

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Uso de regiões homogêneas para obtenção de equações de chuvas intensas
pelo método “Transformação da Máxima Precipitação Diária”**

Ivana Patente Torres
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

IVANA PATENTE TORRES

Uso de regiões homogêneas para obtenção de equações de chuvas intensas pelo método “Transformação da Máxima Precipitação Diária”

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Roberto Avelino Cecilio

Coorientadora: Laura Thebit de Almeida

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

T693u Torres, Ivana Patente, 1999-
2025 Uso de regiões homogêneas para obtenção de equações de
chuvas intensas pelo método “Transformação da Máxima
Precipitação Diária” / Ivana Patente Torres. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (77 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.176>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Chuvas - Frequência da intensidade. 2. Análise de séries
temporais. I. Cecílio, Roberto Avelino, 1976-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada.
III. Título.

CDD 22. ed. 551.5773

IVANA PATENTE TORRES

Uso de regiões homogêneas para obtenção de equações de chuvas intensas pelo método “Transformação da Máxima Precipitação Diária”

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Ivana Patente Torres
Autora

Roberto Avelino Cecilio
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 03/04/2025 às 17:43:35 e pelo orientador em 03/04/2025 às 19:23:29. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **RHZE.TARE.Z24E** e clique no botão 'Validar documento'.

Dedico à minha tia Rita, que sonhava em ter trilhado os passos que tenho conseguido alcançar e faltou-lhe a oportunidade

AGRADECIMENTOS

À minha família, agradeço pelo apoio incondicional, sobretudo às mulheres que fazem parte dela. À minha mãe Vânia, cuja bondade exacerbada transborda o corpo, agradeço pela dádiva da vida e o apoio acima de quaisquer circunstâncias. Às minhas tias, pelo carinho, confiança e companhia todas as vezes que precisava me sentir próxima de casa. Me inspiro diariamente na luta que tiveram para chegarem onde estão. Ao meu irmão, Ivan, minha eterna gratidão por estar sempre presente, pronto para me ouvir.

Aos amigos, família que eu escolhi, agradeço pelas conversas, risadas e, acima de tudo, por não permitirem que eu me sentisse só.

Pela motivação a manter a saúde física junto aos inúmeros desafios semanais criados, agradeço aos amigos da VilaFit e do Attaq; pelo apoio incondicional a minha saúde mental, um muito obrigada à minha querida psicóloga.

Agradeço aos amigos da pós-graduação, pelos cafés da tarde na sexta e pelos “almoços poliglotas”.

Ao meu orientador, professor Roberto, sou profundamente grata pela gentileza e disposição em ensinar. A calma que transmite e a confiança no meu trabalho me fizeram acreditar mais em mim mesma. À minha coorientadora, Laura, agradeço pelas palavras de apoio e pelas trocas enriquecedoras de conhecimento. Ao Marcel, agradeço por aceitar compor a banca e pela disposição em esclarecer minhas dúvidas.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, que tornou esta etapa possível.

João Gilberto escreve em sua música "Wave", de 1977, "é impossível ser feliz sozinho". Acrescento que não apenas ser feliz, mas também, viver e construir uma trajetória solo. Assim, expresso minha profunda gratidão a todos que fizeram parte dessa etapa da minha vida.

Muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"Someone told me long ago there's a calm before the storm"
Creedence Clearwater Revival

RESUMO

TORRES, Ivana Patente, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Uso de regiões homogêneas para obtenção de equações de chuvas intensas pelo método “Transformação da Máxima Precipitação Diária”**. Orientador: Roberto Avelino Cecilio. Coorientadora: Laura Thebit de Almeida.

A precipitação é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, visto que é a principal fonte de retorno de água da atmosfera para o solo. A ocorrência de altos volumes precipitados em um curto intervalo de tempo, denominam-se chuvas intensas. Embora a precipitação seja de suma importância para a atividade humana, manutenção dos rios, lagos e aquíferos, chuvas intensas tem sido relatadas como causadoras de diversos prejuízos às atividades humanas e danos ambientais, consequência de enxurradas, inundações, alagamentos, movimentos de massa e erosão. Nesse contexto, a quantificação e conhecimento da intensidade (I), frequência (F) e duração (d) das chuvas torna-se essencial. A relação entre esses três parâmetros é descrita pela Equação de Chuvas Intensas que pode ser obtida através de pluviógrafos ou da análise de séries históricas de pluviômetros, métodos alternativos utilizados em razão da baixa rede de monitoramento de chuva a partir de pluviógrafos. Métodos alternativos como a Transformação da Máxima Precipitação Diária (TMPD) obtém os parâmetros IDF com melhores resultados, sobretudo em regiões de alta densidade de estações meteorológicas, além de representarem as características regionais das estações de interesse. Entretanto, os dados existentes encontram-se muito dispersos na literatura brasileira, dificultando seu acesso e fazendo-se necessário sua compilação em um único repositório nacional, que facilita o uso dos dados para projetos de engenharia e controles de erosão. O presente trabalho compilou, em um único repositório nacional, equações IDF do Brasil com informações de 6550 localidades; obteve as máximas lâminas diárias precipitadas associadas a diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos) através das funções de distribuição de probabilidade Gumbel, Log-Normal a 2 parâmetros e Gama em 73%, 21% e 6% dos ajustes, respectivamente; identificou 10 regiões homogêneas do ponto de vista das chuvas intensas, validadas pelo método de Hosking e Wallis; e obteve os parâmetros IDF para 5636 estações meteorológicas brasileiras utilizando o método TMPD aplicado a regiões homogêneas.

Palavras-chave: chuvas intensas; equação idf; tmpd; regiões homogêneas; pluviógrafos

ABSTRACT

TORRES, Ivana Patente, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Use of homogeneous regions to obtain equations for heavy rainfall using the “Maximum Daily Precipitation Transformation” method.** Adviser: Roberto Avelino Cecilio. Co-adviser: Laura Thebit de Almeida.

Precipitation is one of the main components of the hydrological cycle, as it is the main source of water returning from the atmosphere to the soil. The occurrence of high volumes of precipitation in a short period of time is called heavy rainfall. Although precipitation is of utmost importance for human activity and maintenance of rivers, lakes and aquifers, heavy rainfall has been reported as causing various losses to human activities and environmental damage, resulting in flash floods, flooding, mass movements and erosion. In this context, the quantification and knowledge of the intensity (I), frequency (F) and duration (d) of rainfall becomes essential. The relationship between these three parameters is described by the Heavy Rainfall Equation, which can be obtained through pluviographs or by analyzing historical series of rain gauges, alternative methods used due to the low rainfall monitoring network from pluviographs. Alternative methods such as the Maximum Daily Precipitation Transformation (MDPT) obtain IDF parameters with better results, especially in regions with a high density of meteorological stations, in addition to representing the regional characteristics of the stations of interest. However, the existing data are very dispersed in the Brazilian literature, making their access difficult and making it necessary to compile them into a single national repository, which facilitates the use of data for engineering projects and erosion controls. This work compiled, in a single national repository, IDF equations from Brazil with information from 6550 locations; obtained the maximum daily precipitation depths associated with different return periods (2, 5, 10, 20, 50 and 100 years) through the Gumbel, 2-parameter Log-Normal and Gamma probability distribution functions in 73%, 21% and 6% of the fits, respectively; identified 10 homogeneous regions from the point of view of intense rainfall, validated by the Hosking and Wallis method; and obtained the IDF parameters for 5636 Brazilian meteorological stations using the MDPT method applied to homogeneous regions.

Keywords: heavy rainfall; idf equation; mdpt; homogeneous regions; pluviographs

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1: CONJUNTO DE DADOS DE CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO PARA O BRASIL

- 1 Estações do Brasil com disponibilidade de equações IDF estabelecidas a partir de registros pluviográficos (método padrão) e pluviométricos (desagregação da chuva máxima diária) 27

CAPÍTULO 2: IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS COM RELAÇÃO À PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NO BRASIL

- 1 (a) Localização geográfica do Brasil na América do Sul com mapa hipsométrico do Brasil; (b) classificação climática de Koppen; c) estações pluviométricas e pluviográficas utilizadas para obtenção da máxima lâmina diária precipitada associada a diferentes períodos de retorno; d) biomas brasileiros 38
- 2 Fluxograma das etapas do trabalho para identificação das regiões homogêneas . 41
- 3 Funções densidade de probabilidade com melhor ajuste às séries de precipitação máxima diária para as estações pluviométricas do Brasil 46
- 4 Variação espacial, no Brasil, da máxima lâmina diária precipitada associada aos períodos de retorno de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 20 (d), 50 (e) e 100 (f) anos 47
- 5 Representação das três primeiras componentes principais pelo bitplot, com os pesos (comprimento dos vetores) das variáveis e como elas se correlacionam entre si (ângulos entre os vetores). Os planos são definidos por: PC1 e PC2 em a); PC1 e PC3 em b); PC3 e PC2 em c) 50
- 6 Dendrograma obtido pelo método de Ward, a partir das medidas de dissimilaridade entre 5636 estações pluviométricas para território brasileiro, baseado na distância Euclidiana, cujo ponto de corte foi definido pelo método Ward. 52
- 7 a) *Clusters*, obtidos pela PCA e HCA: as estações pluviométricas que compartilham as mesmas características do ponto de vista da máxima precipitação diária estão destacadas pelo mesmo símbolo e cor; b) regiões homogêneas identificadas sob ponto de vista das chuvas intensas através da espacialização dos *clusters* aplicando-se os polígonos de Thiessen 53

8	Características da ZCAS em baixos (vetores em verde), médios (altura geopotencial em 500 hPa em rosa) e altos níveis (linhas de corrente em 250 hPa em preto)	56
---	---	----

CAPÍTULO 3: OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES IDF PARA AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS BRASILEIRAS ATRAVÉS DO MÉTODO TMPD

1	Localização geográfica do Brasil e estações pluviométricas e pluviográficas . . .	68
2	Delimitação das regiões homogêneas que indicam a divisão para validade de aplicação dos coeficientes de transformação	69
3	Regiões homogêneas sob ponto de vista da precipitação intensa e localização geográfica dos coeficientes de transformação desenvolvidos por Almeida (2022)	71
4	Distribuição espacial das estações pluviométricas e pluviográficas brasileiras com valores referentes aos parâmetros estatísticos: (a) K ; (b) a ; (c) b ; e (d) c . .	74

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1: CONJUNTO DE DADOS DE CURVAS DE INTENSIDADE-DURAÇÃO-FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO PARA O BRASIL

1	Informações em cada coluna das planilhas e arquivos vetoriais que contém as equações IDF para o Brasil	29
2	Informações pertinentes à estação Juazeiro (Código 0940024), ilustrando a existência de duas distintas equações (K, a, b e c) abrangendo diferentes extensões de séries de precipitação (Start year, End year e Years)	30
3	Informações pertinentes à estação Gavião (Código 0466001), ilustrando a existência de duas distintas equações (K, a, b e c) abrangendo diferentes faixas de duração da chuva (Duration range)	30

CAPÍTULO 2: IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS COM RELAÇÃO À PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NO BRASIL

1	Variância acumulada por componente principal com as variáveis que tiveram maiores influências para criação dos mesmos, em ordem de contribuição	49
2	Distribuição dos autovalores para os três primeiros componentes principais . . .	51
3	Número de estações correspondentes a cada RH e critério de heterogeneidade medido através do método de Hosking e Wallis	53
4	Médias das variáveis de maior importância para PCA por região homogênea . .	54

CAPÍTULO 3: OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES IDF PARA AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS BRASILEIRAS ATRAVÉS DO MÉTODO TMPD

1	Informações em cada coluna das planilhas e arquivos vetoriais que contém as equações de chuvas intensas para o Brasil	72
2	Média dos parâmetros estatísticos K, a, b, c, percentual e número de estações por região homogênea	73

LISTA DE SIGLAS

AD	Anderson-Darling
Af	Clima tropical equatorial
Am	Clima tropical de monção
ANA	Agência Nacional de Águas
As	Clima tropical de savana (estação mais seca no verão)
Aw	Clima tropical de savana (estação mais seca no inverno)
Bsh	Clima semiárido quente
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cfa	Clima subtropical úmido
Cfb	Clima oceânico temperado
Csa	Clima mediterrânico de verão quente
Csb	Clima mediterrânico de verão fresco
Cwa	Clima subtropical úmido
Cwb	Clima subtropical de altitude
Cwc	Clima subtropical frio de altitude
d	Duração
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
f	Frequência
FDP	Função de distribuição de probabilidade
Fi	Filiben
Ga	Gamma
GEV	Generalizada de Eventos Extremos
GUM	Gumbel
H	Altitude (m)
HCA	<i>Hierarchical Cluster Analysis</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Normas Técnicas
I	Intensidade
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i> (Interpolação pelo Inverso do quadrado de distância)
Lat	Latitude

LN2	Log-normal a 2 parâmetros
Lon	Longitude
MV	Método da Máxima Verossimilhança
P3	Pearson a 3 parâmetros
PA	Precipitação total anual (mm)
PCA	<i>Principal Components Analyses</i>
PC	<i>Principal Components</i>
PMMS	Precipitação associada ao mês mais seco (mm)
PMMU	Precipitação associada ao mês mais úmido (mm)
PQMF	Precipitação associada ao quartil mais frio (mm)
PQMQ	Precipitação associada ao quartil mais quente (mm)
PQMS	Precipitação associada ao quartil mais seco (mm)
PQMU	Precipitação associada ao quartil mais úmido (mm)
PVMed	Pressão de vapor média anual (kPA)
RadMed	Radiação solar média anual ($\text{kJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$)
RCDD	Relação de chuvas de diferentes durações
TMA	Temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$)
TMDP	Transformação da Máxima Precipitação Diária
TMMMF	Temperatura máxima do mês mais frio ($^{\circ}\text{C}$)
TMMMQ	Temperatura máxima do mês mais quente ($^{\circ}\text{C}$)
TMQMF	Temperatura média do quartil mais frio ($^{\circ}\text{C}$)
TMQMQ	Temperatura média do quartil mais quente ($^{\circ}\text{C}$)
TMQMS	Temperatura média do quartil mais seco ($^{\circ}\text{C}$)
TMQMU	Temperatura média do quartil mais úmido ($^{\circ}\text{C}$)
UR	Umidade Relativa
VVMed	Velocidade média anual do vento (ms^{-1})
ZCAS	Zona de Convergência Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro de escala da função Gumbel de distribuição de probabilidade
β	Parâmetro de escala da função Gama de distribuição de probabilidade
$ct_{d,T}$	Coefficiente de transformação associado a uma duração e período de retorno específico
cts	Coefficientes de transformação
d	Duração
$\Gamma(v)$	Função Gama
H_i	Medidas de heterogeneidade
h_{24h}	Alturas pluviométricas das chuvas máximas de "24 horas"
h_{dia}	Alturas pluviométricas das chuvas máximas de "um dia"
$h_{dia,T}$	Alturas pluviométricas das chuvas máximas de "um dia" associada a um período de retorno específico
$\widehat{I}_{d,T}$	Intensidade máxima média precipitada estabelecida conforme os cts
i_m	Intensidade máxima média precipitada
K, a, b, c	Parâmetros estatísticos da Equação de Chuvas Intensas
μ	Parâmetro de forma da função Gumbel; Média da distribuição Log-Normal a 2 parâmetros
μ_V	Média dos valores de V
v	Parâmetro de forma da função Gama de distribuição de probabilidade
σ	Desvio padrão
$\sigma(x)$	Desvio padrão da variável x
σ_V	Desvio padrão dos valores de V
T	Período de retorno
V	Desvio padrão ponderado dos momentos L
χ^2	Qui-quadrado
\bar{x}	Valor médio da variável x
x_n	Valor observado em uma matriz de valores para uma dada variável x

SUMÁRIO

1	Introdução Geral	17
2	Referências	21
1	CONJUNTO DE DADOS DE CURVAS DE INTENSIDADE - DURAÇÃO - FREQUÊN- CIA DE PRECIPITAÇÃO PARA O BRASIL	24
1	Sumário	25
2	Introdução	25
3	Métodos	26
4	Descrição dos dados	26
5	Conclusão	32
6	Referências	33
2	IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS COM RELAÇÃO À PRE- CIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NO BRASIL	34
1	Introdução	36
2	Metodologia	37
2.1	Área de estudos	37
2.2	Máxima lâmina precipitada diária	39
2.3	Identificação das regiões homogêneas	40
2.3.1	Variáveis implementadas	41
2.3.2	Análise de Componentes Principais e Agrupamento hierárquico	43
2.3.3	Medida da heterogeneidade	45
2.3.4	Área de abrangência	45
3	Resultados e discussão	45
4	Conclusão	58
5	Referências	60
3	OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES IDF PARA AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRI- CAS BRASILEIRAS ATRAVÉS DO MÉTODO TMPD	64
1	Introdução	66
2	Métodos	67
2.1	Estabelecimento das equações IDF	68

2.2	TMPD aplicada às regiões homogêneas	68
2.2.1	Origem dos <i>cts</i>	70
2.2.2	Ajuste das funções de distribuição de probabilidade para os dados da ANA	70
2.2.3	Regiões Homogêneas Consideradas	70
2.2.4	Obtenção dos parâmetros IDF	71
3	Resultados e discussão	71
4	Conclusão	73
5	Referências	76

1 Introdução Geral

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela energia solar, gravidade e rotação terrestre (Tucci, 2001). A precipitação, componente vital desse ciclo, é a principal fonte de água doce para ecossistemas terrestres e aquáticos, influenciando diretamente processos como a vazão dos rios, a infiltração no solo, a disponibilidade hídrica nas bacias hidrográficas e a dinâmica dos aquíferos subterrâneos (Santos et al., 2024). Além disso, desempenha um papel crucial no abastecimento de cursos d'água e na sustentabilidade ambiental. Sua ocorrência regula o equilíbrio hídrico em diferentes escalas, impactando a produtividade agrícola, o fornecimento de água potável e a regulação climática global.

Precipitações, embora essenciais para a manutenção da vida e das atividades humanas, também podem gerar impactos negativos, especialmente quando ocorrem de forma extrema, como no caso das chuvas intensas. Segundo Tucci (2001), a chuva intensa é entendida como a precipitação extrema com duração, distribuição temporal e espacial críticas para uma área ou bacia hidrográfica específica. Para Mello e Silva (2013), de forma complementar, refere-se a todo evento de chuva cuja lâmina precipitada ou sua intensidade supere um valor mínimo que depende do tempo de duração da chuva. Estes eventos podem exercer consideráveis efeitos indesejados às atividades humanas e ao meio ambiente, tais como erosão hídrica (Wang et al., 2023), alagamentos e inundações (Luiz-Silva et al. 2023) e deslizamentos de terra (Zhang et al. 2024), o que torna a determinação de eventos de chuva, bem como o conhecimento das suas características, indispensável para projetos de engenharia, como estruturas de drenagem de água da chuva (obras de drenagem urbana com drenos e tubos fluviais, por exemplo) e controle de erosão (Chitrakar; Sana; Hamood; 2022; Back, 2020; Islam; Yu, 2022, Haruna, Blanchet, Favre 2023).

Nesse contexto, destaca-se a importância do conhecimento da equação de chuvas intensas, que relacionam intensidade, duração e frequência das chuvas. Segundo Koutsoyiannis et al. (1998), o modelo matemático clássico mais utilizado que expressa a relação entre essas três variáveis é dado pela Equação 1 conhecida por equação de chuvas intensas, ou equação de intensidade-duração-frequência, ou simplesmente equação IDF:

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(d + b)^c}, \quad (1)$$

em que i_m é a intensidade máxima média precipitada (em $mm \cdot h^{-1}$); T é o período de retorno (em anos); d é a duração da precipitação (em minutos); K , a , b , c são parâmetros de ajuste estatístico locais.

As equações IDF são fe para planejar, projetar e operar projetos de recursos hídricos para prevenir inundações (Fordjour et al., 2019) e outros transtornos relacionados ao excesso de água, usando a relação IDF. As relações IDF devem ser deduzidas a partir das observações de

chuvas de diferentes durações ocorridas durante um período de tempo longo, suficientemente grande para que seja possível considerar as frequências como probabilidades.

As equações IDF começaram a ser desenvolvidas a partir dos estudos de chuvas de diferentes durações realizadas em pluviógrafos. Os parâmetros da equação de chuvas intensas para postos pluviográficos são obtidos ajustando uma função para resolução de problemas de mínimos quadrados não lineares, a partir de dados de intensidade máxima de chuva para diferentes durações e períodos de retorno. Entretanto, a determinação das equações IDF para chuvas intensas requer longas séries de dados de chuvas e um grande esforço na tabulação, processamento, análise e interpretação de um grande número de dados de pluviogramas (Cecílio; Pruski, 2003; Dorneles et al., 2019). Vários autores (Fechine Sobrinho et al., 2014; Basumatary; Sil, 2017; Back, 2020) comentam das dificuldades de obtenção de longas séries de dados pluviográficos, as quais, quando disponíveis, possuem considerável quantidade de falhas.

Devido à insuficiência de uma rede de monitoramento e/ou a defasagem temporal e falhas progressivas nas séries, diversos autores têm discutido métodos alternativos à falta de dados de precipitação, em especial dados extremos de chuva subdiária (Almeida, 2022; Nascimento; Silva; Silva, 2024; Costa et al. 2024; Back, 2022; Ruezzenen et al. 2021). Como alternativa à baixa densidade de estações pluviográficas e em razão da ampla rede pluviométrica, tornou-se comum o uso de relações que permitem a estimativa de chuvas críticas com base em dados pluviométricos diários (Silva; Oliveira, 2017), já que no Brasil existe uma extensa rede de monitoramento pluviométrico (Dorneles et al., 2019).

De forma a contribuir com o aumento da disponibilidade de equações IDF, a desagregação de chuvas surge como uma alternativa, convertendo dados de precipitação diária, registrados em pluviômetros, em chuvas com duração de 24 horas e, subsequentemente, em durações sub-diárias. Dentre os diversos métodos de desagregação de chuvas existentes destacam-se: o Método das Relações de chuvas de diferentes durações (RCDD); o método de Bell (1969); o Método de Chen (1983); o Método de Hernandez (1991); o Método das Isozonas, Método de Beltrame (1991), Método da Transformação de Chuvas de Diferentes Durações. No Brasil, o RCDD é o mais difundido, de forma que 81% das IDF publicadas nacionalmente, até 2021, foram obtidas por esse método (Back; Cadorin, 2021).

Embora existam muitas informações sobre equações IDF no Brasil, estabelecidas tanto a partir de dados pluviométricos quanto pluviográficos, essas informações estão dispersas na literatura do país, dificultando seu acesso. Frequentemente, o desconhecimento sobre a existência dessas equações para uma determinada região leva ao uso de equações inadequadas, desenvolvidas para outras localidades com diferentes regimes pluviométricos, o que reforça a necessidade de uma compilação em um único repositório para facilitar seu uso em trabalhos futuros.

Além da dificuldade de obtenção de uma equação IDF mais adequada, novos métodos alternativos tem sido desenvolvidos. Em 2022 surge um novo método de desagregação de chuva, desenvolvido por Almeida (2022), chamado Transformação da Máxima Precipitação Diária (TMDP), com o objetivo de obter os parâmetros das equações de chuvas intensas através do

uso de coeficientes, chamados coeficientes de transformação (*cts*), que refletem as características regionais das chuvas intensas com duração sub-diária. Dentre as vantagens apresentadas pelo método, além de abranger as características regionais, tem-se a fácil e direta aplicação, transformando a máxima lâmina diária precipitada em intensidade. Assim, as estações pluviométricas nas quais os *cts* são desconhecidos usariam as estações pluviográficas mais próximas, conforme descrito pelo TMDP. O TMDP mostrou-se ligeiramente superior ao método RCDD, com destaque em regiões com maior densidade de informação da equação de IDF.

No entanto, ao se tratar de estações pluviométricas, não necessariamente estações geograficamente próximas compartilham semelhanças hidrológicas. As diferenças na variabilidade espacial da precipitação foram observadas tanto na escala global (Kong et al. 2016) quanto nas escalas regionais (Li et al. 2013; Cortesi et al; Amiri; Mesgari, 2019)), sendo afetadas pela topografia (Jin; Yu; Dai, 2024), limites terra-água (Zhou et al. 2020) ou tipos de uso do solo (Imran et al., 2024), podendo ocorrer de maneira mais intensa e localizada em áreas relativamente pequenas, enquanto regiões próximas podem permanecer praticamente sem chuva. O Brasil tem características fisiográficas muito particulares, definidas como uma combinação de elementos naturais como relevo, clima e vegetação (Salgado et al. 2019), o que influencia a variabilidade espacial desse fenômeno natural.

Essa característica destaca uma importante limitação dos métodos de desagregação de chuvas, que frequentemente consideram apenas a proximidade geográfica, desconsiderando as diferenças hidrológicas entre as estações. Assim sendo, a homogeneidade de regiões surge como um critério potencialmente mais adequado para determinar a área de abrangência de cada um dos coeficientes de transformação, buscando o coeficiente mais representativo dentro de um limite espacial específico. O estabelecimento de regiões homogêneas sob o ponto de vista da máxima lâmina precipitada é, portanto, uma abordagem eficaz para contornar essa limitação, proporcionando maior precisão nas estimativas e análises hidrológicas.

Do exposto, este estudo tem como objetivos principais estabelecer uma base de dados abrangente que compile todas as informações disponíveis sobre equações de intensidade-duração-frequência (IDF) já estabelecidas, criando uma referência centralizada para futuras análises. Além disso, busca-se definir regiões homogêneas sob o ponto de vista da máxima lâmina precipitada, considerando critérios que favoreçam a identificação de padrões hidrológicos consistentes em escala regional. Por fim, pretende-se desenvolver equações de chuvas intensas para todas as estações pluviométricas do Brasil, utilizando o Método da Transformação da Máxima Precipitação Diária aplicado no contexto das regiões homogêneas.

A fim de atingir os objetivos propostos, o presente trabalho está estruturado em três artigos, organizados da seguinte forma: o primeiro apresenta uma base de dados abrangente contendo as equações de chuvas intensas de 6550 estações pluviográficas e pluviométricas brasileiras, compiladas a partir de 370 publicações científicas, apresentado em formato de artigo aceito e publicado no idioma inglês na revista Data (Torres et al. 2025). O segundo capítulo identifica regiões hidrologicamente homogêneas por meio de técnicas estatísticas multivariadas, como

Análise de Componentes Principais (ACP) e Agrupamento Hierárquico. O terceiro capítulo desenvolve as equações IDF utilizando a metodologia desenvolvida por Almeida (2022), adaptada para aplicação dentro das regiões homogêneas sob o ponto de vista da precipitação máxima, estabelecidos no Capítulo 2. Os artigos pertinentes aos capítulos 2 e 3 ainda não foram publicados.

2 Referências

- ALMEIDA, L. T. Transformação da Máxima Precipitação Diária para estabelecimento de Equações de Chuvas Intensas: Nova Proposta. Orientador: Roberto Avelino Cecílio. 2022. 147 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2022. Versão eletrônica.
- AMIRI, M. A.; MESGARI, M. S. Spatial variability analysis of precipitation and its concentration in Chaharmahal and Bakhtiari province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 137, n. 3–4, p. 2905–2914, 1 ago. 2019.
- BACK, Á. J. Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, 2020.
- BACK, Á. J.; CADORIN, S. B. Heavy rain equations for Brazil. *International Journal of Development Research*, v. 11, 30 jan. 2021.
- BASUMATARY, V.; SIL, B. S. Generation of Rainfall Intensity-Duration-Frequency curves for the Barak River Basin. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://globalweather.tamu.edu/>>.
- BELL, Frederick C. Generalized Rainfall - Duration - Frequency Relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, v.95, n.1, p.311–328, 1969.
- BELTRAME, L., LANNA, A. L.E., LOUZADA, J. A .S. 1991. Chuvas Intensas. Porto Alegre : Instituto de Pesquisa Hidráulica da UFRGS.
- CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 501–504, dez. 2003.
- CHEN, C. Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formulas. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.109, n.12, p.1603–1621, 1983.
- CHITRAKAR, P.; SANA, A.; HAMOOD NASSER ALMALKI, S. Regional distribution of intensity–duration–frequency (IDF) relationships in Sultanate of Oman. *Journal of King Saud University - Science*, v. 35, n. 7, 1 out. 2023.
- CORTESI, N. et al. Spatial variability of precipitation in Spain. *Regional Environmental Change*, v. 14, n. 5, p. 1743–1749, 1 ago. 2014.
- DORNELES, V.R. et al. Intensity-duration-frequency relationships of rainfall through the technique of disaggregation of daily rainfall. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 23, n. 7, p. 506–510, jul. 2019.
- FECHINE SOBRINHO, V. et al. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. v. 18, n. 7, p. 727–734, 21 fev. 2014.
- FORDJOUR, A. et al. Development of Intensity-Duration Frequency Curves for Koforidua City in Ghana. *European Scientific Journal ESJ*, v. 15, n. 12, 30 abr. 2019.
- HARUNA, A.; BLANCHET, J.; FAVRE, A. Modeling Intensity-Duration-Frequency Curves for the Whole Range of Non-Zero Precipitation: A Comparison of Models. *Water Resources Research*, v. 59, n. 6, jun. 2023.

HERNANDEZ, V. Ainda as equações de chuvas intensas: pode-se generalizar? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9.; SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS, 5., 1991, Rio de Janeiro. [Anais] Fortaleza: Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1991. p. 193-203.

IMRAN, M. et al. Assessment of the Impacts of Rainfall Characteristics and Land Use Pattern on Runoff Accumulation in the Hulu River Basin, China. *Water (Switzerland)*, v. 16, n. 2, 1 jan. 2024.

ISLAM, M. A.; YU, B.; CARTWRIGHT, N. Coupling of satellite-derived precipitation products with Bartlett-Lewis model to estimate intensity-frequency-duration curves for remote areas. *Journal of Hydrology*, v. 609, 1 jun. 2022.

JIN, Z.; YU, J.; DAI, K. Topographic Elevation's Impact on Local Climate and Extreme Rainfall: A Case Study of Zhengzhou, Henan. *Atmosphere*, v. 15, n. 2, 1 fev. 2024.

KOUTSOYIANNIS, D.; KOZONIS, D.; MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, v. 206, p. 118–135, 1998.

LI, Q. et al. Spatial and temporal precipitation variability in the source region of the Yellow River. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 7, 1 abr. 2016.

LUIZ-SILVA, W. et al. Towards a Link between Climate Extremes and Thermodynamic Patterns in the City of Rio de Janeiro-Brazil: Climatological Aspects and Identified Changes. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, v. 11, n. 08, p. 131–160, 2023.

MELLO, C.R.; SILVA, A. *Hidrologia: Princípios e aplicações em sistemas agrícolas*. Lavras: Ed. UFLA, 2013. 455 p.

SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C.; PAISANI, J. C. *The physical geography of Brazil: Environment, vegetation and landscape*. Springer, 2019.

SANTOS, M. R. S. et al. VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL (1981-2020) DA CHUVA NA REGIÃO COSTEIRA DO ESTADO DO PARÁ – AMAZÔNIA ORIENTAL. *Caminhos de Geografia*, v. 25, n. 99, 4 jun. 2024.

SILVA, C. B.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação intensidade-duração-frequência de chuvas extremas na região nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 20, p. 267–283, 2017.

TORRES, I. P. et al. Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves Dataset for Brazil. *Data*, v. 10, n. 2, p. 17, 29 jan. 2025.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. v. 4

WANG, J. et al. Gully internal erosion triggered by a prolonged heavy rainfall event in the tableland region of China's Loess Plateau. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 11, n. 4, p. 610–621, 1 dez. 2023.

ZHANG, L. et al. Landslide susceptibility evaluation and determination of critical influencing factors in eastern Sichuan mountainous area, China. *Ecological Indicators*, v. 169, 1 dez.

2024.

ZHAO, W.; ABHISHEK; KINOUCI, T. Uncertainty quantification in intensity-duration-frequency curves under climate change: Implications for flood-prone tropical cities. *Atmospheric Research*, v. 270, 1 jun. 2022.

ZHOU, G. et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, v. 6, 2015.

CAPÍTULO 1

CONJUNTO DE DADOS DE CURVAS DE INTENSIDADE - DURAÇÃO - FREQUÊNCIA DE PRECIPITAÇÃO PARA O BRASIL

RESUMO

Este é um banco de dados contendo equações de intensidade-duração-frequência (equações IDF) para 6550 estações pluviográficas e pluviométricas no Brasil. O banco de dados foi compilado a partir de 370 publicações diferentes e contém as seguintes informações: identificação da estação, posição geográfica, tamanho e período da série de chuvas utilizada, parâmetros das equações IDF e referências bibliográficas. O banco de dados está disponível no Mendeley Data (DOI: 10.17632/378bdcmmc8.1) na forma de planilhas e arquivos vetoriais. Desde o lançamento do software Pluvio 2.1 em 2006, que incluiu 549 equações IDF obtidas no país, este é o maior e mais acessível banco de dados de equações IDF do Brasil. Os dados fornecidos podem ser úteis, entre outros propósitos, para projetar estruturas hidráulicas, controlar a erosão hídrica, planejar o uso da terra e planejar e gerenciar recursos hídricos.

Palavras-chave: chuvas intensas; projeto hidráulico; desagregação de chuvas; dados pluviográficos.

Dataset: <https://data.mendeley.com/datasets/378bdcmmc8/124>

Dataset License: CC-BY

Palavras-chave: chuvas intensas; projeto hidráulico; desagregação de chuvas; dados pluviográficos.

1 Sumário

Quantificar chuvas intensas e saber como elas se espalham espacial e temporalmente é extremamente importante para o planejamento de recursos hídricos e projeto hidráulico, como estruturas de drenagem de águas pluviais e sistemas de controle de erosão.

Como esses dados estão atualmente dispersos e não estão disponíveis para todos os usuários em potencial, uma compilação de um extenso conjunto de dados pontuais de curvas IDF brasileiras pode ser usada como referência para cientistas e equipe técnica que lidam com sistemas de água urbana, projeto de barragens, controle de erosão do solo, gestão de bacias hidrográficas e planejamento de recursos hídricos.

A primeira tentativa de compilar as informações sobre curvas IDF no Brasil foi feita com o software Pluvio 2.1, em 2006, e incluiu informações de 549 locais, enquanto o banco de dados atual tem informações de 6550 locais (cerca de 1000% a mais).

Regiões anteriormente sem equações IDF agora as têm, o que pode ajudar no projeto de estruturas hidráulicas, controle de erosão, planejamento do uso do solo e gestão de recursos hídricos.

2 Introdução

Chuvas intensas estão associadas a grandes lâminas de precipitação em um curto período. Essas chuvas podem causar impactos negativos consideráveis no meio ambiente e nas atividades humanas, como erosão hídrica, inundações, falha de estruturas hidráulicas e danos à produção agrícola, entre outros (Marengo et al. 2020).

A quantificação correta desse tipo de precipitação é de extrema importância para diversas aplicações ambientais, como o projeto de estruturas hidráulicas, o planejamento do uso do solo, a gestão de recursos hídricos e a previsão de desastres ambientais. Nesse contexto, destaca-se a importância do conhecimento das equações para chuvas intensas, também conhecidas como equações de intensidade-duração-frequência (IDF), conforme a equação geral abaixo (Costa; Blanco; De Oliveira-Júnior, 2020; Koutsoyiannis; Kozonis; Manetas, 1998):

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(d + b)^c}, \quad (1)$$

em que i_m é a intensidade máxima de precipitação, em $mm \cdot h^{-1}$; T é o período de retorno da precipitação (intervalo de tempo médio entre ultrapassagens do valor máximo de intensidade) em anos; d é a duração da precipitação em minutos; e K , a , b e c são parâmetros de ajuste estatístico obtidos para cada local com a disponibilidade de dados pluviográficos e/ou pluviométricos.

Para ajustar as equações IDF de acordo com o método padrão, é necessária uma série relativamente longa de registros de chuvas subdiários, medidos em uma estação pluviográfica (Liu et al., 2023). Tais registros são escassos no Brasil. Alternativamente, essas equações podem ser

ajustadas desagregando a precipitação máxima diária dos registros pluviométricos (Alzahrani; Seidou; Alodah, 2023).

Apesar de sua importância, as informações sobre equações IDF no Brasil estão dispersas na literatura e precisam ser sistematizadas em um único banco de dados. A primeira tentativa de sistematização das equações IDF foi feita em 2006, utilizando o *Software* Pluvio 2.1, que contava com 549 equações para o Brasil. Desde então, diversos estudos estabeleceram novas equações IDF para o Brasil, tornando-se necessário compilar novamente as informações disponíveis na literatura.

A partir do exposto, o conjunto de dados aqui descrito teve como objetivo sistematizar, em um único banco de dados de acesso aberto, as equações IDF estabelecidas para o Brasil.

3 Métodos

O estudo consistiu na compilação de equações IDF estabelecidas especificamente para o Brasil. As equações foram compiladas por meio de uma revisão bibliográfica aprofundada incluindo artigos científicos, teses, relatórios e livros que estabeleceram e/ou disponibilizaram equações para chuvas intensas no Brasil. A busca pelos artigos foi realizada com o auxílio das plataformas Web of Science, Science Direct, Scopus, SciELO e Google Acadêmico, além de relatórios técnicos, teses e dissertações não publicadas em periódicos.

Foram considerados estudos que estabeleceram equações utilizando o método padrão com registros de chuva subdiários e com o método alternativo de desagregação pluviométrica (registros pluviométricos de máxima precipitação diária). Ressalta-se que equações estabelecidas utilizando desagregação não substituem aquelas estabelecidas utilizando registros pluviográficos. Entretanto, são uma alternativa viável na ausência de informações pluviográficas.

4 Descrição dos dados

Este estudo reuniu equações IDF para 6.550 estações brasileiras (Figura 1), para as quais equações IDF foram estabelecidas, tanto por meio de registros pluviográficos quanto pela desagregação de dados pluviométricos. Um total de 711 equações foram estabelecidas com registros pluviográficos (método padrão) e 5839 foram estabelecidas com dados pluviométricos (desagregação). Os parâmetros dessas equações vieram de mais de 370 fontes diferentes da literatura.

As equações obtidas com base nos registros pluviográficos são originárias de 133 estudos diferentes, cuja duração média das séries pluviográficas utilizadas para seu estabelecimento é de 16 anos; no entanto, essa duração é bastante variável (3 a 58 anos). As equações originárias dos coeficientes de desagregação aplicados às séries pluviométricas são oriundas de 244 publicações diferentes. Em relação à duração das séries, o período mínimo observado é de 4 anos, não sendo possível inferir a média ou o máximo, pois a maioria dos estudos indica que a duração das séries

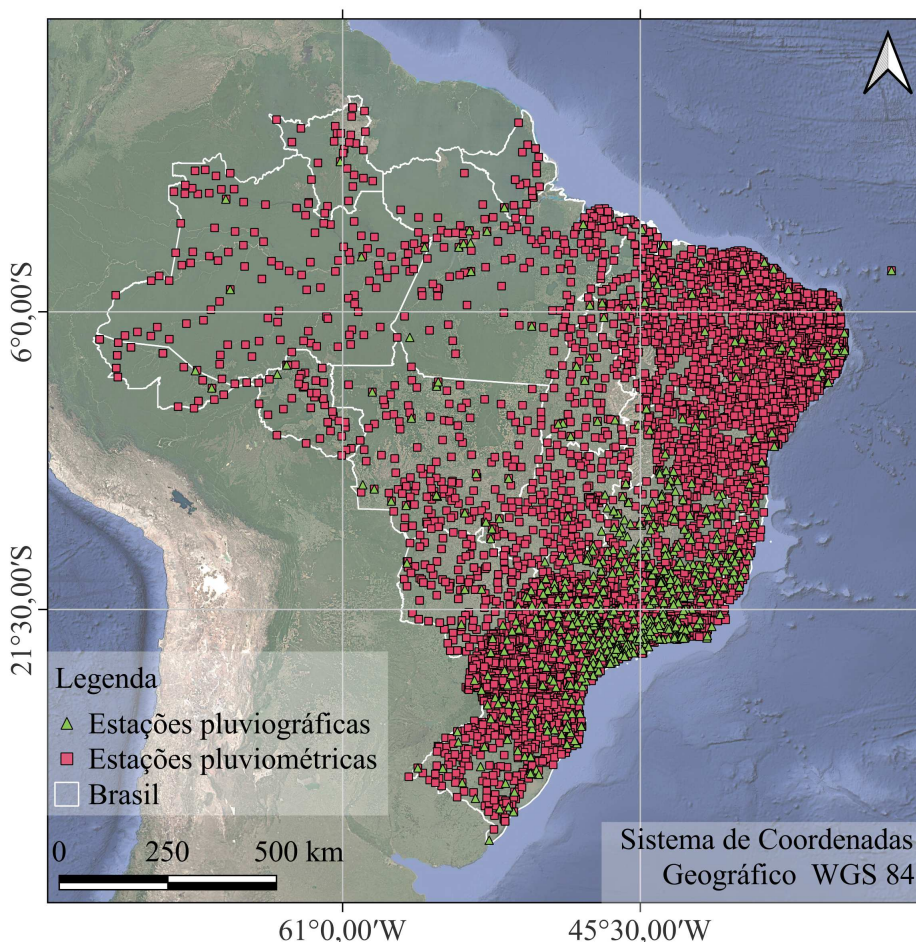


Figura 1: Estações do Brasil com disponibilidade de equações IDF estabelecidas a partir de registros pluviográficos (método padrão) e pluviométricos (desagregação da chuva máxima diária)

é maior que 15 ou 25 anos. Embora compiladas no conjunto de dados, deve-se evitar o uso de equações IDF estabelecidas com séries pluviométricas muito curtas.

O procedimento padrão descrito em (Denardin; Freitas, 1982) foi empregado em todos os estudos que desenvolveram equações a partir de dados subdiários (pluviográficos). Este procedimento considera uma série anual de intensidades máximas de precipitação correspondentes a várias durações, por exemplo, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 min. Para cada duração de precipitação (d), a intensidade média máxima de precipitação (i_m) é estimada para uma série de períodos de retorno, nomeadamente 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. A estimativa de i_m utiliza uma função de distribuição de probabilidade, que é selecionada com base nos resultados de um teste de aderência — o teste de Kolmogorov–Smirnov, Qui-quadrado, Filliben ou Anderson–Darling (Penner et al., 2023). As funções de distribuição de probabilidade mais frequentemente utilizadas incluem Gumbel, Log-Normal de dois parâmetros, Log-Normal de três parâmetros, Pearson de três parâmetros, Log Pearson de três parâmetros e Valor Extremo Generalizado. Finalmente, usando a i_m para diferentes durações e períodos de retorno, os parâmetros da Equação 1 (K , a , b e c) são estimados usando algoritmos de resolução de mínimos

quadrados não lineares, como o método de Gauss-Newton (Koutsoyiannis, 2023).

De maneira geral, a abordagem descrita acima foi empregada em todos os estudos que estabeleceram as equações IDF usando dados diários de precipitação (dados pluviométricos). A única distinção está na aplicação de um método de desagregação, que converte a série de profundidades máximas diárias em intensidades máximas de precipitação correspondentes a várias durações (10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 360, 720 e 1440 min). As lâminas máximas diárias são transformadas em precipitação de menor duração usando o método das relações de chuvas de diferentes durações (RCDD). Este método utiliza coeficientes para ajustar as quantidades diárias de precipitação, convertendo-as em profundidades de precipitação subdiárias e, finalmente, em intensidades máximas de precipitação associadas às durações especificadas (Penner et al., 2023).

Os dados disponíveis no Mendeley Data (Cecílio et al., 2024) foram organizados para facilitar o acesso a informações detalhadas sobre as estações. Eles são apresentados no formato .xlsx para planilhas (tabelas) e .gpkp, .shp, .json e arquivos de vetores de pontos para uso em um ambiente GIS. As planilhas são armazenadas na pasta “1 - Datasheets (arquivo XLSX)”, enquanto os vetores estão nas pastas 2 - *arquivo vetorial GIS (geopackage)*, “3 - *arquivos vetoriais GIS (shapefile)*” e “4 - *arquivos vetoriais GIS (geojson)*”, com um para cada tipo de arquivo.

Na pasta “1 - Datasheets (arquivo XLSX)”, há apenas um arquivo chamado “IDF_Curves_Brazil.xlsx”. Este arquivo contém três planilhas: Padrão, Desagregação e Lista de referências. As duas primeiras contêm as informações relevantes para as estações e suas respectivas equações IDF. A planilha Lista de referências contém uma lista de todas as referências bibliográficas dos estudos que deram origem às equações compiladas. As informações contidas nas colunas das planilhas Padrão e Desagregação são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Informações em cada coluna das planilhas e arquivos vetoriais que contém as equações IDF para o Brasil

Nome da coluna	Conteúdo
State	Estado no qual a estação está localizada
Agency	Agência responsável pela operação da estação
Code	Código atribuído à estação pela Agency
Name	Nome atribuído à estação
Latitude (°)	Latitude em graus
Longitude (°)	Longitude em graus
Altitude (m)	Altitude em metros
Start year	Ano de início da série (pluviométrica ou pluviográfica) usada para estabelecer a equação
End year	Ano de fim da série (pluviométrica ou pluviográfica) usada para estabelecer a equação
K	Valor atribuído ao parâmetro K (Equação 1)
a	Valor atribuído ao parâmetro a (Equação 1)
b	Valor atribuído ao parâmetro b (Equação 1)
c	Valor atribuído ao parâmetro c (Equação 1)
R^2	Coefficiente de determinação da equação estabelecida
Duration range	Faixa de duração da chuva para a qual a equação é válida
Reference	Referência bibliográfica do trabalho de origem, expresso por meio de código associado à planilha “Reference list”
Disaggregation coefficients*	Tipo de coeficiente de desagregação usado: general (estabelecidos de maneira geral para qualquer localidade), national (estabelecido para todo o país), regional (estabelecido para o estado ou região da estação), local (estabelecido para a própria estação), ou no information (não informado no trabalho)
Disaggregation reference*	Referência bibliográfica do trabalho que originou os coeficientes de desagregação, expresso por meio de código exposto associado à planilha “Reference list”

* Colunas presentes apenas na planilha “Disaggregation”.

Na pasta 2 - *arquivo vetorial GIS (geopackage)*, há apenas um arquivo chamado “IDF_Curves_Brazil.gpkg”. Este arquivo, em formato geopackage, contém dois vetores de pontos e uma tabela. A tabela contém a “Reference list”, mencionada anteriormente. Os dois vetores de pontos referem-se às estações contidas nas planilhas Standard e Disaggregation, com as mesmas informações listadas na Tabela 1. As pastas “3 - *arquivos vetoriais GIS (shapefile)*” e “4 - *ar-*

quívos vetoriais GIS (geojson)” contêm dois arquivos cada, que são relacionados às estações contidas nas planilhas Padrão e Desagregação, com as mesmas informações listadas na Tabela 1. Na pasta “3 - *arquivos vetoriais GIS (shapefile)*”, os arquivos shapefile são compactados no formato .rar. Na pasta “4 - *arquivos vetoriais GIS (geojson)*”, eles estão no formato .json. Algumas das estações compiladas no conjunto de dados têm mais de uma equação IDF, por dois motivos:

- a) Mais de um estudo foi conduzido para a estação, abrangendo diferentes períodos. Nestes casos (123 estações pluviográficas e 1491 estações pluviométricas), optou-se por mostrar todas as equações, para que o usuário possa escolher quais equações utilizar. É fortemente recomendado utilizar as equações estabelecidas utilizando os dados mais recentes e o maior número de anos possível. Além disso, de acordo com o planejamento de recursos hídricos e projeto hidráulico, é recomendado que equações IDF com séries temporais curtas e defasadas tenham um período de retorno conservador para garantir o uso seguro. A Tabela 2 mostra o exemplo da estação Juazeiro (Código 0940024), para a qual duas equações foram estabelecidas por diferentes estudos, tomando séries pluviográficas com 12 e 17 anos de extensão de 1988 a 1999, e de 1994 a 2010, respectivamente.

Tabela 2: Informações pertinentes à estação Juazeiro (Código 0940024), ilustrando a existência de duas distintas equações (K, a, b e c) abrangendo diferentes extensões de séries de precipitação (Start year, End year e Years)

Code	Name	Start year	End year	Years	K	a	b	c
0940024	Juazeiro	1988	1999	12	5592,554	0,2420	40,039	1,0930
0940024	Juazeiro	1994	2010	17	1519,000	0,1880	9,300	0,8795

- b) O estudo estabeleceu mais de uma equação abrangendo diferentes faixas de duração de chuva (d), conforme ilustrado no exemplo da Tabela 3 , para a estação Gavião (Código 0466001). Essa situação ocorreu com 45 estações pluviográficas e 47 estações pluviométricas. Em todos esses casos, foi considerado um sistema de equações para a estação, contabilizando a existência de apenas uma equação. Por exemplo, entre as 6550 equações, as duas retas da Tabela 3 foram contabilizadas como apenas uma equação de chuva intensa para a estação Gavião.

Tabela 3: Informações pertinentes à estação Gavião (Código 0466001), ilustrando a existência de duas distintas equações (K, a, b e c) abrangendo diferentes faixas de duração da chuva (Duration range)

Code	Name	Start year	End year	K	a	b	c	Duration Range
0466001	Gavião	2000	2009	1620,5	0,1364	0	0,8232	d>2h
0466001	Gavião	2000	2009	682,8	0,1157	16	0,6234	d<2h

Para algumas estações, existem tanto equações pluviográficas (Padrão) quanto equações pluviométricas (Desagregação). Nessa situação, recomenda-se optar por equações pluviográficas, que foram estabelecidas com base em registros pluviográficos subsidiários. Isso porque os desvios nas estimativas de im, quando se utilizam equações pluviométricas (Desagregação), são da ordem de $\pm 50\%$ (Back; Oliveira; Henn, 2012), podendo chegar a uma superestimação de até 120% em casos extremos (Almeida et al., 2024).

Para algumas equações IDF, não foram informados os anos de início e fim das séries pluviográficas (colunas Ano de início e Ano de fim), mas apenas o número de anos da série. Conforme destacado anteriormente, o período utilizado nas séries merece cada vez mais ser abordado, principalmente pelo contexto das mudanças climáticas. Acredita-se que equações estabelecidas com maior quantidade de dados e/ou em anos mais recentes sejam mais adequadas para o momento presente. Vale ressaltar também que, sob a ótica das mudanças climáticas, não é possível garantir que as equações IDF obtidas no passado possam ser utilizadas no presente ou no futuro. Isso porque séries históricas também podem sofrer tendências, sendo necessária uma análise de estacionariedade para estabelecer equações mais adequadas (Cortez et al., 2022), o que ainda é um campo de pesquisa em aberto. Vários autores (Almeida et al., 2024; Cortez et al., 2022) têm destacado a carência de informações sobre precipitação subsidiária no Brasil e em países em desenvolvimento, o que é crucial para a atualização constante das equações IDF, principalmente no contexto das mudanças climáticas. Ela se torna ainda mais relevante em países com grandes extensões territoriais no Brasil. No entanto, esta é a informação atual disponível aos usuários.

Quando os dados disponíveis estão restritos às estações pluviométricas (Desagregação), é essencial avaliar em que nível foram obtidos os coeficientes utilizados para a desagregação (coluna “Coeficientes de desagregação”): local, regional, nacional ou geral. Deve-se dar preferência às equações que utilizaram coeficientes obtidos no nível local, seguido do regional, nacional e geral, pois representam melhor as características específicas de cada área (Teixeira; Damé; Roskoff, 2011).

O conjunto de dados compilado pode ser útil em estudos futuros da aplicação da estrutura estocástica para a construção de equações IDF que levem em consideração a dependência espacial da precipitação (Almeida et al., 2024; Koutsoyiannis et al., 2024; Iliopoulou et al., 2024). É prático e pode ajudar a projetar curvas de precipitação em um país com grande extensão territorial como o Brasil.

Apesar dos amplos dados de estações pluviométricas na região Sudeste do Brasil, a região Centro-Oeste tem significativamente menos dados do que outras regiões do país, com apenas 8,17% do total de dados. Isso pode resultar em lacunas na representação de certos locais e uma compreensão incompleta dos padrões de precipitação e riscos associados em áreas menos monitoradas. Em regiões com maior densidade de estações, como o Sudeste, pode-se ter uma visão mais detalhada e precisa das condições climáticas, enquanto em regiões com menos estações, como o Centro-Oeste, as análises e previsões podem ser tendenciosas com a cobertura insuficiente, com uma representação menos precisa devido à baixa densidade de estações.

5 Conclusão

O banco de dados é o maior e mais acessível banco de equações IDF do Brasil, com informações de 6.550 localidades brasileiras (cerca de 1000% a mais que Pluvio 2.1).

Contribuições dos autores: I.P.T.: Metodologia, Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original. R.A.C.: Conceituação, Metodologia, Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original, Aquisição de fundos. L.T.A.: Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original. M.C.A.: Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original. D.D.S.: Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original. S.S.Z.: Curadoria de dados, Redação, Preparação do rascunho original. A.C.X.: Curadoria de dados, redação, preparação do rascunho original.

Financiamento: Esta pesquisa foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES [processo nº 001]; o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq [processo nº 305262/2021-1]; e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo – FAPES [processo nº 996/2022].

Declaração do Conselho de Revisão Institucional: Não aplicável.

Declaração de Consentimento Livre e Esclarecido: Não aplicável.

Declaração de disponibilidade de dados: Os dados originais apresentados no estudo estão disponíveis abertamente na plataforma Mendeley Data em <https://data.mendeley.com/datasets/378bdcmmc8/1>, acessado em 27 de dezembro de 2024.

Conflitos de interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

6 Referências

ALMEIDA, L. T. de et al. Method to Establish Intense Rainfall Equations Based in Geoprocessing, *Environ Model Assess*, 2024.

ALZHRANI, F.; SEIDOU, O.; ALODAH, A. Assessing the performance of daily to sub-daily temporal disaggregation methods for the IDF curve generation under climate change. *Journal of Water and Climate Change*, v. 14, n. 4, 2023.

BACK, Á. J.; OLIVEIRA, J. L. R.; HENN, A. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações para desagregação da chuva diária em Santa Catarina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 4, 2012.

CECÍLIO, R. A. et al. Rainfall intensity-duration-frequency curves for Brazil: a large national database. *Data in Brief*, 2024.

CORTEZ, B. N.; AVILA-DIAZ, A.; FONSECA, H. P. Nonstationary extreme precipitation in Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 67, n. 9, p. 1372-1383, 2022.

COSTA, C. E. A. DE S.; BLANCO, C. J. C.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Idf curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. *Journal of Water and Climate Change*, v. 11, n. 3, 2020.

DENARDIN, J. E.; FREITAS, P. L. Características fundamentais da chuva no Brasil. *Pesqui. Agropecuária Bras.*, v. 10, p. 1409–1416, out. 1982.

ILIOPOULOU, T. et al. A stochastic framework for rainfall intensity–time scale–return period relationships. Part II: Point Modelling and Regionalization over Greece, v. 69, n. 8, p. 1092–1112, 2024.

KOUTSOYIANNIS, D. et al. A stochastic framework for rainfall intensity–time scale–return period relationships. Part I: theory and estimation strategies. *Hydrological Sciences Journal*, v. 69, n. 8, p. 1082–1091, 2024.

KOUTSOYIANNIS, D.; KOZONIS, D.; MANETAS, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, v. 206, p. 118–135, 28 jan. 1998.

PENNER, G. C. et al. Methodology for IDF equation based on reduced pluviograph records. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 58, n. 3, p. 365–374, 2023.

LIU, G. et al. Variations of extreme precipitation events with sub-daily data: a case study in the Ganjiang River basin. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 3, 2023.

MARENGO, J. A. et al. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2020.

TEIXEIRA, C. F. A.; DAMÉ, R. DE C. F.; ROSSKOFF, J. L. C. Intensity-duration-frequency ratios obtained from annual records and partial duration records in the locality of Pelotas -RS, Brazil. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, 2011.

CAPÍTULO 2

IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS COM RELAÇÃO À PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NO BRASIL

RESUMO

Este estudo realiza a identificação de regiões homogêneas do ponto de vista da precipitação máxima diária associada a diferentes períodos de retorno, a partir de dados de 5636 estações do Brasil. A determinação dessas regiões iniciou-se com a seleção de 26 variáveis de entrada de importância para formação de chuvas intensas para realização da Análise de Componentes Principais (PCA). Os indivíduos resultantes da PCA que explicam mais de 70% da variância total acumulada foram utilizados para o cálculo da distância euclidiana. No contexto do Agrupamento Hierárquico (HCA), essa métrica foi utilizada para determinar a proximidade entre observações e, conseqüentemente, influenciar a forma como os *clusters* são formados. O HCA selecionado foi o método de Ward e a escolha do número ótimo de *clusters* para delimitação das regiões homogêneas foi realizada a partir do ponto de corte definido pela análise do dendrograma gerado. A homogeneidade dos *clusters* formados foi testada através do método proposto por Hosking e Wallis. De acordo com a medida de heterogeneidade, nove dessas regiões foram classificadas como "aceitavelmente homogêneas", enquanto uma foi considerada "possivelmente homogênea". A delimitação espacial das regiões homogêneas foi representada em mapas utilizando diagramas de Voronoi, permitindo uma visualização clara da abrangência de cada grupo. Os resultados contribuem para o entendimento das dinâmicas hidrológicas regionais e fornecem uma base sólida para estudos futuros e planejamento de recursos hídricos.

Palavras-chave: Dados Hidrológicos; Regionalização; Regiões Homogêneas; Precipitação; Análise de Componentes Principais; *Clusters*.

ABSTRACT

IDENTIFICATION OF HOMOGENEOUS REGIONS IN RELATION TO MAXIMUM DAILY PRECIPITATION IN BRAZIL

This study identifies homogeneous regions from the point of view of maximum daily precipitation associated with different return periods, based on data from 5,636 stations in Brazil. The determination of these regions began with the selection of 26 input variables of importance for the formation of intense rainfall to perform Principal Component Analysis (PCA). The individuals resulting from the PCA that explain more than 70% of the total accumulated variance were used to calculate the Euclidean distance. In the context of Hierarchical Clustering (HCA), this metric was used to determine the proximity between observations and, consequently, influence the way in which the *clusters* are formed. The HCA selected was the Ward method and the choice of the optimal number of *clusters* to delimit the homogeneous regions was made from the cutoff point defined by the analysis of the generated dendrogram. The homogeneity of the *clusters* formed was tested using the method proposed by Hosking and Wallis. According to the heterogeneity measure, nine of these regions were classified as "acceptably homogeneous", while one was considered "possibly homogeneous". The spatial delimitation of the homogeneous regions was represented on maps using Voronoi diagrams, allowing a clear visualization of the scope of each group. The results contribute to the understanding of regional hydrological dynamics and provide a solid basis for future studies and water resources planning.

Key-words: Hydrological Data; Regionalization; Homogeneous Regions; Precipitation; Principal Component Analysis; Clusters.

1 Introdução

Os eventos climáticos extremos, como chuvas intensas, têm se tornado cada vez mais frequentes e intensos devido às mudanças climáticas globais (Monteiro; Araújo, 2024). Esses fenômenos, caracterizados por volumes de precipitação elevados em curto intervalo de tempo, causam impactos severos tanto em ambientes naturais quanto urbanos (Penner et al. 2023). Os impactos nos recursos hídricos são alarmantes, já que eventos extremos interferem diretamente no ciclo hidrológico, desencadeando movimentos de massa e inundações súbitas e danos às infraestruturas (Mendonça et al. 2024), resultando em prejuízos econômicos e sociais significativos, especialmente em regiões mais vulneráveis (Anjos et al., 2024).

Os estudos relacionados ao comportamento das chuvas intensas fornecem elementos para a tomada de decisão em diferentes esferas, desde o planejamento urbano até a formulação de políticas públicas, auxiliando na mitigação de riscos e na proteção de populações vulneráveis (Monteiro; Zanella, 2023). Nesse cenário, a modelagem de extremos de precipitação e o monitoramento contínuo são indispensáveis para reduzir os riscos associados, proteger populações vulneráveis e garantir a segurança hídrica (Santos, 2024). Essa abordagem fornece suporte essencial para o planejamento e o dimensionamento de obras hidráulicas, como drenos, barragens e sistemas de proteção contra cheias, de forma a minimizar os impactos de chuvas extremas tanto em áreas urbanas quanto rurais (Alves et al., 2013).

Para isso, a disponibilidade de informações pluviométricas de alta qualidade e abrangência espacial é essencial. No entanto, a informação necessária nem sempre está disponível nos locais de interesse, especialmente devido à natureza pontual das medições (Ruezenne et al. 2021). Portanto, é necessário desenvolver procedimentos para transferir, ou regionalizar, as informações disponíveis nos locais calibrados existentes para os não calibrados (Durocher; Chebana; Ouarda, 2016).

A regionalização é frequentemente usada em hidrologia para facilitar a extrapolação de locais em que os registros foram coletados para outros nos quais os valores são necessários, mas indisponíveis. Ao dividir uma área de estudo em sub-regiões homogêneas que são consideradas como se comportando de maneira semelhante, os registros podem ser extrapolados com mais precisão, e equações de regressão baseadas em características de captação podem ser usadas com maior confiança para prever variáveis hidrológicas (Nathan; MCMahon, 1990).

A identificação de regiões hidrológicamente homogêneas é geralmente uma das etapas mais importantes da análise regional (Dikbas; Firac; Koc, 2013). Diversos trabalhos vem sendo realizados com o intuito de identificar regiões homogêneas em várias localidades do globo, como, Burn (1997), Lecce (2000), Smithers (2001), Soltani (2006), Brito (2017), Terassi (2017) e Teixeira (2023). Ao se tratar de estações pluviométricas, não necessariamente estações geograficamente próximas pertencem a um mesmo grupo, fazendo-se necessário gerar regiões que compartilhem semelhanças hidrológicas.

Conforme discutido por Lima, Armond (2022), para a variabilidade espacial, fica evidenci-

ado que a altitude, orientação das vertentes e a maritimidade são elementos espaciais essenciais na variabilidade da distribuição das chuvas. Além disso, o relevo brasileiro, caracterizado por cadeias montanhosas, planaltos e vales profundos, exerce uma influência marcante nos padrões de circulação atmosférica, na formação de instabilidade e na distribuição espacial das precipitações (Jesus, 2024). A interação entre a umidade proveniente do oceano e as barreiras topográficas locais cria condições propícias para a ascensão do ar, condensação e, conseqüentemente, o desenvolvimento de tempestades severas (Tavares; Ferreira, 2020).

Entretanto, a combinação de fatores como topografia, proximidade com corpos d'água, circulação atmosférica local e regional, cobertura vegetal e uso do solo, influência de fenômenos globais (como El Niño e La Niña), e a origem de chuvas convectivas, por exemplo, pode gerar regimes de chuva muito diferentes em regiões vizinhas, o que sugere a aplicação do método em regiões que compartilhem características homogêneas do ponto de vista das chuvas intensas.

Assim sendo o presente trabalho objetiva identificar regiões homogêneas do ponto de vista da máxima precipitação diária através da Análise de Componentes Principais, Agrupamento Hierárquico e Análise de *Cluster* para o território brasileiro.

2 Metodologia

2.1 Área de estudos

A área de estudo do presente trabalho é a extensão territorial brasileira, Figura 1. Correspondendo ao maior país da América do Sul e o quinto maior do mundo em extensão territorial, o Brasil detém uma área correspondente a $8.510.417,771\text{km}^2$, segundo o IBGE (2023). A classificação climática, devido a vasta extensão territorial com distintas zonas geográficas, possui ampla diversidade. De acordo com a classificação climática de Köppen, o Brasil possui 3 zonas climáticas (A, B e C), com os seguintes tipos climáticos, de acordo com a classificação de Köppen: Af, Am, Aw, As, Bsh, Cfa, Cfb, Cwa, Cwb, Cwc, Csa e Csb (Alvares et al., 2013).

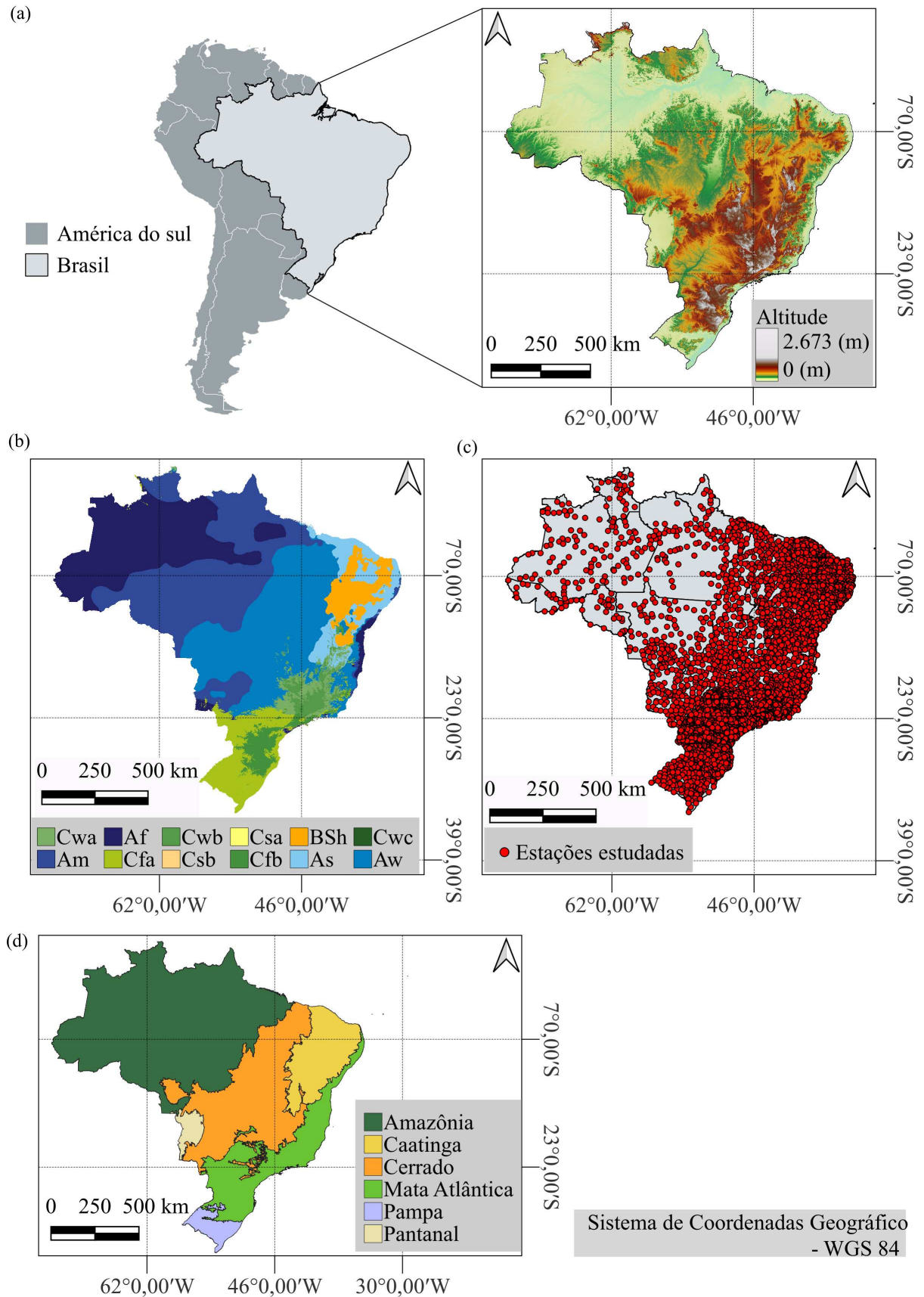


Figura 1: (a) Localização geográfica do Brasil na América do Sul com mapa hipsométrico do Brasil; (b) classificação climática de Köppen; (c) estações pluviométricas e pluviográficas utilizadas para obtenção da máxima lâmina diária precipitada associada a diferentes períodos de retorno; (d) biomas brasileiros

2.2 Máxima lâmina precipitada diária

As séries de dados das estações pluviométricas utilizadas no presente estudo foram baixadas do banco de dados hidrometeorológicos da Agência Nacional das águas (ANA), disponíveis no portal Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas (2024). Como critérios para a utilização das séries de dados considerou-se apenas o uso de dados consistidos, com no mínimo 30 anos de medições consecutivas, resultando em 5636 estações pluviométricas e pluviográficas, conforme ilustrado na Figura 1.c. A utilização de séries de diferentes tamanhos é desejável neste tipo de estudo, uma vez que as conclusões não ficariam limitadas a extensão da série.

Para obter a máxima lâmina diária associada a diferentes períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos) foram utilizadas as seguintes funções de distribuição de probabilidade: Gamma (Equações 1 e 2), Gumbel (Equações 3 e 4) e Log-normal a 2 parâmetros (Equação 2.2). A estimação dos parâmetros das distribuições foi realizada pelo método da máxima verossimilhança, conforme indicado por Abreu et al. (2018).

- A distribuição Gamma (G):

$$f(x; \beta, \nu) = \frac{1}{\beta^\nu \cdot \Gamma(\nu)} \cdot x^{\nu-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad (1)$$

com $0 < x < \infty$, representando a lâmina precipitada, em milímetros ; ν e β parâmetros positivos (Sousa; Costa, 2020), representando, respectivamente, parâmetro de forma (controlando a assimetria da distribuição) e parâmetro de escala (de maneira que um aumento em β translada a função de distribuição para a direita, minimizando a cauda); e $\Gamma(\nu)$ a função Gama, responsável por dar nome à distribuição.

Para estimar os parâmetros presentes na Distribuição Gamma utilizasse a função de log-verossimilhança para um conjunto de dados observados x_i , conforme mostra a Equação 2:

$$LN(L) = -n \cdot \nu \cdot LN(\beta) - n \cdot LN[\Gamma(\nu)] + (\nu - 1) \cdot LN \left[\sum_{i=1}^n LN(x_i) \right] - \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\beta}. \quad (2)$$

- A distribuição Gumbel (GUM):

$$f(x; \alpha, \mu) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\alpha}\right)}, \quad (3)$$

em que $0 < x < \infty$ representa a lâmina precipitada em milímetros, α e μ parâmetros de escala e forma, respectivamente.

A função de log-verossimilhança é dada por:

$$LN(L) = \frac{1}{n} \cdot LN(\alpha) + \sum_{i=1}^n -\alpha \cdot (x_i - \mu) + \sum_{i=1}^n e^{-\alpha \cdot (x_i - \mu)} \quad (4)$$

- A distribuição Log-Normal a dois parâmetros (LN2):

$$f(x; \sigma, \mu) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right]^2}, \quad (5)$$

com $0 < x < \infty$ representando a lâmina precipitada, em milímetros; μ a média da distribuição normal associada e σ o desvio padrão. Esses parâmetros controlam a forma da distribuição, onde μ desloca a distribuição ao longo do eixo logarítmico e σ influencia a dispersão dos valores.

A função de log-verossimilhança para um conjunto de dados observados x_i , é expressa por:

$$LN(L) = -n \ln \sigma - n \ln \sqrt{2\pi} - \sum_{i=1}^n \ln x_i - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln x_i - \mu)^2. \quad (6)$$

com $0 < x < \infty$, média μ e desvio padrão σ .

Posteriormente ao ajuste das séries de dados foi aplicado os testes, não paramétricos, de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS), Qui-quadrado (χ^2) e Anderson-Darling (AD) a fim de aferir a aderência da distribuição escolhida ao nível de significância 5%.

2.3 Identificação das regiões homogêneas

A identificação das regiões homogêneas foi realizada através de Análise de Componentes Principais, Agrupamento Hierárquico e Análise de *Cluster*, Figura 2, utilizando as variáveis implementadas descritas a seguir.

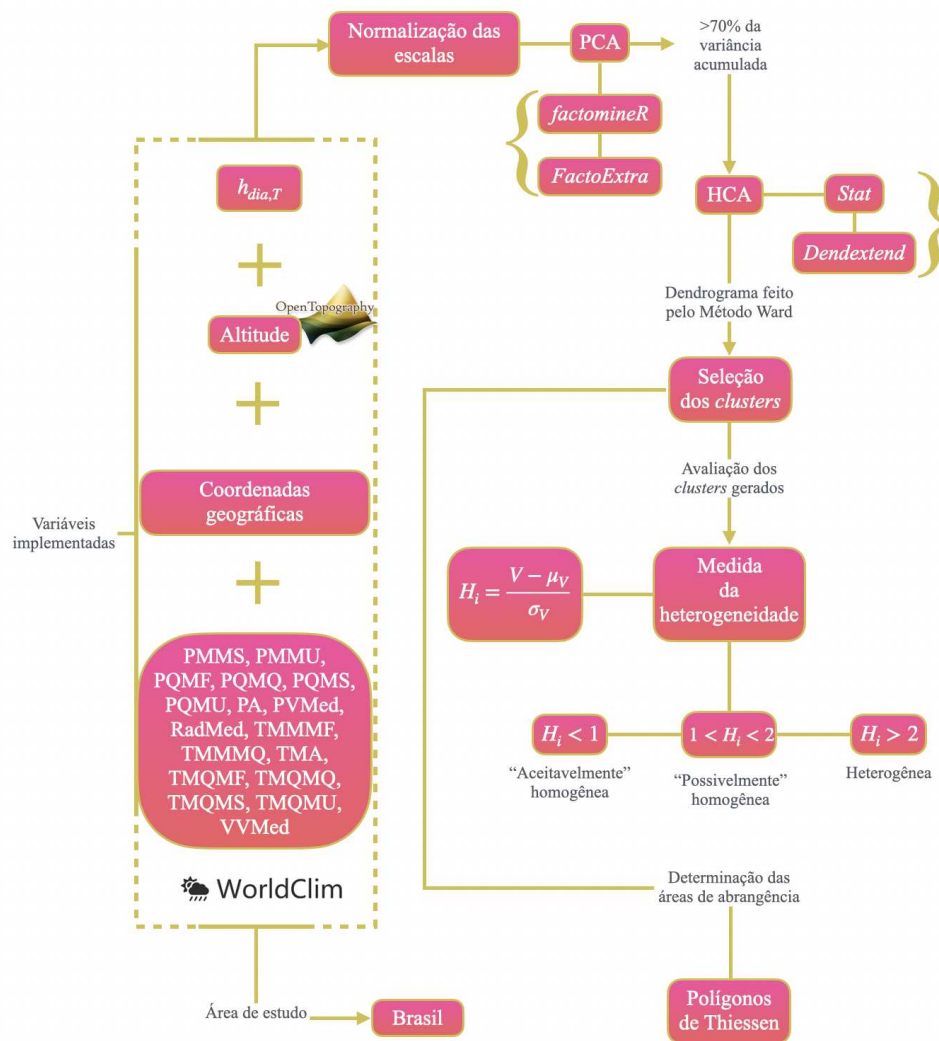


Figura 2: Fluxograma das etapas do trabalho para identificação das regiões homogêneas

2.3.1 Variáveis implementadas

Para que uma região seja considerada homogênea é necessário que existam evidências suficientes de que as diferentes amostras do grupo possuem similaridade de suas características hidrológicas. Do ponto de vista das chuvas intensas, para medida de semelhança entre dados foram selecionadas as variáveis obtidas na Seção 2.2 e as coordenadas geográficas juntamente com os dados disponibilizados pela plataforma *WorldClim*:

1. Coordenadas geográficas referentes às estações (Lat e Lon, °);
2. Máxima lâmina precipitada (mm) associada aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos ($h_{dia,T}$);
3. Precipitação associada ao mês mais seco (mm) (PMMS);

4. Precipitação associada ao mês mais úmido (mm) (PMMU);
5. Precipitação associada ao quartil mais frio (mm) (PQMF);
6. Precipitação associada ao quartil mais quente (mm) (PQMQU);
7. Precipitação associada ao quartil mais seco (mm) (PQMS);
8. Precipitação associada ao quartil mais úmido (mm) (PQMU);
9. Precipitação total anual (mm) (PA);
10. Pressão de vapor média anual (kPA) (PVMed);
11. Radiação solar média anual ($\text{kJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$) (RadMed);
12. Temperatura máxima do mês mais frio ($^{\circ}\text{C}$) (TMMMMF);
13. Temperatura máxima do mês mais quente ($^{\circ}\text{C}$) (TMMMMQ);
14. Temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$) (TMA);
15. Temperatura média do quartil mais frio ($^{\circ}\text{C}$) (TMQMF);
16. Temperatura média do quartil mais quente ($^{\circ}\text{C}$) (TMQMQU);
17. Temperatura média do quartil mais seco ($^{\circ}\text{C}$) (TMQMS);
18. Temperatura média do quartil mais úmido ($^{\circ}\text{C}$) (TMQMU);
19. Altitude (m) (H);
20. Velocidade média anual do vento (m s^{-1}) (VVMed).

As coordenadas geográficas são relativas às estações pluviométricas e pluviográficas, obtidas da ANA (Hidroweb, 2024), $h_{dia,T}$ foram obtidas conforme anteriormente descrito, os dados topográficos SRTM foram baixados com resolução espacial de 30 metros, e os demais dados foram obtidos do *WorldClim* (2024) em formato *GeoTiff* e resolução espacial de 340 km^2 , medidos entre o período de 1970-2000.

As variáveis enumeradas acima representam as características locais do clima, que influenciam na ocorrência de precipitação.

2.3.2 Análise de Componentes Principais e Agrupamento hierárquico

A Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*, PCA) é uma abordagem estatística utilizada para reduzir um conjunto de p variáveis de alta dimensionalidade (X_1, X_2, \dots, X_p) a um conjunto de p componentes, ou eixos, principais (PCs) não correlacionados (Z_1, Z_2, \dots, Z_p), ordenados por sua importância em relação à explicação da variabilidade nos dados. O principal objetivo dessa metodologia é descrever a variação dos dados de maneira eficiente por meio dos PCs, considerando sua estrutura de covariância. O “resumo multivariado” da informação pode promover a caracterização de padrões de agrupamento entre amostras, a caracterização de variáveis redundantes e a caracterização de estruturas de correlação entre os dados.

Os componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, definidas de forma a maximizar a variância explicada. O primeiro componente é calculado como:

$$Z_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1p}X_p, \quad (7)$$

em que os coeficientes a_{1j} são determinados de modo que Z_1 tenha a maior variância possível dentro dos dados. O segundo componente é definido de forma análoga:

$$Z_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2p}X_p, \quad (8)$$

sob a condição de não ser correlacionado com Z_1 e de explicar a próxima maior parcela de variância. Esse processo continua até o p -ésimo componente:

$$Z_p = a_{p1}X_1 + a_{p2}X_2 + \dots + a_{pp}X_p, \quad (9)$$

ou seja, cada observação original do conjunto de dados é projetada em um novo sistema de eixos, definidos pelos componentes principais.

Na prática, selecionam-se os componentes principais que acumulam a maior parte da variância total dos dados. O primeiro componente é o mais importante, pois possui a maior variância e explica a maior parte da variabilidade nos dados, seguido pelo segundo componente, que explica a segunda maior parcela, e assim sucessivamente (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2016). A falta de correlação entre os PCs garante que cada componente represente uma dimensão independente dos dados. Para a seleção do número de componentes a serem mantidos, recomenda-se incluir aqueles que expliquem, em conjunto, ao menos 70% da variância total (Rencher, 2002). Esse critério assegura que a análise retenha uma parcela significativa da variabilidade dos dados, permitindo uma interpretação simplificada sem perda substancial de informação.

Os componentes principais não são invariantes à escala, uma vez que a variância de cada variável está diretamente relacionada à sua escala de medição. Como as variáveis possuem diferentes unidades de medida, a escala influencia a composição dos PCs derivados, fazendo-se necessária a padronização das variáveis para média zero e variância unitária antes de realizar a

PCA. A normalização das escalas, portanto, é feita para todas as variáveis com o propósito de minimizar possíveis interferências nos resultados decorrentes das disparidades nas magnitudes dos dados, conforme descrito na Equação 10 abaixo:

$$x_n = \frac{x_n - \bar{x}}{\sigma(x)}, \quad (10)$$

em que x_n é um valor observado em uma matriz de valores para uma dada variável x ; \bar{x} é o valor médio da variável x ; e $\sigma(x)$ é o desvio padrão. Para realizar a PCA utiliza-se os pacotes *FactoMineR* (Le; Josse; Husson, 2008) e *factoextra* (Kassambra; Mundt, 2020).

Para a análise de cluster, calculou-se a distância euclidiana entre as variáveis mais relevantes, resultantes da PCA, considerando as componentes principais que representam pelo menos 70% da variância total das observações originais. Essa medida de dissimilaridade é fundamental para a aplicação do Agrupamento Hierárquico (*Hierarchical Cluster Analysis*, HCA), uma vez que a HCA utiliza a matriz de distâncias como entrada. Essa matriz contém a distância entre cada par de observações e influencia diretamente a construção da árvore hierárquica (dendrograma). Dessa forma, a distância euclidiana, d_{ij} , permite a identificação de padrões ou grupos similares entre as observações através da forma como os indivíduos se distribuem no espaço dos PCs. Ela é dada pela raiz quadrada da soma das diferenças quadradas entre as coordenadas correspondentes, conforme à Equação 11:

$$d_{ij} = \sqrt{(Z_{i1} - Z_{j1})^2 + (Z_{i2} - Z_{j2})^2 + \dots + (Z_{im} - Z_{jm})^2}. \quad (11)$$

Na árvore hierárquica gerada pela Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA), os *clusters* representam grupos de observações com características semelhantes, com base na métrica de distância euclidiana, escolhida para este trabalho. Para minimizar a variabilidade dentro dos *clusters* e garantir que as observações dentro de cada grupo sejam o mais semelhantes possível, utilizou-se o método de Ward (Ward Jr., 1963) como técnica hierárquica de classificação. A implementação foi realizada com os pacotes Stat (Bolar, 2019) e Dendextend (Galili, 2020) no software R.

O método de Ward, especificamente a Aglomeração Hierárquica utilizada, não seleciona automaticamente a quantidade ideal de *clusters*. Em vez disso, esse método constrói uma estrutura hierárquica na qual o número de agrupamentos diminui progressivamente à medida que se avança da base para o topo do dendrograma, fornecendo fusões entre os dados que possuem maiores características entre si. Cada fusão possui uma distância associada, que indica a dissimilaridade entre os *clusters* que estão sendo unidos. Em alguns pontos do dendrograma, as fusões ocorrem com um grande aumento na distância, o que indica que *clusters* distantes estão sendo unidos, como ocorre nos níveis superiores da estrutura hierárquica.

Os *clusters* resultantes foram utilizados para fim de determinação da extensão geográfica abrangida por cada *cluster* mediante a aplicação do método dos polígonos de Thiessen. Esse procedimento resulta na criação de mapas que representam a disposição espacial de cada região

homogênea, conforme descrito no estudo conduzido por Shahana Shirin e Thomas (2016).

2.3.3 Medida da heterogeneidade

A homogeneidade das regiões foi testada usando Momentos L, proposto por Hosking e Wallis (1997), que propõem estimar o grau de heterogeneidade entre grupos multivariados, ou seja, os *clusters*. O intuito do teste é avaliar a coerência em tratá-los como homogêneos. As medidas de heterogeneidade (H_1, H_2 e H_3) estão relacionadas às medidas estatísticas derivadas dos momentos L (CV: *Coefficient of Variation*, que indica a variabilidade dos dados em relação à média; CS: *Skewness*, que analisa a simetria ou assimetria da distribuição dos dados; e CK: *Kurtosis*, que interpreta a concentração dos dados em torno da média) conforme expressa a Equação 12:

$$H_i = \frac{V - \mu_V}{\sigma_V}, \quad (12)$$

em que V é o desvio padrão ponderado de L-CV, L-Cs ou L-Ck no local; μ_V é a média; e σ_V o desvio padrão dos valores de V. Para $H_i < 1$ a região é “aceitavelmente homogênea”, para $1 < H_i < 2$ a região é “possivelmente homogênea”, mas para $H_i > 2$ a região é “heterogênea”.

2.3.4 Área de abrangência

A extensão geográfica de cada *cluster*, definido previamente, foi determinada utilizando o método dos polígonos de Thiessen no *software* QGIS, que é amplamente utilizado para análises espaciais. Esse método é baseado na construção de regiões de influência ao redor de pontos específicos, que permitem delimitar áreas de influência de cada estação pertencente a um *cluster* específico.

Para representar a disposição espacial de cada *cluster*, os polígonos de Thiessen foram gerados considerando a localização geográfica das estações. Em seguida, foi realizado um processo de dissolução, no qual as áreas de influência das estações pertencentes ao mesmo grupo foram unidas em uma única delimitação. Esse procedimento elimina as divisões internas entre as áreas individuais das estações dentro do mesmo *cluster*, resultando em uma representação contínua e coesa das regiões homogêneas. O mapa resultante apresenta a distribuição espacial de cada *cluster*, destacando as regiões de abrangência de forma clara e permitindo uma visualização intuitiva da homogeneidade geográfica entre os pontos agrupados.

3 Resultados e discussão

Os dados sobre as funções de distribuição de probabilidade (FDP's) ajustadas são representados na Figura 3, que sugere que a distribuição Gumbel (GUM) foi a mais representativa, ajustando-se a 72,91% dos casos. Com mais de 70% de aderência e melhor desempenho, é a

distribuição mais adequada entre as testadas, conforme retratado pelos testes de aderência KS, χ^2 , AD. Isso reforça sua aplicabilidade em modelagens de eventos extremos, especialmente em precipitação, devido à sua capacidade de captar adequadamente valores máximos (Santiñaque et al. 2022). Além disso, outros trabalhos mostraram a aderência das frequências teóricas obtidas pela distribuição de Gumbel às frequências observadas, fornecendo um coeficiente de determinação alto e conduzindo a bons resultados (Moussinho et al., 2024, Da Silva; Pereira Filho, 2025; De La Fuente et al., 2020; Abreu et al., 2018). A Log-Normal de dois parâmetros (LN2) obteve o segundo maior desempenho e, por isso, a segunda mais utilizada, com 20,56%, enquanto a distribuição Gamma teve menor representatividade (6,56%).

Funções de distribuição de probabilidade

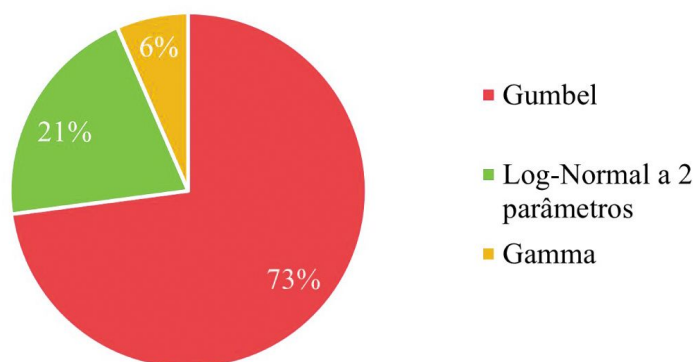


Figura 3: Funções densidade de probabilidade com melhor ajuste às séries de precipitação máxima diária para as estações pluviométricas do Brasil

Na Figura 4 apresenta-se a distribuição espacial das máximas lâminas diárias precipitadas associadas aos períodos de retorno 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos. Para fins exclusivos de melhor visualização, os valores de $h_{dia,T}$ foram espacializados por intermédio do IDW (*Inverse Distance Weighting*) e não apresentados apenas de forma pontual para cada estação. Embora a interpolação não represente fielmente os resultados para todas as áreas, visto que só apresenta de maneira precisa os valores obtidos da máxima lâmina diária para cada estação, a visualização dos resultados de forma espacializada torna visível a magnitude dos valores obtidos para todos os períodos de retorno analisados.

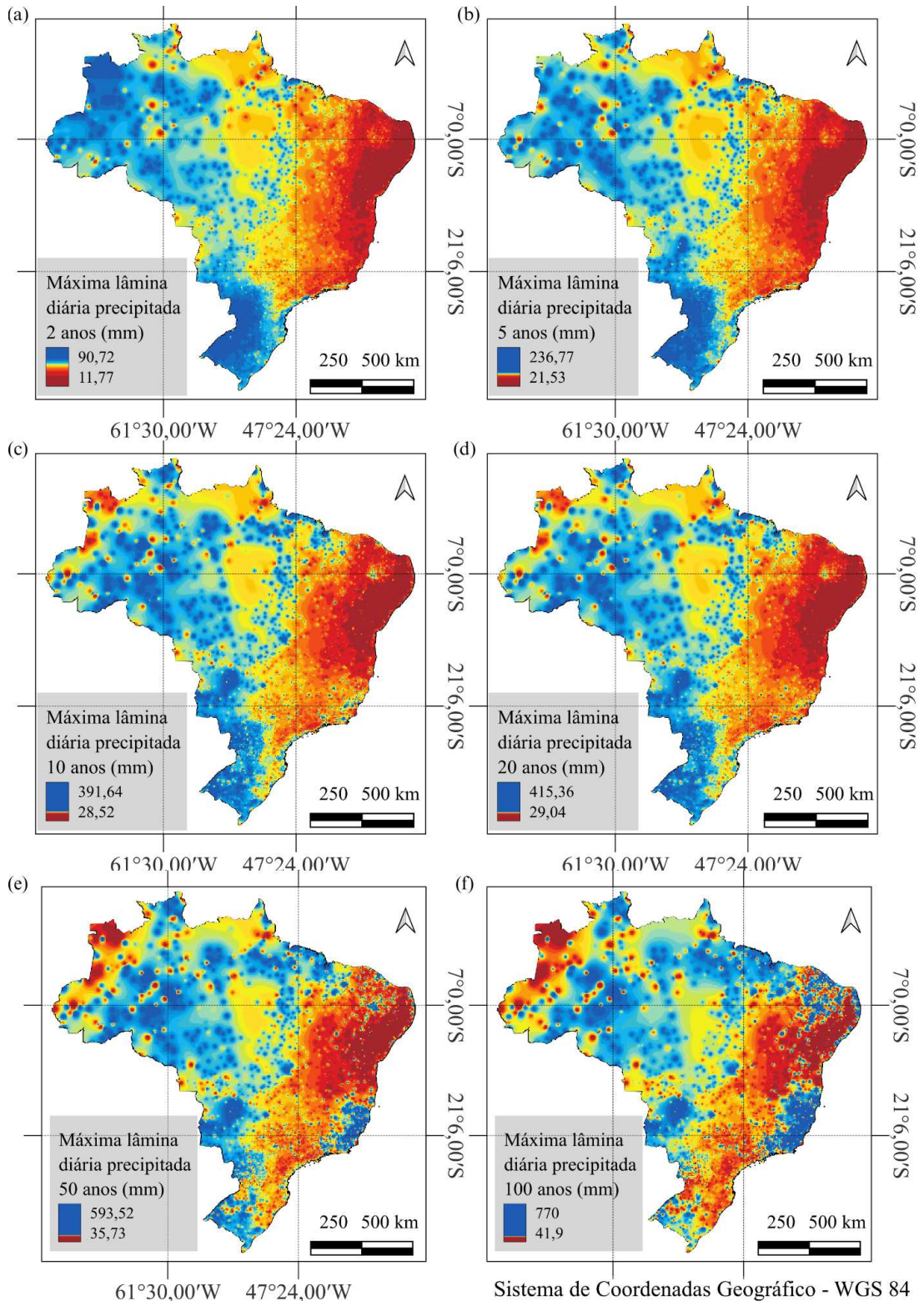


Figura 4: Variação espacial, no Brasil, da máxima lâmina diária precipitada associada aos períodos de retorno de 2 (a), 5 (b), 10 (c), 20 (d), 50 (e) e 100 (f) anos

Observa-se que para os períodos de retorno menores (2 e 5 anos) e intermediários (10 e 20 anos) as maiores lâminas diárias precipitadas estão associadas ao Sul do país e a região Amazônica. Esses resultados indicam uma variabilidade regional significativa nos padrões de chuvas

intensas, que está associada a diferentes características climáticas e geográficas, como regimes de chuva, temperatura e umidade. Marengo (2004) analisou as tendências de precipitação na bacia amazônica, e separando essa região em Norte e Sul, relatou tendências negativas nos índices precipitados ao Norte e positivas no Sul, assim como mostra a imagem. Segundo Alvalá et al. (2024) As chuvas intensas no Sul do país, sobretudo no Rio Grande do Sul, podem ser devido às frentes frias estacionárias ocasionadas como impactos do El Niño 2023-24 (Alvalá et al., 2024) ou ainda devido a sistemas convectivos de mesoescala (Palharini et al., 2022). Em Santa Catarina, Back, Wildner e Pereira (2021) também verificaram altos índices pluviométricos na região leste do estado, justificando a ocorrência devido às condições geomorfológicas que favorecem a ocorrência de chuvas orográficas.

Ao considerar os valores para períodos de retorno mais longos, como $h_{dia,50}$ e $h_{dia,100}$, observa-se que as áreas mais elevadas do Sudeste apresentam os maiores índices de precipitação. A Região Sudeste registra uma média de 234,02 mm/h para $h_{dia,100}$, o maior valor entre todas as regiões. Isso reflete uma maior probabilidade de eventos extremos de chuva nessas localidades, frequentemente associados a sistemas meteorológicos intensos, como frentes frias e zonas de convergência. Além disso, a topografia variada da região, composta por serras e planícies costeiras, influencia na distribuição das chuvas, resultando em variações significativas nos regimes pluviométricos em várias áreas (Jesus, 2024). Exemplos são as serras da Mantiqueira, Espinhaço, Canastra, Serra do Mar e Cantareira (Mendes; Muniz, 2024). O fator orográfico contribuinte para aumento dos acumulados de precipitação pode ser facilmente visualizado na Figura 4, onde o Espírito Santo apresenta altos valores precipitados.

No semiárido nordestino, as chuvas intensas são menos frequentes e de menor intensidade, mas mesmo assim, em áreas litorâneas podem ocorrer eventos expressivos devido à interação entre sistemas meteorológicos e a brisa marítima, pois, ao se tratar de uma área litorânea, espera-se que a influência da umidade proveniente dos ventos marinhos condicione climas mais úmidos. Por outro lado, algumas áreas litorâneas do Rio de Janeiro chuvas brandas que podem estar associadas à influência da ocupação humana, uma vez que a evapotranspiração exerce grande peso na quantidade de água disponível no sistema solo-planta-atmosfera (Fialho; Machado, 2023).

A partir das $h_{dia,T}$ e das demais variáveis implementadas foi realizada a PCA. As variáveis que mais contribuíram para cada um dos componentes são retratadas na Tabela 1. Os três primeiros componentes resultantes da presente PCA resultou em uma variância acumulada de 74,10%, em que 40,91%, 21,38%, 11,81% referem-se, respectivamente, aos componente principal 1, 2 e 3 (PC1, PC2, PC3). Dentre as variáveis utilizadas para realizar a PCA, as variáveis cruciais para explicar a variância da componente principal 1 estão relacionadas à precipitação, seja vinculada à máxima lâmina diária associada aos períodos de retorno iguais ou maiores que dez anos, ou a precipitação do quartil mais frio. Para a componente principal 2, a explicação da variância também se dá pelos padrões de precipitação, mas, agora, associados a períodos de retorno mais curtos (2, 5 e 10 anos), juntamente com a longitude. Por outro lado, a compo-

nente principal 3 é relativa principalmente a variáveis climáticas, como temperatura média anual (TMA), temperaturas médias dos meses mais frios (TMMMF) e mais quentes (TMMMQ), pressão de vapor média (PVmed) e radiação média (RadMed), além da Latitude (Lat).

Tabela 1: Variância acumulada por componente principal com as variáveis que tiveram maiores influências para criação dos mesmos, em ordem de contribuição

Componentes principais	Variância acumulada (%)	Variáveis com mais contribuições
1	40,91	$h_{dia,50}$, $h_{dia,100}$, $h_{dia,20}$, $h_{dia,10}$, PQMF
2	62,29	PA, $h_{dia,10}$, $h_{dia,5}$, PQMU, PMMU, $h_{dia,2}$, Lon
3	74,10	TMA, TMMMF, Lat, TMMMQ, PVmed, RadMed

A contribuição das variáveis mostra quais variáveis são mais importantes na formação de cada componente principal. Os três primeiros componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais, explicam a maior parte da variância explicada, cujas variáveis com maiores contribuições para formação dos mesmos foram retratadas na tabela anterior. Essas combinações são determinadas pelos autovetores da matriz de covariância (ou correlação) dos dados, onde cada autovetor define uma direção no espaço dos dados e os autovalores correspondentes indicam a variância explicada nessa direção. A Figura 5 ilustra esses autovetores no círculo de correlação.

$$Z_3 = \dots + 7,781X_8 + \dots + 6,424X_{17} + 5,729X_{18} + 8,579X_{19} + 8,304X_{20} + 6,730X_{21} + \dots \quad (15)$$

Nas equações acima, os componentes principais são representados por $PC1 = Z_1$, $PC2 = Z_2$, $PC3 = Z_3$. As variáveis originais são indicadas pelos termos $X_1 \dots X_{26}$, enunciados um a um na Tabela 2.

Tabela 2: Distribuição dos autovalores para os três primeiros componentes principais

X_p	Autovalores			X_p	Autovalores		
Variável	PC1	PC2	PC3	Variável	PC1	PC2	PC3
$h_{\text{dia},2}$	1,629	7,963	1,815	PQMQ	0,017	0,716	5,645
$h_{\text{dia},5}$	0,266	10,435	1,459	PQMS	2,925	1,902	3,843
$h_{\text{dia},10}$	7,017	10,528	0,791	PQMU	0,617	9,905	0,003
$h_{\text{dia},20}$	19,665	6,589	0,131	PVMed	0,954	2,864	6,424
$h_{\text{dia},50}$	26,231	2,051	0,031	RadMed	0,271	1,695	5,729
$h_{\text{dia},100}$	25,957	0,758	0,149	TMA	0,083	1,032	8,579
H	0,807	2,367	3,456	TMMMF	0,328	0,699	8,304
Lat	0,131	0,201	7,781	TMMMQ	0,036	1,144	6,730
Lon	1,803	6,393	1,988	TMQMF	0,089	1,025	8,613
PA	3,081	10,915	1,700	TMQMQ	0,163	1,389	7,531
PMMS	2,943	1,847	3,701	TMQMS	0,290	0,824	8,098
PMMU	0,460	9,386	0,012	TMQMU	0,001	0,969	5,714
PQMF	4,191	5,909	7,781	VVMed	0,043	0,494	1,742

A Figura 5 mostra a relação entre as variáveis no espaço dos PCs, representadas pelo comprimento e direção dos vetores. O comprimento de um vetor indica sua influência sobre a PC correspondente, enquanto o ângulo entre os vetores explica a correlação entre as variáveis. Em particular, a Figura 5.b auxilia na interpretação da Tabela 2, evidenciando a relação entre as variáveis. Nota-se que as variáveis climáticas (TMA, TMMMF, Lat, TMMMQ, PVMed, RadMed) formam ângulos próximos a 90° em relação às variáveis associadas à precipitação, indicando que essas últimas contribuem fortemente para um determinado eixo principal, enquanto as variáveis climáticas influenciam outro. De fato, os autovalores associados a $h_{\text{dia},20}$, $h_{\text{dia},50}$ e $h_{\text{dia},100}$ são pelo menos 60 vezes maiores que aqueles das variáveis climáticas relacionadas à temperatura para PC1. Em contrapartida, para PC3, as variáveis climáticas apresentam vetores mais compridos e ângulos menores em relação ao eixo PC3, indicando uma maior influência sobre essa componente.

Após a seleção dos indivíduos resultantes da PCA, que explicam pelo menos 70% da variância total, a análise da distância euclidiana permitiu identificar padrões, ou seja, grupos de indivíduos com características semelhantes. Com base nessa estrutura, foi selecionado o nú-

mero ótimo de *clusters* por meio do Agrupamento Hierárquico. Essa escolha foi feita a partir da análise do dendrograma gerado pela PCA, conforme indicado pelo ponto de corte representado pela linha tracejada vermelha na Figura 6. Quanto menor a distância entre os conjuntos de dados no dendrograma, menor a dissimilaridade e a decisão sobre o número final de regiões homogêneas se dá conforme o local onde as fusões de *clusters* apresentam um grande aumento na distância. A decisão tomada selecionou 10 *clusters* que apresentaram números distintos de estações, com no mínimo 286 e no máximo 1219 estações. A disposição dos clusters e a delimitação de regiões hidrologicamente homogêneas, após aplicação do polígono de Thiessen, está disposta na Figura 7.

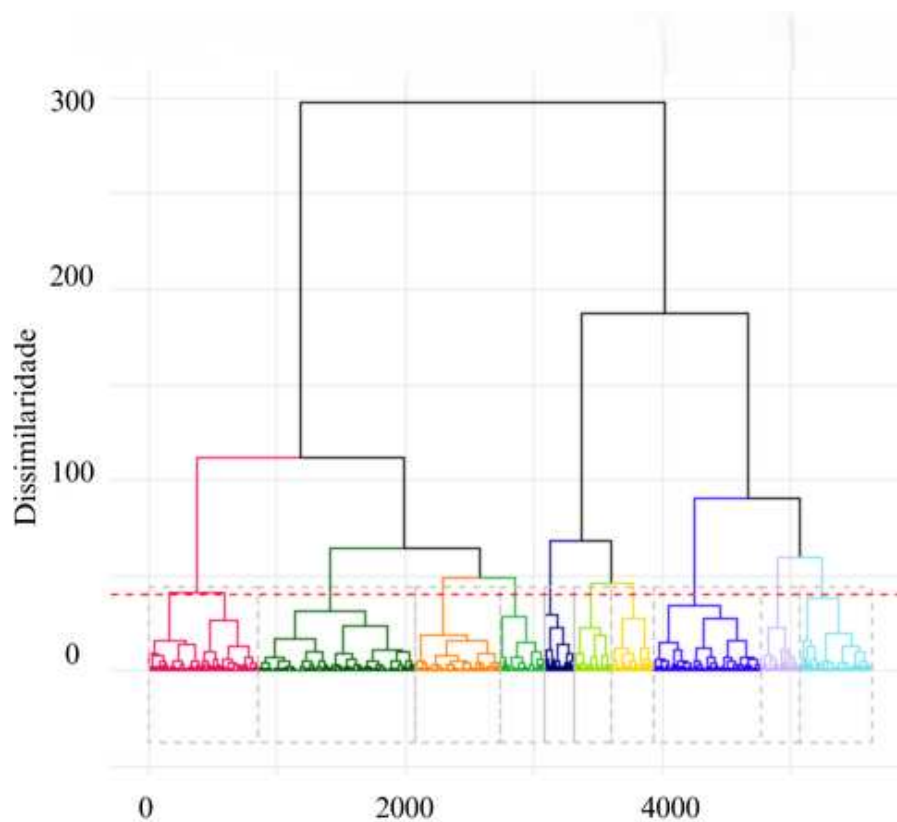


Figura 6: Dendrograma obtido pelo método de Ward, a partir das medidas de dissimilaridade entre 5636 estações pluviométricas para território brasileiro, baseado na distância Euclidiana, cujo ponto de corte foi definido pelo método Ward.

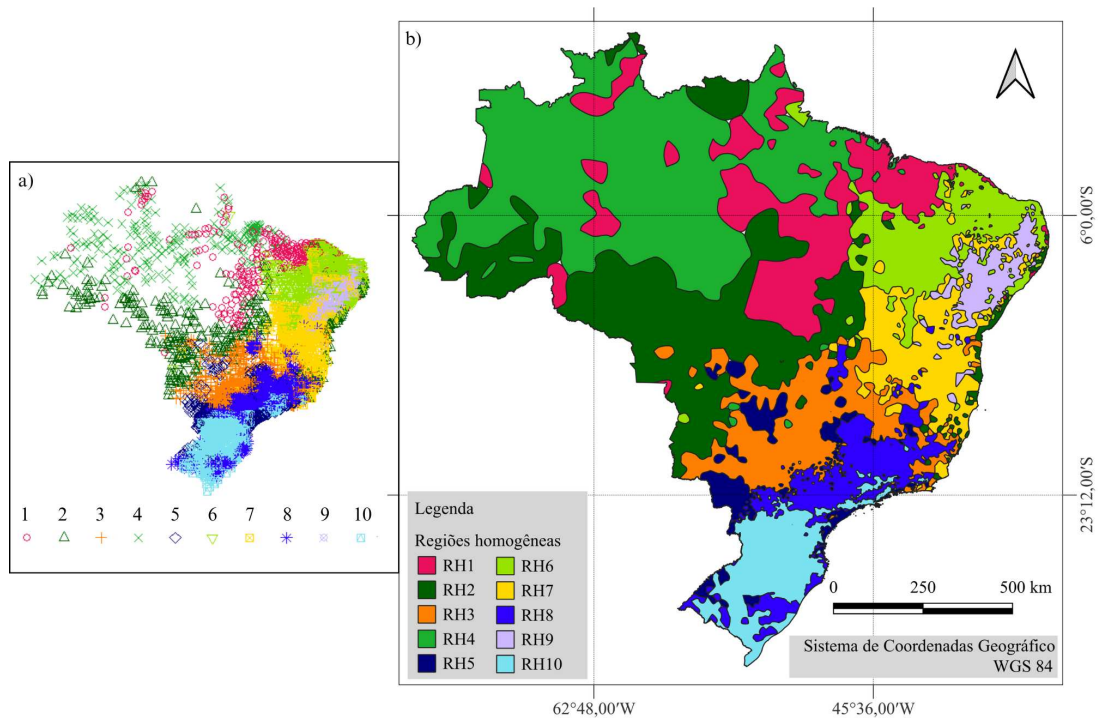


Figura 7: a) *Clusters*, obtidos pela PCA e HCA: as estações pluviométricas que compartilham as mesmas características do ponto de vista da máxima precipitação diária estão destacadas pelo mesmo símbolo e cor; b) regiões homogêneas identificadas sob ponto de vista das chuvas intensas através da espacialização dos *clusters* aplicando-se os polígonos de Thiessen

De acordo com o método proposto por Hosking e Wallis a homogeneidade das regiões foi testada mediante ao teste de Momentos L, Tabela 3. Com exceção da região homogênea 3, cujas H_2 e H_3 são menores que 2, todas as outras obtiveram valores suficientes para que sejam avaliadas em “aceitavelmente homogênea”, um nível superior de homogeneidade em relação à classificação de “possivelmente homogênea”, atribuída à região 3.

Tabela 3: Número de estações correspondentes a cada RH e critério de heterogeneidade medido através do método de Hosking e Wallis

Região homogênea	Número de estações	H_1	H_2	H_3
RH1	286	-20,15	-7,43	-11,34
RH2	325	-17,07	-4,77	-10,55
RH3	661	-25,95	1,88	1,76
RH4	231	-9,10	-1,47	-14,55
RH5	351	-17,84	-7,91	-15,96
RH6	837	-18,99	-8,40	0,46
RH7	557	-13,03	-7,44	-15,01
RH8	1219	-7,10	-8,46	-10,05
RH9	303	-5,57	-3,71	-10,23
RH10	842	-8,28	-8,13	-12,06

A Tabela 4 apresenta os valores médios associados a cada variável que compõe as PC1, PC2 e PC3 para todas as dez RH. Essa tabela permite identificar padrões regionais para cada variável, destacando as diferenças espaciais observadas nos dados. A RH1 compreende, principalmente, a Região Norte e parte de suas fronteiras com as regiões Centro-Oeste e Nordeste, estendendo-se até áreas do litoral. Ela apresenta os maiores valores médios de temperatura anual e de temperatura média no mês mais quente, embora disponha de uma das menores quantidades de estações. Por sua vez, a RH2 se distribui por todas as regiões brasileiras, exceto a região Sul. No Norte e no Centro-Oeste, cobre vastas áreas, sendo que quase todo o estado de Mato Grosso faz parte dessa RH. Já no Nordeste e no Sudeste, encontra-se principalmente em áreas litorâneas, abrangendo desde o Rio de Janeiro até a Paraíba.

Tabela 4: Médias das variáveis de maior importância para PCA por região homogênea

Variáveis	RH1	RH2	RH3	RH4	RH5	RH6	RH7	RH8	RH9	RH10
$h_{dia,2}$ (mm)	54,50	57,45	52,40	68,73	64,63	39,38	36,72	50,26	19,15	63,20
$h_{dia,5}$ (mm)	92,99	95,69	89,16	105,88	101,77	74,65	70,26	85,59	42,52	96,32
$h_{dia,10}$ (mm)	120,92	123,34	114,85	131,78	127,61	103,09	97,32	110,41	64,25	118,68
$h_{dia,20}$ (mm)	149,90	151,93	140,69	157,93	153,48	134,83	127,53	135,45	90,43	140,55
$h_{dia,50}$ (mm)	191,14	192,40	176,18	194,21	188,80	183,50	173,87	169,97	133,24	169,62
$h_{dia,100}$ (mm)	225,28	225,73	204,53	223,64	216,85	226,51	214,81	197,64	172,88	192,09
Lat (°)	-5,11	-13,13	-20,00	-3,40	-23,10	-6,78	-13,26	-22,63	-9,43	-25,93
Lon (°)	-45,85	-51,63	-48,55	-57,64	-49,68	-39,79	-41,41	-47,46	-38,15	-50,13
PQMF (mm)	562,42	180,67	103,68	827,04	219,76	159,26	98,06	137,31	147,26	313,25
PQMU (mm)	845,78	730,41	635,53	993,04	679,91	522,01	459,25	630,15	302,42	568,96
PVMed (kPa)	2,59	2,40	2,01	2,81	1,95	2,29	2,06	1,80	2,20	1,61
RadMed (kJ m ² dia ⁻¹)	16781,40	15827,92	15573,28	15049,19	14829,95	17887,49	16911,76	14909,23	17750,06	14511,43
TMA (°C)	26,43	24,69	22,46	26,30	21,29	25,75	22,88	19,91	23,54	17,62
TMMMF (°C)	19,72	15,88	12,16	20,67	11,45	18,86	14,56	9,73	16,58	7,49
TMMMQ (°C)	33,54	32,18	30,23	32,33	29,61	32,89	30,51	28,06	30,71	26,96

A RH4 situa-se em uma grande porção da floresta Amazônica, apresentando os maiores índices médios de $h_{dia,T}$ e da precipitação associada aos quartis mais úmidos e frios, o que pode ser justificado (nesse caso) pela localização geográfica. Note que a região Norte do país apresenta as maiores RH/m², representadas pela RH1, RH2 e RH4. A menor subdivisão em detrimento de outras áreas reflete na baixa densidade de estações pluviométricas e pluviográficas. Além disso, as três RH representam as maiores latitudes médias, estando mais próximas da linha do Equador, geralmente associadas a um clima quente e úmido (Dias; Penner, 2021).

A pressão de vapor, e_0 , representa a quantidade de vapor d'água no ar. Já a pressão de vapor de saturação, e_s , corresponde à máxima pressão que o vapor d'água pode exercer em uma determinada temperatura, T, caracterizando o equilíbrio entre evaporação e condensação (Silva; Mendes, Ferreira, 2024). A relação entre essas três variáveis é descrita pela Lei de Clausius-Clapeyron, que afirma que a pressão de vapor aumenta exponencialmente com a temperatura (Damasceno, 2024):

$$e_s = e_0^{-\frac{L}{RT}}, \quad (16)$$

em que L refere-se ao calor latente da água e R é a constante universal dos gases. O aumento na capacidade da atmosfera de reter água é estimado em cerca de 7% para cada aumento de 1° C na temperatura (Papadopoulos-Zanchos; Anagnostopoulou, 2024). Conforme mostra a Tabela

4, os valores mais altos da pressão de vapor média anual ocorrem nas regiões homogêneas RH1 e RH4, cujas médias são, respectivamente, 2,59 kPa e 2,81 kPa. Para que ocorra precipitação, é necessário que o ar esteja próximo da saturação. Isso ocorre quando a pressão de vapor real se aproxima da pressão de vapor de saturação, o que leva a um aumento na umidade relativa (UR), definida como:

$$UR = \frac{e}{e_s} \times 100. \quad (17)$$

Quanto maior a umidade relativa, maior a probabilidade de formação de nuvens e precipitação (Hao; Lu, 2022), refletindo os resultados expressos por RH4. Essas regiões também apresentam as temperaturas médias mais elevadas, corroborando a relação entre temperatura e pressão de vapor de saturação.

A RH3 concentra-se de forma irregular na fronteira entre várias RH distintas principalmente no Sudeste e Centro-Oeste do país. Há ainda áreas menores no Sul e Nordeste que compartilhem as mesmas características hidrológicas. Valores intermediários, tanto relacionados as lâminas precipitadas quanto as temperaturas, pressão de vapor médio da água quanto radiação média anual estão atribuídos a RH3. Na divisa, há a área de abrangência da RH5. Nessa região concentram-se altos valores médios associados as variáveis climáticas, bem como os segundos maiores índices precipitados. Embora espalhe-se pelos estados Mato-Grosso, Mato-Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, é muito pequena. Apesar disso, seu número de estações (251) é maior que o número de estações da RH1 (286) e RH2 (325), cuja extensão territorial é muito maior.

A maior quantidade de regiões homogêneas distintas no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil pode ser explicada por uma combinação de fatores naturais e antrópicos que influenciam as características hidrológicas e climáticas dessas regiões. Primeiramente, a grande variação de relevo nessas áreas, com a presença de planaltos, chapadas e cadeias de montanhas exerce uma forte influência nos padrões de precipitação, temperatura e circulação atmosférica. Além disso, o Sudeste do Brasil, reconhecido como uma das regiões mais dinâmicas e influentes, destaca-se por sua densidade populacional e atividades industriais e relevância econômica (Jesus, 2024), o que reflete na quantidade de estações disponibilizadas. A maior densidade de estações meteorológicas no Sudeste e Centro-Oeste permite um detalhamento mais preciso na análise dos dados hidrológicos e climáticos. Isso facilita a identificação de diferenças entre áreas, contribuindo para a classificação em um maior número de Regiões Homogêneas.

A RH3 e RH5 abrigam uma transição entre diferentes biomas, como a Mata Atlântica, o Cerrado e o Pantanal. Cada um desses biomas apresenta características climáticas e hidrológicas próprias, como padrões distintos de chuva, umidade e vegetação, o que também colabora para a subdivisão em várias regiões homogêneas. Além disso, o Sudeste do Brasil, reconhecido como uma das regiões mais dinâmicas e influentes do Brasil, destaca-se por sua densidade populacional e atividades industriais e relevância econômica (Jesus, 2024), o que reflete na quantidade de

estações disponibilizadas. A maior densidade de estações meteorológicas no Sudeste e Centro-Oeste permite um detalhamento mais preciso na análise dos dados hidrológicos e climáticos. Isso facilita a identificação de diferenças entre áreas, contribuindo para a classificação em um maior número de Regiões Homogêneas.

Conforme mostra a Tabela 4, a RH3 está associada a valores intermediários de $h_{dia,T}$ para todos os períodos de retorno e a RH5 a aos segundos maiores valores de $h_{dia,T}$, com exceção a $T = 100$ anos. Trabalho desenvolvido por Silva, Reboita e Escobar (2019) divulgou a Figura 8, que representa as características dos eventos da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Os vetores em verde representam o padrão dos ventos próximos à superfície (cerca de 1500 metros de altitude), fluindo de áreas de alta para baixa pressão; as isolinhas rosas representam a altitude (em metros) onde a pressão atmosférica é de 500 hPa, que podem atuar como barreiras para circulação de ar; as setas pretas referem-se ao sistema da Alta Bolívia, às correntes de jato em altos níveis de altitude. Os vetores verdes mostram o transporte de umidade da Amazônia em direção centro-sul do Brasil, que justifica os valores precipitados apresentados na Figura 4 para o Sul, Sudeste e Centro-Oeste brasileiro. O padrão de chuvas associado à costa pode estar vinculado ao transporte direto das massas de ar oriundas do oceano Atlântico que tangenciam o continente, como ocorre no Espírito Santo (Figura 4 e na área litorânea da RH2. Todos esses fenômenos são intensificados pelas correntes de jato.

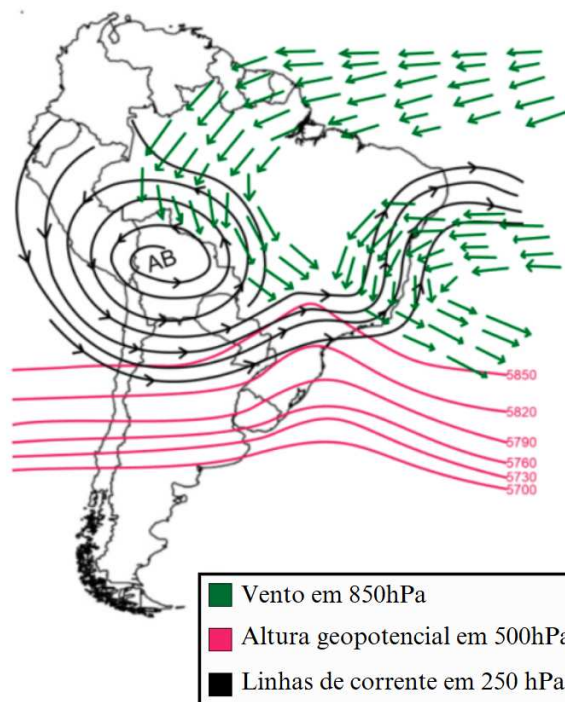


Figura 8: Características da ZCAS em baixos (vetores em verde), médios (altura geopotencial em 500 hPa em rosa) e altos níveis (linhas de corrente em 250 hPa em preto)

Silva, Escobar; Reboita (2019).

A RH que possui o maior número de estações é a 8. Essa região, por sua vez, apresenta-se entre a região Sudeste, Sul e Centro-Oeste do país. Embora apresente uma extensão territorial

pequena, possui alta densidade de estações. Ainda que os valores mais altos de precipitação não estejam vinculados a esta região, a Zona de Convergência Intertropical apresenta um fluxo de umidade bem estabelecido desde a região Amazônica até o oceano Atlântico, passando pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste do País (Silva; Escobar; Reboita 2020), como pode ser visto na Figura 8.

Se estende pelas regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste a RH7, cujos menores (depois da RH9) valores médios da precipitação a caracteriza. Ainda que a altitude não tenha sido um fator influente para formação dessa região homogênea, valores acentuados estão presentes nesta topografia, como mostra a Figura 1. De acordo com a Tabela 4, os menores valores médios de PQMF, bem como baixos índices de $h_{dia,2}$, $h_{dia,5}$, $h_{dia,10}$ e PQMU encontram-se nesta RH.

A média da máxima lâmina diária precipitada associada ao período de retorno de 100 anos, juntamente com os valores médios de radiação solar anual, estão relacionadas à RH6. A perpendicularidade dos raios solares em relação à superfície dessa região resulta em uma variabilidade térmica reduzida, além da ausência de ciclos sazonais típicos, como primavera, verão, outono e inverno (Pinheiro; Pinheiro; Pinheiro, 2023). Essa região abrange parte do litoral nordestino e se estende por áreas de estados do Nordeste, Nordeste de Minas Gerais e o Noroeste do Mato Grosso do Sul, que compartilham pequenas porções dessa região homogênea.

Um dos principais responsáveis por esses elevados volumes de chuva na RH6 é a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A Zona de Convergência Intertropical é o sistema meteorológico mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor norte do Nordeste do Brasil (Oliveira et al. 2023). Segundo Menezes (1995), o fortalecimento dos alísios de nordeste e sudeste aumenta a área de atuação da Zona de Convergência Intertropical que pode chegar a até $5^{\circ}S$ o que proporciona aumento dos totais normais de precipitação na região nordeste do país.

Além disso, a alta incidência de radiação solar devido aos menores valores de latitude presentes nessa RH resultam em altos padrões de temperatura e, conseqüentemente, pressão de vapor d'água elevado. Esses parâmetros contribuem para aumento da umidade relativa e, à vista disso, altos índices precipitados, como discutido anteriormente.

Os menores valores médios de lâmina máxima precipitada, seja diária ou do quartil mais úmido, foram determinantes para delimitação da RH9, que situa-se no semi-árido brasileiro. À medida que se adentra o Nordeste do Brasil do oceano Atlântico em direção ao continente, a precipitação reduz. No Sertão Nordestino os totais anuais de precipitação são de aproximadamente 400 mm que é cerca de 75% a menos do que na região litorânea (Reboita et al., 2016). Um fator importante para ser levado em consideração é a presença do planalto da Borborema, que impede o escoamento em altos níveis da atmosfera quando o ar úmido tenta adentrar o Nordeste, assim como discute Santos, Ferreira e Santana (2023), que notou diminuição da precipitação no sentido Leste-Oeste associado a hipsometria da cidade de Campo Grande, Paraíba.

Gomes e Zanella (2023) discutem sobre outras hipóteses relacionadas a origem da semiaridez do Nordeste à sua posição geográfica com relação às massas de ar atuantes, de forma que a

região representaria o "ponto final" de diversos sistemas de correntes atmosféricas, uma vez que as massas de ar Equatorial Continental, Equatorial Atlântica, Tropical Atlântica e Polar Atlântica chegam no interior do Nordeste com umidade insuficiente. Molion e Bernardo (2002), por outro lado, sugere que o fenômeno de seca pode estar relacionado à adjacência à região Amazônica, uma vez que "o ar ascendente sobre a Amazônia adquire movimento anticiclônico nos níveis altos (alta da Bolívia) diverge e, parte dele, desloca-se para leste, criando um ramo descendente e uma forte inversão psicotérmica"

Por fim, a RH10 abrange o a região Sul e parte da região Sudeste (Sul de Minas, Rio de Janeiro e São Paulo). Coerentemente, os valores médios mínimos de todas as variáveis que contribuíram para a componente 3 da PCA (que refletem características climáticas, sobretudo térmicas) foram obtidos nesta região. O menor valor médio da pressão de vapor também encontra-se nessa RH, que, vinculado aos baixos valores de temperatura, justificam os índices precipitados. Além disso, tanto a RH10 quanto a RH8 apresenta valores bem variados de $h_{dia,T}$, não seguindo um padrão concentrando menores ou maiores valores, como acontece com RH9, por exemplo.

4 Conclusão

As maiores lâminas diárias precipitadas associadas a eventos extremos destacam a vulnerabilidade de áreas como o Sudeste, que concentra altos valores para períodos de retorno mais longos (50 e 100 anos), e a importância de entender os fatores que intensificam esses eventos. Para períodos de retorno mais curtos, por outro lado, (2 e 5 anos) a Região Sul deteve os maiores valores; para os períodos de retorno intermediários (10 e 20 anos) a Região Norte teve as maiores lâminas diárias precipitadas.

A análise estatística da série de dados, feita através das funções de distribuição de probabilidade Gamma, Gumbel e Log-Normal a 2 parâmetros foram aferidas à aderência conforme os testes KS, χ^2 e AD. As FDPs que mais ajustaram as séries de dados de estações foram Gumbel, Log-Normal a 2 parâmetros e Gamma com, respectivamente, 73%, 21% e 6% dos ajustes.

A predominância da distribuição de Gumbel como ferramenta representativa para modelar os eventos extremos reforça sua relevância para estudos hidrológicos, ao passo que o uso complementar de outras distribuições, como LN2 e Gamma, aponta para a necessidade de abordagens regionais mais refinadas. Além disso, a disparidade na densidade de estações pluviométricas, especialmente em regiões como o Norte, evidencia a necessidade urgente de ampliar a cobertura do monitoramento para oferecer uma representação mais precisa e uniforme dos regimes de entrega no país.

Os três primeiros componentes principais da PCA explicaram, em conjunto, 74,10% da variância total dos dados, sendo que o primeiro componente (PC1) capturou 40,91%, seguido por 21,38% pelo segundo (PC2) e 11,81% pelo terceiro (PC3).

A análise de agrupamento hierárquico feito através do método de Ward. Foi definido número ótimo de *clusters* igual a 10 a partir da análise da árvore do dendrograma. As 10 regiões

homogêneas tiveram sua homogeneidade verificadas através do método proposto por Hosking e Wallis, em que apenas o *cluster* 3 foi classificado como "possivelmente homogêneo", de acordo com os valores H_2 e H_3 , inferiores ao H crítico (tal que $H_i > 2$ implica em heterogeneidade, $1 < H_i < 2$ é "possivelmente homogêneo" e $H_i < 1$ é "aceitavelmente homogêneo"). As demais regiões obtiveram bons resultados, com valores menores que 1 para todas as medidas de heterogeneidade, e conseqüentemente classificadas em aceitavelmente homogêneas. De modo geral, as regiões foram bem caracterizadas de acordo com variáveis importantes do ponto de vista hidrológico. Ao analisar as variáveis que tiveram maiores contribuições para formação dos componentes principais, o resultado torna-se ainda mais coerente.

5 Referências

ABREU, M. C. et al. Criteria for choosing probability distributions in studies of extreme precipitation events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, p. 601–613, 1 out. 2018.

ALMEIDA, L. T. Transformação da Máxima Precipitação Diária para estabelecimento de Equações de Chuvas Intensas: Nova Proposta. Orientador: Roberto Avelino Cecílio. 2022. 147 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2022. Versão eletrônica.

ALVALÁ, R. C. S. et al. Analysis of the hydrological disaster occurred in the state of Rio Grande do Sul, Brazil in September 2023: Vulnerabilities and risk management capabilities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 110, 1 ago. 2024.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

ALVES, A. V. P. et al. Análise dos métodos de estimativa para os parâmetros das distribuições de Gumbel e GEV em eventos de precipitações máximas na cidade de Cuiabá-MT. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 6, p. 34–43, 2013.

ANJOS, L. S. et al. Resgate histórico dos eventos extremos de precipitação e seus impactos no município do Recife-PE. *Revista Brasileira de Climatologia*, p. 337–359, 26 fev. 2024.

BACK, Á. J.; WILDNER, L. DO P.; PEREIRA, J. R. Chuvas intensas para projetos de conservação do solo e da água no estado de Santa Catarina. *Agropecuária Catarinense*, v. 34, n. 2, p. 65–72, 20 ago. 2021.

BOLAR, K. STAT: Interactive Document for Working with Basic Statistical Analysis. R package version 2.3. , 2019.

BRITO, T. T. et al. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 129, n. 5, p. 469–478, 1 out. 2017.

BURN, D.H. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology*. p. 212–230. 1997.

DAMASCENO, I. P. A importância da temperatura de superfície do Oceano Atlântico Sul na avaliação do impacto nas mudanças de regime do Sistema de Monção da América do Sul (SMAS). Orientadora: Ilana Waiber. 2024. Dissertação (Mestrado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

DA SILVA, C. M.; PEREIRA FILHO, J. Equation of heavy rainfall using the rainfall disaggregation method for the Farinha river basin – MA. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, v. 17, n. 2, p. e4483, 14 fev. 2024.

DE LA FUENTE, A. et al. Geografia, meio ambiente, educação & cidadania: Elementos para refletir a realidade socioambiental. Curitiba: Editora CRV, 2020.

DIAS, É. C.; PENNER, G. C. Equação de chuvas intensas para Abaetetuba-PA: estudo comparativo. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 4, p. e31310414213, 12 abr. 2021.

DIKBAS, F. et al. Defining Homogeneous Regions for Streamflow Processes in Turkey Using a K-Means Clustering Method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, v. 38, n. 6, p. 1313–1319, 2013.

DUROCHER, M.; CHEBANA, F.; OUARDA, T. B. M. J. Delineation of homogenous regions using hydrological variables predicted by projection pursuit regression. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 12, p. 4717–4729, 29 nov. 2016.

GALILI, T. dendextend: Extending “dendrogram” Functionality in R. R package version 1.14. , 2020.

GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. Histórico, causas e características da semiaridez do Nordeste do Brasil. *Geografares*, 1 dez. 2023.

HIDROWEB. Série histórica de estações. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 24 jan. 2025.

HONGYU, K. et al. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação Principal Component Analysis: theory, interpretations and applications. *Engineering and Science*, v. 1, 2015.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, James R. *Regional Frequency Analysis*. New York: Cambridge University Press, 1997.

IBGE. Áreas Territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.

JESUS, E. S. Tempestades na região Sudeste do Brasil: análises de dois episódios extremos de precipitação. 2024. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. doi:10.11606/D.14.2024.tde-11102024-093250. Acesso em: 2024-12-05.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. CRAN: Contributed Packages, 2016.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: AnRPackage for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, v. 25, n. 1, 2008.

LECCE, S.A. Spatial variations in the timing of annual floods in the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, v. 235, n. 3–4, p. 151–169, 2000.

LIMA, S. S.; ARMOND, N. B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. *Sociedade & Natureza*, v. 34, n. 1, 17 out. 2022.

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 78, n. 1–3, p. 79–96, 2004.

MENDONÇA, M. G. S. et al. Fenômenos climáticos extremos na região metropolitana de Recife: Gestão de riscos e políticas de prevenção e mitigação. *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Recife- PE, 2024.

MENEZES, R. H. N. Relação entre a precipitação no NEB e as anomalias de temperatura da superfície do mar dos Oceanos Atlântico e Pacífico tropicais. Dissertação (Mestrado em

Meteorologia). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 1995.

MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 17, p. 1-10.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. A metodologia estatística dos eventos extremos de precipitação: uma proposta autoral para análise de episódios pluviométricos diários. *Revista Brasileira de Climatologia*, p. 496–516, 31 mar. 2023.

MONTEIRO, L. R.; DUARTE, B. C.; VANELLI, F. M. Mapeamento de perigo de inundação para Rio Negrinhos/SC. III Encontro Nacional de Desastres, 2023.

MONTEIRO, V. L.; ARAÚJO, G. R. M. Importância da implementação de cidades-esponja: um estudo do município de São José dos Campos/SP. *Revista Ciências Exatas*, v. 30, n. 2, 19 dez. 2024.

MOUSSINHO, F. H. G. et al. Rainfall characterization of the last 50 years in Caruaru - PE, with trend analysis, daily maximums, IDF Curves and Gumbel distribution. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 2, p. 958–973, 14 mar. 2024.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Identification of homogeneous regions for the purposes of regionalisation. *Journal of Hydrology*, v. 121, p. 217–238, 1990.

OLIVEIRA, S. S. et al. Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia. In: EDITORA POISSON (Ed.). Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia - Volume 14. 1. ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2023. v. Volume 14.

PALHARINI, Rayana et al. Análise de eventos extremos de precipitação e desastres naturais usando produtos de precipitação de satélite em diferentes regiões do Brasil. *Atmosphere*, v. 13, n. 10, p. 1680, 2022.

PAPADOPOULOS-ZACHOS, A.; ANAGNOSTOPOULOU, C. A Methodological Approach to Improving Extreme Precipitation Reanalysis Data Using the Clausius-Clapeyron Relationship: A Case Study in a Mediterranean City. *Atmosphere*, v. 15, n. 10, 1 out. 2024.

PENNER, G. C. et al. Methodology for IDF equation based on reduced pluviograph records. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 58, n. 3, p. 365–374, 2023.

PEREIRA, C. R. P. Planejamento urbano e gestão de risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Bacanga - São Luís, MA. *Geoconexões*, v. 1, n. 18, p. 129–150, 30 jun. 2024.

REBOITA, M. S. et al. Causas da semi-aridez do sertão Nordeste. *Eletrônica) Ano*, v. 12, p. 2237–8642, dez. 2016.

RENCHER, A.C. *Methods of Multivariate Analysis*. A JOHN WILEY SONS, INC. PUBLICATION, p.727. 2ed. 2002.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA.

RUEZENNE, C. B. et al. Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tradicionais e por inteligência artificial. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 29, p. 179–204, 22 set. 2021.

SANTIÑAQUE, F.; KALEMKERIAN, J.; RENOM, M. Spatial Clustering of Extreme Annual Precipitation in Uruguay. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 4, p. 419–426,

2022.

SANTOS, C. P. DA S. Análise estatística de extremos de precipitação via distribuição generalizada de Pareto (GPD). Estudo de casos: Natal, Fortaleza e Teresina. Natal - RN, 9 ago. 2024.

SANTOS, P. H. N.; FERREIRA, W. S.; SANTANA, B. L. P. Repercussões do El Niño e La Niña na precipitação do Estado de Sergipe - Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 33, p. 411–437, 19 nov. 2023.

SILVA, P. N.; ESCOBAR, G. C. J.; REBOITA, M. S. Eventos extremos de precipitação no Estado de Minas Gerais associados com a ocorrência de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 3, p. 1013–1023, 2020.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da zona de convergência do atlântico sul em campos atmosféricos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, jul. 2019.

SILVA, W. R. F.; MENDES, K. G.; FERREIRA, R. DOS S. Development of a meteorological station using reused materials and low-cost sensors. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 46, 2024.

SMITHERS, J.C; SCHULZE, R.E. A methodology for the estimation of short duration design storms in South Africa using a regional approach based on L-moments. *Journal of Hydrology*, v. 241, n. 1–2, p. 42–52, 2001.

SOLTANI, S.; MODARRES, R. Classification of spatio-temporal pattern of rainfall in Iran using a hierarchical and divisive cluster analysis. *Journal of Spatial Hydrology*, v. 6, n. 2, 2006.

SOUSA, J. W.; COSTA, D. B. Ajuste de distribuições de probabilidades à série 1970-2010 de precipitação máxima anual de Rio Branco, Acre. *Scientia Naturalis*, v. 2, n. 1, p. 177–187, 7 maio 2020.

TAVARES, C. DE M. G.; FERREIRA, C. DE C. M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis - RJ. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 26, 4 mar. 2021.

TEIXEIRA, D. B. S.; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; et al. Assessment, Regionalization, and Modeling Rainfall Erosivity Over Brazil: Findings from a Large National Database. *SSRN Electronic Journal*, 2023.

TERASSI, P.; GALVANI, E. Identification of Homogeneous Rainfall Regions in the Eastern Watersheds of the State of Paraná, Brazil. *Climate*, v. 5, n. 3, p. 53, 2017.

WARD, Joe H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, v.58, n.301, p.236, 1963.

WorldClim. Disponível em: < <https://www.worldclim.org/> >. Acesso em: 7 mai. 2024.

CAPÍTULO 3

OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES IDF PARA AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS BRASILEIRAS ATRAVÉS DO MÉTODO TMPD

RESUMO

As chuvas intensas são eventos extremos caracterizados pela precipitação de grandes volumes de água em curtos intervalos de tempo, frequentemente resultando em vários desastres significativos. A caracterização de eventos extremos de chuva é usualmente feita através de curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), que requerem dados históricos de alta qualidade e longo prazo. Para obter esses dados, são usados pluviogramas e séries representativas. Entretanto, a falta de dados pluviográficos e as limitações das séries pluviométricas levaram ao uso de relações que estimam chuvas intensas com base em dados pluviométricos diários, como o método da "Transformação da Máxima Precipitação Diária (TMPD)", que permite a obtenção de relações IDF com base nas características regionais das chuvas intensas. O método utiliza coeficientes de transformação (*cts*) que transformam a máxima lâmina diária precipitada em intensidade máxima média precipitada. Entretanto, para as estações onde os *cts* são desconhecidos, o método utiliza os coeficientes de transformação das estações pluviométricas mais próximas. Acredita-se que a utilização de regiões homogêneas para aplicação do método e conhecimento do limite de validade dos coeficientes de transformação melhor representa, do ponto de vista das chuvas intensas, as intensidades máximas médias precipitadas. O presente trabalho utilizou o método TMPD para obtenção dos parâmetros estatísticos da equação IDF aplicado a da regiões homogêneas para 5636 estações meteorológicas brasileiras. Os parâmetros K , a , b e c , ajustados para diferentes localidades, apresentaram as variações $87,438 < K < 11411,778$; $0,013 < a < 0,833$; $0,999 < b < 76,731$; $0,500 < c < 1,225$.

Palavras-chave: Precipitação; Projetos Hidrológicos; Eventos Extremos; Intensidade-Duração-Frequência; Coeficientes de Transformação; TMPD.

ABSTRACT

OBTAINING INTENSITY-DURATION-FREQUENCY EQUATIONS FOR BRAZILIAN RAIN GAUGE STATIONS USING THE TRANSFORMATION OF MAXIMUM DAILY PRECIPITATION METHOD

Heavy rainfall is an extreme event characterized by the precipitation of large volumes of water in short time intervals, often resulting in several significant disasters. The characterization of extreme rainfall events is usually done through intensity-duration-frequency (IDF) curves, which require high-quality and long-term historical data. To obtain these data, pluviograms and representative series are used. However, the lack of rainfall data and the limitations of rainfall series have led to the use of relationships that estimate heavy rainfall based on daily rainfall data, such as the "Transformation of Maximum Daily Precipitation (TMPD)" method, which allows the obtaining of IDF relationships based on the regional characteristics of heavy rainfall. The method uses transformation coefficients (*cts*) that transform the maximum daily precipitation depth into the average maximum precipitation intensity. However, for stations where the *cts* are unknown, the method uses the transformation coefficients of the nearest rainfall stations. It is believed that the use of homogeneous regions for applying the method and knowing the validity limit of the transformation coefficients better represents, from the point of view of heavy rainfall, the average maximum precipitation intensities. The present work used the TMPD method to obtain the statistical parameters of the IDF equation applied to homogeneous regions for 5636 Brazilian meteorological stations. The parameters K , a , b and c , adjusted for different locations, presented the variations $87.438 < K < 11411.778$; $0.013 < a < 0.833$; $0.999 < b < 76.731$; $0.500 < c < 1.225$.

Key-words: Precipitation; Hydrological Projects; Extreme Events; Intensity-Duration-Frequency; Transformation Coefficients; TMPD.

1 Introdução

Chuvas intensas são eventos meteorológicos que resultam em grandes volumes de precipitação em um curto intervalo de tempo (Calbete et al., 1996). Quando essas chuvas têm curta duração e alta intensidade, há uma maior probabilidade de causarem desastres, como inundações em áreas urbanas, caracterizadas por alto escoamento superficial e baixa capacidade de infiltração do solo (Li et al., 2023), deslizamentos de terra (Vasconcelos Junior et al., 2024), erosão do solo (Zhao et al., 2024) e falhas em encostas (Song; Tan, 2024). Os riscos naturais associados a esses eventos extremos provocam sérios impactos socioeconômicos nas comunidades afetadas. Em 2024, por exemplo, o Brasil enfrentou um desastre hidrológico significativo, que atingiu praticamente todo o estado do Rio Grande do Sul, afetando 478 de seus 497 municípios (Da Costa et al., 2025).

Compreender a distribuição espacial e temporal dos eventos pluviométricos, bem como suas principais características — intensidade, duração e frequência — é fundamental para proteger a vida humana e apoiar o desenvolvimento das atividades econômicas (Sane et al., 2018). As equações de intensidade-duração-frequência para diversas localidades são indispensáveis para o planejamento urbano e a construção de infraestruturas hidráulicas, permitindo estimar a intensidade da precipitação em diferentes escalas de tempo e períodos de retorno, fornecendo dados essenciais para projetos de infraestrutura hidráulica, além de ser crucial no planejamento e na gestão de recursos hídricos (Simonovic et al., 2016; Sarhadi e Soulis, 2017). Matematicamente, a Equação IDF é expressa por meio da relação:

$$i_m = \frac{KT^a}{(d+b)^c}, \quad (1)$$

em que i_m é a intensidade máxima média de precipitação, em $mm \cdot h^{-1}$; T é o período de retorno da precipitação, em anos; d é a duração da precipitação, em minutos; e K , a , b , c são parâmetros de ajuste estatístico obtidos para cada localidade com disponibilidade de dados pluviográficos e/ou pluviométricos.

Devido à falta de dados pluviográficos em quantidade e qualidade suficientes no Brasil, normalmente são utilizados dados de precipitação máxima diária anual fornecidos por estações pluviométricas. Em seguida, aplica-se um método de desagregação para estimar a precipitação com durações menores que 24 horas (Nóbrega; Neves, 2024). Dos diversos métodos de desagregação de chuvas existentes destacam-se: o Método das Relações de chuvas de diferentes durações (RCDD, Cetesb 1986); o Método de Bell (1969); o Método de Chen (1983); o Método de Hernandez (1991); o Método das Isozonas, o Método de Beltrame (1991) e o Método da Transformação da Máxima Precipitação Diária (2022). Dentre eles, o mais difundido até hoje é o RCDD, segundo Back e Cadorin (2021). Todavia, Almeida (2022) demonstrou melhores resultados do TMPD em relação ao RCDD.

Diferentemente do método da Relação de Chuvas de Diferentes Durações, o método de

Transformação da Máxima Precipitação Diária reflete características regionais de cada estação pluviométrica ao converter a máxima lâmina diária precipitada em intensidade máxima média de chuva. O TMPD recomenda o uso do coeficiente de transformação mais próximo da estação para a qual se deseja calcular os dados, baseando-se na equação-alvo. No entanto, essa abordagem nem sempre é a mais apropriada, pois uma estação com um coeficiente conhecido pode não compartilhar as mesmas características hidrológicas da estação de interesse. Nesse contexto, é essencial que as estações possuam similaridades hidrológicas para que o uso de regiões homogêneas se torne mais apropriado, como destacado por Almeida (2022).

Essa necessidade de considerar similaridades regionais está diretamente associada à influência de fatores climáticos nos padrões de precipitação. O clima de uma região é amplamente determinado pela circulação atmosférica global, que resulta do aquecimento desigual do planeta pela radiação solar, da distribuição assimétrica entre oceanos e continentes e das características topográficas locais (Montoya et al., 2018). Outros fatores, como latitude, longitude, orientação do relevo, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade média dos ventos, também desempenham papéis significativos nos padrões de precipitação (Liu et al., 2021; Smith et al., 2021).

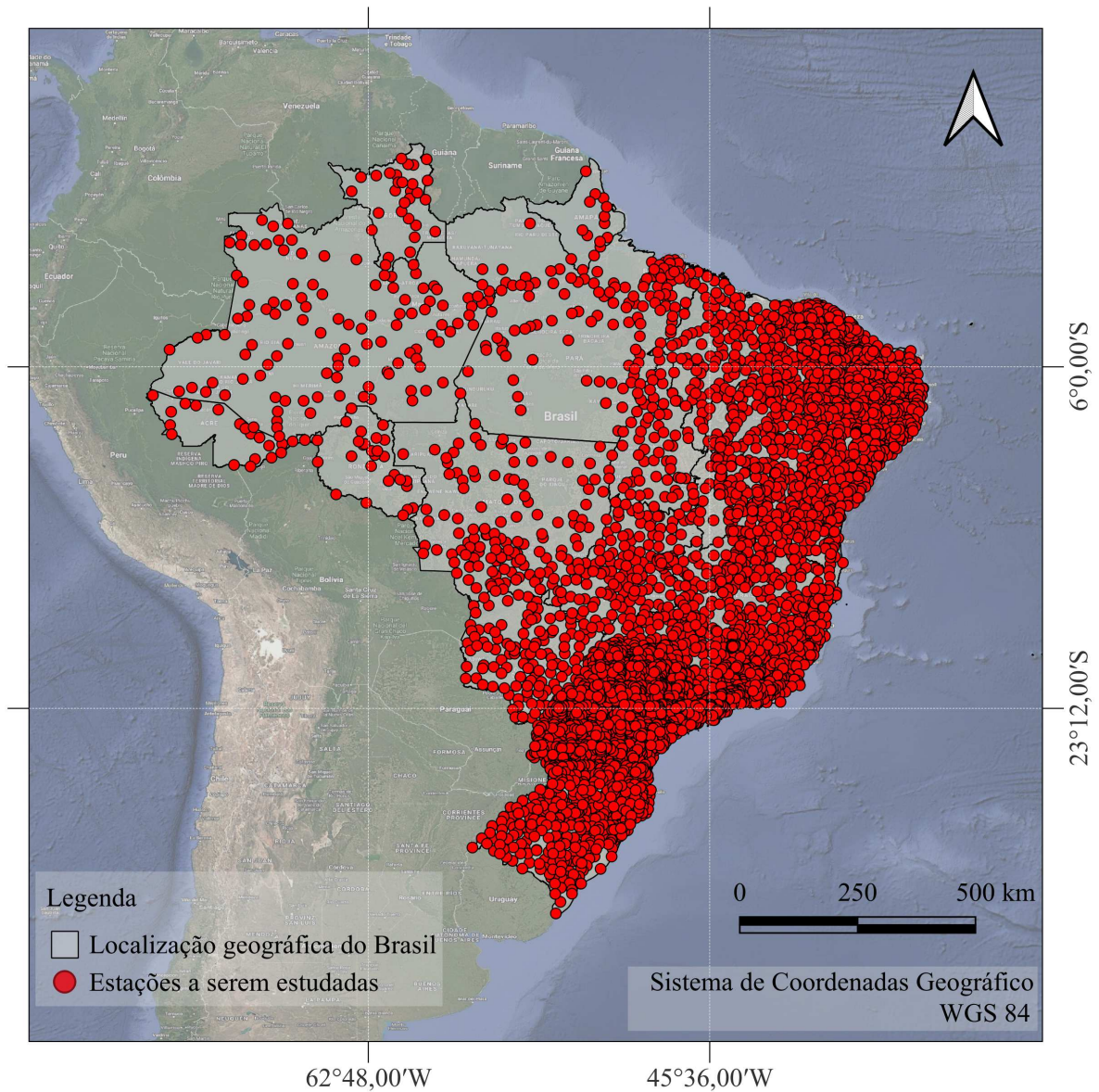
A interação complexa desses fatores pode gerar regimes pluviométricos distintos, mesmo em regiões próximas, o que reforça a necessidade de adotar métodos que considerem características homogêneas do ponto de vista das chuvas intensas. Assim, a homogeneidade regional é vista como um critério mais adequado para determinar a área de abrangência das 301 estações, permitindo a identificação de coeficientes de transformação mais representativos e ajustados a limites espaciais específicos, potencializando a aplicação do TMPD.

Do exposto, objetivo deste trabalho é aplicar o método de Transformação da Máxima Precipitação Diária (TMPD) no contexto das regiões homogêneas, identificadas no Capítulo 2 com base nas chuvas intensas, para estabelecer as equações intensidade-duração-frequência (IDF) em todo o território nacional. Essa abordagem busca explorar a potencialidade do TMPD em representar as condições locais de precipitação com maior precisão.

2 Métodos

Os parâmetros da Equação de Chuvas Intensas foram obtidos para todas as estações do Brasil, Figura 1. As séries de dados das estações pluviométricas utilizadas no presente estudo foram baixadas diretamente da Agência Nacional de Águas (ANA). Das estações pluviométricas brasileiras, foram filtradas aquelas com ao menos 30 anos de medições consecutivos, totalizando 5636 estações. O Brasil, localizado na América do Sul, é o maior país do hemisfério sul e o quinto maior do mundo em extensão territorial, com uma área de mais de 8,5 milhões de quilômetros quadrados, segundo o IBGE (2023). Situado entre as latitudes $5^{\circ}16'$ norte e $33^{\circ}45'$ sul e longitudes $34^{\circ}47'$ oeste e $73^{\circ}59'$ oeste, o território brasileiro abrange uma ampla variedade de climas e biomas e faz fronteira com 10 países sul-americanos, sendo banhado a leste pelo Oceano Atlântico ao longo de uma costa de mais de 7.400 km. Sua posição equatorial e tro-

pical, aliada à diversidade topográfica e climática, faz do Brasil um país com características hidrológicas e pluviométricas bastante heterogêneas, contribuindo para a complexidade de seus padrões de precipitação e recursos hídricos.



2.1 Estabelecimento das equações IDF

2.2 TMPD aplicada às regiões homogêneas

Conhecidos os coeficientes de transformação, a transformação da máxima precipitação diária desenvolvida por Almeida (2022) se dá na utilização dos *cts* para converter a máxima lâmina diária da estação pluviométrica mais próxima em máxima intensidade média precipitada associada a uma combinação de duração e período de retorno específico $\widehat{I}_{d,T}$ conforme descrito pela

Equação 2 abaixo:

$$\widehat{I}_{d,T} = ct_{d,T} h_{dia,T}, \quad (2)$$

em que $ct_{d,T}$ são os coeficientes de transformação associado a uma duração d (10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 360, 720, 1440 minutos) e período de retorno T (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos) específicos (sua origem está descrita no item 2.2.1) e $h_{dia,T}$ à máxima lâmina diária precipitada associada aos mesmos d e T , estabelecidos conforme item 2.2.2. Todavia, o presente trabalho seleciona o ct mais próximo dentro de uma mesma região homogênea, descritas no item 2.2.3, para obtenção dos parâmetros IDF, conforme se segue.

Primeiramente, atribui-se um valor de *cluster* — ou seja, um número que identifica a região homogênea — a cada estação pluviométrica e pluviográfica, com o objetivo de delimitar a área de abrangência de cada coeficiente de transformação. As regiões homogêneas funcionam como zonas específicas de abrangência para os *cts*, estabelecendo limites que orientam a escolha do coeficiente mais adequado para cada estação pluviométrica. Essa escolha é baseada na similaridade das características hidrológicas das regiões, garantindo que o cálculo da intensidade máxima média precipitada seja mais preciso.

Em seguida, verifica-se quais estações pluviométricas possuem valores de *cluster* coincidentes com os postos que dispõem de um coeficiente de transformação. O coeficiente de transformação selecionado será aquele associado à menor distância entre a estação pluviométrica e o posto pertencente à mesma região homogênea, assegurando a consistência e a representatividade dos cálculos.

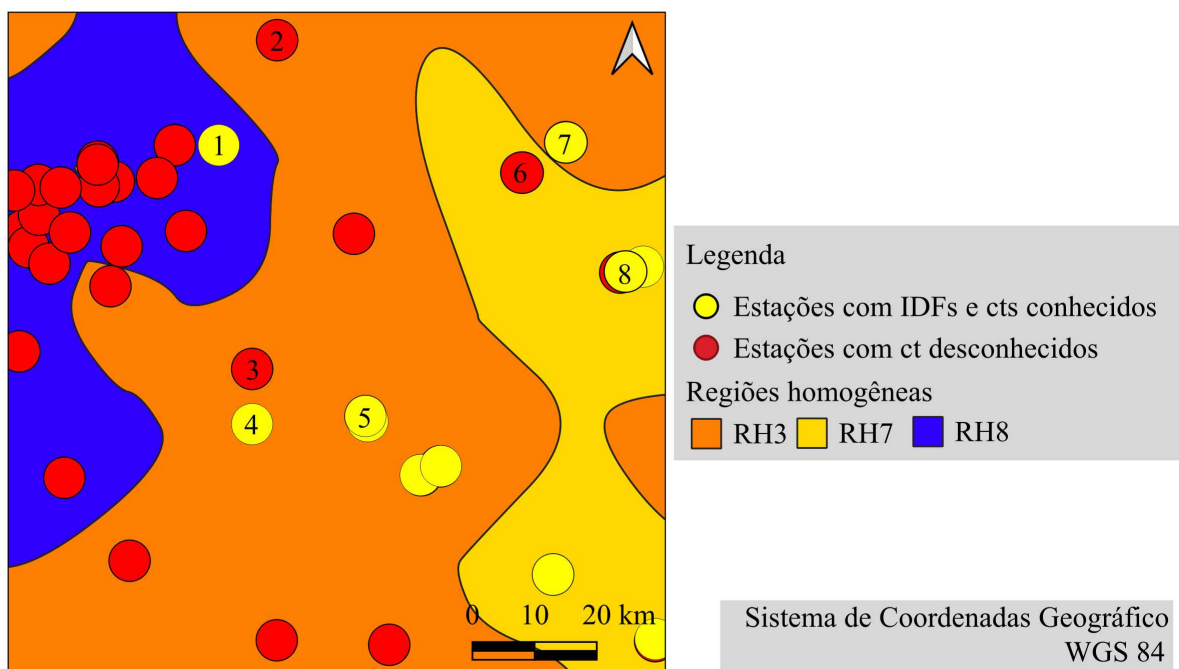


Figura 2: Delimitação das regiões homogêneas que indicam a divisão para validade de aplicação dos coeficientes de transformação

A Figura 2 exemplifica o procedimento realizado em ambiente *R*. A figura mostra três regiões homogêneas distintas; estações nas quais as máximas lâminas precipitadas diárias associadas a diferentes períodos de retorno são conhecidas, embora não possuem coeficientes de transformação atribuídos a ela, em vermelho, e estações com *cts* disponíveis, em amarelo. Através do Método TMPD, a princípio, seriam escolhidas as estações mais próximas para atribuição dos coeficientes àquelas estações com *cts* ausentes. Ou seja, para a estação 6, na qual inexistente coeficiente de transformação, seria escolhida o *ct* coincidente com a estação 7, devido a proximidade. No entanto, o resultado obtido pela seleção do *ct* é a estação 8, presente na mesma região homogênea.

O mesmo vale para a estação 1. Embora a estações 2 é mais próxima geograficamente, não compartilham as mesmas características hidrológicas, pois não pertencem à mesma região homogênea.

2.2.1 Origem dos *cts*

O presente trabalho utilizou os *cts* de 301 estações com coeficientes de transformação conhecidos e desenvolvidos por Almeida (2022), cuja localização geográfica sob regiões homogêneas é expressa na Figura 3.

2.2.2 Ajuste das funções de distribuição de probabilidade para os dados da ANA

A obtenção da máxima lâmina precipitada associada aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos foi realizada através das funções de distribuição de probabilidade (FDP) Gamma, Gumbel e Log-Normal a 2 parâmetros pelo método da Máxima Verossimilhança (MV), como descrito por Abreu et al. (2018). A adequação das séries de dados às FDPs foi realizada conforme a aplicação dos testes de aderência não paramétricos Kolmogorov-Smirnov, Qui-Quadrado e Anderson-Darling.

2.2.3 Regiões Homogêneas Consideradas

As regiões homogêneas (RH, Figura 3), sob ponto de vista da máxima lâmina precipitada, foram identificadas através de técnicas estatísticas multivariadas como a Análise de Componentes Principais e o Agrupamento Hierárquico. A PCA partiu da utilização de 26 variáveis distintas para redução de três componentes principais que representam mais de setenta por cento da variância acumulada explicada. A classificação das regiões homogêneas foi realizada através do método de Ward através da menor distância entre os pontos, selecionando 10 *clusters* distintos; e a área de abrangência de cada um deles foi determinada pelos polígonos de Voronoi. Uma melhor descrição da identificação das RH pode ser encontrada no Capítulo 2.

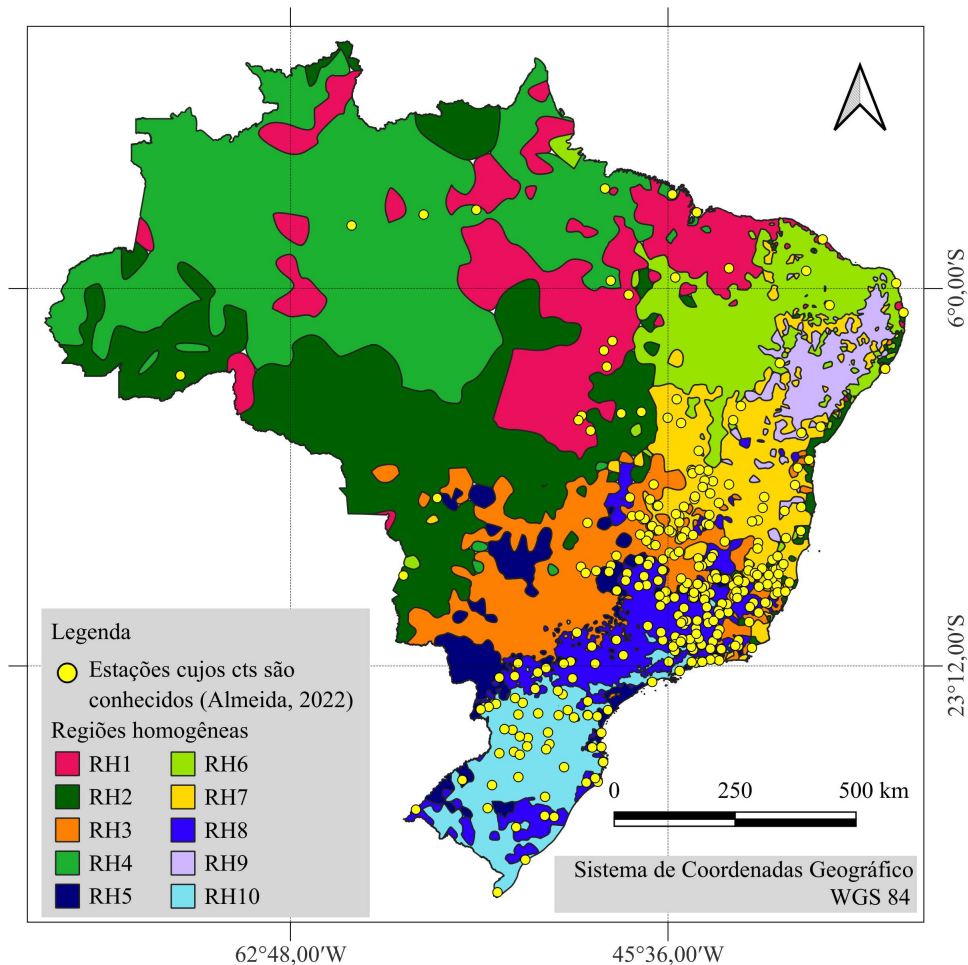


Figura 3: Regiões homogêneas sob ponto de vista da precipitação intensa e localização geográfica dos coeficientes de transformação desenvolvidos por Almeida (2022)

2.2.4 Obtenção dos parâmetros IDF

A intensidade máxima média precipitada, $\widehat{I}_{d,T}$, é obtida facilmente através da multiplicação direta da lâmina, $h_{dia,T}$, pelo coeficiente de transformação $ct_{d,T}$ para todas as estações. Dessa forma, para cada estação tem-se 96 valores de intensidade resultantes da combinação dos períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos) e duração (10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 360, 720, 1440 minutos).

Conhecidos $\widehat{I}_{d,T}$, d , e T , os parâmetros estatísticos da Equação IDF foram ajustados através de regressões não-lineares.

3 Resultados e discussão

O presente estudo obteve os parâmetros estatísticos da Equação de Chuvas Intensas de 5636 estações pluviométricas brasileiras. Os dados foram organizados no Mendeley Data (Torres, 2025) de forma a facilitar o acesso às informações detalhadas das estações, sendo distribuídos em formato *.xlsx*.

A planilha contém as seguintes informações organizadas: o estado onde a estação se localiza, a agência responsável, o código e o nome da estação, coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude), bem como os parâmetros da equação IDF (K , a , b e c), o coeficiente de determinação, conforme é mostrado na Tabela 1. Os valores foram calculados considerando um intervalo de tempo de, ao menos, 30 anos de medições.

Tabela 1: Informações em cada coluna das planilhas e arquivos vetoriais que contém as equações de chuvas intensas para o Brasil

Nome da coluna	Conteúdo
State	Estado no qual a estação está localizada
Agency	Agência responsável pela operação da estação
Code	Código atribuído à estação pela Agency
Name	Nome atribuído à estação
Latitude (°)	Latitude em graus
Longitude (°)	Longitude em graus
Altitude (m)	Altitude em metros
K	Valor atribuído ao parâmetro K (Equação 1)
a	Valor atribuído ao parâmetro a (Equação 1)
b	Valor atribuído ao parâmetro b (Equação 1)
c	Valor atribuído ao parâmetro c (Equação 1)
R^2	Coeficiente de determinação da equação estabelecida

Os parâmetros estatísticos K , a , b e c , ajustados para diferentes localidades exibem uma ampla variação, sendo $87,438 < K < 11411,778$; $0,013 < a < 0,833$; $0,999 < b < 76,731$; $0,500 < c < 1,225$, Figura 4. A Tabela 2 mostra os valores médios dos parâmetros K , a , b e c por região homogênea. A Tabela 2 também apresenta o percentual de estações por região homogênea e o número de estações que cada uma delas compreende. As maiores densidades de estações concentram-se nas regiões homogêneas 8 (com 21,67% das estações), RH9 (15,17%) e RH6 (14,85%), respectivamente, que compreendem as regiões Sudeste e Nordeste do país, como pode ser observado na Figura 1. O Sudeste, região mais densa, destaca-se por ser uma das regiões administrativas mais dinâmicas e influentes do País. As regiões homogêneas que obtiveram os maiores valores de coeficiente K são a RH4, RH9 e RH7.

Tabela 2: Média dos parâmetros estatísticos K , a , b , c , percentual e número de estações por região homogênea

Região homogênea	Valores médios				Percentual de estações (%)	Número de estações
	K	a	b	c		
RH1	2177.324	0.377	36.948	0.941	5.08	286
RH2	1988.637	0.342	25.732	0.899	5.78	325
RH3	1987.062	0.307	23.931	0.868	11.77	663
RH4	3010.430	0.302	36.906	0.956	4.10	231
RH5	1478.034	0.294	19.336	0.833	5.50	310
RH6	2208.532	0.442	35.598	0.967	14.85	837
RH7	2255.741	0.380	31.716	0.954	6.21	350
RH8	1756.104	0.301	20.906	0.861	21.67	1221
RH9	2592.221	0.425	39.881	1.011	15.17	855
RH10	1456.867	0.323	18.247	0.852	9.88	557

A análise da Equação 1 propõe algumas interpretações quanto às variáveis estatísticas. Altos valores de a indicam que a intensidade das chuvas aumenta mais rapidamente para períodos de retorno mais elevados, como podem ocorrer em algumas estações presentes na RH6, visto que é a região com maior valor médio atribuído à a . O parâmetro b está associado à escala temporal, isto é, como a duração pode interferir na intensidade. As RH10 e RH5, que apresentam os menores valores de b , por exemplo, indicam que as chuvas de curta duração tem uma intensidade inicial de chuva mais alta; por outro lado, valores mais altos, como RH9 e RH1 caracterizam curvas mais suaves. O parâmetro c reflete a curvatura da intensidade precipitada, de forma que valores menores que um dizem respeito à intensidade que decai mais rapidamente com o aumento da duração da chuva, o que caracteriza eventos extremos; valores maiores que 1 (como apresentado na média da RH9) indicam um decaimento mais acentuado com o aumento da duração da chuva.

Em relação ao parâmetro K a alta variação pode estar associado a proporção precipitada, como discutido por Silva e Oliveira (2017) e Santos et al. (2024) uma vez que os dados abrangem uma ampla malha territorial. Um caso particular pode ser observado na RH4, cujas maiores médias das lâminas diárias precipitadas para todos os períodos de retorno estão relacionadas aos maiores K . Coerentemente, a RH4 compreende, em maioria, a Região Norte do Brasil e quase todo o estado do Amazonas, o que justifica os altos padrões precipitados.

4 Conclusão

Através do presente trabalho foi disponibilizado dados de 5636 estações pluviométricas brasileiras através do método da Transformação da Máxima Precipitação Diária. O método

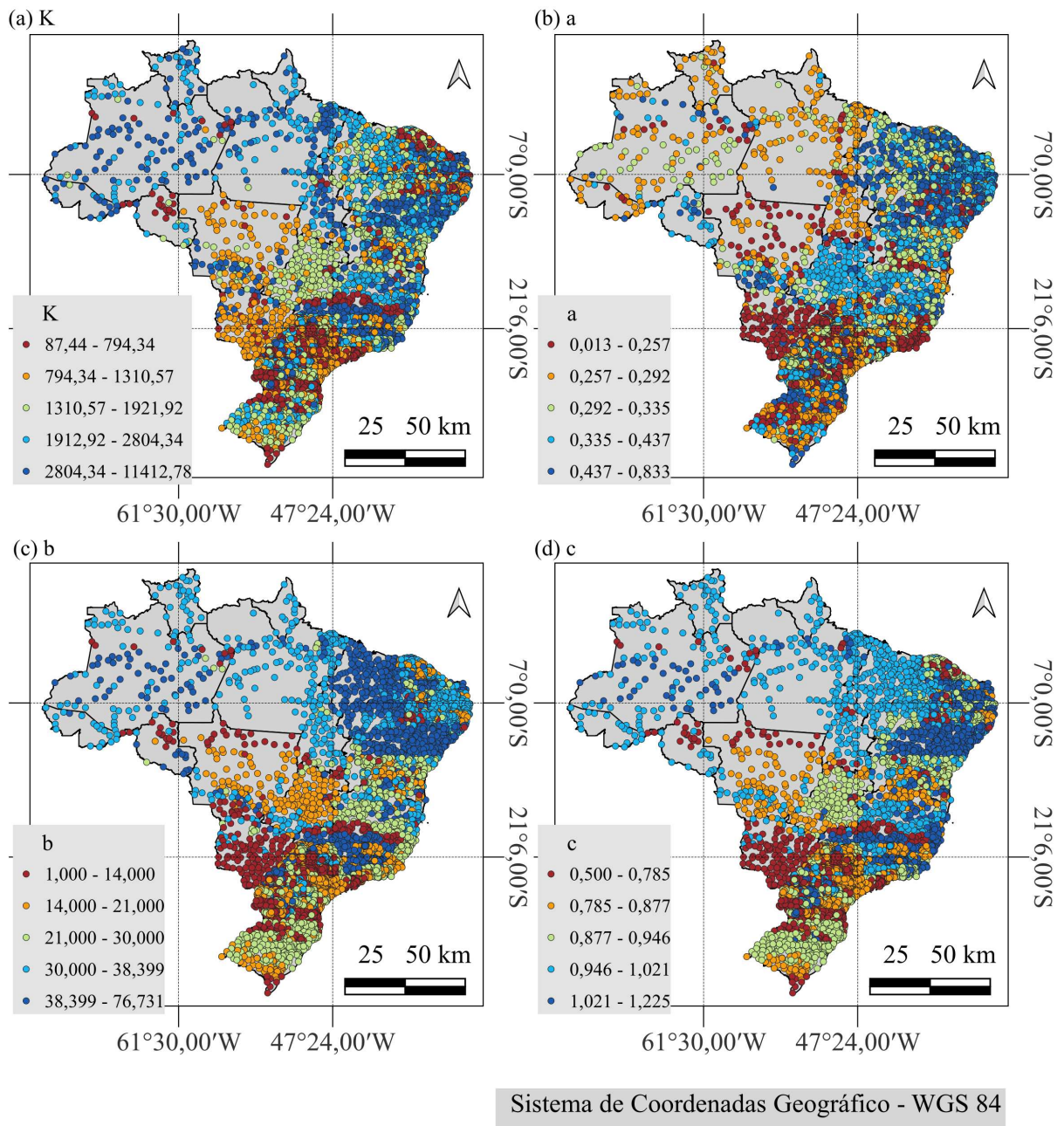


Figura 4: Distribuição espacial das estações pluviométricas e pluviográficas brasileiras com valores referentes aos parâmetros estatísticos: (a) K ; (b) a ; (c) b ; e (d) c

apresenta ligeira melhoria em relação ao método mais difundido no Brasil, Relação das Chuvas de Diferentes Durações. Segundo Almeida (2022), acredita-se que a aplicação do método TMPD à regiões que compartilhem semelhanças hidrológicas é um critério mais adequado para obtenção dos parâmetros IDF. Entretanto, para as estações onde se conhece os coeficientes K, a, b, e c obtidos pela metodologia padrão (estações pluviográficas) recomenda-se o uso deles em detrimento a TMPD.

5 Referências

ABREU, M. C. et al. Criteria for choosing probability distributions in studies of extreme precipitation events. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 4, p. 601–613, 1 out. 2018.

ALMEIDA, Laura T. Transformação da Máxima Precipitação Diária para estabelecimento de Equações de Chuvas Intensas: Nova Proposta. Orientador: Roberto Avelino Cecílio. 2022. 147 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 2022. Versão eletrônica.

BACK, Á. J.; CADORIN, S. B. Heavy rain equations for Brazil. *International Journal of Development Research*, v. 11, 30 jan. 2021.

BELL, F. C. Generalized Rainfall - Duration - Frequency Relationships. *Journal of the Hydraulics Division*, v. 95, n. 1, 1969.

BELTRAME, L.F.S.; LANNA, A.E.L.; LOUZADA, J.A.S. Chuvas intensas Porto Alegre: IPH-UFRGS, 1991. 69 p.

CALBETE, N. O.; CALBETE, S. R.; ROZANTE, J. R.; LEMOS, C. F. Precipitações intensas ocorridas no período de 1986 a 1996 no Brasil. São José dos Campos: INPE, 1996. p. 106-109. (Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática). Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman1/boletim/cliEsp10a/11.html>. Acesso em: 21 dezembro 2024.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Drenagem urbana – Manual de projeto. 3.ed. São Paulo: CETESB, 1986. 464p.

CHEN, C. Rainfall Intensity-duration-frequency formulas. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE*, v. 109, n. 12 p. 21, 1983.

DA COSTA, F. F. et al. GEOT-IDF equations: an R-based tool for intense rainfall studies. *Earth Science Informatics*, v. 18, n. 1, 1 jan. 2025.

HERNANDEZ, V. “Ainda as equações de chuvas intensas - pode-se generalizar?” IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, p. 193-203, 1991.

IBGE. Áreas Territoriais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15761-areas-dos-municipios.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.

LI, D. et al. Urban rainfall-runoff flooding response for development activities in new urbanized areas based on a novel distributed coupled model. *Urban Climate*, v. 51, 1 set. 2023.

LIU, C. et al. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021.

MONTOYA, A. A. D. V.; DE LIMA, A. M. M.; DA ROCHA, E. J. P.; PEREIRA FILHO, A. J. Conflitos pelo uso das águas no baixo do rio Tocantins: análise de tendências. *Boletim de Geografia*, v. 36, n. 2, p. 14-30, 2018.

NÓBREGA, A. E. L.; NEVES, Y. T. Determinação e espacialização de parâmetros de equa-

ções de chuvas intensas para o estado da Paraíba. *Geo USP*, v. 28, 2024.

SANE, Y.; PANTHOU, G.; BODIAN, A.; et al. Intensity–duration–frequency (IDF) rainfall curves in Senegal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 18, n.7, p. 1849–1866, 2018.

SANTOS, W. O. et al. PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS (IDF) PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE Parameters of the Intense Rains Equations (IDF) for the State of Rio Grande do Norte. v. 20, p. 1, 2024.

SARHADI, A.; SOULIS, E. D. Time-varying extreme rainfall intensity-duration-frequency curves in a changing climate. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 5, p. 2454–2463, 16 mar. 2017.

SILVA, C. B.; OLIVEIRA, L. F. C. Relação Intensidade-Duração-Frequência de chuvas extremas na Região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.13, p.2237~8642, 2017.

SIMONOVIC, S. P. et al. A web-based tool for the development of Intensity Duration Frequency curves under changing climate. *Environmental Modelling and Software*, v. 81, p. 136–153, 1 jul. 2016.

SMITH, D. F. et al. Local meteoric water lines describe extratropical precipitation. *Hydrological Processes*, v. 35, n. 2, 1 fev. 2021.

SONG, X.; TAN, Y. Experimental study on the stability of vegetated earthen slopes under intense rainfall. *Soil and Tillage Research*, v. 238, 1 maio 2024.

TORRES; I. P. Intensity-duration-frequency parameters for Brazil obtained by the TMPD method applied to homogeneous regions. *Mendeley Data*. Disponível em: <https://data.mendeley.com/preview/25gfg9d5yc?a=a917c021-f1d8-49b7-b83b-668bb67feae1>.

VASCONCELOS JUNIOR, F. DAS C. et al. An attribution study of very intense rainfall events in Eastern Northeast Brazil. *Weather and Climate Extremes* Elsevier B.V., , 1 set. 2024.

ZHAO, Y. et al. Extreme rainfall erosivity: Research advances and future perspectives. *Science of the Total Environment* Elsevier B.V., , 20 mar. 2024.