years. The results indicate that values above the threshold adopted by INMET to define heat waves should

[1] Especialista em divulgação meteorológica na Tempo OK, com mais de dez anos de experiência em conteúdo de previsão do tempo. Graduanda em Licenciatura em Matemática pelo IFSP, tem expertise em análise de dados e modelos climáticos. Além disso, é produtora de conteúdo científico, tornando temas técnicos acessíveis ao público.

[2] Doutor em Educação Matemática pela Universidade Anhanguera. Mestre em Sistemas Sócio-Organizacionais da Atividade Econômica pela Universidade Técnica de Lisboa (Portugal). Especialista em Educação Matemática, Licenciado em Matemática e Bacharel em Estatística. É docente do Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Campus São Paulo, atuando nas áreas de ensino, pesquisa e formação de professores.

©2025. Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

occur at least once in the next five years, showing a gradual warming trend in the historical series. The methodology was efficient in quantifying the risk of new thermal records and reinforces the potential of EVT as a support tool for planning and adapting to the effects of severe heat waves.

KEYWORDS: *Extreme Value Theory (EVT), Generalized Extreme Value Distribution (GEV), Gumbel*, Heat Waves.

RESUMEN
El presente estudio aplicó la Teoría de los Valores Extremos (TVE) en el análisis de las temperaturas máximas observadas en la ciudad de São Paulo (SP), objetivando identificar y caracterizar eventos de calor extremo. Fueron utilizadas series históricas diarias del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) referentes al período 1990 a 2024, considerando sólo los meses más calurosos del año. Después del tratamiento de los datos, los valores máximos mensuales fueron extraídos y ajustados a la distribución generalizada de valores Extremos (GEV) por medio del método máximo Verosimilitud (MV). La estimación de los parámetros indicó un valor de forma próximo de cero (ξ = −0,1378 ± 0,1246), caracterizando la distribución de Gumbel como la más adecuada para representar los máximos estacionales. El gráfico QQ-plot demostró buen ajuste del modelo hasta cerca de 35°C, mientras que los niveles de retorno estimados apuntaron temperaturas de 36°C, 36,8°C y 37,6°C para períodos de 5, 10 y 20 años, respectivamente. El récord de calor en la ciudad de São Paulo puede repetirse en aproximadamente 22 años. Los resultados indican que valores por encima del umbral adoptado por el INMET para definir ondas de calor deben ocurrir al menos una vez en los próximos cinco años, evidenciando una tendencia de calentamiento gradual en la serie histórica. La metodología se mostró eficiente en la cuantificación del riesgo de nuevos récords térmicos y refuerza el potencial de la TVE como herramienta de apoyo a la planificación y adaptación a los efectos de las ondas de calor severas.

PALABRAS-CLAVE*: Teoría de los valores Extremos (TVE). Distribución generalizada de los valores Extremos (GEV). Gumbel. Ondas de calor.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo tem enfrentado diversos efeitos das mudanças climáticas e do aquecimento global, com aumento na frequência e na magnitude de eventos meteorológicos extremos. O último relatório do IPCC, de 2023, afirma que:

> As mudanças climáticas causaram danos substanciais e perdas cada vez mais irreversíveis em ecossistemas terrestres, de água doce, criosféricos, costeiros e oceânicos. Centenas de perdas de espécies locais foram impulsionadas pelo aumento da magnitude de eventos extremos de calor, com eventos de mortandade em massa registrados em terra e no oceano. Os impactos em alguns ecossistemas estão se aproximando da irreversibilidade, como os impactos das mudanças hidrológicas resultantes do recuo das geleiras ou as mudanças em alguns ecossistemas de montanha e do Ártico impulsionadas pelo degelo do permafrost.

Chuvas torrenciais, ondas de frio severas e ondas de calor históricas impactam diretamente o ciclo hidrológico e sistemas sociais, impondo pressões sobre setores como agricultura, saúde pública e economia (IPCC, 2023).

Entre os fenômenos climáticos extremos, as ondas de calor se destacam pela sua relação direta com o bem-estar humano e a vulnerabilidade da população que vive nas grandes cidades. Em ambientes urbanos densamente construídos, como São Paulo (SP), essa limitação é agravada pela presença de ilhas de calor, baixa ventilação e elevada impermeabilização do solo, fatores que contribuem para a elevação das temperaturas máximas locais, como afirma Emolo (2025).



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

Recentemente, aulas e atividades presenciais nas escolas chegaram a ser suspensas ou alteradas devido às ondas de calor que atingiram o Brasil. Tais acontecimentos ressaltam a necessidade de abordagens quantitativas para compreender e prever extremos meteorológicos.

Neste contexto, estudos recentes avaliaram a frequência e a magnitude de eventos extremos de temperaturas, particularmente no contexto de ondas de calor, como apresentam Ferreira et al. (2024) e Lisboa et al. (2021). A aplicação da Teoria dos Valores Extremos (TVE) a séries históricas de temperatura máxima permite investigar o comportamento das temperaturas com tempo de retorno para diferentes horizontes, contribuindo para o planejamento de ações futuras que visem minimizar os impactos decorrentes de ondas de calor severas.

Bezerra (2013) ajustou distribuições de Gumbel e Weibull a dados de temperatura máxima em São Gonçalo, PB; já Lisboa et al. (2021) analisaram ondas de calor em Campinas, SP, observando que a distribuição GEV apresentou o melhor desempenho para dados extremos. Além disso, outros trabalhos demonstram a aplicabilidade da distribuição Gumbel em fenômenos hidrológicos e meteorológicos, como precipitações máximas na Bahia (JESUS; NASCIMENTO, 2020) e a análise bayesiana da GEV em Carbonita, MG (BEIJO;AVELAR, 2010).

A literatura existente evidencia que a TVE constitui uma metodologia robusta para investigar o tempo de retorno de um evento meteorológico extremo e estimar a magnitude da ocorrência de novos recordes. Sendo assim, este estudo ajustou o modelo da Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), com ênfase na forma Gumbel, para analisar o comportamento das temperaturas máximas diárias registradas em São Paulo (SP), pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que fica no Mirante de Santana, Zona Norte. A distribuição foi ajustada pelo método da Máxima Verossimilhança (MV), e, a partir dos parâmetros estimados, foram calculados os níveis de retorno para o período de 5, 10 e 20 anos, representando a magnitude esperada de episódios de calor severo nesses horizontes temporais.

A expectativa é que os resultados apresentem implicações práticas para contribuir com a discussão sobre os efeitos de ondas de calor intensas, além de fornecer subsídios quantitativos para o planejamento urbano voltado à redução dos impactos das ondas de calor sobre a qualidade de vida e saúde da população, especialmente as mais vulneráveis como crianças e idosos.

2 METODOLOGIA

A condução deste estudo fundamentou-se em uma abordagem quantitativa, com ênfase na análise estatística de eventos extremos a partir da aplicação da Teoria dos Valores Extremos (TVE). A metodologia compreendeu quatro etapas principais: (i) obtenção dos dados observacionais; (ii) tratamento e consistência da série histórica; (iii) modelagem estatística com a Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV); e (iv) estimativa dos níveis de retorno para diferentes horizontes temporais.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

2.1 Fonte de dados e critérios de seleção

Foram utilizados dados diários de temperatura máxima registrados pela estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) situada no Mirante de Santana, na cidade de São Paulo (SP). A série compreende o período de 1º de janeiro de 1990 a 31 de dezembro de 2024, obtida em formato.csv a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

Considerando a finalidade climatológica do estudo e o foco na identificação de extremos térmicos, foram selecionados apenas os meses climatologicamente mais quentes: janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro, que são os períodos em que historicamente se concentram as maiores temperaturas máximas na região.

2.2 Tratamento, depuração e preparação da série

Os dados brutos passaram por um rigoroso processo de tratamento para assegurar a consistência estatística da série. As etapas incluíram:

- remoção de registros nulos, incompletos e duplicados, assegurando continuidade temporal;
- verificação de limites físicos, com exclusão de valores impossíveis (por exemplo, máximas negativas ou discrepâncias superiores a padrões termodinâmicos realistas);
- tratamento de duplicidade de datas, mantendo-se o maior valor observado, conforme prática recomendada para análise de extremos;
- construção da série diária final, da qual foram extraídos os máximos mensais, resultando em 238 observações independentes, utilizadas como base para a modelagem estatística.

Este procedimento garante que a amostra utilizada represente adequadamente a distribuição dos eventos extremos ao longo das últimas três décadas.

2.3 Modelagem estatística: Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

A modelagem dos extremos foi conduzida com base na Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), que sintetiza os três tipos de distribuições-limite possíveis para máximos: Gumbel, Fréchet e Weibull reversa. Os parâmetros de posição (μ), escala (σ) e forma (ξ) foram estimados por Máxima Verossimilhança (MV), método amplamente empregado em climatologia estatística e hidrometeorologia por sua eficiência assintótica.

O parâmetro de forma (ξ) foi utilizado para identificar o domínio de atração da distribuição aplicada. A obtenção de ξ negativo e próximo de zero indica que a cauda da distribuição ajustada converge para o domínio da distribuição Gumbel, o que é fisicamente coerente com processos atmosféricos sujeitos a limites superiores naturais.

2.4 Avaliação da qualidade do ajuste

A aderência do modelo foi verificada por meio do gráfico Quantil-Quantil (QQ-plot), que compara os quantis empíricos com os quantis teóricos sob o modelo ajustado. A proximidade dos pontos à reta 1:1 indicou forte adequação do modelo para a maior parte da série, com desvios restritos à cauda superior, comportamento típico em estudos de extremos térmicos urbanos.

Além disso, a análise gráfica da série temporal e a comparação com a climatologia oficial do INMET permitiram contextualizar os eventos mais intensos dentro de tendências de aquecimento de longo prazo. Observou-se um aumento gradual da frequência de dias com temperaturas acima do limiar que caracteriza episódios de onda de calor em São Paulo (33 °C), com destaque para máximas superiores a 35 °C, que passaram a ocorrer com maior regularidade nos anos mais recentes da série.

2.5 Estimativa dos níveis de retorno

Com base nos parâmetros estimados, foram calculados os níveis de retorno para períodos de 5, 10 e 20 anos. Esses níveis representam a magnitude da temperatura máxima esperada para ser excedida, em média, uma vez a cada T anos. Os intervalos de confiança de 95% foram obtidos por meio de técnicas de reamostragem e propagação de incerteza associada aos parâmetros estimados.

A curva de retorno foi empregada para avaliar a probabilidade futura de ocorrência de ondas de calor na cidade de São Paulo e para comparar tais valores com o recorde histórico (37,8°C), possibilitando a inferência sobre a provável recorrência de episódios extremos no horizonte analisado.

2.6 Ferramentas computacionais

Todo o processamento estatístico foi realizado em ambiente Python, com uso das bibliotecas: Pandas (manipulação e estruturação das séries históricas); NumPy (operações numéricas de suporte à modelagem); SciPy (ajuste da distribuição GEV via genextreme.fit( ); e Matplotlib (construção dos gráficos de evolução temporal, QQ-plot e níveis de retorno).

2.7 Limitações do estudo

A análise considerou exclusivamente a variável temperatura máxima do ar, sem incorporar efeitos de fatores externos (urbanização, redução de vegetação, umidade relativa, circulação atmosférica regional), que podem influenciar as tendências observadas. Assim, os resultados refletem apenas o comportamento estatístico das observações e não incluem modelagem física ou impactos de mudanças de uso do solo.

3 RESULTADOS E ANÁLISE

3.1 Temperatura do ar e conforto térmico

A temperatura do ar está relacionada à velocidade das moléculas presentes na atmosfera. Quanto mais rápidas essas moléculas se movem, maior será o valor registrado pelo termômetro, ou seja, maior será o aquecimento do ar (AHRENS, 2009, pg.30). Quando os meteorologistas informam a previsão de temperatura, eles se referem ao valor que será registrado pelo termômetro de bulbo

seco[3], instalado no abrigo meteorológico, sob condições ideais de ventilação e protegido de radiação solar direta.

Considerando a crescente recorrência de eventos extremos de calor no Brasil e no mundo e sua influência sobre o ambiente urbano, o presente estudo avaliou a temperatura máxima do ar[4], parâmetro amplamente utilizado em análises climatológicas e de extremos térmicos, em uma das maiores cidades do país, que possui uma densa área edificada. A investigação foi conduzida com base na TVE, aplicada às séries históricas de temperatura máxima registradas na estação meteorológica do INMET no Mirante de Santana (SP), no período de 01 de janeiro 1990 a 31 de dezembro de 2024, considerando apenas os meses mais quentes do ano[5] (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro).

A Figura 01 apresenta a série das temperaturas máximas diárias observadas em São Paulo, comparada com a climatologia do INMET (1991–2020). Os dados foram obtidos através da plataforma BDMEP, do INMET, no formato .csv, e tratados a fim de remover registros nulos e duplicados, verificar a consistência temporal, excluir valores inapropriados para a série, como máximas negativas ou extremamente elevadas. Em caso de duplicidade de data, foi mantido o dado com o maior valor, para conservar a análise de extremos.

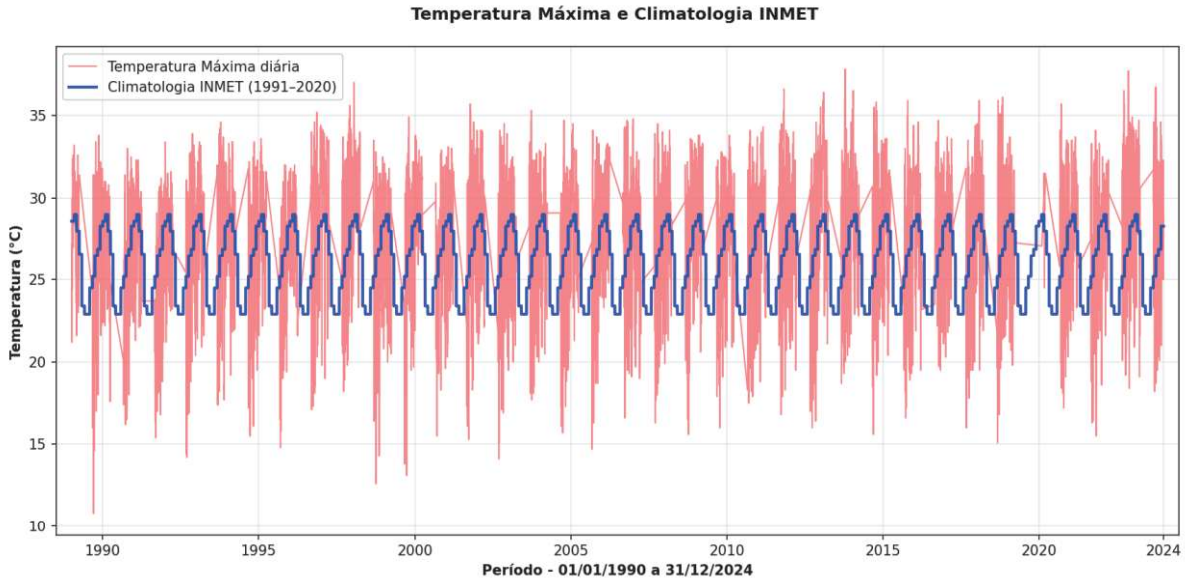

***Figura 01**: Valores de temperatura máxima diárias registradas em São Paulo (SP) (Mirante de Santana), comparada com a climatologia do INMET entre 01 de janeiro de 1990 e 31 de dezembro de 2024. No gráfico, foram considerados apenas os meses mais quentes do ano (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro).*

[3] O termômetro de bulbo seco mede a temperatura do ar sem nenhuma forçante externa, como gaze umidificada ou ventilação forçada.
[4] Maior temperatura registrada no dia.
[5] Na Região Sudeste do Brasil, o verão é a estação do ano que tem a maior média de temperatura, porém os extremos de temperatura máxima acontecem nos meses de primavera. Por este motivo, os meses de setembro a novembro também foram incluídos neste estudo.

O gráfico evidencia o comportamento sazonal característico da temperatura máxima ao longo dos anos. Observa-se também um aumento gradual, especialmente a partir dos anos 2000, quando os valores passaram a atingir os 35°C com mais frequência, valor que supera a climatologia de referência (INMET) em mais de 5°C. Esse comportamento indica uma tendência de aquecimento aparentemente consistente, que pode estar associada às mudanças climáticas e/ou efeito da urbanização e expansão das ilhas de calor, como aponta Emolo (2025).

Durante este período, os recordes de calor ocorreram nos meses de outubro e novembro, transição entre a primavera e o verão, quando massas de ar seco e episódios de bloqueio atmosférico podem ocorrer, influenciando o tempo no Sudeste do Brasil.

A Tabela 01 mostra quando ocorreram as três maiores temperaturas do período.

Tabela 01: Maiores temperaturas máximas registradas em São Paulo no período analisado

Cidade	Data	Temperatura Máxima (°C)
São Paulo (SP)	17/10/2014	37,8
	13/11/2023	37,7
	14/11/2023	37,7

Fonte: Dados observacionais diários do INMET (São Paulo), organizados pelos autores.

Na série analisada, os recordes de temperatura máxima foram registrados em 17 de outubro de 2014 (37,8°C), 13 de novembro de 2023 (37,7°C) e 14 de novembro de 2023 (37,7°C). Vale destacar que as duas das maiores temperaturas registradas na série ocorreram em 2023, ano em que o planeta registrou sucessivos recordes de calor, que se estenderam até o início de 2025, segundo o monitoramento do Centro Europeu Copernicus (2025).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (BRASIL, 2025), a exposição a altas temperaturas por períodos prolongados pode causar exaustão pelo calor, cãibras, fadiga, dor de cabeça, náuseas e até desmaios, especialmente em indivíduos mais vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com comorbidades. O risco de uma onda de calor[6] depende da intensidade e do tempo de duração do evento.

3.2 Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV)

Para a aplicação da TVE, foram extraídos os valores máximos mensais, resultando em uma série com 238 dados, mostrados na Figura 02. Esses valores representam os eventos mais intensos observados em cada mês do período analisado e foram utilizados para o ajuste da distribuição de GEV, com o objetivo de quantificar a frequência e a magnitude dos episódios de calor.

[6] Período em que a temperatura máxima supera em pelo menos 5°C a climatologia, por 2 dias consecutivos ou mais (INMET).



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

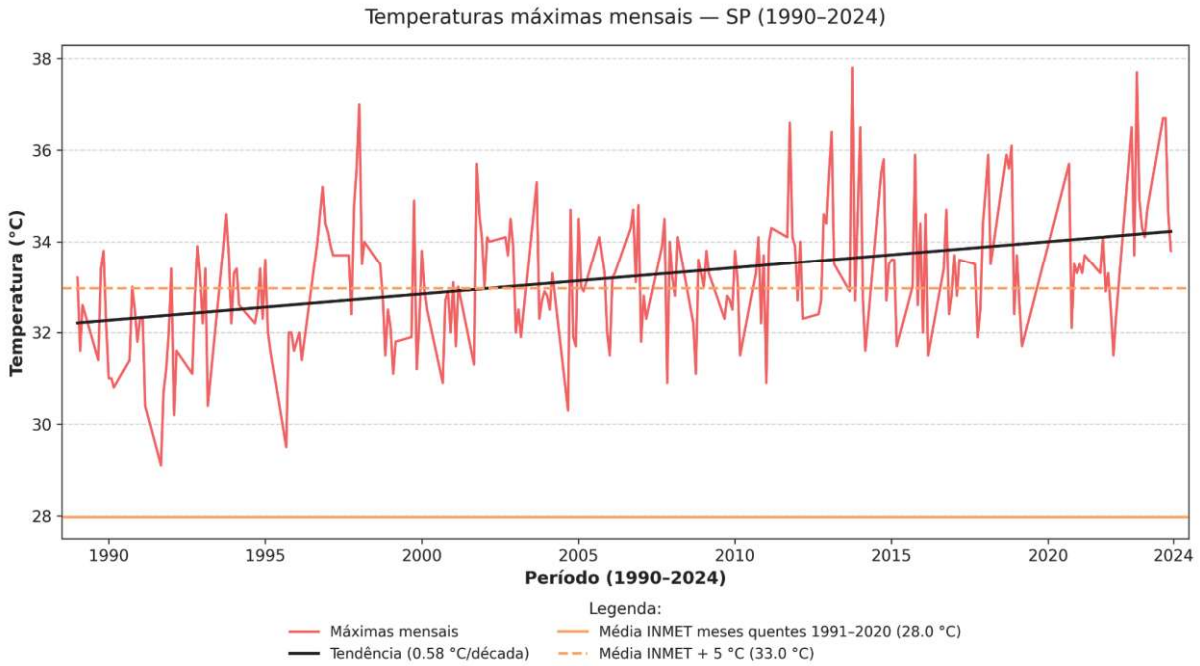

***Figura 02**: Série de temperaturas máximas mensais de São Paulo (1990–2024), acompanhada da tendência linear e de duas linhas de referência baseadas na climatologia oficial do INMET (1991–2020). A linha laranja contínua indica a média climatológica dos meses mais quentes (janeiro, fevereiro, março, setembro, outubro, novembro e dezembro), correspondente a 27,9°C, enquanto a linha laranja tracejada representa a média + 5°C (32,9 °C), utilizada como limiar de ondas de calor. A linha preta representa a tendência de aumento das temperaturas ao longo das últimas décadas.*

Essa representação permite visualizar a variação temporal das temperaturas máximas, destacando os períodos em que os valores observados ultrapassam o patamar de calor extremo definido a partir da climatologia. A linha preta evidencia a tendência de aumento de 0,58°C por década, reforçando o aquecimento gradual observado na cidade de São Paulo.

A teoria da TVE começou a ser desenvolvida por Fisher e Tippett (1928) e formalizada por Gnedenko (1943) (Coles, 2001), que demonstraram que o máximo de uma sequência de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas converge, sob certas condições, para uma das três distribuições limites: Gumbel, Fréchet ou Weibull reversa. Essas três distribuições podem ser expressas de forma unificada pela Distribuição de Valores Extremos Generalizada (GEV), amplamente descrita por Coles (2001).

De acordo com Coles (2001), para uma função de distribuição não degenerada[7] G, então G é um membro da família GEV

$$G(z) = exp\{-\left[1+\xi\ (\frac{z-\mu}{\sigma})\right]^{\frac{-1}{\xi}}\},para\ 1+\xi\ (\frac{z-\mu}{\sigma}) > 0$$

definido em $\left\{z: 1+\xi(\frac{z-\mu}{\sigma}) > 0\right\}$, onde $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ e $-\infty < \xi < \infty$

sendo:

[7] A probabilidade distribuída ao longo de um intervalo de valores e não em um ponto isolado.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

$$\mu \text{ é o parâmetro de posição}$$
$$\sigma > 0 \text{ é o parâmetro de escala}$$
$$\xi \text{ é o parâmetro de forma}$$

O parâmetro de forma (ξ) determina o tipo de cauda que a distribuição terá:

$$\xi > 0: \text{cauda pesada } (Fréchet);$$
$$\xi = 0: \text{cauda exponencial } (Gumbel);$$
$$\xi < 0: \text{cauda limitada superiormente } (Weibull\ reversa) \text{ (COLES, 2001)}$$

Para facilitar a visualização da diferença entre os três tipos de distribuição, a Tabela 02 destaca o sinal de ξ, o comportamento da cauda e alguns exemplos de aplicação.

Tabela 02: *Classificação dos tipos de distribuição da família GEV segundo o parâmetro de forma ξ* (indicando o comportamento da cauda e exemplos de fenômenos extremos que costumam ser bem representados por cada tipo)

Tipo	ξ	Cauda	Exemplo
Fréchet	ξ > 0	Cauda pesada	Extremos muito grandes: enchentes, chuva extrema
Weibull	ξ < 0	Cauda limitada	Variáveis com máximo natural: resistência de materiais, velocidade do vento limitada
Gumbel	ξ ≈ 0	Cauda exponencial	Cresce exponencial, mas não explode. Temperatura, precipitação diária.

Fonte: Organizado pelos autores.

Após tratar os dados e obter os valores máximos mensais, foram realizadas as análises estatísticas e modelagem dos extremos. Os parâmetros da distribuição de GEV foram estimadas pelo método da Máxima Verossimilhança (MV), que estima os parâmetros de posição (μ), escala (σ), e forma (ξ), definida por:

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \prod_{i=1}^{n} \quad f(x_i|\mu, \sigma, \xi),$$

onde $f(x_i)$ representa a função de densidade de probabilidade da distribuição de GEV.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

A análise foi conduzida em ambiente Python, utilizando as bibliotecas Pandas, NumPy, Matplotlib e SciPy. A biblioteca *Pandas* foi empregada para leitura e tratamento das séries históricas de temperatura máxima; *NumPy* auxiliou nos cálculos numéricos e operações vetoriais; *Matplotlib* foi utilizada na construção dos gráficos de tendência e níveis de retorno; e a *SciPy* foi responsável pelos procedimentos estatísticos, incluindo o ajuste das distribuições Gumbel e GEV pelo método da MV por meio da função genextreme.fit( ).

A estimativa dos parâmetros, mostrada na Tabela 03, indicou que o valor de ξ é muito próximo de zero (-0,1379 $\pm$ 0,1246), o que caracteriza a forma Gumbel como mais adequada para representar os máximos mensais de temperatura.

Tabela 03: Parâmetros estimados da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) ajustada às temperaturas máximas

Parâmetro	Valor	Erro-padrão (EP)	Interpretação
ξ (forma)	−0,1378	0,1246	Próximo de zero → domínio de atração de Gumbel
μ (posição)	34,3775	0,2163	Representa a localização média da cauda de extremos
σ (escala)	1,1405	0,1524	Mede a dispersão dos valores extremos

Parâmetros estimados da distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) ajustada às temperaturas máximas de São Paulo (1990–2024), obtidos pelo método da MV. Entre parênteses, são apresentados os erros-padrão (EP) calculados pela inversa do hessiano numérico.

Fonte: Organizado pelos autores.

O parâmetro de forma (ξ) apresentou valor negativo e próximo de zero (ξ = −0,1378 ± 0,1246), indicando que a cauda da distribuição tende ao domínio de atração da distribuição de Gumbel ($\xi \approx 0$), o que é coerente com o comportamento físico esperado para séries de temperatura do ar, que possuem limite superior natural.

A aderência do modelo ajustado foi analisada por meio do gráfico QQ-plot (Quantis-Quantis), apresentado na Figura 03, que compara os quantis empíricos dos valores máximos de temperatura com os quantis teóricos da distribuição GEV ajustada.

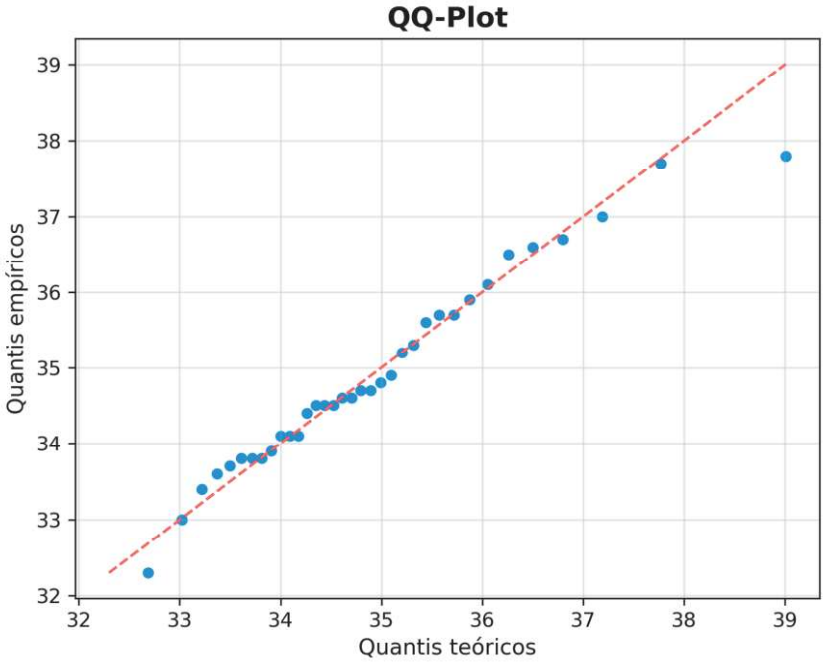

Figura 03: *Gráfico QQ-plot que compara os quantis empíricos e teóricos da distribuição de Gumbel ajustada às temperaturas máximas dos meses quentes de São Paulo (1990–2024). Observa-se bom ajuste ao longo de quase toda a série analisada.*

O ajuste da distribuição de Gumbel aos máximos mensais dos meses quentes foi avaliado por meio do gráfico Quantil-Quantil (QQ-plot). Nesse tipo de diagnóstico, os quantis empíricos observados são comparados diretamente com os quantis teóricos esperados sob a distribuição ajustada. Quando o modelo teórico descreve bem o comportamento dos dados, os pontos do gráfico tendem a se alinhar ao longo da reta 1:1.

No presente estudo, o QQ-plot mostrou que os pontos seguem de forma muito próxima a essa linha de referência, indicando elevada coerência entre os valores observados e aqueles previstos pelo modelo de Gumbel. Pequenos desvios ocorrem apenas na cauda superior da distribuição, onde o quantil teórico puxa mais que o empírico. Esse comportamento confirma que Gumbel fornece um ajuste consistente aos máximos mensais de temperatura analisados, sendo apropriada para a modelagem dos extremos e para a estimativa de níveis de retorno.

3.3 Níveis de Retorno

Os níveis de retorno são valores que indicam, neste caso, o limiar de temperatura máxima que será atingido uma vez a cada T anos. A curva de retorno que relaciona a temperatura ao período de retorno, o que permitiu visualizar a probabilidade de ocorrência de eventos extremos nos próximos 05, 10 e 20 anos. Com base nos parâmetros estimados para a distribuição GEV, foram calculados os níveis de retorno (Z_T) correspondentes aos períodos de 05, 10 e 20 anos, que representam as temperaturas máximas esperadas para cada horizonte temporal.



REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE
ISSN 2763-8928

$$z_T = \mu - \frac{\sigma}{\xi}\left[1 - (-ln(1 - \frac{1}{T})) \quad ^{-\xi}\right]$$

onde:
T é o período de retorno em anos;
z_T é a temperatura máxima esperada para esse intervalo de tempo

No caso especial, quando $\lim_{\xi \to 0}$,

$$z_T = \mu - \sigma ln\left[-ln(1 - \frac{1}{T})\right]$$

A Figura 4 abaixo mostra os resultados obtidos, assim como o intervalo de confiança de 95%, com destaques para os períodos de interesse (05, 10 e 20 anos). O gráfico também apresenta a maior temperatura (37,8°C) registrada na série histórica analisada, a fim de mostrar o limite superior da série.

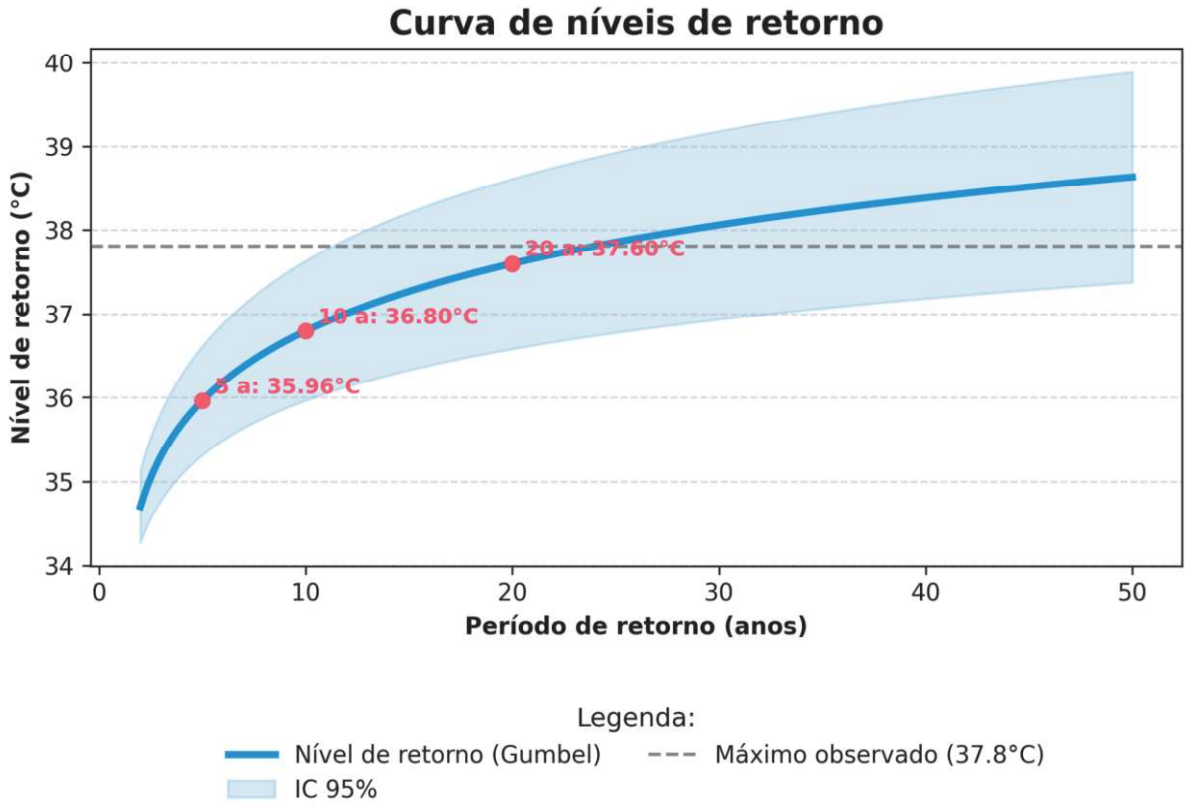

***Figura 4**: Curva de níveis de retorno estimada pela distribuição Gumbel ajustada às temperaturas máximas em São Paulo (1990–2024). A linha pontilhada representa o máximo observado na série histórica, a linha azul representa o ajuste teórico, a faixa sombreada indica o Intervalo de Confiança de 95% e os pontos destacam os níveis de retorno correspondentes a 5, 10 e 20 anos.*

Observa-se que as temperaturas associadas aos tempos de retorno aumentam de forma gradual, variando de aproximadamente 36°C [IC95%: 35,3°C; 36,6°C] para 5 anos; 36,8 °C [IC95%: 36,0°C; 37,6°C] para 10 anos e 37,6°C [IC95%: 36,6°C; 38,6°C] para 20 anos. Esses resultados

indicam que valores acima do limiar definido pelo INMET para caracterizar uma onda de calor devem ser atingidos pelo menos uma vez nos próximos cinco anos. Já temperaturas mais elevadas, acima de 36,6°C, apresentam menor frequência de ocorrência, exigindo intervalos de tempo mais longos para que eventos de intensidade semelhante voltem a ocorrer. Além disso, o tempo para que o recorde da série (37,8°C) volte a ocorrer é um pouco maior que 20 anos (≈ 22 anos). Esse comportamento reforça que, embora eventos de calor extremo sejam relativamente raros, sua ocorrência é estatisticamente provável dentro de períodos curtos, o que evidencia o aquecimento gradual da série e o aumento do risco de exposição da população vulnerável a temperaturas potencialmente perigosas.

CONSIDERAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento das temperaturas máximas na cidade de São Paulo (SP), utilizando a TVE para identificar e caracterizar eventos de calor extremo. Com base nas séries históricas do INMET referentes ao período de 1990 a 2024, foi ajustada a distribuição GEV por meio do método da MV, sendo a forma da distribuição Gumbel a mais adequada para representar os máximos de temperatura.

Os resultados mostraram que o parâmetro de forma (ξ) apresentou valor próximo de zero ($-0{,}1378 \pm 0{,}1246$), confirmando a aderência da distribuição de Gumbel como modelo que melhor se ajusta à série estudada. A análise do gráfico QQ-plot indicou bom ajuste do modelo em praticamente toda a série, indicando uma leve tendência de superestimação das temperaturas extremas.

As estimativas dos níveis de retorno indicaram valores de aproximadamente 36 °C, 36,8 °C e 37,6 °C para períodos de 5, 10 e 20 anos, respectivamente, sugerindo que temperaturas acima do limiar adotado para caracterizar ondas de calor, ou seja, persistência de temperaturas máximas acima de 5°C acima da média a partir do segundo dia, devem ser atingidas ao menos uma vez nos próximos cinco anos. Esses resultados reforçam que, embora eventos de calor extremo sejam raros, sua ocorrência é estatisticamente provável dentro de períodos curtos, evidenciando a tendência de aquecimento gradual da série. Além disso, o valor recorde de 37,8°C, registrado no dia 17/10/2014 poderá ser atingido em um intervalo de tempo um pouco maior que 20 anos.

Comportamento semelhante foi relatado por Lisboa et al. (2021) ao aplicar a TVE em séries de temperatura máxima de Campinas (SP). Os autores observaram que a distribuição de GEV apresentou bom desempenho até cerca de 35°C, mas superestimou os valores projetados para eventos mais extremos. Eles concluíram que esse modelo de distribuição indica valores de temperatura elevada em pouco tempo de retorno. Outros resultados semelhantes foram obtidos por Bezerra (2013), ao aplicar a TVE a dados de temperatura máxima em São Gonçalo (PB). Os autores verificaram que o método da MV apresentou bom desempenho na estimativa dos parâmetros da distribuição, embora tenha observado instabilidades no parâmetro de forma (ξ) em alguns meses analisados.

Por fim, conclui-se que a TVE é uma ferramenta estatística confiável e pode ser aplicada à análise de eventos meteorológicos extremos, como temperatura máxima, contribuindo não apenas para a compreensão científica dos fenômenos, mas também para o desenvolvimento de ações voltadas

para reduzir os impactos das ondas de calor em ambientes escolares e urbanos, uma vez que fornece evidências para o tempo de retorno de eventos extremos. Os resultados obtidos reforçam a importância de associar o monitoramento, tanto das condições registradas quanto das projeções futuras de temperaturas extremas, para adotar medidas estratégicas de adaptação urbana frente às mudanças climáticas. Algumas ações já são mapeadas pelos órgãos competentes, como as indicações do Ministério da Saúde (Brasil, 2025), que recomenda a implementação de medidas preventivas, assim como hidratação adequada, uso de roupas leves, atenção especial a grupos vulneráveis e a busca por ambientes ventilados e sombreados, como medidas de segurança diante de cenários de ondas de calor.

No âmbito territorial e estrutural das escolas brasileiras, o relatório "O acesso ao verde e a resiliência climática nas escolas das capitais brasileiras", elaborado pelo Instituto Alana e MapBiomas (2024), evidencia que escolas e territórios educativos com maior cobertura vegetal se adaptam melhor às emergências climáticas, e ainda, recomenda ações para amenizar os efeitos das ondas de calor, como diminuir a área de concreto e aumentar a área vegetada, por meio de hortas, jardins e pátios naturalizados. Tais medidas fortalecem a resiliência climática, promovem o bem-estar e a saúde pública, e ampliam o potencial educativo das cidades, integrando ações de planejamento urbano, educação ambiental e políticas de adaptação às mudanças climáticas.

É importante ressaltar que este estudo considerou apenas os dados observados de temperatura máxima e não assumiu os efeitos de fatores ambientais e antropogênicos, como desmatamento, expansão urbana e impermeabilização do solo, que podem influenciar o aquecimento local e alterar o comportamento das séries históricas. Para análises futuras, é recomendado aplicar modelos espaciais e avaliar outras variáveis, como altitude, umidade relativa do ar e uso do solo. Além disso, considerar o ajuste da distribuição Weibull como uma alternativa plausível para ajustar séries semelhantes à analisada neste estudo, uma vez que o valor do parâmetro de forma apresentou valor negativo, mesmo que muito próximo de zero, o que pode indicar um bom ajuste para essa distribuição.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. **Meteorology Today: an introduction to weather, climate, and the environment**. 9. ed. Belmont: Brooks/Cole, 2009.

BEIJO, L. A.; AVELAR, F. G. Distribuição generalizada de valores extremos no estudo de dados climáticos: uma breve revisão e aplicação. **Revista da Estatística da UFOP**, v. 1, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285880761. Acesso em: 11 nov. 2025.

BEZERRA, S. R. S. **Modelagem estatística de valores extremos aplicada a dados de temperatura máxima em São Gonçalo–PB**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Estatística) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Ondas de calor**. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/o/ondas-de-calor. Acesso em: 11 nov. 2025.

C3S – COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **January 2025 was the warmest on record globally despite emerging La Niña**. 2025. Disponível em: https://climate.copernicus.eu/copernicus-january-2025-was-warmest-record-globally-despite-emerging-la-nina. Acesso em: 11 nov. 2025.

COLES, S. **An introduction to statistical modeling of extreme values**. London: Springer, 2001.

EMOLO, C. S. S. **Análise das ilhas de calor urbanas em São Paulo: desenvolvimento de um modelo estatístico para mitigação e planejamento sustentável**. 2025. 175 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2025. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/33454. Acesso em: 11 nov. 2025.

FERREIRA, G. F. et al. Modelagem bayesiana de temperatura máxima do ar em Divinópolis – MG. *Nativa*: **Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Sinop, v. 12, n. 3, p. 449–456, 2024. DOI: https://doi.org/10.31413/nativa.v12i3.17665.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 10 out. 2025.

INSTITUTO ALANA; MAPBIOMAS. **O acesso ao verde e a resiliência climática nas escolas das capitais brasileiras**. São Paulo: Instituto Alana, 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2023: Synthesis Report.* **Summary for Policymakers**. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/summary-for-policymakers. Acesso em: 15 out. 2025.

JESUS, J. B.; NASCIMENTO, Y. D. Tempo de retorno e espacialização das precipitações máximas pelo método dos momentos para o estado da Bahia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 127–131, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/S1413-41522020200508.

LISBOA, G.; AVILA, A. M. H.; FARIA, E. C.; COSTA, P. D. P. Teoria de valores extremos aplicada ao estudo de ondas de calor. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 29., 2021, Campinas. **Anais eletrônicos**... Campinas: UNICAMP, 2021.