



O IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL – BRASIL

Juliana Marques Schontag¹
Michel Nobre Muza²

Resumo: Conhecer a intensidade das precipitações e sua distribuição temporal são de suma importância para o dimensionamento de obras hidráulicas. Neste estudo buscou-se analisar a ocorrência de precipitação em municípios localizados no noroeste do estado do Rio Grande do Sul, avaliando a Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e equações de chuva. Foram comparados dois métodos de desagregação da precipitação máxima anual registrada, o método amplamente difundido e replicado em território nacional proposto pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo (CETESB) e o método sugerido por Robaina e Peiter para o estado do Rio Grande do Sul. As diferenças na intensidade da precipitação obtida utilizando ambas as metodologias foram mínimas no que se refere ao dimensionamento de obras hidráulicas. Contudo, para a intensidade de precipitação em cenários futuros (até 2040), demonstra-se uma diminuição dos valores de intensidade de precipitação para todos os tempos de duração e períodos de retorno.

Palavras-chave: Precipitação máxima. Desagregação de precipitação. Curvas IDF. Clima Presente. Cenários Futuros.

THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE INTENSITY-DURATION-FREQUENCY CURVES OF PRECIPITATION IN NORTHWEST RIO GRANDE DO SUL – BRAZIL

Abstract: The study on the intensity of rainfall and its temporal distribution are important for the standards for designing civil engineering infrastructures. It was to analyze the occurrence of precipitation in municipalities located in the northwest of the state of Rio Grande do Sul, evaluating the Intensity-Duration-Frequency (IDF) and rainfall equations. To provide the sub-daily precipitation values, two methods for make data disaggregated were compared, the method known by CETESB from Environmental Technology Company from State of São Paulo and the method suggested by Robaina and Peiter for the State of Rio Grande do Sul. Differences in the intensity of precipitation obtained using both methodologies were minimal regarding the dimensioning of hydraulic works. However, for the rainfall intensity in future scenarios (to 2040), a decrease in the rainfall intensity values is demonstrated for all duration times and return periods.

Keywords: Maximum precipitation. Precipitation breakdown. IDF equations. Present Climate. Future Scenarios.

¹ Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS, Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, Brasil, juliana.schontag@uffs.edu.br, <https://orcid.org/0000-0001-5279-2669>

² Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Meteorologia, Florianópolis, Brasil, michel.muza@ifsc.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-0410-1514>

EL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL NOROESTE DE RIO GRANDE DO SUL – BRASIL

Resumen: Conocer la intensidad de las precipitaciones y su distribución temporal son de suma importancia para el dimensionamiento de obras hidráulicas. En este estudio, buscamos analizar la ocurrencia de precipitación en municipios ubicados en el noroeste del estado de Rio Grande do Sul, evaluando las ecuaciones Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) y ecuaciones del lluvia. Se compararon dos métodos de desagregación, el método sugerido por CETESB de la Empresa de Tecnología Ambiental del Estado de São Paulo y el método sugerido por Robaina y Peiter para el estado de Rio Grande do Sul. La intensidad de la precipitación obtenida con ambas metodologías fueron mínimas con respecto al dimensionamiento de las obras hidráulicas. Sin embargo, para la intensidad de lluvia en escenarios futuros (hasta 2040), se demuestra una disminución en los valores de intensidad de lluvia para todos los tiempos de duración y períodos de retorno.

Palabras clave: Precipitación máxima. Desagregación. Curvas IDF. Clima Actual. Escenarios futuros.

Introdução

Existem inúmeras evidências de que as mudanças climáticas estão em curso, documentadas em uma série de estudos realizados nas últimas décadas pelo Painel Internacional para Mudanças Climáticas (IPCC), orgão vinculado à Organização das Nações Unidas. As mudanças climáticas também podem afetar os índices de precipitação, duração e frequência. As pesquisas recentes demonstram que estamos testemunhando uma ampliação e intensificação de eventos extremos, como as chuvas intensas em curíssimos prazos, bem como prolongados períodos de estiagem (Cerón et. al., 2021; Regoto et. al., 2021). Essas mudanças na precipitação têm um impacto direto no dimensionamento de obras hidráulicas como reportado por Trenberth et al. (2007).

Uma das relações amplamente empregadas na hidrologia para avaliar as precipitações máximas em uma localidade dentro de uma bacia hidrográfica é conhecida como a curva de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) de acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do estado de São Paulo

(CETESB, 1979) e Robaina e Peiter, 1992 (aqui mencionado como RP92). As curvas IDF estabelecem uma relação entre a intensidade máxima da precipitação, sua duração ao longo do tempo e sua probabilidade ou período de recorrência (Basso et al., 2019).

As curvas IDF são utilizadas para estimar a erosão do solo, para drenagem de forma geral, determinar vazões de projeto para pequenas bacias e apoiar a determinação para bacias maiores. A influência que as curvas IDF possuem sobre a infraestrutura brasileira de estradas, ruas, condutos, canais e barragens são altas (Batista et al., 2018).

No Brasil as curvas IDF foram determinadas em 1958 para um grande número de cidades brasileiras por Otto Pfastetter, junto ao Departamento Nacional de Obras de Saneamento. Este trabalho ainda é utilizado em todo o Brasil, apesar dos parâmetros estarem desatualizados, pois foram obtidos de séries históricas passadas. Contudo, séries temporais de variáveis atmosféricas como a precipitação podem conter tendências na escala temporal interanual a interdecadal, ou ainda uma variabilidade de mais baixa frequência. O conceito de estacionariedade dos eventos, podem estar levando ao super ou subdimensionamento das obras hidráulicas, o que seria desastroso em se tratando de obras com risco assumido, por exemplo, como barragens.

Dificilmente, uma série de precipitação não apresentará suas propriedades estatísticas mudando com o tempo, podendo em alguns casos apresentar uma fraca estacionariedade. Além disso, com a variabilidade do clima e a soma do efeito das mudanças climáticas, essa estacionariedade pode ser comprometida.

Assim, esse estudo propõe um levantamento dos dados de precipitação das estações meteorológicas existentes no noroeste do Rio Grande do Sul em um período climatológico contemporâneo, a fim de tratar esses dados e estudá-los, com o propósito de determinar parâmetros como a curva IDF para essa região.

A região noroeste do estado do Rio Grande do Sul é preponderantemente agrícola e o conhecimento da IDF da precipitação são de elevada importância para o dimensionamento de obras hidráulicas preservando esse recurso tanto para períodos

chuvosos quanto para a estiagem. Assim, esse estudo é um subsídio atualizado para o dimensionamento de obras hidráulicas na região.

Desenvolvimento

Dados do clima presente e futuro.

Esse estudo utilizou dados de estações meteorológicas distribuídas no noroeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1a) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com informações de referência reconhecida e disponibilidade de longo período. As estações meteorológicas estão localizadas no município de São Luiz Gonzaga e Cruz Alta (estações meteorológicas convencionais e automáticas) e nos municípios de Santa Rosa e Santo Augusto (somente automáticas). A variável meteorológica utilizada nesse estudo foi a precipitação ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$ ou $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

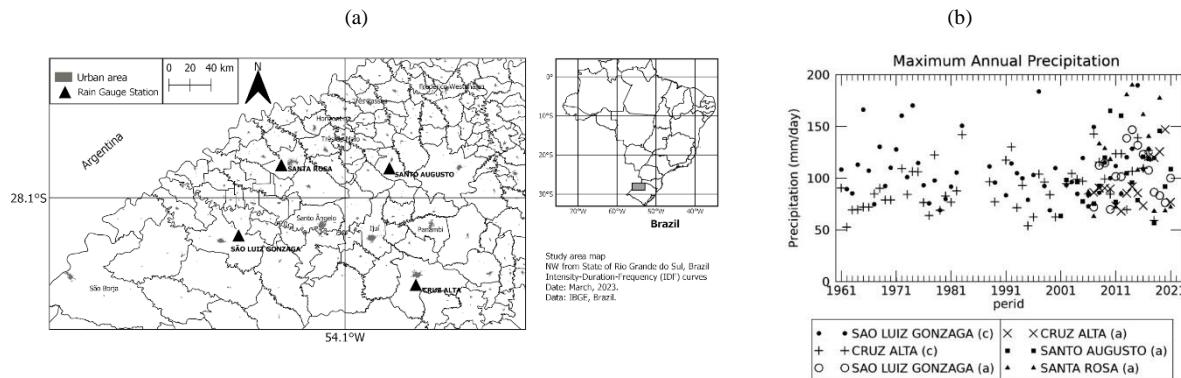
Na Figura 1b, é possível observar que o período de análise utilizado foi de 1961 a 2021 (61 anos) para a estação meteorológica de São Luiz Gonzaga e Cruz Alta (convencional) e de 2000 a 2021 para as estações meteorológicas automáticas nos demais municípios. A variabilidade do clima de longo período e também mais recente apresenta-se relativamente condizente. Há dados faltantes nos anos entre 1981-1984, já no restante do período, os dados faltantes são menos de 1% do período considerado.

Os cenários futuros globais são representados por dados climáticos espacializados em pontos de grade, com resolução horizontal de 10 km. Essas informações estão disponíveis em um banco de dados fornecido pelo projeto WorldClim (WORLDCLIM.ORG), que pode ser acessado por grupos de pesquisa em modelagem climática de várias nações. Além disso, esses dados são utilizados por iniciativas como o Coupled Model Intercomparison Project – CMIP, que é coordenado pelo World Climate Research Program – WCRP. Este projeto reúne os resultados dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (Eyring et al., 2016) e também é acessível através do Serviço de Mudanças Climáticas

Copernicus (CDS.CLIMATE.COPERNICUS.EU), que faz parte da União Europeia. As variáveis atmosféricas são temperaturas mínima, máxima e média, além da precipitação. Os períodos disponíveis são 2021 a 2040, 2041 a 2060, 2061 a 2080 e 2081 a 2100, sendo apresentados em frequência mensal ou diária. Para esta análise específica, a variável principal utilizada foi a precipitação diária, focando no período de 2021 a 2040 e centrando-se na localização indicada na Figura 1b.

Dentre os diversos cenários futuros projetados pelos modelos climáticos globais, foram considerados para esse estudo o SSP370 e o SSP585. O cenário SSP370 representa um nível de emissão de gases de efeito estufa de médio a alto. Reflete um futuro em que as emissões são moderadamente controladas, mas ainda há uma significativa emissão de poluentes para a atmosfera. As consequências futuras desse cenário estão muito próximas de um cenário realista, mesmo com alguma mudança parcial de conceitos na sociedade atual em relação às emissões de gases de efeito estufa.

Figura 01 - (a) Localização da área de estudo no Noroeste no estado do Rio Grande do Sul (Brasil) mostrando zonas urbanas (IBGE, 2021) e estações meteorológicas (INMET). (b) Série temporal 1961-2021 da precipitação máxima anual nas estações meteorológicas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O cenário SSP585 representa um aumento significativo das emissões dos gases efeito estufa para atender a demanda da sociedade atual e suas expectativas de crescimento. É um cenário de alto aquecimento global, no qual as emissões de gases de efeito estufa continuam a aumentar substancialmente ao longo do tempo, levando a consequências mais severas em termos de mudanças climáticas.

Os dados de modelos climáticos avaliados foram o CanESM5 e o MIROC6. O CanESM5 é um modelo de origem canadense. A sensibilidade climática do CanESM5 refere-se à resposta desse modelo em relação ao aumento do dióxido de carbono (CO₂) em comparação com as condições climáticas atuais (Fick et al., 2017). A sensibilidade climática do CanESM5 é uma das maiores entre os modelos pesquisados e é avaliada em 5.6 em uma escala que varia de 0 a 6. Isso significa que o CanESM5 é mais sensível às mudanças nos níveis de CO₂ e pode prever mudanças climáticas mais significativas em resposta a essas alterações.

O outro modelo avaliado foi o MIROC6. Este é um modelo climático japonês e é caracterizado por ser menos sensível às mudanças nos níveis de CO₂ em comparação com o CanESM5. A sensibilidade climática do MIROC6 é avaliada em 2.6, o que indica uma menor resposta às mudanças nos níveis de CO₂ em comparação com o CanESM5.

Curva IDF (Intensidade-Duração-Freqüência)

Para a elaboração da curva IDF foi proposta a seguinte metodologia: as equações de IDF foram ajustadas por séries de precipitações máximas anuais.

Nesse processo, presume-se que as precipitações intensas seguem a distribuição estatística do tipo I de Fisher-Tipett, que é também conhecida como a distribuição de Gumbel. Essa abordagem levará à obtenção de uma equação geral, referida como "*tipo Chen*".

A partir dos dados obtidos foi adotada a distribuição de valores extremos do tipo I, também conhecida como distribuição de *Gumbel*, *Fisher-Tipett* tipo I ou dupla exponencial. Essa distribuição é muito utilizada na análise de freqüência de eventos hidrológicos, inclusive com inúmeras aplicações na determinação de curvas de IDF de precipitações intensas e estudos de vazões de enchentes (Naghettini; Pinto, 2007).

Com isso, optou-se em utilizá-la para o ajuste dos dados da região.

A fim de verificar a adequação da função probabilidade, os dados de precipitação diária máxima anual (a partir de agora, referida como somente como precipitação máxima) foram colocados em ordem decrescente. Com os dados ordenados, calculou-se a frequência da série de dados (Eq. 1).

$$P = \frac{m}{(n+1)} \quad (1)$$

Onde: m = ordem de dados na série, n = número total de dados da série.

Com a frequência pode-se calcular o período de retorno, que é o inverso da frequência, calculado pela expressão 2.

$$T = \frac{1}{P} \quad (2)$$

No qual: T = Período de retorno em anos e P = Frequência de ocorrência do evento.

Obtido o período de retorno, calculou-se a variável reduzida de *Gumbel* que é utilizada na distribuição, dada pela expressão 3.

$$y = -\ln \ln \left[-\ln \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

Sendo que: y = Variável reduzida da distribuída e T = Período de retorno em anos.

Calculou-se a média e o desvio padrão das variáveis reduzidas calculadas para cada período de retorno, e assim calculou-se a variável reduzida da série de precipitação máxima, pelas expressões 4 e 5.

$$y = \frac{(P - x_f) \cdot s_y}{s_p} \quad (4)$$

$$x_f = \frac{x_{med} - (s_p \cdot y_{med})}{s_y} \quad (5)$$

Onde: P = Precipitação máxima naquele ano, S_y = desvio padrão amostral da variável y de *Gumbel*, S_p = Desvio padrão amostral da precipitação máxima ao longo dos anos, x_{med} = Média da precipitação e y_{med} = Média das variáveis reduzidas de *Gumbel*.

Com a variável reduzida da série, calculou-se a frequência e o período de retorno, pelas expressões 6 e 7.

$$P = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (6)$$

$$T = \frac{1}{P} \quad (7)$$

Com essas informações, calcula-se o parâmetro k_1 , para cada valor de precipitação máxima, dado pela expressão 8.

$$k_1 = \frac{(y - y_n)}{S_n} \quad (8)$$

No qual: y = variável reduzida da série de dados de precipitação máxima, y_n = é a média das variáveis reduzidas de *Gumbel*, S_n = desvio padrão das variáveis reduzidas da série de *Gumbel*.

Para verificar se a distribuição de *Gumbel* pode ser aplicada à série de dados de precipitação máxima, utilizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. As equações (9) e (10) medem as distâncias (verticais) entre as curvas das duas funções, teórica e empírica, para que com isso se possa avaliar a diferença entre as duas funções.

$$DN + |F_{(xi)} - Fn_{(xi)}| \quad (9)$$

$$DN - |F_{(xi)} - Fn_{(xi-1)}| \quad (10)$$

Onde: $F_{(xi)}$ = Frequência de Gumbel calculada, $F_{n_{(xi)}}$ = Frequência da série de dados de precipitação máxima calculadas.

Dessa forma, se determina o *D_{crítico}*, que é o valor que determinará se a hipótese de normalidade dos dados será rejeitada ou aceita. Se os valores de *DN+* e *DN-* forem inferiores ao valor crítico *D_{crítico}*, podemos concluir que a amostra segue a distribuição de Gumbel. Portanto, torna-se viável a realização de uma extração de dados para calcular os valores de precipitação máxima em períodos de recorrência que ultrapassem o período de dados disponíveis. Esse teste de aderência deve ser realizado para a precipitação máxima em cada ponto da curva, ou seja, para os dados diários de pluviometria de cada ano individualmente.

Para a construção da curva IDF é fundamental obter a precipitação máxima para cada combinação de duração e período de retorno, determinada com base nas necessidades específicas de aplicação ou no projeto de engenharia em questão. Neste estudo, os tempos de retorno selecionados foram 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, pois abrange uma gama de aplicações de áreas de interesse na região noroeste do Rio Grande do Sul. Após isso, se ajusta uma curva de distribuição de probabilidade que melhor interpreta os dados observados de precipitação máxima.

Para obter a intensidade (i) para cada período de retorno com base na precipitação máxima, a distribuição *Gumbel* é aplicada.

Para o cálculo da intensidade de precipitação, obtém-se o parâmetro K_a (Eq. 11), que depende das variáveis de distribuição de Gumbel e do período de retorno. Assim, encontra-se intensidade de precipitação para períodos de retorno maiores que a série de dados.

$$K_a = \frac{(y_t - y_n)}{S_n} \quad (11)$$

$$y_t = -\ln \ln \left(-\ln \ln \left[\frac{(T-1)}{T} \right] \right) \quad (12)$$

Sendo que: y_t = Variável reduzida, T = Período de retorno, y_n = Média da variável reduzida de Gumbel e S_n = desvio padrão da variável reduzida de Gumbel. Desse modo, se calculou a intensidade de precipitação diária (Eq. 13) para cada período de retorno desejado.

$$P = X_{med} + K_a \cdot S_p \quad (13)$$

Onde: K_a = Parâmetro, S_p = desvio padrão amostral da precipitação máxima ao longo dos anos e X_{med} = média da precipitação.

Após, foi aplicada a tabela de desagregação proposta pela CETESB (1979). Também se utilizou a sugerida por RP92 que propuseram um modelo de desagregação para chuvas com duração de 24h medidas em pluviômetros no estado do Rio Grande do Sul. A função proposta está descrita na equação 14.

$$f(t) = 0,00008 \cdot t + 0,14 \cdot \ln \ln(1 + 0,33 \cdot t) \quad (14)$$

Onde t é a duração da precipitação expresso em minutos.

O objetivo da desagregação é encontrar a intensidade de precipitação para cada duração definida e para cada período de retorno selecionado. Assim, teremos a intensidade de precipitação e a duração, onde é possível obter a precipitação para cada período de retorno. A equação geral da curva IDF (Eq. 15) tem sido usada por Aragão et. al; (2000); Damé (2006); Gonçalves (2012) e Silva et. al; (2013).

$$i = \frac{K \cdot Tr^m}{(t+b)^n} \quad (15)$$

No qual: i = intensidade máxima dada em $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Tr = Período de retorno em anos, t = duração do evento em minutos. Os demais parâmetros K , m , b , n são determinados dependendo do local de análise. Esta é uma fórmula empírica que resume a experiência de outros estudos, como por exemplo os desenvolvidos por Bell (1969), e BELL adaptada por Uehara et al. (1980). Como Chen (1983) desenvolveu

uma fórmula de IDF generalizada para qualquer local nos Estados Unidos, denominada equação do *tipo Chen*.

Tabela 1 – Precipitação máxima diária para os tempos de retornos estabelecidos

Tempo de retorno – T (anos)	2	5	10	25	50	100
Precipitação máxima diária – (mm.dia ⁻¹)	126,74	159,86	181,79	209,50	230,06	250,46

Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

A partir dos valores de precipitação máxima foram empregados dois métodos de desagregação de dados, nomeadamente o método proposto pela CETESB e o RP92. Isso permitiu a obtenção de valores de precipitação com uma maior precisão na discretização temporal, conforme apresentado na Tabela 2.

Na Figura 2 são comparadas as curvas IDF obtidas em ambos os métodos de desagregação empregados, onde se destaca a principal característica de eventos de precipitação de curta duração apresentando maior intensidade.

Ao comparar os resultados da curva IDF e os parâmetros das equações constata-se uma variação nos valores obtidos, o que resulta em uma superestimação das vazões em obras hidráulicas quando se utiliza o método da CETESB (Figura 2a) em comparação com o RP92 (Figura 2b). Isso se deve as características de intensidade do regime de chuvas onde cada método foi desenvolvido e pode potencialmente tornar as obras de drenagem mais dispendiosas e menos eficazes.

Ao analisar as curvas IDF obtidas foi possível identificar uma relação inversa peculiar entre a intensidade e a duração das precipitações máximas. Isso significa que os valores mais elevados de intensidade estão associados às menores durações em todos os períodos de retorno, conforme também destacado por Netto et al. (1998).

Além disso, é notável que à medida que os valores de tempo de precipitação máxima aumentam, a variação da intensidade diminui em todos os períodos de retorno, de acordo com o que também foi observado em Ferraz et al. (2020) no estado da Bahia.

Os parâmetros obtidos com método da CETESB foram $K=1253.04$; $m=0.16$; $b=9.92$ e $n=0.73$ e com RP92, $k=1151.40$; $m=0.16$; $b=5.81$ e $n=0.75$. A partir das equações obtidas para cada um dos métodos propostos, pode-se perceber que houve uma variação dos parâmetros, exceto o parâmetro m .

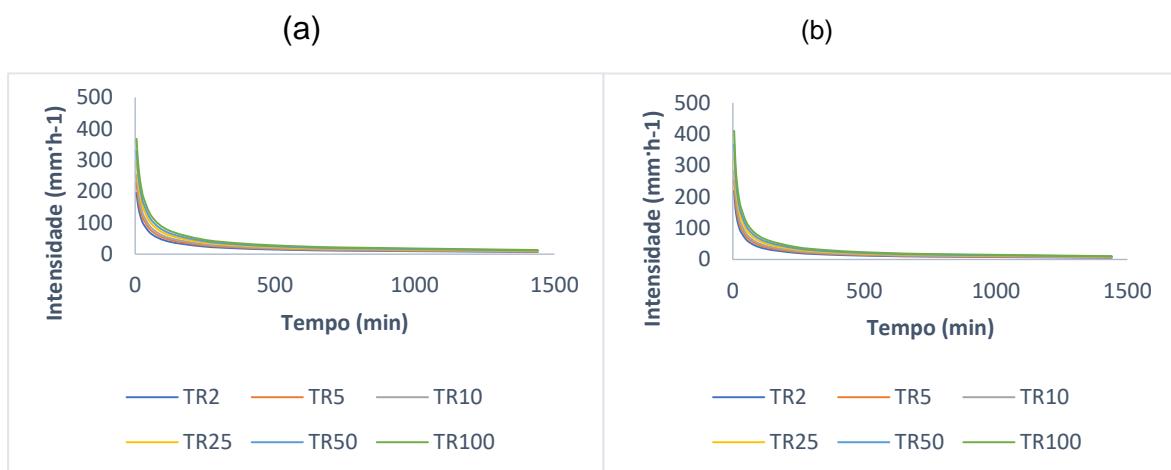
Tabela 2 – Valores obtidos pelos métodos de desagregação da CETESB e RP92

TR (anos)	2	5	10	25	50	100	2	5	10	25	50	100
t (min)	CETESB						RP92					
	i ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)											
1440	6,02	7,59	8,64	9,95	10,93	11,90	5,17	6,52	7,41	8,54	9,38	10,21
720	10,23	12,91	14,68	16,92	18,58	20,22	8,52	10,74	12,21	14,08	15,46	16,83
600	11,85	14,94	16,99	19,58	21,51	23,41	9,78	12,34	14,04	16,17	17,76	19,34
480	14,09	17,77	20,21	23,29	25,57	27,84	11,60	14,63	16,64	19,18	21,06	22,92
360	17,34	21,87	24,87	28,66	31,47	34,26	14,44	18,22	20,72	23,87	26,22	28,54
240	22,76	28,70	32,64	37,62	41,31	44,97	19,63	24,75	28,15	32,44	35,62	38,78
120	37,57	47,38	53,88	62,10	68,19	74,24	32,75	41,30	46,97	54,13	59,44	64,71
60	60,68	76,54	87,04	100,31	110,15	119,92	53,29	67,21	76,43	88,08	96,72	105,30
30	89,81	113,28	128,82	148,46	163,02	177,48	83,54	105,37	119,82	138,08	151,63	165,08
25	98,08	123,71	140,67	162,11	178,02	193,81	93,29	117,67	133,81	154,20	169,33	184,35
20	109,12	137,64	156,52	180,38	198,07	215,64	106,23	133,99	152,37	175,59	192,82	209,92
15	125,74	158,60	180,35	207,84	228,23	248,47	124,44	156,96	178,49	205,70	225,88	245,91
10	145,50	183,52	208,69	240,50	264,10	287,52	152,53	192,39	218,79	252,13	276,87	301,42
5	183,22	231,10	262,80	302,85	332,57	362,06	203,63	256,84	292,07	336,59	369,61	402,39

Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

Ao considerar que ambos os métodos utilizam coeficientes de desagregação diferentes, mas o estudo é realizado na mesma região, isso em parte explica a diferença entre os resultados obtidos.

É interessante notar que o parâmetro K funciona como um multiplicador de escala, semelhante ao parâmetro b , enquanto os parâmetros m e n , que foram os mais similares, atuam como fatores de potência.

Figura 2 – Curvas IDF pelo método de desagregação da (a) CETESB e (b) RP92

Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

A similaridade dos parâmetros também pode ser notada em um estudo na cidade de Iraí no norte do estado Rio Grande do Sul, na qual obteve-se os parâmetros para as equações IDF $K=1086.604$; $m=0.184$; $b=9.886$ e $n=0.728$ (ARBOIT et. al; 2017). Em outro estudo realizado na cidade de Itaqui, localizada mais a centro-oeste do estado gaúcho, Ogassawara e Oliveira (2017), obtiveram os seguintes parâmetros, $K=991.9557$; $m=0.1591$; $b=10$ e $n=0.7305$, respectivamente.

Já em outro estudo realizado por Oliveira et al. (2018) nos municípios de Campo Bom e Porto Alegre foi utilizado o método de desagregação proposto por RP92, onde foram obtidos os parâmetros $K=863.3315$; $m=0.1401$; $b=7.6983$ e $n=0.7315$ (Campo Bom) e $K=755.4064$; $m=0.1471$; $b=7.4266$ e $n=0.7242$ (Porto Alegre). Os parâmetros apresentam divergências por se tratarem de regiões diferentes, mesmo que tenham regimes climáticos de precipitação máxima semelhantes.

Desta forma, considerando que o estudo realizado por RP92 foi desenvolvido com coeficientes de desagregação aplicáveis ao Rio Grande do Sul, presume-se que seja o método mais adequado devido à sua capacidade de gerar dados mais realísticos para a região. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de atualização de estudos da IDF, pois a importância dos dados de precipitação máxima no dimensionamento de obras de engenharia reside na obtenção de parâmetros mais

confiáveis através do monitoramento e da consistência das séries temporais relacionadas.

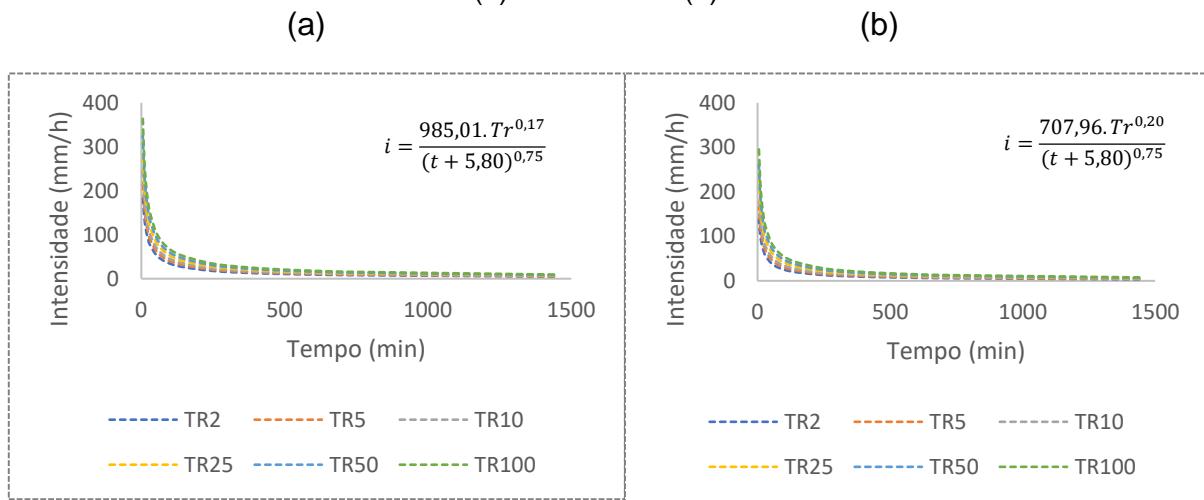
A pesquisa analisou dados de precipitação máxima de cenários futuros (2021-2040) baseados em modelos climáticos do IPCC da ONU. A comparação do cenário futuro com o clima atual teve como referência o método de desagregação RP92. As curvas IDF foram obtidas inicialmente para o cenário SSP370 para ambos modelos climáticos, CanESM5 e MIROC6 (Figuras 3a e 3b, respectivamente).

Os resultados revelam uma redução na intensidade de precipitação para todos os tempos de duração e períodos de retorno no cenário futuro em comparação com o clima presente, que podem ser observadas em ambos modelos nas Figuras 4 e 5. Essa redução foi mais significativa para durações menores que 40 minutos (20-50 mm) e acumulados de durações maiores (3-5 mm). À medida que os tempos de retorno aumentaram, as diferenças na intensidade de precipitação entre o clima atual e os cenários futuros diminuíram.

O cenário SSP370, associado a emissões de CO₂ médias a altas, foi considerado mais realista. O modelo MIROC6, menos sensível, mostrou uma maior diferença em relação ao CanESM5, que é mais sensível às mudanças globais de CO₂. Isso sugere que o MIROC6, mais estável em termos climáticos, produziu resultados com maior discrepância para a região de estudo em relação ao CanESM5.

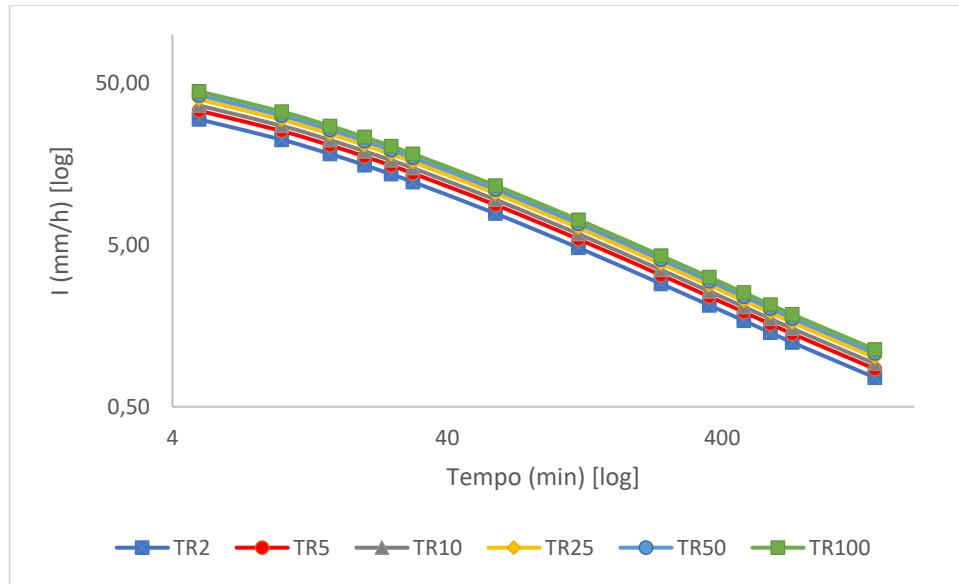
No cenário SSP585 (Figuras 6a), mais pessimista em comparação com o SSP370, usando o modelo CanESM5, também foi observada uma redução na precipitação máxima. No entanto, à medida que os tempos de retorno aumentam, a diferença percentual entre o clima atual e futuro diminui, conforme ilustrado na Figura 7. Além disso, notou-se uma diferença significativa entre o clima presente e futuro para diferentes tempos de retorno.

Figura 3 – Curvas IDF com desagregação proposta por RP92 para o cenário SSP370 e o Modelo (a) CanESM5 e (b) MIROC6.



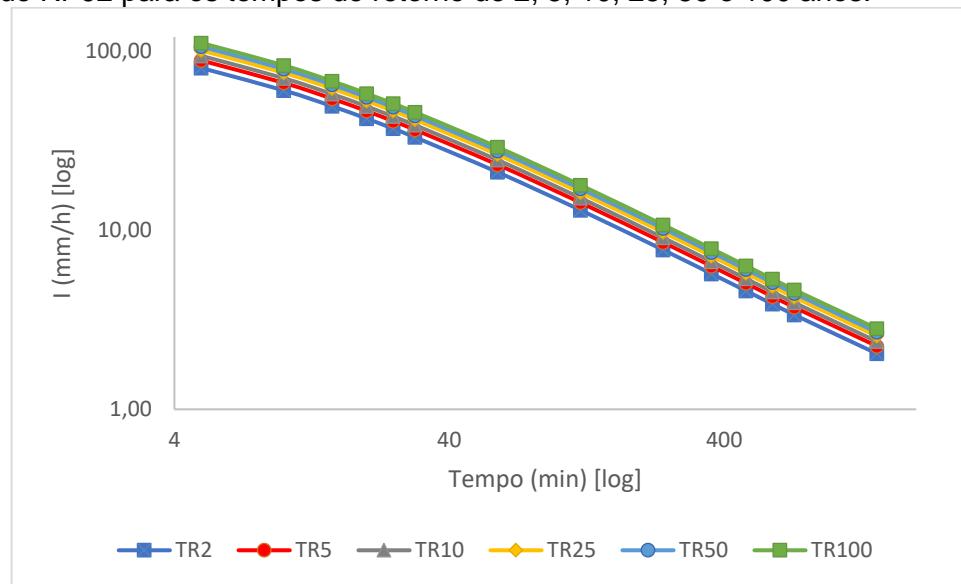
Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

Figura 4 – Diferença entre as curvas IDF obtidas com os dados atuais de precipitação (2000 até 2020) e os cenários futuros SSP370 e os modelos CanESM5 (2021 até 2040) desagregadas pelo método de RP92 para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

Figura 5 – Diferença entre as curvas IDF obtidas com os dados atuais de precipitação (2000 até 2020) e os cenários futuros SSP370 e modelo MIROC6 (2021 até 2040) desagregadas pelo método de RP92 para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

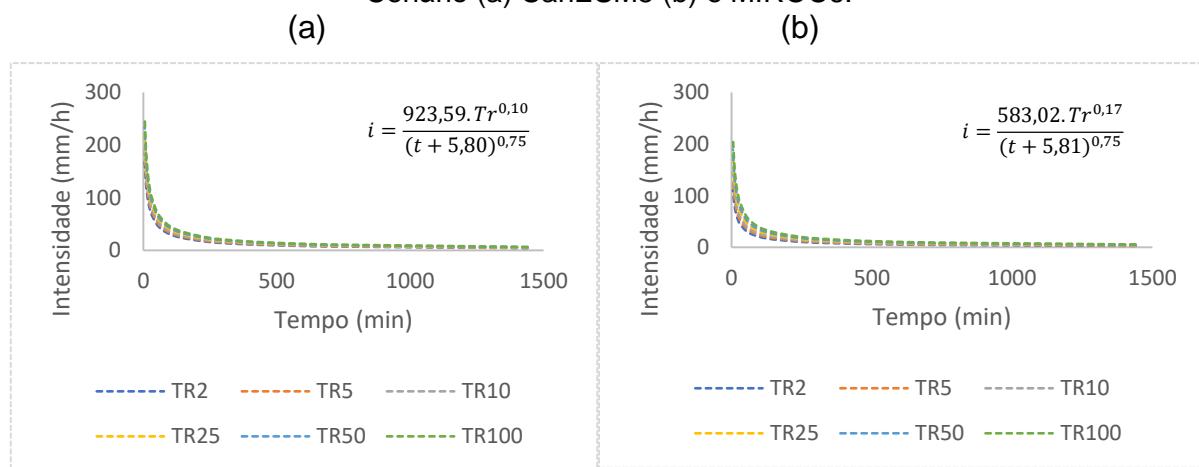


Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

O modelo MIROC6 também registrou uma diminuição na precipitação máxima para todos os tempos de duração e períodos de retorno, com uma diferença clara entre o clima atual e futuro. Para os primeiros 40 minutos, essa diferença variou de 25 a 195 mm, enquanto para tempos de retorno mais longos, ficou entre 2,5 e aproximadamente 32 mm, conforme evidenciado na Figura 8.

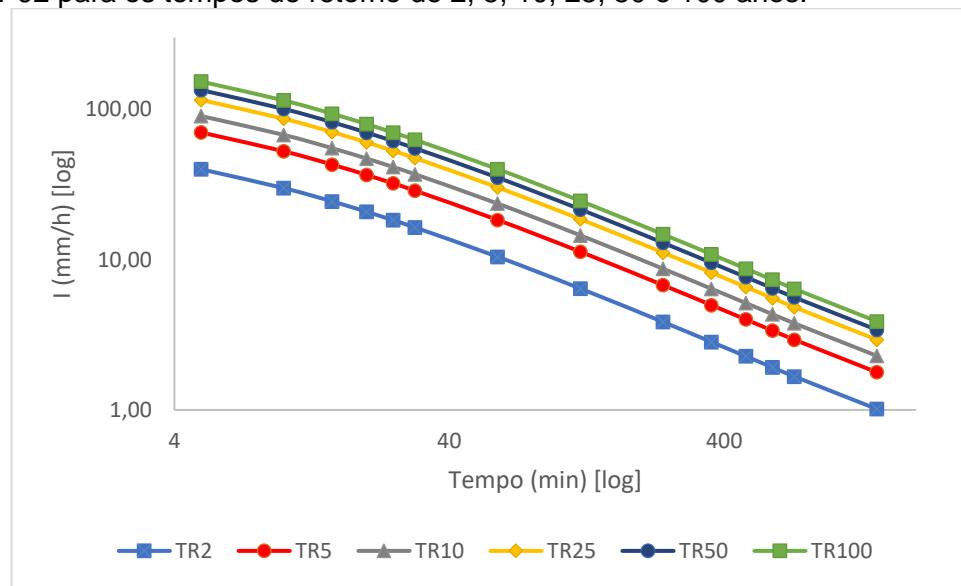
Conforme apontado por Eyring et al. (2016), as discrepâncias entre os modelos climáticos podem ser atribuídas às características dos padrões de precipitação máxima nos dados observados, às condições iniciais dos modelos e à significativa variabilidade climática em regiões subtropicais. Em alguns casos, os modelos podem ter dificuldades em capturar as interações oceano-atmosfera, especialmente em regiões tropicais, onde os modelos podem ser menos desenvolvidos. Além disso, os modelos climáticos têm diferentes fundamentos físicos, o que naturalmente leva a discrepâncias nos resultados. Portanto, é essencial considerar os resultados de múltiplos modelos climáticos para uma análise abrangente.

Figura 6 – Curvas IDF com desagregação proposta por RP92 para o Modelo SSP585
Cenário (a) CanESM5 (b) e MIROC6.



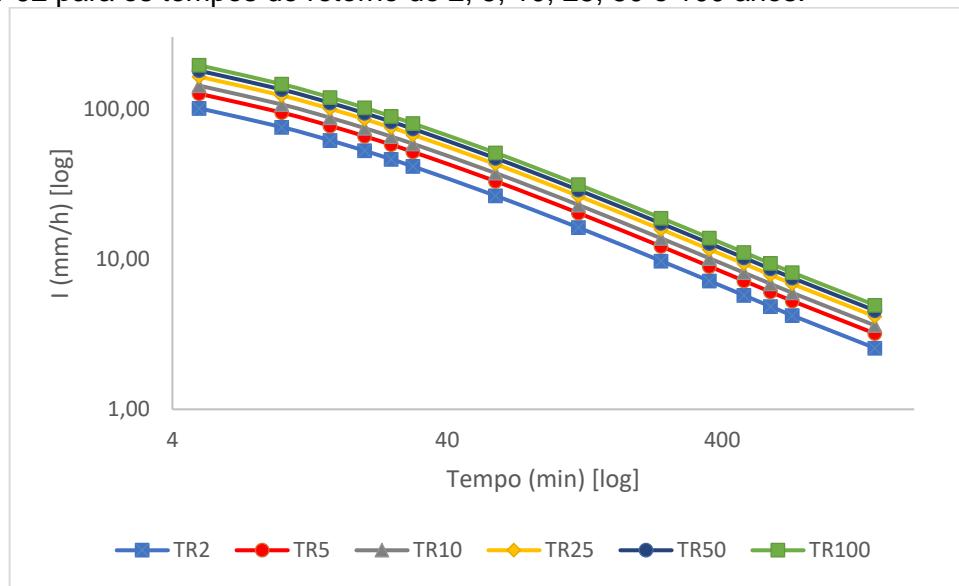
Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

Figura 7 – Comparação entre as curvas IDF obtidas com os dados atuais de precipitação (2000 até 2020) e o cenário SSP585 e modelo CanESM5 (2021 até 2040) desagregadas pelo método de RP92 para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.



Fonte: Elaborado pelos autores, (2023).

Figura 8 – Comparação entre as curvas IDF obtidas com os dados atuais de precipitação (2000 até 2020) e o cenário SSP585 e modelo MIROC6 (2021 até 2040) desagregadas pelo método de RP92 para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2023).

Considerações finais

A pesquisa sobre a ocorrência de chuvas intensas e sua parametrização desempenha um papel fundamental no dimensionamento de projetos de engenharia, inclusive no noroeste do Rio Grande do Sul. Para alcançar esse objetivo, foram empregadas duas metodologias diferentes na desagregação dos dados: o método proposto pela CETESB (1979) e o método desenvolvido por Robaina e Peiter (1992).

Essas abordagens permitiram a obtenção da intensidade da precipitação, que varia de acordo com os coeficientes específicos adotados em cada método, assim como com a duração e a frequência das chuvas. Através dessas duas metodologias, foram derivadas equações do tipo *Chen* e elaboradas curvas IDF para ambas. Ao comparar os valores obtidos nas equações com estudos semelhantes realizados no estado do Rio Grande do Sul, foi possível concluir que os parâmetros obtidos neste estudo são válidos e apresentam semelhanças com alguns desses estudos na região.

Para construir a curva IDF de cenários futuros no período de 2021 a 2040, adotou-se o modelo de desagregação proposto por RP92, que, com base nos estudos

e resultados obtidos, revelou-se confiável e apropriado. A análise dos dados de precipitação diária máxima anual, tratados por meio de equações e curvas IDF, permitiu a determinação de períodos de retorno e duração. Foram considerados dois modelos climáticos, CanESM5 e MIROC6, juntamente com dois cenários futuros, SSP370 e SSP585, para comparação com o clima atual.

Os resultados das quatro projeções sugerem uma tendência de diminuição na intensidade da precipitação futura, independentemente do período de retorno. Isso significa que tanto os cenários quanto os modelos indicaram uma redução na precipitação diária máxima anual em todos os tempos de retorno. É importante ressaltar que a utilização de projeções futuras está sujeita a incertezas decorrentes das diferentes parametrizações físicas dos modelos climáticos, seus processos de convecção, condições iniciais e discretização espacial para cada cenário climático. No entanto, um padrão de diminuição na precipitação foi observado.

Devido à variação dos valores de intensidade em relação à duração e aos períodos de retorno, informações desse tipo desempenham um papel essencial no projeto e dimensionamento de obras de engenharia. Este estudo destaca que, com base na expectativa de redução nos valores de intensidade de precipitação máxima no futuro, a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul pode enfrentar a situação de ter estruturas hidráulicas superdimensionadas, o que resultaria em custos mais elevados para as obras em andamento e planejadas.

Por outro lado, esse estudo também demonstra que as infraestruturas projetadas com base nos dados de precipitação máxima atuais provavelmente continuarão a ser eficazes no futuro. Entretanto, é fundamental enfatizar a necessidade de ajustar os projetos de engenharia para se adequarem às mudanças climáticas em curso e adotar estratégias de gestão de recursos hídricos que incorporem as projeções climáticas. Isso implica na adoção de medidas de conservação de água, no aprimoramento da infraestrutura de armazenamento e distribuição para torná-la mais resiliente e na exploração de fontes alternativas de água. Adicionalmente, é importante considerar a expansão da área de estudo e a validação de modelos de desagregação para diferentes condições, tanto presentes quanto futuras, no estado do Rio Grande do Sul. Isso pode ser realizado por meio da

utilização de diversos modelos e cenários climáticos existentes, incluindo suas atualizações, para obter análises adicionais e mais sólidas.

Dado o nível de incerteza relacionado ao clima, a aplicação de análises baseadas em probabilidades pode ser considerada em futuras pesquisas. No entanto, os resultados deste estudo enfatizam a necessidade imediata de um planejamento cuidadoso para a preservação dos recursos hídricos na região, por meio de ações que visem à conservação e contenção de águas pluviais, bem como a educação ambiental.

Agradecimentos.

Agradecemos a Universidade Federal da Fronteira Sul pelo apoio financeiro ao projeto de número de registro PES-2020-0094, aprovado no Edital n.º 270/GR/UFFS/2020.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. S.; GOIS, R. S. S. **Chuvas intensas no Estado da Paraíba.** In: Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, pp. 74-85, 2000.
- ARBOIT S. N. K.; ANDREA MANCUSO, M.; FIOREZE, M. **Ajuste de Equação IDF por Desagregação de Chuvas Diárias para o município de Iraí, RS.** Anuário do Instituto de Geociências, v. 40, n. 3, 2017.
- BASSO, R. E.; ALLASIA, D. G.; TASSI, R. **Vazão de projeto na microdrenagem em locais sem dados de precipitação: estudo para o Rio Grande do Sul.** Ambiente Construído, pp. 233-247. 2019.
- BATISTA, T. L.; ALVES, F. M.; TAVARES, P. R. L. **Utilização de dados pluviométricos para o desenvolvimento de equações IDF da região metropolitana de Fortaleza-CE.** Brasil. 2018.
- BELL, F. C. **Generalized rainfall- duration-frequency relationships.** Journal of the Hydraulics Division – ASCE, vol. 95, No. HY1, p. 311-27.1969.
- CERÓN WL, KAYANO MT, ANDREOLI RV, AVILA-DIAZ A, RIVERA IA, FREITAS ED, MARTINS JA & SOUZA RAF. 2021. **Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981-2018).** Atmos Res 249: 105299.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana, manual de projetos.** In: Drenagem urbana, manual de projetos. 1979.

CHEN, C. L. **Rainfall Intensity - duration - frequency formulas.** Journal of Hydraulic Engineering - ASCE, pp. 1603-21, 1983.

DAMÉ, R. C. F.; PEDROTTI, C. B. M.; CARDOSO, M. A.; SILVEIRA, C. P.; DUARTE, L. A.; MOREIRA, A. C. **Comparação entre curvas intensidade-duração-frequência de ocorrência de precipitação obtidas a partir de dados pluviográficos com aquelas estimadas por técnicas de desagregação de chuva diária.** Revista Brasileira de Agrociências, pp. 505-509, 2006.

DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S. **Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas-RS.** Engenharia Agrícola, pp. 245-255, 2008.

EYRING, V. et al. **Overview of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) experimental design and organization.** Geosci. Model Dev. 9, 1937–1958 (2016).

FERRAZ, L. L.; NEVES, J. R. D.; GONÇALVES, L. J.; DE SOUSA, L. F.; OLIVEIRA, L. B. **Determinação da equação intensidade-duração-frequência da precipitação para a cidade de Itabuna, Bahia.** Revista Brasileira de Meio Ambiente, pp. 87-98. 2020.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. **WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas.** International Journal of Climatology, v. 37, n. 12, p. 4302–4315, 2017.

GONÇALVES, L. S. **Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.

GRIMM, A.M., 2003: **The El Niño Impact on the Summer Monsoon in Brazil: Regional Processes versus Remote Influences.** J. Climate, 16, 263-280.

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D.H. **Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset.** International Journal of Climatology, v. 34, n. 3, p. 623–642, 2014.

HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES AND A. JARVIS. **Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas.** International Journal of Climatology 25: 1965- 1978, 2005.

IPCC, 2021: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. DE A. **Hidrologia Estatística.** Belo Horizonte: CRPM, 2007. 561p.

NETTO, A.; FERNANDEZ, F. M.; ARAUJO, R.; ITO, E. A. **Manual de Hidráulica.** Edgard Blucher LTDA. 669p. 1998.

NOGUÉS-PAEGLE, J., K.C.MO, 1997: **Alternating Wet and Dry Conditions over South America during Summer.** M.W.R,125, 279-291.

OGASSAWARA, J. F.; OLIVEIRA, L. J. C. **Determinação das curvas de intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para Itaqui-RS.** 2017.

OLIVEIRA, J., TORALLES, S. L., ADAM, K. N., FLECK, P. R., DE QUEVEDO, D. M. **Impacto das mudanças climáticas em projetos de drenagem urbana.** 2018.

REGOTO P, DERECZYNKI CP, CHOU SC & BAZZANELA ACF. 2021. **Observed Changes in Air Temperature and Precipitation Extremes over Brazil.** Int J Climatol 41: 5125-5142.

ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X. **Modelo de Desagregação e de Geração de Chuvas Intensas no RS.** In Anais Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola. Santa Maria: Sociedade Brasileira De Engenharia Agrícola, pp. 746-53. 1992.

ROPELEWSKI, C.H., S. HALPERT. 1987: **Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation.** Mon . Wea. Rev.. 115. 1606-1626.

SILVA, F. O. E.; JÚNIOR, F. F. R. P.; CAMPOS, J. N. B. **Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC.** Revista DAE, pp. 49-59. 2013.

SU, B.; HUANG, J.; MONDAL, S. K.; ZHAI, J.; WANG, Y.; WEN, S.; GAO, M.; LV, Y. JIANG, S.; JIANG, T.; LI, A. **Insight from CMIP6 SSP-RCP scenarios for future drought characteristics in China,** Atmospheric Research, v. 250, n. November 2021.

TRENBERTH, K. E; JONES, P. D.; AMBENJE, P.; BOJARIU, R.; EASTERLING, D.; KLEIN TANK, A.; PARKER, D.; RAHIMZADEH, F.; RENWICK, J. A.; RUSTICUCCI, M.; SODEN, B.; ZHAI, P. **Observations: Surface and Atmospheric Climate Change.** In: SOLOMON, S. D. et al. (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

UEHARA, K.; ZAHED FILHO, K.; SILVEIRA, L. N. L.; EI-GER, S. E PALERMO, M. A. **Pequenas bacias hidrográficas do Estado de São Paulo – Estudo de vazões médias e máximas.** FDTE/Escola Politécnica da USP, São Paulo, S. P., vol.2, 708p. 1980.

NOTAS DE AUTOR

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Juliana Marques Schöntag - Concepção, Coleta de dados de precipitação, Análise de dados para construção das curvas de intensidade-duração-Frequência, Elaboração do manuscrito, Participação ativa da discussão dos resultados, revisão e aprovação da versão final do trabalho.

Michel Nobre Muza – Tratamento e Análise de dados de precipitação, modelagem para cenários futuros, Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

FINANCIAMENTO

Universidade Federal da Fronteira Sul concedeu apoio financeiro ao projeto de número de registro PES-2020-0094, aprovado no Edital n.º 270/GR/UFFS/2020.

CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica

APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica

CONFLITO DE INTERESSES

Não foi identificado conflito de interesses.

LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

HISTÓRICO

Recebido em: 06-04-2023

Aprovado em: 29-11-2023