



## **Efeito das mudanças climáticas nas chuvas extremas no município de Botucatu - SP**

### **Pedro Vitor Soares Adrien**

Mestrando, FCA/UNESP, Brasil  
p.adrien@unesp.br

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-9956-2196>

### **Isaque Miyabara Agostinho**

Mestrando, FCA/UNESP, Brasil  
Im.agostinho@unesp.br

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0006-8267-531X>

### **José Rafael Franco**

Doutorando, FCA/UNESP, Brasil  
jose\_rafael.franco@hotmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7129-4304>

### **Victor Crespo de Oliveira**

Doutorando, FCA/UNESP, Brasil  
victor.crespo@unesp.br

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2719-9972>

### **Enzo Dal Pai**

Professor Doutor, FCA/UNESP, Brasil  
enzo-dal.pai@unesp.br

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0570-8644>



## Efeito das mudanças climáticas nas chuvas extremas no município de Botucatu - SP

### RESUMO

**Objetivo** - Estudar a influência dos efeitos das mudanças climáticas nas chuvas extremas do município de Botucatu-SP-Brasil.

**Metodologia** - Aplicação de modelagem estatística em períodos distintos de uma série de 52 anos: período pré-mudança climática e período de plena mudança climática.

**Originalidade/relevância** - O trabalho compara um estudo anterior, de 1999, com os últimos anos (até 2022). O trabalho verifica se houve alterações na modelagem anterior.

**Resultados** - Houve aparente aumento das chuvas extremas, de 6,8% segundo o modelo de Gumbel, e aumento de 70,9% para o modelo GEV.

**Contribuições teóricas/metodológicas** - O estudo de distribuições estatísticas meteorológicas já foi bem elaborado no passado. É necessário checar a validade atual destes modelos, com dados atuais de mudanças climáticas.

**Contribuições sociais e ambientais** - Este tipo de estudo fornece ferramenta para correto dimensionamento de estruturas como pontes, bueiros, terraços e barragens. Com a escassez de água no planeta, o correto dimensionamento de obras hidráulicas é vital para o uso racional da água. Também fornece maior segurança a obras hidráulicas

**PALAVRAS-CHAVE:** Chuvas extremas. Mudanças climáticas. Modelagem estatística. Gumbel. GEV.

## Effects of climate change on extreme rainfall in the municipality of Botucatu - SP

### ABSTRACT

**Objective** – To study the influence of the effects of climate change on extreme rainfall in the municipality of Botucatu-SP-Brazil.

**Methodology** – Application of statistical modeling in distinct periods of a 52-year series: the pre-climate change period and the full climate change period.

**Originality/Relevance** – This work compares a previous study from 1999 with the latest years (up to 2022). The work verifies if there were alterations in the previous modeling.

**Results** – There was an apparent increase in extreme rainfall of 6.8% according to the Gumbel model, and an increase of 70.9% for the GEV model.

**Theoretical/Methodological Contributions** – The study of statistical meteorological distributions has already been well elaborated in the past. It is necessary to check the current validity of these models with current climate change data.

**Social and Environmental Contributions** – This type of study provides tools for the correct dimensioning of structures such as bridges, culverts, terraces, and dams. With the scarcity of water on the planet, the correct dimensioning of hydraulic works is vital for the rational use of water. It also provides greater safety to hydraulic works.

**KEYWORDS:** Extreme rainfall. Climate change. Statistical modeling. Gumbel. GEV.

## Efecto de los cambios climáticos en las lluvias extremas en el municipio de Botucatu - SP

### RESUMEN

**Objetivo** – Estudiar la influencia de los efectos del cambio climático en las lluvias extremas del municipio de Botucatu-SP-Brasil.

**Metodología** – Aplicación de modelado estadístico en distintos periodos de una serie de 52 años: periodo pre-cambio climático y periodo de pleno cambio climático.



**Originalidad/Relevancia** – Este trabajo compara un estudio anterior, de 1999, con los últimos años (hasta 2022). El trabajo verifica si hubo alteraciones en el modelado anterior.

**Resultados** – Hubo un aparente aumento de las lluvias extremas del 6,8% según el modelo de Gumbel, y un aumento del 70,9% para el modelo GEV.

**Contribuciones Teóricas/Metodológicas** – El estudio de distribuciones estadísticas meteorológicas ya ha sido bien elaborado en el pasado. Es necesario verificar la validez actual de estos modelos, con datos actuales de cambio climático.

**Contribuciones Sociales y Ambientales** – Este tipo de estudio proporciona herramientas para el correcto dimensionamiento de estructuras como puentes, alcantarillas, terrazas y represas. Con la escasez de agua en el planeta, el correcto dimensionamiento de obras hidráulicas es vital para el uso racional del agua. También proporciona mayor seguridad a las obras hidráulicas

**PALABRAS CLAVE:** Lluvias extremas. Cambio climático. Modelado estadístico. Gumbel. GEV.



## **1 INTRODUÇÃO**

O monitoramento das chuvas é de grande importância, uma vez que impactam de forma direta ou indireta diversas atividades sociais e econômicas, a exemplo da agricultura, habitação, abastecimento urbano, geração de energia, turismo e segurança pública (EMILIANO et al., 2024). Nesse sentido, a compreensão mais aprofundada das mudanças climáticas e suas implicações na distribuição e ocorrência de chuvas torna-se cada vez mais crucial. Catástrofes e eventos climáticos extremos tem se tornado cada vez mais comuns na sociedade brasileira e mundial. Estudos visando garantir uma adequada gestão de riscos em áreas urbanas crescem em importância, especialmente para aquelas que apresentam maior vulnerabilidade (MARENGO et al., 2024).

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2025), as mudanças climáticas podem ser entendidas como alterações nos padrões de clima e temperatura a longo prazo. Elas podem ser causadas por fatores naturais, entretanto as atividades humanas têm impulsionado essas mudanças, pois a emissão de gases do efeito estufa, provenientes da queima de combustíveis fósseis, desmatamento, queimadas, atividades agropecuárias e industriais, tem alterado a composição química da atmosfera (YONUE et al., 2017).

Segundo dados do relatório síntese de mudanças climáticas do painel intergovernamental sobre mudanças climáticas - IPCC (2023), as ações humanas causaram uma elevação próxima a 1,09°C na temperatura da superfície global entre 2011 e 2021, em comparação ao período de 1850 a 1900. O mesmo relatório aponta que o ritmo desse aumento tem sido mais rápido desde 1970 do que qualquer outro período de 50 anos analisado. Em consequência dessas mudanças, observa-se um aumento na ocorrência de eventos climatológicos extremos em diversas regiões do planeta, como longos períodos de estiagens e aumento de chuvas intensas (RIPPLE et al., 2024).

O excesso de chuvas causa danos materiais incalculáveis. Em 2024, ocorreram enchentes em vários países, como Indonésia, Afeganistão e Quênia, deixando muitos mortos e desabrigados (RIZOTTO; COSTA; LOBATO, 2024). Nesse mesmo ano, no Brasil, as chuvas causaram uma das maiores tragédias climáticas no estado do Rio Grande do Sul, sendo que 90% dos municípios foram afetados e muitos foram completamente destruídos, além de cerca de 650 mil pessoas que foram desalojadas (MARENGO et al., 2024).

Em 2020, o município de Botucatu - SP registrou o maior volume de chuva em um único dia dentro de um período de 50 anos, 287 mm em 10 de fevereiro. Esse volume de chuva ocasionou alagamentos e destruições de casas, pontes e estradas, além da morte de 4 pessoas (FRANCO, 2024).

É provável que a incidência e a severidade dos eventos meteorológicos extremos se alterem nos próximos anos, tendendo para piores cenários. Por essa razão, medidas de mitigação são cada vez mais urgentes de serem adotadas, além da elaboração de políticas públicas eficazes, de modo que os danos sejam minimizados (SRIVASTAVA; METHA; NAEISS, 2022). Para auxiliar a tomada de decisões em medidas mitigativas e planejamento urbano, o conhecimento do padrão das chuvas é necessário.



Estudos sobre chuvas extremas já existem e auxiliam no conhecimento do padrão das chuvas. Modelos estatísticos ajudam na compreensão e previsão de eventos de climatológicos extremos. Estes modelos são ferramentas de suma importância para órgãos públicos, na realização da gestão de municípios e elaboração de políticas públicas.

Entretanto, vários modelos de chuvas extremas já publicados no Brasil possuem mais de 25-30 anos: período coincidente com o aumento dos efeitos das mudanças climáticas. Levanta-se a dúvida sobre a eficácia destes modelos em novos tempos climáticos. Nos períodos em que esses modelos foram desenvolvidos o número de eventos extremos de chuva eram menores em comparação com os dias atuais.

Modelos estatísticos de chuvas extremas são baseados em distribuições de probabilidade, baseado em eventos já ocorridos no local (ASSIS, ARRUDA; PEREIRA, 1996). É muito comum em climatologia se pressupor, a priori, que a distribuição dos dados obedeça a uma distribuição estatística normal. Mas isso nem sempre é verdadeiro, possuindo a distribuição de chuvas extremas sempre lados assimétricos em sua distribuição de probabilidades.

## **2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de um modelo de chuvas extremas publicado no ano de 1999 com as chuvas extremas ocorridas no município de Botucatu-SP nos períodos de abrangência das mudanças climáticas. O intuito é determinar se o modelo antigo continua válido ou se ele se alterou (e caso tenha se alterado espera-se avaliar quanto ele se alterou).

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Local do experimento e dados**

O experimento foi realizado no município de Botucatu. Botucatu é um município localizado no centro do estado de São Paulo (22°54'S, 48°27'O e 786m), sem atividade industrial pesada, majoritariamente rural. Os dados foram obtidos da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), pertencente à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP-SP). Segundo a classificação de Köppen, o clima do local é do tipo Aw, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos, com temperatura média do ar de 21,34 e precipitação média anual de 1500 mm (FRANCO et al., 2023).

A base de dados de chuva utilizada compreende o período de 1971 até 2022, com valores diários de volume de chuva. Estes dados foram obtidos com pluviômetros do tipo "Ville de Paris".



### 3.2 Modelos

Como base para este trabalho foi utilizado o livro “Equações de chuvas intensas do estado de São Paulo”, livro feito em parceria do DAEE (Departamento de águas e energia elétrica do estado de São Paulo) com a universidade USP (DAEE, 1999). Este livro, dos autores Francisco Martinez Júnior e Nelson Luiz Goi Magni possui um modelo de chuvas extremas ajustado para o município de Botucatu. Embora o livro tenha sido publicado (a última versão) no ano de 1999, o modelo referente ao município de Botucatu é ajustado até o ano de 1997, e foi realizado com 27 anos de observação (1967; 1970 a 1982; 1984 a 1991; 1993 a 1997).

Esse modelo base consistem em uma equação com oito parâmetros locais e as variáveis de entrada são o Tempo de Retorno (TR), que consiste no número de anos em média que um dado evento extremo aconteça; e o tempo de duração da chuva (Tc), em minutos (este tempo de duração da chuva também pode ser interpretado como tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, no dimensionamento de obras hidráulicas), conforme a equação 1 (TUCCI, 2001; DUARTE et al., 2024).

$$i_{TR,tc} = A * (tc + B)^C + D * (tc + E)^F * [G + H * \ln \ln(\frac{TR}{TR-1})] \quad (1)$$

Onde i = precipitação máxima, em mm/h;

Tc = tempo de duração da chuva ou tempo de concentração, em minutos;

TR = temo de retorno, em anos;

A,B,C,D,E,F,G e H = parâmetros locais da equação.

Quadro 1 - Parâmetros da equação das chuvas intensas (Equação 1) para o município de Botucatu

Parâmetros	Valor
A	30,6853
B	20
C	-0,8563
D	3,9660
E	10
F	-0,7554
G	-0,4754
H	-0,8917

Fonte: (DAEE, 1999)

Para processamento dos valores de chuvas extremas optou-se por utilizar a equação geral das chuvas extremas, dada pela equação 2:

$$i_{TR,tc} = \frac{K * TR^a}{(b+tc)^c} \quad (2)$$

Onde i = precipitação máxima, em mm/h;



Tc = tempo de duração da chuva ou tempo de concentração, em minutos;

TR = tempo de retorno, em anos;

K, a, b e c = parâmetros locais da equação.

Na distribuição estatística, foram utilizadas duas distribuições estatísticas na modelagem dos dados para o município de Botucatu-SP: a distribuição de Gumbel para máximos (também conhecida como Assinótica de valores máximos tipo I); e também a distribuição Generalizada de extremos GEV. Optou-se por utilizar dois modelos diferentes de distribuição estatística para se obter valores mais confiáveis no ajuste, dado que são duas metodologias diferentes.

A Função Densidade de Probabilidade da Distribuição de Gumbell é apresentada Equação 3:

$$FDP = \alpha * \exp\{-\alpha * (\bar{X} - \mu) - \exp[-\alpha * (\bar{X} - \mu)]\} \quad (3)$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\mu$  são calculados considerando-se o Método dos momentos (BUSSAB, MORETTIN, 2017).  $\bar{X}$  representa a média da série.

A estimativa da lâmina de uma chuva extrema em função do tempo de retorno de sua ocorrência, segundo Gumbel, é apresentada na Equação 4:

$$X_{TR} = \frac{-LN\left(-LN\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right)}{\alpha} + \mu \quad (4)$$

Onde  $X_{TR}$  = a chuva extrema máxima estimada com base no tempo de retorno TR;

TR = tempo de retorno para a chuva;

$\alpha$  e  $\mu$ : parâmetros da equação, obtidos via o método dos momentos.

A distribuição Generalizada de Extremos GEV é dada pela Equação 5:

$$FDP = \frac{1}{\sigma} * \left[1 - \xi * \left(\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\left(\frac{1}{\xi-1}\right)} * \exp\left\{-\left[1 - \xi * \left(\frac{\bar{X} - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{1}{\xi}}\right\} \quad (5)$$

Os parâmetros  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\xi$  também são ajustados conforme o método dos momentos.

A equação para estimar o valor extremo com base no tempo de retorno é apresentada na Equação 6:

$$X_{TR} = \mu + \frac{\sigma}{\xi} * \left\{1 - \left[-LN\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right]^{\xi}\right\} \quad (6)$$



Onde XTR é a chuva extrema máxima estimada com base no tempo de retorno TR;

TR = tempo de retorno para a chuva;

$\sigma$ ,  $\mu$  e  $\xi$ : parâmetros da equação, obtidos via o método dos momentos.

Estes modelos fornecem valores da chuva de 1 dia. Para obtenção de chuvas de menores períodos de duração utiliza-se o método da desagregação de chuvas.

Para desagregação de valores diários de chuva em períodos menores foram utilizados os parâmetros estabelecidos pela CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1986. Estes valores servem para se estimar chuvas de menor duração em um dia, como por exemplo a chuva de uma hora. Estes valores desagregados servem para se realizar o ajuste e se encontrar os parâmetros da Equação 2.

Quadro 2- Valores das constantes de desagregação de chuvas intensas para o estado de São Paulo

Constantes de desagregação	Valor
$h_{24h}/h_{dia}$	1,14
$h_{12h}/h_{24h}$	0,85
$H_{10h}/h_{24h}$	0,82
$H_{8h}/h_{24h}$	0,78
$H_{6h}/h_{24h}$	0,72
$H_{1h}/h_{24h}$	0,42
$H_{0,5h}/h_{1h}$	0,74
$H_{25'}/h_{30'}$	0,91
$H_{20'}/h_{30'}$	0,81
$H_{15'}/h_{30'}$	0,70
$H_{10'}/h_{30'}$	0,54
$H_{5'}/h_{30'}$	0,34

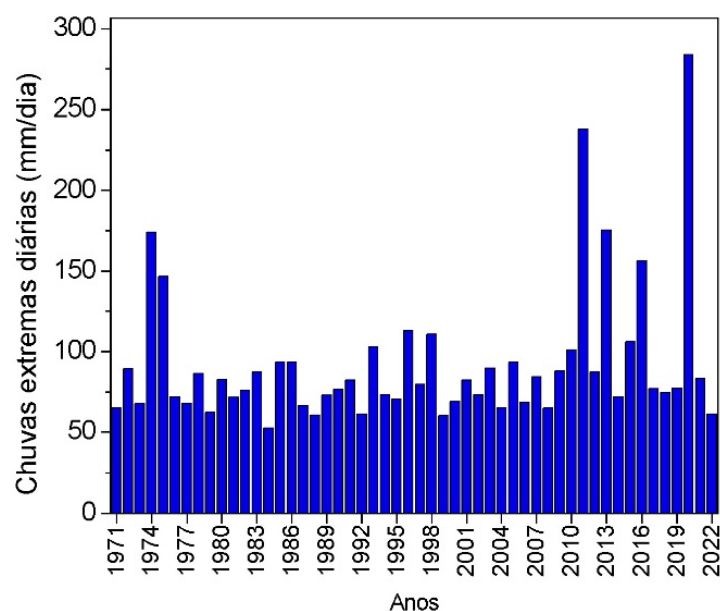
Fonte: CETESB (1986)

A série de dados apresenta 52 anos. Em climatologia é comum o uso de séries de 30 anos, por apresentar grande representatividade do período (VAREJÃO-SILVA, 2001). Neste trabalho a intenção é se investigar efeitos das mudanças climáticas. Optou-se por separar a série em duas partes, em um ano tido como “início das mudanças climáticas”, o ano de 2000. Embora a mudança climática apresente características de alteração contínua, seus efeitos começaram a ser mais claramente entendidos a partir do ano 2000. Desta maneira, neste trabalho haverá três partições temporais: uma série que vai de 1971 até 1999, representando um período “sem mudanças climáticas”; uma série que vai do ano 2000 até o ano de 2022, representando período “de plena mudança climática”, e também a série completa, do ano de 1971 até o ano de 2022.



## 4 RESULTADOS

Gráfico 1 - Valores máximos anuais de chuvas em Botucatu-SP, entre os anos de 1971 a 2022.



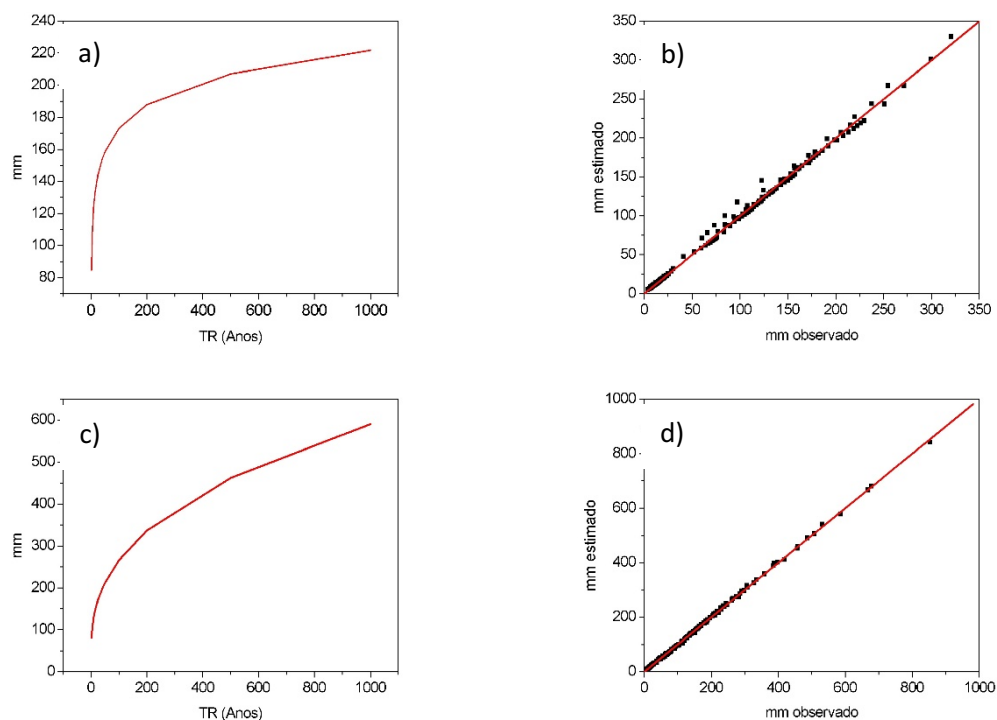
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na Figura 1 estão apresentados valores das maiores chuvas de cada ano, desde o ano de 1971 até o ano de 2022. O ano de menor chuva extrema foi o ano de 1984, com 52,3 mm em um dia. O ano de maior chuva extrema foi o ano de 2020, com uma chuva extrema de 284 mm em um dia. A média dos valores é de  $92,0 \pm 45,5$  mm por dia.

Observando estes valores nota-se que os maiores valores estão na parte direita do gráfico, representando os últimos anos da série. Os anos de 1984 e 1985 são dois anos muito atípicos na série: O ano de 1984 foi o ano de menor volume acumulado anual, representando o ano mais seco da série. O ano de 1985 foi o ano de maior volume anual de chuvas. Estes dois anos destoam dos valores apresentados no restante da série. Excluindo-se estes dois anos temporalmente mais remotos, os grandes valores de chuvas extremas apresentam-se depois do ano de 2010. As maiores chuvas desta série ocorreram entre 2010 e 2020.

Foi feito o ajuste dos modelos de Gumbel e GEV com os dados da Figura 1. Os valores presentes na Figura 2 foram obtidos com o uso das equações 4 (Gumbel) e 6 (GEV). A representação gráfica do ajuste e suas respectivas validações estão apresentados na Figura 2:

Figura 2 - Ajuste das chuvas extremas para o município de Botucatu-SP. a) Ajuste de Gumbel; b) comparação dos dados gerados pelo modelo de Gumbel com os valores observados em Botucatu; c) Ajuste GEV; d) comparação dos dados gerados pelo modelo GEV com os valores observados em Botucatu.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Observando-se as Figuras 2b e 2d nota-se um bom ajuste dos dados. O coeficiente angular da Figura 2a (Gumbel) é de 0,9986, com valor  $r$  de 0,998. Isto denota uma diferença menor que 1% entre os valores estimados e observados. No ajuste GEV, o coeficiente angular foi de 0,999, com valor  $r$  de 0,999, também denotando diferenças menores que 1% entre valores observados e valores estimados.

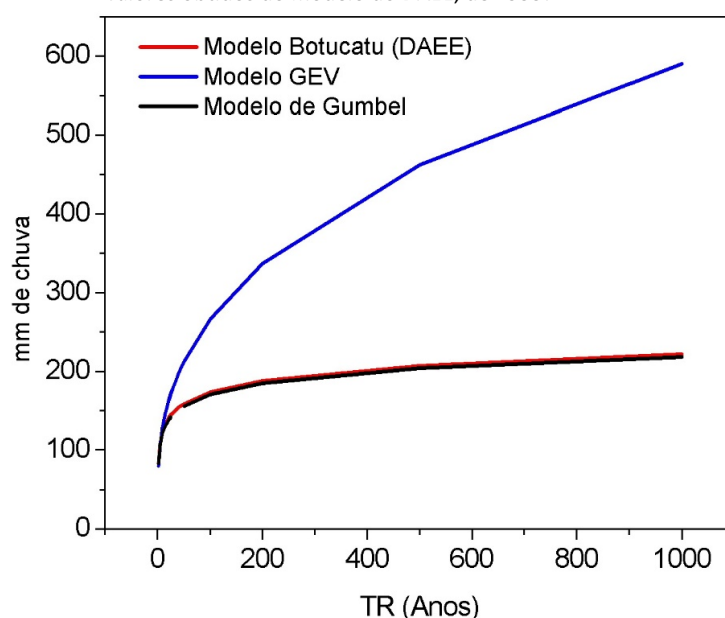
Os parâmetros do modelo de Gumbel, estimado pelo método dos momentos com os dados de chuvas de Botucatu, foram  $\alpha$  igual a 20,9461, e  $\mu$  igual a 76,9960.

Os parâmetros  $\sigma$ ,  $\mu$  e  $\xi$  estimados com os dados de Botucatu foram, respectivamente 15,75438; 73,30686 e 0,37443.

Ambos os modelos demonstraram bom ajuste com os dados obtidos em Botucatu. Isto levanta a dúvida de qual seria o mais adequado para ser utilizado como base para dimensionamento de obras públicas. Lembrando que neste tipo de obras a superestimativa dos valores de chuvas extremas tende a deixar a obra mais segura (em comparação com subestimativas de chuvas), observa-se o modelo GEV apresentando maiores valores de chuvas extremas. O modelo de Gumbel apresentou a tendência de estabilização abaixo dos 250 mm em um dia. O modelo GEV, em um tempo de retorno de 1000 anos apresentou aproximadamente 600mm, sem a tendência de estabilização nesta escala.

Deve-se lembrar que mudanças climáticas têm causado chuvas extremas de maior intensidade e volume. A maior chuva do município de Botucatu foi de 284mm – não aparecendo no modelo de Gumbel em 1000 anos. Em outras localidades tem ocorrido chuvas desta magnitude. Em fevereiro de 2023 houve uma chuva de 683 mm em 24 horas no litoral paulista (Bertioga-SP) (CLIMAINFO, 2025). Na hipótese de que as chuvas extremas estejam aumentando em intensidade e volume, seria mais aconselhável se utilizar o modelo GEV para estimativas de chuvas extremas. Aparentemente o modelo GEV apresenta melhor capacidade de estimar valores de chuvas extremas.

Figura 3: Comparação dos Modelos de Gumbel e GEV ajustados para o município de Botucatu-SP com valores obtidos do modelo do DAEE, de 1999.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na Figura 3 observa-se a comparação entre 3 modelos: os dois modelos ajustados – o de Gumbel e o modelo GEV – com o modelo do DAEE publicado em 1999. É notória a semelhança do ajuste de Gumbel com o modelo do DAEE.

Novamente existe a questão das mudanças climáticas: o modelo do DAEE publicado em 1999 também apresenta estabilização abaixo dos 250mm (em 1000 anos). Aparentemente o modelo de Gumbel e o modelo do DAEE, obtidos de diferentes metodologias, apontam para os mesmos resultados. Porém para maiores valores de chuvas extremas deve-se pensar sobre qual modelo será mais adequado.

Todos os valores – os dois modelos ajustados e mais os valores obtidos do modelo do DAEE, foram parametrizados para a equação 2, com intuito de se padronizar o processamento dos dados. Nesta parametrização utiliza-se quatro parâmetros:  $k$ ,  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

Para esta parametrização utilizou-se o método da desagregação de chuva, com valores presentes no quadro 2 (CETESB, 1986). Para a parametrização, utilizou-se as três partições. Ajustou-se os parâmetros da equação 3 para períodos até o ano 2000, do ano 2000

até o ano de 2022 e para os 52 anos. Foram ajustados os modelos de Gumbel e GEV; também foi parametrizado o modelo do DAEE – a parametrização deste modelo não permite a separação temporal, já que os valores de entrada são apenas o tempo de retorno e o tempo de chuva. Os valores dos quatro parâmetros são apresentados na Tabela 1:

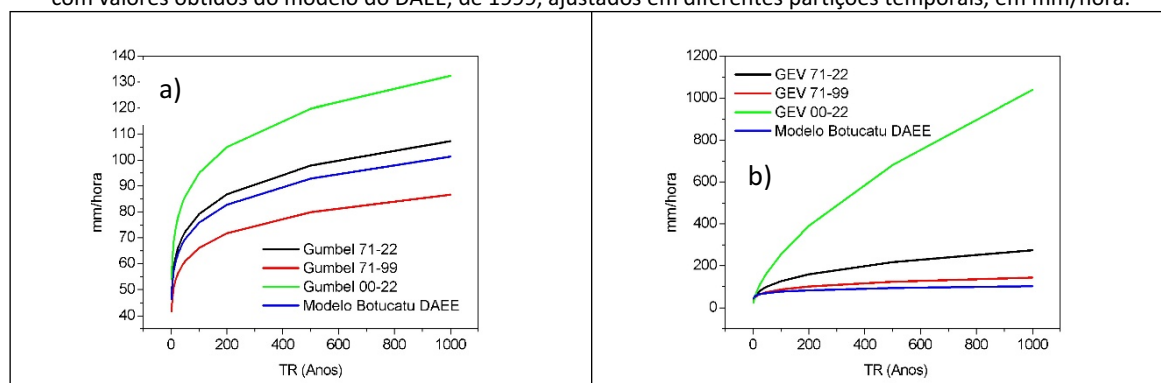
Tabela 1 - Valores dos parâmetros da equação geral das chuvas extremas

Modelos - Séries	K	a	b	c
Gumbel 71-22	933,4613	0,13204	9,79037	0,72435
Gumbel 71-99	834,5594	0,11721	9,79036	0,72435
Gumbel 00-22	1059,608	0,14413	9,79036	0,72435
GEV 71-22	587,1913	0,33451	9,79023	0,72435
GEV 71-99	675,2255	0,2207	9,79088	0,72435
GEV 00-22	334,6736	0,60929	9,79037	0,72435
Modelo DAEE	1401,891	0,12578	15,13178	0,80934

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Na Figura 4 são apresentados os valores ajustados dos modelos de Gumbel e GEV, comparados ao modelo do DAEE.

Figura 4: Comparação dos Modelos de Gumbel(a) e GEV(b) ajustados para o município de Botucatu-SP com valores obtidos do modelo do DAEE, de 1999, ajustados em diferentes partições temporais, em mm/hora.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Novamente nesta Figura 4 nota-se que os valores obtidos com o modelo GEV são maiores aos obtidos com o modelo Gumbel. Porém nesta Figura é possível se observar a diferença entre as séries.

O modelo DAEE, de 1999, é o balizador deste trabalho: trata-se de um modelo já publicado e testado.

No modelo de Gumbel (Figura 4a), observam-se valores, em mm/hora, de chuvas extremas crescentes em função do tempo de retorno. Na comparação do modelo DAEE com o modelo Gumbel completo (71-22), nota-se pequeno incremento nos valores extremos, com grande similaridade entre as duas curvas.

Caso esta comparação fosse feita com dados referentes até o ano de 1999 (linha vermelha na Figura 4a), o modelo Gumbel subestimaria os valores de chuvas extremas. Isto denota que provavelmente o modelo de Gumbel subestima valores de chuvas extremas. Na série completa de Gumbel seus valores são maiores pois nesta modelagem as chuvas de maior volume dos anos 2010-2022 entram no modelo, chuvas estas que são notoriamente as maiores da série.

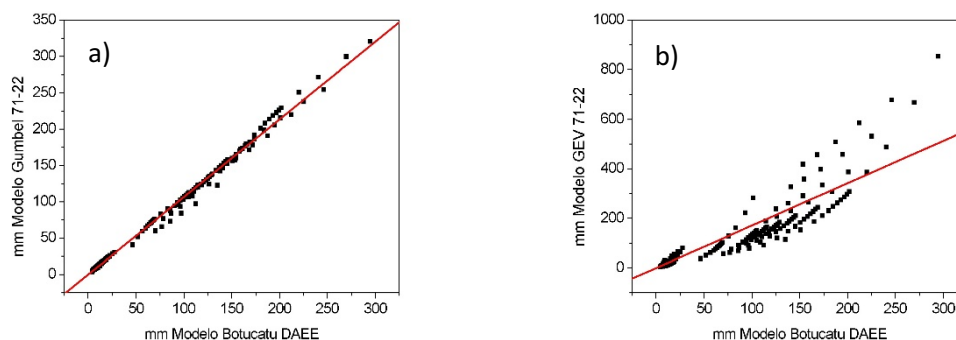
Ao se observar o modelo de Gumbel apenas para o período de 2000 até 2022 (linha verde na Figura 4a) a magnitude de incremento chama a atenção. Considerando-se apenas esse período, pode-se afirmar que a intensidade das chuvas extremas aumentou significativamente.

No modelo GEV (Figura 4b) nota-se alguns comportamentos interessantes. Nesse modelo, o período de 1971 até 1999 apresentou valores próximos ao modelo DAEE, ligeiramente superiores. Lembrando que nesta condição os dois modelos utilizaram praticamente os mesmos anos no ajuste, o modelo GEV pode ser considerado um modelo superestimador.

Em relação à série total, o modelo GEV apresenta maiores valores de chuvas extremas. Quando se considera apenas o período após o ano de 2000 o modelo GEV apresenta valores muito superiores aos outros modelos.

A comparação linear destes modelos com o modelo DAEE é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Comparação linear dos Modelos de Gumbel(a) e GEV(b) ajustados para o município de Botucatu-SP com valores obtidos do modelo do DAEE, de 1999, ajustados na partição de 52 anos.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2025)

O modelo de Gumbel foi o de melhor ajuste. Nesta comparação o coeficiente angular foi de 1,068, com  $r$  igual a 0,997. Com isto, pode-se afirmar que o modelo de Gumbel, ajustado para 52 anos em Botucatu, apresenta valores em média 6,8% superiores aos ocorridos até 1999 (ano do modelo DAEE).

O modelo GEV, embora aparentemente mais promissor no estudo das mudanças climáticas, deu um ajuste de menor desempenho: seu coeficiente angular foi de 1,709, com  $r$  de 0,903. Este menor desempenho deve-se provavelmente por ser um modelo nitidamente fornecedor de maiores valores – em média valores 70,9% maiores.



## **5 CONCLUSÃO**

Mudanças climáticas estão alterando o padrão das chuvas extremas. O modelo antigo de 1999 se alterou. O modelo de Gumbel ajustado para Botucatu demonstrou um aumento de 6,8% no volume e intensidade das chuvas extremas. O modelo GEV demonstrou um aumento de até 70,9% nos valores das chuvas extremas em Botucatu-SP, quando comparado ao modelo anterior.



## REFERÊNCIAS

- ASSIS, F. N.; ARRUDA, H. V.; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística a climatologia**: Teoria e prática. 1. ed. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1996. 161 p.
- BUSSAB, W. D. O.; MORETTIN, P.A. **Estatística Básica**. 10. ed. São Paulo: Saraiva, 2024. 624 p.
- DUARTE, S. N. et al. **Hidrologia**: Conceitos e exercícios com aplicações práticas. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 2024. 563 p.
- FRANCO, J. F. et al. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu- SP. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 1, p. 77-92, Jan./Mar. 2023. DOI 10.15809/irriga.2023v28n1p77-92. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2023v28n1p77-92>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- IPCC, 2023: **Summary for Policymakers**. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- JÚNIOR, M. J.; MAGNI, N. G. M. **Equações de chuvas intensas do estado de São Paulo**. ed revisada. São Paulo: DAEE e Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. 141 p.
- MARENGO, J.A. et al. O maior desastre climático do Brasil: Chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 38, n. 112, p. 203 -227. DOI [10.1590/s0103-4014.202438112.012](https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012) Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- RIPPLE, W. J. et al. The 2024 state of climate report: Perilous times on planet earth. **BioScience**, Oxford, v. 74, n. 12, p. 812-824, Dec 2024. DOI [10.1093/biosci/biae087](https://doi.org/10.1093/biosci/biae087). Disponível em: <https://doi.org/10.1093/biosci/biae087>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- RIZZOTTO, M. L. F.; COSTA A. M.; LOBATO, L. V. C. Crise climática e os novos desafios para os sistemas de saúde: o caso das enchentes no Rio Grande do Sul/Brasil. **Saúde em debate**, Rio de Janeiro, v. 48, n. 141, p. e141ED, ABR - JUN 2024. DOI 10.1590/2358-28982024141EDP. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2358-28982024141EDP>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- SRIVASTAVA, S.; MEHTA, L.; NAESS, L. N. Increased attention to water is key to adaptation. **Nature Climate Change**, Londres, v. 75, n. 12 p. 113-114, Fev. 2022. DOI 10.1038/s41558-022-01277-w. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01277-w>. Acesso em: 17 abr. 2025.
- Tragédia das chuvas no litoral norte de SP completa dois anos com moradores voltando para área de risco. **Climainfo**, São Paulo, 25 fev. 2025. Disponível em: <https://climainfo.org.br/2025/02/20/tragedia-das-chuvas-no-litoral-norte-de-sp-completa-dois-anos-com-moradores-voltando-para-areas-de-risco/#:~:text=Entre%2018%20e%2019%20de,nunca%20antes%20registrado%20no%20pa%C3%ADs>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: Ciência e aplicação. 2.ed. Porto alegre :Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 943 p.
- VAREJÃO-SILVA; M.A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Brasília: INMET gráfica
- YNOUE, R. Y. et al. **Meteorologia**: Noções básicas. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 184 p.





---

## DECLARAÇÕES

---

### CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Enzo Dal Pai.
  - **Curadoria de Dados:** Isaque Miyabara Agostinho
  - **Análise Formal:** José Rafael Franco
  - **Aquisição de Financiamento:** Enzo Dal Pai
  - **Investigação:** Victor Crespo de Oliveira.
  - **Metodologia:** Victor Crespo de Oliveira
  - **Redação - Rascunho Inicial:** Isaque Miyabara Agostinho
  - **Redação - Revisão Crítica:** José Rafael Franco; Pedro Vitor Soares Adrien
  - **Revisão e Edição Final:** Pedro Vitor Soares Adrien.
  - **Supervisão:** Enzo Dal Pai.
- 

### DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, [Pedro Vitor Soares Adrien, Isaque Miyabara Agostinho, José Rafael Franco, Victor Crespo de Oliveira e Enzo Dal Pai] declaro(amos) que o manuscrito intitulado "[Efeito das mudanças climáticas nas chuvas extremas no município de Botucatu - SP]":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
  2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
  3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-