



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Erivan de Paula Santos Neto

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS DA EQUAÇÃO
INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE CHUVAS
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO HEURÍSTICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Erivan de Paula Santos Neto

3. Título do trabalho

Determinação de Parâmetros Ótimos da Equação Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas Utilizando Otimização Heurística

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Antover Panazzolo Sarmento, Professor do Magistério Superior**, em 04/05/2020, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ERIVAN DE PAULA SANTOS NETO, Discente**, em 04/05/2020, às 19:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1309352** e o código CRC **9900563B**.

ERIVAN DE PAULA SANTOS NETO

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ÓTIMOS DA EQUAÇÃO
INTENSIDADE, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE CHUVAS
UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO HEURÍSTICA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:
Antover Panazzolo Sarmento

CATALÃO – GO

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos Neto, Erivan de Paula
Determinação de Parâmetros Ótimos da Equação Intensidade, Duração e
Frequência de Chuvas Utilizando Otimização Heurística [manuscrito] /
Erivan de Paula Santos Neto. - 2020.
107 f.

Orientador: Prof. Antover Panazzolo Sarmiento.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2020.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. IDF. 2. Chuva. 3. Algoritmo heurístico. 4. Modelagem. I.
Sarmiento, Antover Panazzolo, orient. II. Título.

CDU 624



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 02 da sessão de Defesa de Dissertação de **Erivan de Paula Santos Neto**, que confere o título de Mestre(a) em Matemática, na área de concentração em **Modelagem e Otimização**.

Em 24 de março de 2020, às 07 h 50 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) **Dr. Antover Panazzolo Sarmento (FENG) (orientador) - à distância pelo RNP, Dr. Marcos Napoleão Rabelo (IMTec) - à distância pelo RNP, Dr. Rafael de Ávila Rodrigues (IGEO) - à distância pelo RNP** para, em sessão pública realizada na Sala Virtual do Sistema de Videoconferência da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), procederem a avaliação da Dissertação intitulado(a) “*Determinação de Parâmetros da Equação Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas Utilizando Otimização Heurística*”, de autoria de **Erivan de Paula Santos Neto - à distância pelo RNP**, discente do Programa de Pós-graduação em Modelagem e Otimização – PPGMO, da "UFG/RC - UFCAT em transição". A sessão foi aberta pelo(a) presidente, que fez a apresentação formal dos membros da banca. Em seguida, a palavra foi concedida ao(à) discente que, em 40 min procedeu a apresentação. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinando(a). Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da Dissertação, que foi considerado(a): (**X**) **Aprovado(a)** ou () **Reprovado(a)**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 09 h 52 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu Antover Panazzolo Sarmento, lavei a presente ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo(a) discente.

Obs.: A Banca Examinadora de Defesa Pública de Dissertação foi realizada em conformidade com a Portaria da CAPES n. 36, de 19 de março de 2020, de acordo com seu segundo artigo: "Art. 2º A suspensão de que trata esta Portaria não afasta a possibilidade de defesas de tese utilizando tecnologias de comunicação à distância, quando admissíveis pelo programa de pós-graduação stricto sensu, nos termos da regulamentação do Ministério da Educação."

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Determinação de Parâmetros Ótimos da Equação Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas Utilizando Otimização Heurística



Documento assinado eletronicamente por **Antover Panazzolo Sarmento, Professor do Magistério Superior**, em 24/03/2020, às 09:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Napoleão Rabelo, Professor do Magistério Superior**, em 24/03/2020, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael De Ávila Rodrigues, Coordenador**, em 24/03/2020, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **ERIVAN DE PAULA SANTOS NETO, Discente**, em 24/03/2020, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1239213** e o código CRC **D59BC34D**.

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e à todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

Agradecimentos

À minha mãe, pelo amor, carinho, apoio incondicional apesar de todas as dificuldades. À todos da minha família que me apoiaram e torceram por mim em cada etapa, mesmo que de longe. Aos meus amigos, a família que eu escolhi, que me acompanharam desde o início e sempre ampararam minhas escolhas e ouviram minhas reclamações.

Ao meu orientador Antover Panazzolo Sarmento, pelo apoio para que eu pudesse ingressar no mestrado, pela bolsa que possibilitou que eu concluísse o mesmo, pelas suas correções e incentivos, e por tudo que me propiciou durante os meus anos acadêmicos, contribuindo de maneira única no meu crescimento profissional e pessoal.

À todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, seja me acolhendo durante minha trajetória, me incentivando em tomadas de decisão ou simplesmente acreditando que a conclusão seria possível.

E ao departamento de Engenharia Civil, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás por tornarem possível o início e término dos cursos em situações desconformes e pela bolsa de fomento que possibilitou à realização de um sonho.

*Quem come do fruto do conhecimento
é sempre expulso de algum paraíso.
- Melanie Klein.*

RESUMO

SANTOS NETO, E. DE P. *Determinação de Parâmetros Ótimos da Equação Intensidade, Duração e Frequência de Chuvas Utilizando Otimização Heurística*. 2020. 107 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Tendo em vista que as curvas de intensidade, duração e frequência (curvas IDF) são escassas e em alguns casos desatualizadas para o Estado de Goiás, o presente trabalho tem por objetivo elaborar um algoritmo capaz de tratar os dados de chuvas, oriundos de pluviômetros do INMET, e, posteriormente, através do uso de algoritmos heurísticos, criar um programa capaz de determinar os parâmetros K , a , b e c através do método de desagregação de chuvas. A distribuição probabilística utilizada foi a distribuição de Gumbel, a qual foi avaliada através do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. Em seguida, os algoritmos: genético, de colônia de formigas, de enxame de partículas, polinização de flores e de evolução diferencial foram utilizados para a determinação dos parâmetros. Posteriormente foi realizado um teste de ajuste através do coeficiente de determinação ajustado, do índice de concordância de Willmott e do coeficiente de confiança para mensurar o desempenho dos modelos propostos. Os resultados obtidos mostraram que os algoritmos conseguem resolver o problema de maneira eficaz, tendo destaque para o algoritmo de polinização de flores e o de evolução diferencial, que apresentaram um desvio-padrão baixo e alta velocidade de processamento. Em relação ao coeficiente de determinação ajustado, ao índice de concordância de Willmott e ao coeficiente de confiança, nenhum deles apresentaram valores inferiores à 0,9945, 0,9950 e 0,9923, respectivamente. Dessa forma, o modelo e os parâmetros obtidos descrevem de maneira eficaz os dados de chuva para as cidades analisadas, recebendo classificação de desempenho ótimo. Por fim, conclui-se que a ferramenta elaborada nesse trabalho cumpre o objetivo proposto, servindo não só como uma ferramenta de cálculo prático, mas também como material de estudo.

Palavras-chaves: IDF, chuva, algoritmo heurístico, modelagem.

ABSTRACT

SANTOS NETO, E. DE P. *Determination of Optimum Parameters of the Equation Rain Intensity, Duration and Frequency Using Heuristic Optimization*. 2020. 107 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Considering that the intensity, duration and frequency curves (IDF curves) are scarce and in some cases outdated for the State of Goiás, the present work aims to elaborate an algorithm capable of treating the rainfall data, coming from INMET rain gauges, and, later, through the use of heuristic algorithms, to create a program capable of determining the parameters K , a , b and c through the rainfall disaggregation method. The probabilistic distribution used was the Gumbel distribution, which was evaluated through the Kolmogorov-Smirnov adherence test. Then, the algorithms: genetic, ant colony, particle swarm, flower pollination and differential evolution were used to determine the parameters. Subsequently, an adjustment test was performed using the adjusted determination coefficient, Willmott's concordance index, and the confidence coefficient to measure the performance of the proposed models. The results obtained showed that the algorithms are able to solve the problem effectively, with emphasis on the flower pollination algorithm and the differential evolution algorithm, which presented a low standard deviation and high processing speed. Regarding the adjusted determination coefficient, Willmott's concordance index and the confidence coefficient, none of them presented values lower than 0.9945, 0.9950 and 0.9923, respectively. Thus, the model and the parameters obtained effectively describe the rain data for the analyzed cities, receiving an optimal performance rating. Finally, it is concluded that the tool elaborated in this work fulfills the proposed objective, serving not only as a practical calculation tool, but also as study material.

Keywords: IDF, rain, heuristic algorithm, modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Número de publicações ao longo dos anos (5 em 5 anos).	27
Figura 2.2 – Distribuição dos artigos selecionados em função dos continentes.	27
Figura 2.3 – Distribuição dos artigos selecionados em função do país da instituição do primeiro autor.	28
Figura 2.4 – Pluviômetro do tipo paulista (à esquerda) e pluviógrafo de boia (à direita).	35
Figura 2.5 – Pluviômetro “ <i>Ville de Paris</i> ”.	36
Figura 3.1 – Fluxograma para o cálculo dos parâmetros da curva IDF através da metodologia de desagregação da CETESB (1980).	49
Figura 3.2 – Plataforma do site INMET mostrando como acessar os dados diários de precipitação.	50
Figura 4.1 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Catalão - GO, no período de 1961 a 2010.	62
Figura 4.2 – Distribuição da probabilidade empíricas e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Catalão - GO.	64
Figura A.1 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Aragarças - GO, no período de 1970 a 2019.	81
Figura A.2 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Brasília - DF, no período de 1961 a 2019.	82
Figura A.3 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Catalão - GO, no período de 1961 a 2019.	82
Figura A.4 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Formosa - GO, no período de 1961 a 2019.	83
Figura A.5 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Goiânia - GO, no período de 1961 a 2019.	83
Figura A.6 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Goiás - GO, no período de 1961 a 2019.	84
Figura A.7 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Ipameri - GO, no período de 1977 a 2019.	84

Figura A.8 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Itumbiara - GO, no período de 1989 a 2019.	85
Figura A.9 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Jataí - GO, no período de 1978 a 2019.	85
Figura A.10 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Pirenópolis- GO, no período de 1977 a 2019.	86
Figura A.11 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Posse - GO, no período de 1975 a 2019.	86
Figura A.12 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Rio Verde - GO, no período de 1971 a 2019.	87
Figura A.13 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Roncador - DF, no período de 1979 a 2019.	87
Figura C.1 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Aragarças - GO.	95
Figura C.2 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Brasília - DF	96
Figura C.3 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Catalão - GO.	96
Figura C.4 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Formosa - GO.	97
Figura C.5 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Goiânia - GO.	97
Figura C.6 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Goiás - GO.	98
Figura C.7 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Ipameri - GO.	98
Figura C.8 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Jataí - GO.	99
Figura C.9 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Pirenópolis- GO.	99
Figura C.10 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Posse - GO.	100
Figura C.11 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Rio Verde - GO.	100
Figura C.12 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Roncador - DF	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento.	26
Tabela 2.2 – Quantitativo dos artigos obtidos no mapeamento por periódico.	29
Tabela 2.3 – Distribuições probabilísticas utilizadas nos artigos.	30
Tabela 2.4 – Testes de aderência utilizados nos artigos para avaliar a distribuição probabilística mais aderente.	31
Tabela 2.5 – Equações empíricas utilizadas nos artigos.	31
Tabela 2.6 – Métodos de otimização utilizados nos artigos.	32
Tabela 2.7 – Coeficientes para avaliar os parâmetros determinados utilizados nos artigos.	33
Tabela 3.1 – Valores críticos da estatística D_N do teste de aderência de KS, considerando-se um nível de significância de 1%.	54
Tabela 3.2 – Coeficientes de desagregação e valores mínimos de precipitação adotados para diferentes durações de chuva.	56
Tabela 3.3 – Critério de interpretação do desempenho pelo Ic	60
Tabela 4.1 – Informações das estações pluviométricas e início do ano hidrológico.	61
Tabela 4.2 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Catalão - GO.	63
Tabela 4.3 – Resumo das principais informações relacionadas às precipitações máximas dos municípios estudados.	63
Tabela 4.4 – Resumo do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado à estação de Catalão - GO.	65
Tabela 4.5 – Altura máxima de chuva de acordo com Gumbel para a estação de Catalão - GO.	66
Tabela 4.6 – Desagregação de chuvas para o município de Catalão - GO.	67
Tabela 4.7 – Intensidade de chuvas para o município de Catalão - GO.	67
Tabela 4.8 – Tempo de processamento médio após as 100 execuções, número de avaliações da função objetivo (FO) para uma execução e média dos tempos médios para cada algoritmo.	68
Tabela 4.9 – Desvio-padrão máximo e mínimo para a função objetivo (FO) e os parâmetros k , a , b e c após as 100 execuções para cada algoritmo.	69
Tabela 4.10 – Resultado dos parâmetros K , a , b , c e dos coeficientes de ajuste empregados.	70

Tabela B.1 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Aragarças - GO.	89
Tabela B.2 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Brasília - DF.	90
Tabela B.3 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Catalão - GO.	90
Tabela B.4 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Formosa - GO.	91
Tabela B.5 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Goiânia - GO.	91
Tabela B.6 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Goiás - GO.	92
Tabela B.7 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Ipameri - GO.	92
Tabela B.8 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Itumbiara - GO.	92
Tabela B.9 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Jataí - GO.	93
Tabela B.10 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Pirenópolis - GO.	93
Tabela B.11 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Posse - GO.	93
Tabela B.12 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Rio Verde - GO.	94
Tabela B.13 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Roncador - DF.	94
Tabela D.1 – Intensidade de chuvas para o município de Aragarças - GO.	103
Tabela D.2 – Intensidade de chuvas para o município de Brasília - DF.	103
Tabela D.3 – Intensidade de chuvas para o município de Catalão - GO.	104
Tabela D.4 – Intensidade de chuvas para o município de Formosa - GO.	104
Tabela D.5 – Intensidade de chuvas para o município de Goiânia - GO.	104
Tabela D.6 – Intensidade de chuvas para o município de Goiás - GO.	105
Tabela D.7 – Intensidade de chuvas para o município de Ipameri - GO.	105
Tabela D.8 – Intensidade de chuvas para o município de Itumbiara - GO.	105
Tabela D.9 – Intensidade de chuvas para o município de Jataí - GO.	106
Tabela D.10 – Intensidade de chuvas para o município de Pirenópolis - GO.	106
Tabela D.11 – Intensidade de chuvas para o município de Posse - GO.	106
Tabela D.12 – Intensidade de chuvas para o município de Rio Verde - GO.	107
Tabela D.13 – Intensidade de chuvas para o município de Roncador - DF.	107

Lista de Algoritmos

Algoritmo 2.1	Algoritmo Genérico (AG).	42
Algoritmo 2.2	Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO).	43
Algoritmo 2.3	Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).	44
Algoritmo 2.4	Algoritmo de Polinização de Flores (FPA).	45
Algoritmo 2.5	Evolução Diferencial (ED).	46
Algoritmo 3.1	Algoritmo para Determinação do Ano Hidrológico.	51
Algoritmo 3.2	Algoritmo para Determinação das Máximas Anuais.	52
Algoritmo 3.3	Algoritmo para Cálculo das Distribuições.	54
Algoritmo 3.4	Algoritmo para Teste de Aderência.	55
Algoritmo 3.5	Algoritmo para Extrapolação Probabilística.	56
Algoritmo 3.6	Algoritmo para Extrapolação dos Dados.	57
Algoritmo 3.7	Pseudocódigo para Cálculo dos Coeficientes de Ajuste.	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Objetivos	24
1.1.1	Objetivo geral	24
1.1.2	Objetivos específicos	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Mapeamento Sistemático	25
2.1.1	Coleta de Periódicos no Banco de Dados	25
2.1.2	Resultados e Discussões da Coleta	26
2.2	Referencial Teórico Sobre a Curva IDF	33
2.2.1	Ano hidrológico	38
2.2.2	Precipitações máximas anuais	38
2.2.3	Distribuição probabilística teórica e empírica	38
2.2.4	Teste de aderência das distribuições probabilísticas	39
2.2.4.1	Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov	39
2.2.5	Extrapolação probabilística das máximas	39
2.2.6	Desagregação das chuvas	39
2.2.7	Otimização	40
2.2.7.1	Algoritmo Genético	41
2.2.7.2	Algoritmo Colônia de Formigas	42
2.2.7.3	Algoritmo de Enxame de Partículas	43
2.2.7.4	Algoritmo de Polinização de Flores	44
2.2.7.5	Evolução Diferencial	46
2.2.8	Avaliação do ajuste do modelo	46
2.2.8.1	Coefficiente de determinação ajustado	47
2.2.8.2	Índice de concordância de Willmott	47
2.2.8.3	Coefficiente de Confiança	47
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	Coleta de Dados Pluviométricos	49
3.2	Ano Hidrológico	51
3.3	Precipitações Máximas Anuais	51

3.4	Distribuição Probabilística Teórica e Empírica	52
3.5	Teste de Aderência das Distribuições Probabilísticas	54
3.6	Extrapolação Probabilística das Máximas	55
3.7	Desagregação das Chuvas	56
3.8	Otimização	57
3.9	Avaliação do Ajuste do Modelo	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Ano Hidrológico e Precipitações Máximas	61
4.2	Distribuições Probabilísticas e Teste de Aderência	64
4.3	Extrapolação dos Dados	65
4.4	Desagregação de Chuvas	67
4.5	Otimização e Avaliação do Ajuste	68
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	73
	REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A	PRECIPITAÇÕES MÉDIAS MENSAIS	81
APÊNDICE B	PRECIPITAÇÕES MÁXIMAS DIÁRIAS ANUAIS	89
APÊNDICE C	DISTRIBUIÇÃO PROBABILÍSTICA DE GUMBEL	95
APÊNDICE D	INTENSIDADE DE CHUVA	103

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Embora os fenômenos hidrológicos como as chuvas e o escoamento dos rios possam parecer comuns e muito conhecidos, devido à irregularidade com que esses fenômenos se verificam ao longo do tempo e do espaço, eles podem vir a causar efeitos catastróficos devido às grandes cheias ou estiagens, provocando danos à população. Esses fatos evidenciam que ainda há uma necessidade de se aprofundar o conhecimento nessa área de estudo.

Dessa maneira, o desenvolvimento de relações capazes de descrever os fenômenos hidrológicos é fundamental para proporcionar a solução de inúmeros problemas práticos, fazendo com que o estudo hidrológico deixe de ser uma ciência apenas estudada no âmbito acadêmico para se tornar uma ferramenta imprescindível ao engenheiro, em todos os projetos relacionados com a utilização dos recursos hídricos (PINTO *et al.*, 1976).

Dentre esses projetos pode-se citar o dimensionamento de vertedouros, barragens, canais, desvios de cursos d'água, galerias pluviais, bueiros, sistemas de drenagem e de irrigação, controle da erosão hídrica do solo, dentre outros (CARDOSO; ULLMANN; BERTOL, 1998). Para se dimensionar essas estruturas faz-se necessário conhecer a vazão máxima de projeto, que devido escassez de dados fluviométricos acaba sendo determinada a partir de dados pluviométricos através da intensidade máxima de precipitação, obtida por meio da curva de intensidade, duração e frequência (curva IDF).

Desse modo, os estudos relacionados à curva IDF possibilitam uma maior segurança na elaboração de projetos de obras hidráulicas (tanto urbanas quanto agrícolas) e uma maior economia, já que as margens de segurança não precisam ser elevadas para suprir as possibilidades de falhas.

Atualmente, o estado de Goiás conta com equações de chuvas intensas escassas ou determinadas há muito tempo (não representando de maneira segura as chuvas dos dias atuais) (PEREIRA; DUARTE; SARMENTO, 2017). O que atrapalha a execução de projetos do ponto de vista econômico e seguro, dificultando a atividade de engenheiros e profissionais da área, justificando assim o estudo dessas curvas e a elaboração desse trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo elaborar um algoritmo capaz de tratar os dados de chuvas e, posteriormente, através do uso de algoritmos heurísticos, criar um programa capaz de determinar, de forma ótima, os parâmetros k , a , b e c . O mesmo será aplicado em diversos postos pluviométricos do Estado de Goiás, fazendo com que ao final do trabalho, além de uma ferramenta capaz de efetuar o cálculo dos parâmetros, diversos postos pluviométricos tenham seus parâmetros calculados ou atualizados. Destaca-se que no algoritmo elaborado evitou-se o uso de bibliotecas prontas, facilitando, assim a implementação dessa metodologia em outras linguagens computacionais de uma maneira mais rápida, de acordo com a necessidade de cada usuário.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- a) Determinar o modelo de otimização mais eficiente na determinação dos parâmetros das curvas IDF;
- b) Calcular os parâmetros das curvas IDF para diversos postos pluviométricos dentro do estado de Goiás, através do uso de algoritmos heurísticos;
- c) Realizar a avaliação do ajuste através do uso do coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), do índice de concordância de Willmott (d) e do coeficiente de confiança (Ic).

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir foi dividida em duas partes. A primeira parte consiste num mapeamento sistemático a cerca do tema, onde apresentou-se toda a metodologia e os resultados do mapeamento realizado com o intuito de evidenciar quais os procedimentos mais utilizados nos cálculos dos parâmetros da curva IDF, servindo de embasamento teórico para a segunda parte, onde foi realizado um referencial teórico, apresentando-se todos os conceitos sobre a curva IDF e o procedimento de cálculo dos parâmetros.

2.1 Mapeamento Sistemático

O Mapeamento Sistemático, também conhecido como *mapping study*, é usado para fornecer uma visão geral de uma área de pesquisa, para estabelecer se a evidência de pesquisa existe e para fornecer uma indicação da quantidade de evidência (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007). Ele consiste em uma busca por literaturas em bancos de dados, através de operadores lógicos (*strings*) estabelecidos, cujo objetivo é selecionar referências e obter um panorama sobre as pesquisas referentes a um determinado assunto (COSTA; STAUT; ILHA, 2014).

O procedimento baseia-se nas seguintes etapas: definição dos bancos de dados de busca, determinação das *strings*, aplicação dos filtros (área de estudo, período, idioma *etc.*), aderência das referências a partir do título, aderência das referências a partir do resumo, *snowball sampling* (revisão das bibliografias utilizadas nas referências aderentes, a fim de se obter outras referências não selecionadas no mapeamento), exclusão dos artigos repetidos dentro das buscas, análise dos artigos selecionados e apresentação dos resultados obtidos.

2.1.1 Coleta de Periódicos no Banco de Dados

Nesta pesquisa, as buscas foram realizadas no banco de dados *Capes*, disponível através do servidor da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, considerando todo

o banco de dados. Os operadores lógicos e as *strings* adotadas foram: combinação 1 (C1), “*Intensity-duration-frequency*” e “*Estimt**”; combinação 2 (C2), “*Intensity-duration-frequency*” e “*Optimization*”; combinação 3 (C3), “*Intensity-duration-frequency*” e “*Algorithm*”. Após a busca inicial, foram adotados como filtros: o idioma (inglês, espanhol e português), o tipo de periódico (artigos) e o tipo de publicação (artigo de periódico revisado por pares).

Não foram aplicados filtros em relação à área de conhecimento, no entanto foram aplicados filtros com relação ao tópico para cada combinação, a saber: (C1) *environmental sciences, storms, climate, runoff, mathematical models, floods, geography, statistical analysis, engineering, hydrogeology, precipitation, climate change, hydrology, rain e rainfall*; (C2) *watersheds, simulation, geography, optimization, runoff, precipitation, water resources, models, statistical analysis, climate change, hydrogeology, floods, mathematical models, hydrology, rain, engineering e rainfall*; (C3) *storms, models, runoff, climate, water resources, earth sciences, floods, climate change, geography, statistical analysis, hydrogeology, engineering, precipitation, hydrology, mathematical models, rain e rainfall*.

Após a aplicação dos filtros, foi feita a leitura dos títulos e resumos para selecionar quais trabalhos eram aderentes e o *snowball sampling*. Em seguida, a revisão da bibliografia foi desenvolvida a partir do número final de trabalhos aderentes. Os resultados obtidos, por meio da aplicação do processo previamente descrito, são apresentados na forma de tabelas e gráficos.

2.1.2 Resultados e Discussões da Coleta

Com base na mapeamento, foi elaborada a Tabela 2.1, que quantifica os resultados obtidos no mapeamento para cada uma das combinações, o número total de artigos a cada análise e a quantidade total de artigos aderentes.

Tabela 2.1 – Resumo dos resultados obtidos no mapeamento.

Etapas	Objeto de estudo: Curva IDF		
	Expressões-chave		
	Combinação 1	Combinação 2	Combinação 3
Número inicial de artigos na mesma busca	1385	239	284
Número total de artigos após análise de aderência de títulos	176	24	35
Número de artigos após leitura dos resumos e sem repetições na mesma busca	42	7	10
Artigos repetidos entre as buscas		17	
Artigos do <i>Snowball sampling</i>		6	
Total de artigos aderentes		48	

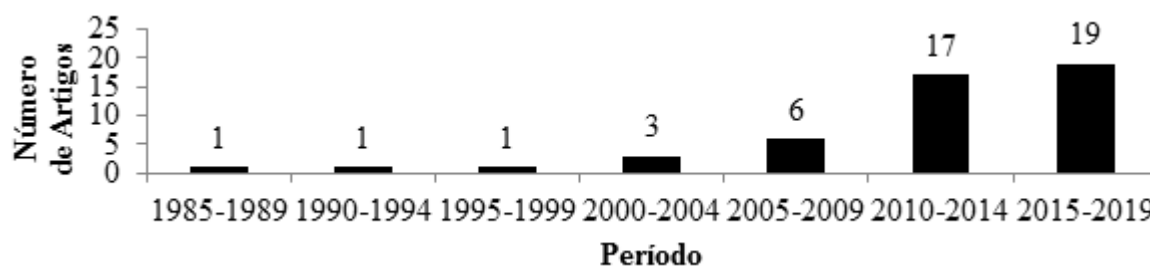
Fonte: O autor.

A partir desses resultados verifica-se que a combinação “*Intensity-duration-frequency*” e “*Estimt**” (C1) foi a que mais retornou resultados sobre o tema, foram 72,59% do total de artigos retornados pela busca, enquanto que as demais combinações, “*Intensity-duration-frequency*” e “*Optimization*” (C2) e “*Intensity-duration-frequency*” e “*Algorithm*” (C3), retornaram 12,53% e 14,88%, respectivamente.

Após a análise de aderência de títulos e resumos dos trabalhos, a C1 ainda continuou a totalizar o maior número de artigos aderentes, 71,19%, em relação a 11,86% e 16,95% das combinações C2 e C3, respectivamente. Feita a exclusão dos artigos repetidos e realizado o *snowball sampling* obteve-se um total de 48 artigos aderentes ao tema.

A Figura 2.1 apresenta o número de publicações aderentes ao tema, utilizando-se as três combinações de palavras-chave utilizadas na pesquisa, até a data limite de 31 de dezembro de 2019. Nesta, observa-se um crescimento significativo das pesquisas em relação ao tema, desde o ano de 2000, tendo em vista que a partir desse ano o número de publicações por intervalo começou a triplicar, mantendo esse ritmo até 2014 e praticamente se igualando nos dois últimos intervalos.

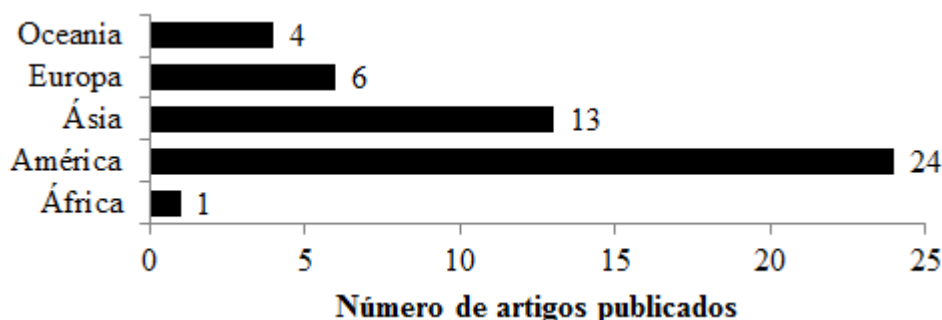
Figura 2.1 – Número de publicações ao longo dos anos (5 em 5 anos).



Fonte: O autor.

Analisando-se de uma perspectiva continental (Figura 2.2), a América lidera com 50% das publicações, seguida pela Ásia, com 27,08% do total de publicações. Juntos esses dois continentes produziram cerca de 77% do total de artigos selecionados.

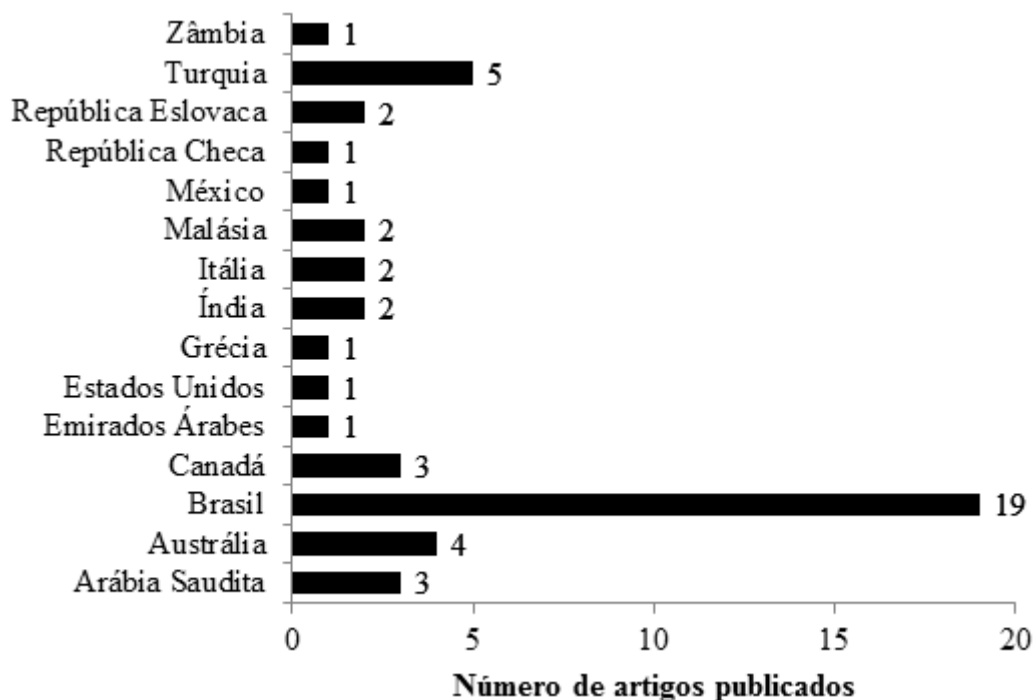
Figura 2.2 – Distribuição dos artigos selecionados em função dos continentes.



Fonte: O autor.

Em relação aos países, a Figura 2.3 mostra todos aqueles que tiveram artigos selecionados (ressalva-se que o local de publicação foi tomado como sendo o país onde se encontra a instituição do primeiro autor). Nela pode-se notar que o Brasil é o país que mais apresenta publicações aderentes, com um total de 39,58%, seguido pela Turquia com 10,42% do total. Esse fator mostra uma grande relevância em relação ao tema e a importância de seu estudo.

Figura 2.3 – Distribuição dos artigos selecionados em função do país da instituição do primeiro autor.



Fonte: O autor.

Em relação aos periódicos onde esses artigos foram publicados (Tabela 2.2), verifica-se que a Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental foi a que mais obteve publicações, 5 delas no total. Em relação ao local de publicação, 36,96% dos artigos foram publicados em revistas nacionais, sendo que 29,41% desses foram publicados na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Em contrapartida, as revistas internacionais acumularam um total de 63,04% do total de publicações, sendo que 13,79% desses estão publicados no *Journal of Hydrology*.

Sabendo-se que o objeto de estudo do trabalho é a determinação das curvas IDF, e tendo em vista as etapas para se calcular os parâmetros da curva IDF, foi realizado um levantamento de quais distribuições probabilísticas, testes de aderência, fórmulas empíricas, métodos de otimização e avaliações de ajuste, foram mais utilizados na elaboração dos artigos selecionados.

No entanto, ressalta-se que os dados apresentados nos passos subsequentes não possuem somatório probabilístico igual a 100%, tendo em vista que a maioria dos trabalhos

analisados apresentam o uso de mais de um tipo de distribuição probabilística, de teste de aderência, de fórmula empírica, de método de otimização ou de avaliação de ajuste ou não apresentam um ou vários desses passos, pois focam seus estudos em uma dessas etapas. Assim, as porcentagens apresentadas foram feitas com base no total de trabalhos analisados (48) ou, em alguns casos, quando mencionado, em relação ao somatório das quantidades de cada uma dessas etapas.

Tabela 2.2 – Quantitativo dos artigos obtidos no mapeamento por periódico.

Periódicos	Número de Artigos Publicados
Arabian Journal of Geosciences	2
Canadian Journal of Civil Engineering	1
Engenharia Agrícola	2
Environmental Earth Sciences	1
Estonian Journal of Earth Sciences	1
Hydrological Processes	3
Ingeniería Investigación y Tecnología	1
International Journal of Climatology	1
International Journal of Sustainable Built Environment	1
Journal of Hydrologic Engineering	2
Journal of Hydrology	4
Journal of Hydrology and Hydromechanics	1
Journal of Hydrology: Regional Studies	1
Journal of King Saud University - Engineering Sciences	2
KSCE Journal of Civil Engineering	1
MATEC Web of Conferences	1
Natural Hazards	2
Pamukkale University Journal of Engineering Sciences	1
Pesquisa Agropecuária Tropical	2
Revista Ambiente & Água	5
Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental	5
Revista Ciência Agronômica	1
Revista Engenharia na Agricultura	3
Slovak Journal of Civil Engineering	1
SpringerPlus	1
Stochastic Environmental Research and Risk Assessment	1
Theoretical and Applied Climatology	1

Fonte: O autor.

A Tabela 2.3 traz as distribuições probabilísticas utilizadas na determinação da precipitação máxima para cada período de retorno. A distribuição mais utilizada foi a de Gumbel (EV1), 68,75% em relação ao total de trabalhos analisados, seguida pela distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV) e pela distribuição Log-Person III, com 43,75% e 41,67%, respectivamente.

O motivo de tal uso pode ser explicado por [Oliveira et al. \(2005\)](#), que afirmam que as

distribuições de valores extremos de grandezas hidrológicas ajustam-se satisfatoriamente à distribuição de Gumbel. No entanto, como pode ser observado em Franco *et al.* (2014), Dar, Maqbool e Raazia (2016) e Mamoon e Rahman (2017), a distribuição de Gumbel nem sempre pode resultar na melhor opção, podendo ocorrer melhores ajustes advindos de outras distribuições, como a distribuição GEV e a distribuição de Pearson III para algumas regiões do Catar, da Índia e do Brasil. Além disso, de acordo com AlHassoun (2011), o método Log Pearson III é supostamente mais preciso, pois explica a assimetria na distribuição de dados.

Outro fator importante é o método de obtenção dos parâmetros de cada uma das distribuições probabilísticas, que podem causar variações nos resultados de aderência obtidos, assim como Franco *et al.* (2014) obtiveram em seus estudos, onde a distribuição de probabilidades GEV utilizando o método dos momentos L para estimativa dos parâmetros e a distribuição Gumbel pelo método da máxima verossimilhança foram consideradas as mais adequadas.

Tabela 2.3 – Distribuições probabilísticas utilizadas nos artigos.

Distribuições Probabilísticas	Quantidade de Vezes Utilizadas
Distribuição Exponencial	2
Distribuição Generalizada de Fréchet	2
Gamma Generalizado	2
Gamma III (G3)	2
Gamma II (G2)	5
Generalização da Distribuição Logística (GLO)	4
Generalizada de Valores Extremos (GEV)	21
Gumbel (EV1)	33
Kappa	2
Log-Normal (LN)	3
Log-Normal III (LN3)	11
Log-Normal II (LN2)	11
Log-Pearson (LP)	1
Log-Pearson III (LP3)	20
Pareto (GPD)	7
Pearson	2
Person III	8
Wakeby	1
Weibull	4

Fonte: O autor.

Na Tabela 2.4 pode-se verificar quais testes probabilísticos foram mais utilizados para se determinar a distribuição probabilística mais aderente. De acordo com Franco *et al.* (2014) os testes de aderência podem variar significativamente para cada distribuição probabilística aplicada, não sendo possível determinar qual teste é mais eficiente. O teste mais utilizado foi o teste de Kolmogorv-Smirnov (KS) que apareceu em 39,58% dos artigos selecionados, seguido pelo método do Qui-Quadrado (X^2), com 27,08%. Se levado em considera-

ção o somatório da quantidade de vezes que cada teste foi aplicado, os testes de Kolmogorv-Smirnov (KS), Qui-Quadrado (X^2) e Anderson Darling (AD) aparecem 40 vezes (num total de 56), o que representa 71,43%.

Tabela 2.4 – Testes de aderência utilizados nos artigos para avaliar a distribuição probabilística mais aderente.

Testes de Aderência	Quantidade de Vezes Utilizados
Anderson Darling (AD)	8
Bootstrapping	1
Coefficiente de Correlação (CC)	1
Critério Bayesiano de Schwarz (BIC)	1
Critério de Informação de Akaike (AIC)	1
Erro Absoluto Máximo (MAE)	1
Erro Padrão de Estimativa (EPE)	2
Erro Relativo	1
Filliben	2
Kolmogorov-Smirnov (KS)	19
Qui-Quadrado (X^2)	13
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	1
Raiz Relativa Erro Quadrático Médio (RRMSE)	1
Razão de Momentos-L	1
Teste Z	3

Fonte: O autor.

O equacionamento das curvas IDF ocorre, em geral, de maneira empírica. A Tabela 2.5 mostra as equações empíricas utilizadas nos artigos aderentes e a quantidade de parâmetros que são necessárias na determinação de cada uma. Sabe-se que a equação número 1 foi a mais utilizada nos trabalhos, um total de 21 vezes, o que representa 43,75%, seguida da equação de número 5, com 14,58%.

No entanto, assim como nos demais tópicos abordados, não existe uma única equação capaz de se adequar a todos os tipos de chuva, assim, esta também varia de acordo com a região de cálculo, sendo necessários vários estudos a fim de se determinar qual a melhor fórmula para o lugar em questão.

Tabela 2.5 – Equações empíricas utilizadas nos artigos.

Equações Empíricas	Fórmula	Número de Parâmetros	Quantidade de Vezes Utilizadas
1	$i_{max} = \frac{a * T_r^b}{(t+c)^d}$	4	21
2	$i_{max} = (a * \ln t + b) * (c * t^d - e) * h_{60,2}$	5	3
3	$i_{max} = \frac{(a * (T_r + b)^c)}{(t+d)^e}$	5	2
4	$i_{max} = e^{(a+b * T_r^c + d * (\ln t)^2)}$	4	1
5	$i_{max} = \frac{a * T_r^b}{t^c}$	3	7
6	$i_{max} = \frac{a * T_r^b}{t^c + d}$	4	1

Fonte: O autor.

Os métodos utilizados para determinar os parâmetros da curva IDF são escolhidos de acordo com as variáveis do problema e de acordo com a configuração da equação IDF utilizada. Devido a essa gama de metodologias, algumas delas podem apresentar uma melhor eficiência em relação às outras, obtendo ajustes um pouco melhores e com um menor custo computacional.

A Tabela 2.6 apresenta os métodos de otimização utilizados nos artigos, nela 20,83% do total de trabalhos utilizaram Mínimos Quadrados e 16,67% Gradação Reduzida Generalizada (GRG). No entanto, não se pode afirmar nada a respeito de qual método é mais preciso ou mais eficiente em termos computacionais, já que essas análises raramente foram realizadas e os artigos não trazem todos os dados necessários para que as mesmas sejam feitas. Além disso, ressalta-se que o GRG utilizado, em praticamente todos os trabalhos, foi o disponibilizado pela ferramenta Solver do software Excel®.

Outro detalhe importante, referente a análise dos métodos de otimização, é o uso de algoritmos heurísticos na determinação dos parâmetros da curva IDF. Pode-se perceber que apenas 2 do total de trabalhos utilizaram algoritmos heurísticos, o que representa apenas 4,17%. Os algoritmos heurísticos utilizados foram: o Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO) e o Algoritmo Genético (AG).

Tabela 2.6 – Métodos de otimização utilizados nos artigos.

Métodos de Otimização	Quantidade de Vezes Utilizadas nos Artigos
Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO)	1
Algoritmo Genético (AG)	1
Gradação Reduzida Generalizada (GRG)	8
Momentos-L	1
Mínimos Quadrados	10
Chen	1
Regressão Não-linear de Gauss-Newton	2
Sherman-Morrison	1
Regressão Polinomial	1

Fonte: O autor.

Após o cálculo da curva é realizado o cálculo do ajuste. O cálculo desse ajuste, como já mencionado anteriormente, reflete no quão próximo os dados reais estão dos dados estimados, ou seja, o quão adequado é o modelo proposto. Nos trabalhos analisados, pode-se observar que esse cálculo sempre é realizado.

A Tabela 2.7, o cálculo do coeficiente de determinação (R^2) foi o mais utilizado, apresentando um total de 25,00%, em relação ao total de trabalhos, seguido pelo erro relativo, com 8,33%. Esses dois coeficientes mais o índice de concordância de Wilmott (d), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), somam um total de 52,08% de todos os cálculos realizados.

Tabela 2.7 – Coeficientes para avaliar os parâmetros determinados utilizados nos artigos.

Ajustes Calculados	Quantidade de Vezes Utilizadas nos Artigos
Acurácia do Método de Chen	1
Coeficiente de Correlação (R)	2
Coeficiente de Desempenho (c)	2
Coeficiente de Determinação (R^2)	12
Coeficiente de Determinação Ajustado (R_{aj}^2)	3
Coeficiente de Eficiência Ajustado (E')	2
Coeficiente de Eficiência de Nash-. Sutcliffe (COE)	1
Coeficiente de Variação do Erro Quadrático Médio da Raiz (CV_{RMSE})	1
Desvio Percentual Médio Absoluto (DPMA)	1
Desvio Quadrático Médio (DQM)	1
Erro Absoluto Máximo (MAE)	2
Erro Absoluto Médio (EAM)	1
Erro Padrão de Estimativa (EPE)	1
Erro Quadrático Médio (MSE)	2
Erro Quadrático Total	1
Erro Relativo	4
Índice de Concordância de Wilmott (d)	3
Porcentagem Média da Diferença (D)	1
Qui-Quadrado (X^2)	1
Raiz do erro quadrático médio (RMSE)	3
Raiz Relativa do Erro Quadrático Médio (RRMSE)	1
Soma dos Erros Quadrados	1
Teste F de Variância (F_{est})	1
Teste T de Student	1
Viés Relativo	1

Fonte: O autor.

2.2 Referencial Teórico Sobre a Curva IDF

A Hidrologia é uma geociência que trata da água na Terra. Ela investiga os fenômenos que determinam a sua ocorrência e sua distribuição espaço-temporal, sob os aspectos de quantidade, de qualidade e de interação com a sociedade. Os fenômenos hidrológicos são aqueles que determinam os mecanismos de armazenamento e de transporte entre as diversas fases do ciclo da água em nosso planeta, especialmente as áreas continentais (VILLELA; MATTOS, 1975; NAGHETTINI; PINTO, 2007; TUCCI, 2014).

De acordo com Pinto *et al.* (1976) e Naghettini e Pinto (2007), a Hidrologia se divide em duas áreas: Paramétrica (ou Determinística) e Estocástica (ou Probabilística). A Hidrologia Paramétrica é aquela que realiza a análise e o desenvolvimento de relações matemáticas, por meio da aplicação direta de leis da Física, Química ou Biologia, com o objetivo de descrever os eventos hidrológicos, através de um número limitado de variáveis, desenvolvendo relações funcionais ou experimentais unívocas, que explicam completamente as suas variações espaço-temporais. Já a Hidrologia Estocástica é aquela que se baseia nas características probabilísticas de eventos hidrológicos aleatórios, onde essas componentes se superpõem às regularidades eventualmente explicitáveis (Hidrologia Paramétrica), desenvolvendo relações matemáticas para um conjunto de variáveis do espaço-tempo.

Um dos estudos utilizados na realização de projetos hidráulicos é o estudo de caracterização das precipitações. A precipitação é considerada como toda forma de umidade proveniente da atmosfera que atinge ou é depositada na superfície terrestre como chuva, granizo, nevoeiro, orvalho, sereno, neblina, neve e geadas. No entanto, apesar dessa definição, no Brasil, a precipitação é determinada pelas chuvas, tendo em vista que estas são facilmente medidas, devido a difícil ocorrência de neve no território brasileiro, e porque as outras formas pouco contribuem para o valor precipitado (VILLELA; MATTOS, 1975; PINTO *et al.*, 1976; GARCEZ; ALVAREZ, 1988; TUCCI, 2014).

Desta forma, para se evidenciar as precipitações, faz-se necessário inteirar-se sobre sua altura pluviométrica, duração, intensidade e frequência de ocorrência ou período de retorno (Tr). A altura pluviométrica é a quantidade de água precipitada em uma determinada área horizontal, sendo medida através da espessura da lâmina de água acumulada durante um intervalo de tempo (dia, mês, ano) caso a água não infiltrasse, evaporasse ou escoasse. Essa medida é realizada por aparelhos específicos, denominados de pluviômetros, sendo expressa em milímetros (mm). A duração é o intervalo de tempo em que se iniciou e terminou a precipitação, expressa em minutos ou horas. A razão entre a altura pluviométrica e a duração é denominada de intensidade, que é a velocidade com que a precipitação ocorre (mm/min ou mm/h). Por fim, a frequência ou período de retorno é o número de vezes que uma mesma precipitação pode ocorrer num determinado espaço de tempo fixo, sendo o número médio de anos durante o qual, espera-se, que a precipitação seja igualada ou superada (VILLELA; MATTOS, 1975; GARCEZ; ALVAREZ, 1988; TUCCI, 2014).

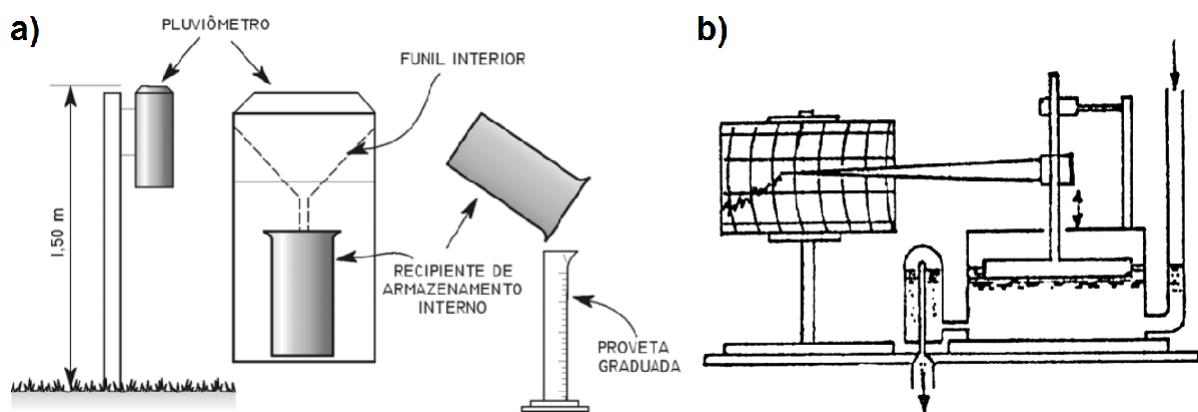
Essas grandezas são comumente chamadas de dados da curva IDF (Intensidade, Duração e Frequência), os quais são relacionados em um gráfico e deste são retirados os parâmetros necessários para o cálculo da intensidade de chuva, a qual é necessária para se determinar uma vazão de projeto, definida como sendo aquela que possui uma maior chance de ocorrer em uma dada região, proporcionando, assim, o adequado dimensionamento das obras hidráulicas.

O estudo das curvas IDF faz parte da Hidrologia Paramétrica e se baseia na quase repetição dos regimes de precipitação ao longo do tempo. Isto é, ainda que a sucessão histórica de precipitações constatada no passado, não se repita exatamente para o futuro, suas tendências mantêm-se aproximadamente as mesmas, assim os projetos de obras futuras são elaborados com base em elementos do passado, considerando-se ou não a probabilidade de se verificarem alterações com relação ao passado (PINTO *et al.*, 1976). Desse modo, além de determinar os parâmetros das curvas IDF para localidades em que estas não existem, faz-se necessário atualizar os parâmetros das mesmas já existentes, tendo em vista que estas podem ser modificadas ao longo de vários anos, oriundas das “variações, algumas regulares e muitas irregulares, dos climas global e regional, bem como das particularidades regionais e locais, sob os aspectos meteorológicos, geomorfológicos, de propriedades e uso do solo,

entre tantos outros” (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 3).

Para tanto, como já mencionado, faz-se necessária à determinação da altura da lâmina de água acumulada durante um intervalo de tempo. Ela é avaliada utilizando-se os aparelhos chamados pluviômetros (Figura 2.4-a) ou pluviógrafos (Figura 2.4-b), apesar de existirem outras formas como radares meteorológicos ou satélites. Em geral, esses aparelhos costumam ter superfície receptora circular, a fim de colher uma pequena amostra de água, com área entre 200 e 500 cm², geralmente instalados a 1,50 m do solo de tal forma que não sofram influências de árvores, prédios ou outros obstáculos (PINTO *et al.*, 1976; ANA, 2012).

Figura 2.4 – Pluviômetro do tipo paulista (à esquerda) e pluviógrafo de boia (à direita).



Fonte: Porto, Filho e Marcellini (2000)

A principal diferença entre esses aparelhos é que o pluviômetro possui um reservatório para acumular a água recolhida durante um intervalo de tempo, determinado de acordo com o número de medições realizadas durante o dia por um observador. Já o pluviógrafo, permite um monitoramento contínuo da quantidade de água recolhida a cada instante de tempo. O pluviógrafo de cubas, por exemplo, realiza o monitoramento através de duas cubas articuladas por um eixo central (pluviógrafo de cubas), o movimento e o tempo em que ocorre cada oscilação dessas cubas são registrados num papel, atualmente substituídos por memórias (data-logger), informando assim o total de precipitação acumulada ao longo do tempo (TASSI; COLLISCHONN, 2004).

Apesar da existência desses dois aparelhos, os dados de intensidade de chuvas utilizados nesse trabalho serão oriundos apenas de pluviômetros. O motivo principal disso é que a pluviometria é relativamente simples e pouco custosa, se comparada a pluviografia, fazendo com que ela possua muito mais postos de coleta de dados aumentando, assim, a qualidade do estudo (PINTO *et al.*, 1976; NAGHETTINI; PINTO, 2007).

No Brasil um dos pluviômetros mais utilizados é o tipo “Ville de Paris” (Figura 2.5). Esse pluviômetro possui formato cilíndrico com uma área de captação de 400 cm², dessa

maneira um volume de 40 mL de água acumulado corresponda a 1 mm de chuva (TASSI; COLLISCHONN, 2004; ANA, 2012). As medições da lâmina de água acumulada no aparelho são feitas por um observador, normalmente, em intervalos de 24 horas, através do esvaziamento da água acumulada por uma torneira (existente no fundo do aparelho) em uma proveta graduada. Essas medições são anotadas em cadernetas próprias e são enviadas a agência responsável pela rede pluviométrica todo fim de mês (PINTO *et al.*, 1976).

Figura 2.5 – Pluviômetro “*Ville de Paris*”.



Fonte: ANA (2012).

Como essas medições são organizadas de acordo com sua ocorrência no tempo, em intervalos de tempo equidistantes, elas formam uma série histórica. As séries históricas podem incluir todas as observações disponíveis ao longo de vários anos de registros. Desse modo, requerem uma coleta sistemática de dados básicos que se desenvolvem ao longo de vários anos, assim quanto mais longos e precisos forem os registros de dados hidrológicos, mais corretas serão as análises. A necessidade de se obter uma série de dados muito longa faz com que existam erros grosseiros associados às mesmas, além dos erros aleatórios e/ou sistemáticos (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Os erros aleatórios fazem parte dos atos de medir e observar, eles trazem consigo imprecisões de leituras e medições. Desse modo, mesmo que se façam várias leituras considerando-se as mesmas condições os resultados raramente irão coincidir, eles em geral flutuam em torno de seu verdadeiro valor. Já os erros sistemáticos são aqueles que registram os resultados observados sistematicamente acima ou abaixo do valor real, e podem ter origem na mudança da técnica de medição, na calibração incorreta do aparelho de medição ou mesmo nos processos de coleta, transmissão e processamento dos dados. Por fim, os erros grosseiros são aqueles oriundos de falhas humanas e que são resultado direto da falta de cuidado durante a execução de uma medição ou leitura (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Então, para se calcular os parâmetros de uma curva IDF faz-se necessário à análise de dados de precipitação (altura pluviométrica) oriundos dessas séries hidrológicas históricas para cada ponto de coleta de dados, tenho em vista que a quantidade de água precipitada

varia de acordo com o espaço-tempo fazendo com que os parâmetros da curva variem não só ao longo dos anos (tempo), mas também em relação a sua localização (espaço).

Apesar desse trabalho tomar como base os dados oriundos de estações pluviométricas, a metodologia utilizada na determinação da curva IDF é originada da análise de dados pluviográficos, a fim de se obter as chuvas máximas para diversas durações. No entanto, essa metodologia apresenta grandes dificuldades em função da falta de dados disponíveis (como já mencionado anteriormente) e de seu extenso trabalho para obtenção dos dados, tendo em vista que esse exige a tabulação, a análise e a interpretação de uma quantidade grande de pluviogramas (CECILIO; PRUSKI, 2003).

Assim, na falta de registros pluviográficos, foram desenvolvidas, no Brasil, outras metodologias, a partir dos registros pluviométricos, empregando-se coeficientes para transformar uma chuva de 24 h em chuvas de menor duração. Dentre essas metodologias pode-se citar a metodologia das isozonas, proposta por Torrico (1975), e a metodologia de desagregação de chuvas, da CETESB (1980), a qual será utilizada nesse trabalho (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

O cálculo dos parâmetros da curva IDF através da metodologia de desagregação de chuvas da CETESB (1980) e os conceitos relacionados a essa metodologia são apresentados a seguir. Para facilitar a compreensão do procedimento de cálculo, este pode ser separado em oito etapas principais:

1. Determinar o mês inicial e final do ano hidrológico oriundo da série histórica;
2. Determinar as precipitações diárias máximas de cada ano hidrológico oriundas da série histórica;
3. Calcular a distribuição probabilística teórica e empírica dessas máximas (a fim de se obter a frequência associada a cada uma);
4. Aplicar o teste de aderência (a fim de se determinar qual a distribuição probabilística mais adequada);
5. Fazer a extrapolação probabilística dos dados para diferentes períodos de retorno, através do uso de uma distribuição probabilística teórica;
6. Aplicar o método de desagregação de chuvas através dos coeficientes de desagregação da CETESB (1980);
7. Determinar os parâmetros da curva IDF através de um método de otimização;
8. Calcular o erro associado a cada otimização realizada.

2.2.1 Ano hidrológico

O ano hidrológico correspondente a um intervalo fixo de 12 meses, o qual se inicia no período chuvoso e termina no fim do período de estiagem (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Caso não se possa distinguir um período chuvoso (6 meses seguidos das maiores precipitações médias mensais) e um período seco (6 meses seguidos das menores precipitações médias mensais), adota-se o ano civil (janeiro a dezembro) para a determinação das máximas precipitações anuais.

2.2.2 Precipitações máximas anuais

A precipitação máxima diária anual, em geral, ocorre no período chuvoso. No entanto, podem ocorrer eventos extremos em outros meses do ano (eventos atípicos). Ela é determinada dentro de cada ano hidrológico, para toda a série histórica analisada, sendo o maior valor precipitado de 1 dia. No entanto, tendo em vista que as séries históricas são formadas a partir da coleta de dados durante vários anos e que esses registros são passíveis de erros, como já mencionado anteriormente, destaca-se que, em geral, não se pode obter uma precipitação diária máxima para todos os anos, pois há falhas nas séries analisadas, as quais podem variar de um dia à até mesmo anos.

2.2.3 Distribuição probabilística teórica e empírica

De acordo com Naghettini e Pinto (2007) há um conjunto de distribuições de probabilidades teóricas específicas que podem ser empregadas para a modelação de eventos extremos anuais de variáveis hidrológicas e hidrometeorológicas. Dentre esse conjunto pode-se citar: as distribuições de Gumbel, de Fréchet, de Weibull, Exponencial, Pearson III, Log-Pearson III, Log-Normal II e a Generalizada de Valores Extremos (GEV).

Nesse trabalho, escolheu-se utilizar a distribuição probabilística teórica de Gumbel, pois de acordo com Naghettini e Pinto (2007) ela é a distribuição extrema mais utilizada na análise da frequência de inúmeras grandezas hidrológicas, com várias aplicações na determinação das curvas IDF e de estudos de vazões de enchentes sendo uma distribuição que não necessita de tabelas na realização dos cálculos, já que os mesmos são realizados a partir da média de precipitações máximas anuais da série histórica e do desvio padrão, para cada período de retorno. Além disso, a distribuição de Gumbel foi a mais citada e utilizada nos artigos aderentes do Mapeamento Sistemático (Tabela 2.3), o que evidencia sua grande utilização.

Além da distribuição probabilística teórica, existe a distribuição probabilística empírica. De acordo com Villela e Mattos (1975), CETESB (1980) e Naghettini e Pinto (2007), a probabilidade empírica ligada aos dados pode ser dada pelo Método Califórnia ou pelo Mé-

todo de Kimbal. Nesse trabalho, escolheu-se utilizar a distribuição de Kimbal, assim como apresentado no "Manual de Projeto de Drenagem Urbana" da CETESB (1980).

2.2.4 Teste de aderência das distribuições probabilísticas

Os testes de aderência verificam se há eventual adequação entre as probabilidades empíricas e teóricas. Desse modo, eles permitem verificar se uma variável aleatória contínua (variáveis pertencentes à reta real que podem assumir valores fracionários) é ou não distribuída segundo um modelo teórico. Os principais testes de aderência, empregados na hidrologia estatística, são o do Qui-Quadrado (X^2), o de Kolmogorov-Smirnov (KS), o de Anderson-Darling (AD) e o de Filliben (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Nesse trabalho, escolheu-se utilizar o método de Kolmogorov-Smirnov (KS), assim como indicado pelo mapeamento sistemático.

2.2.4.1 Teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov

O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) é um teste não paramétrico, ou seja, independe dos parâmetros da distribuição. Sua estatística de teste tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica, de variáveis aleatórias contínuas. Contudo, seu poder de teste nas caudas inferior e superior é diminuído, devido ao reduzido número de observações amostrais e do erro associado a essa parte do espaço amostral (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

2.2.5 Extrapolação probabilística das máximas

A extrapolação probabilística dos dados consiste em utilizar a distribuição teórica que melhor representa os dados amostrais analisados. Assim, a distribuição teórica que apresentou os melhores resultados no teste de aderência é escolhida para se obter os valores de precipitação máxima de 1 dia para diferentes períodos de retorno. Como nesse trabalho escolheu-se utilizar somente a distribuição de Gumbel, o teste de aderência irá testar apenas se a distribuição é ou não aceitável.

2.2.6 Desagregação das chuvas

O método de desagregação de chuvas consiste em transformar uma chuva de 1 dia, obtida no pluviômetro, em uma chuva de 24 horas de duração e desta para tempos menores através do emprego de coeficientes de desagregação. Os coeficientes de desagregação, de acordo com CETESB (1980) são oriundos de estudos tanto do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, realizado em 1966, o qual buscava estabelecer uma relação entre as alturas pluviométricas das chuvas máximas de 1 dia e de 24 horas, quanto do Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), em 1957, o qual publicou um es-

tudo de chuvas de grande alcance, denominado "Chuvas Intensas no Brasil", a fim de obter uma relação entre as alturas pluviométricas das chuvas máximas para tempos de concentração inferiores a 1 dia.

Apesar desses estudos terem caráter preliminar, devido a falta de dados pluviográficos suficientes para a realização de estudos mais profundos e desenvolvimento de coeficientes para todas as regiões do país, os valores desses coeficientes são muito próximos aos utilizados em diversas partes do mundo, "tendo Reich sugerido que as mesmas são aplicáveis em todo o mundo", fazendo com que esses valores possam ser aplicados com relativa confiança (CETESB, 1980, p. 22).

2.2.7 Otimização

A otimização pode ser definida como um processo através do qual se obtém o melhor valor de uma grandeza, assim, ela determina o valor máximo ou mínimo de um dado problema descrito por uma ou mais funções matemáticas, a qual pode ou não estar sujeita a condições de contorno e/ou restrições (SARAMAGO, 2003). Desse modo, qualquer problema, real ou fictício, que possa ser modelado matematicamente, possuindo no mínimo variáveis de projeto e função objetivo (FO), pode ser otimizado aplicando-se processos iterativos, através do uso de algoritmos.

As metodologias usadas em resoluções de um problema de otimização, em geral, são classificadas em dois grupos: a determinística (ou clássica) e a heurística (ou não-clássica). Como exemplos de métodos determinísticos tem-se: Método da Seção Áurea, Método de Fibonacci, Método da Máxima Descida, Método do Gradiente Conjugado, Método de Newton, Método Quase-Newton, Método das Penalidades, entre outros. Como exemplo de métodos heurísticos tem-se: Algoritmos Genéticos, Algoritmo de Enxame de Partículas, Algoritmo de Colônia de Abelhas, Algoritmo de Colônia de Vagalumes, Algoritmo de Morcegos, Algoritmo de Polinização de Flores, Algoritmo de Colônia de Formigas, Evolução Diferencial, entre outros.

De acordo com Bastos (2004), os métodos de otimização baseados nos algoritmos determinísticos, requerem, em geral, o uso de pelo menos a primeira derivada da função objetivo em relação às variáveis de projeto, requerendo que a função objetivo seja diferenciável. Já os métodos baseados nos algoritmos heurísticos usam somente a avaliação da função objetivo, resolvendo o problema do ponto de vista probabilístico, através do uso de dados e parâmetros estocásticos, não requerendo que a função objetivo seja diferenciável.

No entanto, apesar dos algoritmos heurísticos possuírem a capacidade de escapar de máximos ou mínimos locais, tendo em vista que os algoritmos determinísticos são extremamente dependentes do chute inicial, eles não garantem se a função objetivo está ou não próxima da solução ótima, já que o método depende do número de gerações, da população

inicial adotada e do seu espalhamento. Além disso, os algoritmos determinísticos possuem uma maior convergência em relação aos algoritmos heurísticos, tendo em vista que os mesmos realizam a avaliação de toda a população a cada iteração (BASTOS, 2004).

Neste trabalho foram utilizados 5 algoritmos heurísticos: o Algoritmo Genético (AG), o Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO), o Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO), o Algoritmo de Polinização de Flores (FPA) e a Evolução Diferencial (ED). Esses algoritmos foram escolhidos devido ao seu uso em outros trabalhos relacionados à problemas de engenharia, tais como: o estudo de minimização do custo de painéis alveolares e vigotas protendidas de concreto (CASTILHO, 2003) e o estudo do comportamento de estruturas tubulares metálicas com barras cruzadas para cobertura (SOUZA JUNIOR, 2005), através do uso do AG; o estudo de transporte de funcionários de uma empresa (RODRIGUES, 1986) e o estudo da resolução do problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas (MORAIS; ASSIS; ANDRADE, 2010), através do uso do ACO; o estudo de otimização do núcleo de um reator nuclear (MEDEIROS, 2005) e o estudo de layouts industriais (MÜLLER, 2007), através do uso do PSO; o estudo de otimização de custos de geração de energia elétrica através de unidades termoelétricas (SOUZA; OLIVEIRA; SILVA JUNIOR, 2017) e o estudo de otimização da implantação de *smallcells* para redes móveis celulares (SILVA FILHO, 2019), através do uso do FPA; o estudo de otimização do projeto de um rotor de motor de indução trifásico (MALAGOLI *et al.*, 2014) e o estudo da otimização de custos problemas estruturais (VARGAS *et al.*, 2016), através do uso do ED.

2.2.7.1 Algoritmo Genético

O surgimento do Algoritmo Genético (AG) pode ser atribuído a uma abstração originada do livro “Adaptation in Natural and Artificial Systems” de John Holland publicado em 1975. Nesse livro, Holland exemplifica que os indivíduos de uma população passam por diversos processos de transformação para que possam adaptar-se ao meio coletivo em que vivem, favorecendo comportamentos considerados úteis através de recompensas e eliminando comportamentos inúteis. É a partir dessa ideia que Holland compreende que esses mecanismos que favorecem a adaptação dos indivíduos ao meio poderiam ser expressos matematicamente e simulados computacionalmente, dando origem a ideia do AG (COELHO, 2003).

O AG é baseado nos princípios oriundos da dinâmica de populações naturais. Sua estrutura básica consiste na geração aleatória de uma população de soluções candidatas, a qual é evoluída para uma nova geração de soluções através da aplicação de operadores genéticos como o princípio de sobrevivência dos mais aptos, cruzamento e mutação. Ou seja, cada indivíduo da população em cada geração representa uma possível solução para um dado problema, o que o AG faz é buscar dentro desse conjunto de soluções qual é a melhor solução, sempre a partir da criação de populações de indivíduos cada vez mais aptos

(BASTOS, 2004; CASTRO, 2001; COELHO, 2003).

O Algoritmo 2.1 apresenta um pseudo-código com todos os procedimentos básicos de um AG (adaptado de Castro (2001) e Bastos (2004)). Nele pode-se verificar os seguintes parâmetros de entrada: limite inferior (l_i) e limite superior (l_s) do espaço de projeto, número de gerações (N_{ger}), tamanho da população (N_{ind}); probabilidade de cruzamento (P_c) e probabilidade de mutação (P_m).

Algoritmo 2.1: Algoritmo Genérico (AG).

Entrada: $FO, l_i, l_s, N_{ger}, N_{ind}, P_c$ e P_m

- 1 Inicialização da população;
- 2 Avaliação dos indivíduos da população;
- 3 **enquanto** *critério de parada não seja satisfeito* **faça**
- 4 Selecione indivíduos para reprodução;
- 5 Aplique operadores de cruzamento (P_c) e mutação (P_m);
- 6 Avalie indivíduos na população;
- 7 Selecione indivíduos para sobreviver (nova geração);

Saída: Solução ótima local.

2.2.7.2 Algoritmo Colônia de Formigas

O Algoritmo de Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO) é inspirado no comportamento de procura de alimento de colônias de formigas reais. Muitas sociedades de formigas tem um comportamento de coleta de alimentos baseada na comunicação indireta mediada por feromônios. De modo geral, quando as formigas saem em busca de alimento elas depositam feromônios no chão, esses feromônios fazem com que outras formigas tendam a escolher esse caminho, devido a sua maior concentração de feromônios. Desse modo, quanto mais formigas passam por um caminho maior é a concentração de feromônios, formando o que se chama de trilha química. A trilha química é uma estrutura emergente e auto-organizada que se origina de um feedback positivo, assim quanto maior a concentração de feromônio numa trilha, maior é a quantidade de formigas atraídas, tornando a trilha mais concentrada, o que atrairá mais formigas, tornando a trilha mais concentrada, em um loop crescente (SERAPIÃO, 2009).

Inspirados por esse comportamento, Dorigo, Maniezzo e Colorni (1991) publicaram um relatório técnico chamado "*Positive Feedback as a Search Strategy*", propondo o primeiro modelo computacional baseado na comunicação de formigas para resolver o clássico problema do caixeiro viajante. A ideia por trás desse algoritmo funciona da seguinte forma: primeiramente, cada formiga vai de uma cidade a outra independentemente, seguindo um caminho qualquer determinado por uma regra probabilística que sugere a melhor opção de caminho e libera uma determinada quantidade de feromônio, quanto maior o caminho menor é a quantidade de feromônio liberado pela formiga. Quando todas as formigas tiverem

percorrido suas rotas e liberado feromônio, haverá rotas entre cidades utilizadas mais vezes por serem mais curtas. Essas rotas mais curtas terão uma quantidade maior de feromônio depositado fazendo com que mais formigas sejam atraídas. Além disso, quanto mais longa uma rota mais rápido ela desaparecerá, visto que o feromônio evapora com o decorrer do tempo (COELHO, 2003; RODRIGUES, 1986; SERAPIÃO, 2009).

O Algoritmo 2.2 apresenta um pseudo-código com todos os procedimentos básicos de um ACO (adaptado de Dorigo, Maniezzo e Colorni (1991)). Nele pode-se verificar os seguintes parâmetros de entrada: limite inferior (l_i) e limite superior (l_s) do espaço de projeto, número de gerações (N_{ger}), tamanho da população (N_{ind}) e a taxa de evaporação do feromônio (T_f).

Algoritmo 2.2: Algoritmo de Colônia de Formigas (ACO).

Entrada: função objetivo, l_i , l_s , N_{ger} , N_{ind} e T_f

- 1 Inicialização da população (trilha percorrida por cada formiga);
- 2 Avaliação de cada trilha percorrida;
- 3 Atualização dos valores do feromônio para cada trilha;
- 4 **enquanto** critério de parada não seja satisfeito **faça**
- 5 Atualize cada trilha através de uma regra de transição de posição;
- 6 Avalie o valor de cada trilha;
- 7 Armazene o valor da melhor solução;
- 8 Atualize os valores do feromônio para cada trilha;

Saída: Solução ótima local.

2.2.7.3 Algoritmo de Enxame de Partículas

O Algoritmo de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) foi introduzido por Eberhart e Kennedy (1995), em um artigo chamado "*Particle Swarm Optimization*". O PSO emergiu de experiências com algoritmos que modelam o comportamento social observado em muitas espécies de pássaros e cardumes de peixes, e até mesmo do comportamento social humano, baseando-se num processo de adaptação cultural.

Ele é baseado numa teoria sócio-cognitiva muito simples. Cada indivíduo de uma população passa por experiências próprias, sendo capaz de estimar a qualidade dessas experiências. No entanto, como indivíduos que vivem em sociedade, eles também possuem conhecimentos sobre como seus vizinhos se comportam. Essas duas informações formam a aprendizagem individual (cognitiva) e a transmissão cultural (social), respectivamente. Portanto, a tomada de decisão de um determinado indivíduo será uma função probabilística das suas experiências do passado e do comportamento de seus vizinhos. Assim, com base nos princípios de autoavaliação, comparação e imitação, os indivíduos são capazes de lidar com um número de possíveis situações que o ambiente lhes apresenta. Os comportamentos globais serão, portanto, resultados emergentes dessas interações (SERAPIÃO, 2009).

A ideia por trás desse algoritmo é fazer com que os indivíduos da população, representados por pontos e denominados de partículas, voem em um espaço de busca através da definição de uma nova posição, determinada através da posição atual da partícula, de uma velocidade e do uso de dois princípios. O primeiro princípio cria uma vizinhança para cada indivíduo composta por ele próprio e seus vizinhos mais próximos e representa a posição da partícula que levou ao seu melhor desempenho até o momento. O segundo princípio conecta conceitualmente todos os membros de uma população entre si e representa o melhor desempenho global do sistema até o momento. Como consequência, o comportamento de cada partícula é influenciado pelo comportamento de todas as outras partículas. Assim, a cada iteração as partículas mudam de posição levando a novos pontos no espaço, fazendo com que o sistema convirja (SARAMAGO, 2003).

O Algoritmo 2.3 apresenta um pseudo-código com todos os procedimentos básicos de um PSO (adaptado de Saramago (2003) e Serapião (2009)). Nele pode-se verificar os seguintes parâmetros de entrada: limite inferior (l_i) e limite superior (l_s) do espaço de projeto, número de gerações (N_{ger}), tamanho da população (N_{ind}), velocidade inicial e final de cada partícula e da melhor partícula (V_p) e o fator de inércia inicial e final (F_i).

Algoritmo 2.3: Algoritmo de Enxame de Partículas (PSO).

Entrada: $FO, l_i, l_s, N_{ger}, N_{ind}, V_p$ e F_i

- 1 Inicialização da população de partículas;
- 2 Atribuição de uma velocidade inicial igual para todas as partículas;
- 3 **enquanto** critério de parada não seja satisfeito **faça**
- 4 **para** cada partícula **faça**
- 5 Avalie o valor da função objetivo;
- 6 Calcule a melhor posição da partícula até o momento;
- 7 Determine a partícula que possui o melhor valor da função objetivo;
- 8 **para** cada partícula **faça**
- 9 Atualize a velocidade da partícula;
- 10 Atualize a posição da partícula;

Saída: Solução ótima local.

2.2.7.4 Algoritmo de Polinização de Flores

O Algoritmo de Polinização de Flores (*Flower Pollinization Algorithm* - FPA) foi introduzido por Yang (2012), em um artigo chamado "*Flower Pollination Algorithm for Global Optimization*". Esse algoritmo é baseado no processo de polinização das flores, o qual é realizado principalmente por insetos.

De acordo com Yang (2012), estima-se que existem mais de 250 mil tipos de plantas na natureza e que cerca de 80% de todas elas apresentam flores. Essas plantas floríferas utilizam o processo de polinização (autopolinização ou polinização cruzada) para se repro-

duzirem. A polinização cruzada, ou alogamia, é o processo de fertilização entre duas flores, isso significa que houve transferência de pólen de uma flor para outra através de um agente polinizador (polinização global). Já a autopolinização é o processo de fertilização de uma flor, isso significa que não houve transferência de pólen de uma flor para outra (polinização local). Além disso, no processo de polinização cruzada, os agentes polinizadores tendem a visitar determinadas espécies de flores, ignorando outras, o que proporciona uma vantagem de algumas flores sobre outras, visto que isso maximizará a transferência de pólen e, conseqüentemente, a reprodução das mesmas.

A ideia por trás desse algoritmo é fazer com que os candidatos (flores), em cada uma das gerações, produzam um novo candidato (fertilização) através de um processo aleatório de polinização global ou local, tendo em vista que por motivos de simplificação cada uma delas só possui um gameta, fertilizando somente uma vez a cada iteração. Na polinização local, o processo ocorre de maneira puramente aleatória, garantindo apenas que o novo candidato esteja próximo à região de polinização. Já na polinização global, o pólen das flores é carregado por um agente polinizador, podendo viajar por longas distâncias, de acordo com a distribuição de Lévy, que descreve o movimento (voos) desses agentes. Isso garante a polinização de flores mais aptas (candidatos à solução do problema) e por fim a convergência do sistema (YANG, 2012).

O Algoritmo 2.4 apresenta um pseudo-código com todos os procedimentos básicos de um FPA (adaptado de Silva Filho (2019)). Nele se pode verificar os seguintes parâmetros de entrada: limite inferior (l_i) e limite superior (l_s) do espaço de projeto, número de gerações (N_{ger}), tamanho da população (N_{ind}) e probabilidade de ocorrer polinização global ou não (P_t).

Algoritmo 2.4: Algoritmo de Polinização de Flores (FPA).

Entrada: FO , l_i , l_s , N_{ger} , N_{ind} e P_t

- 1 Inicialização da população de flores;
- 2 Determinação da melhor solução;
- 3 **enquanto** critério de parada não seja satisfeito **faça**
- 4 **para** cada flor **faça**
- 5 **se** $rand < P_t$ **então**
- 6 Gere um novo candidato via polinização global (distribuição de Lévy);
- 7 **senão**
- 8 Gere um novo candidato via polinização local;
- 9 Avalie as novas soluções;
- 10 Atualize a população;
- 11 Armazene a melhor solução obtida;

Saída: Solução ótima local.

2.2.7.5 Evolução Diferencial

A Evolução Diferencial (ED) é um algoritmo evolucionário que foi proposto por [Storn e Price \(1997\)](#) publicado em um relatório técnico chamado “*Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces*”. A ideia por trás desse algoritmo é puramente matemática e funciona da seguinte forma: o algoritmo gera uma população inicial aleatória, a qual estará sempre contida dentro dos limites do domínio através do uso de “regras de reparo”, em seguida ocorre o processo de mutação, onde são selecionados aleatoriamente três indivíduos diferentes para gerarem um novo vetor (vetor de diferenças), o qual pode ser calculado por diferentes estratégias, e 1 indivíduo para sofrer mutação. Após a mutação inicia-se o processo de cruzamento, nele os genes do vetor de diferenças podem substituir os genes do indivíduo que está sofrendo mutação de maneira aleatória. Por fim, é realizada uma comparação entre o indivíduo antes de sofrer mutação e depois de sofrer mutação, o que tiver um melhor valor da função objetivo passa para próxima geração, criando uma nova população de vetores melhores e fazendo com que o sistema convirja ([COELHO, 2003](#); [ARAÚJO et al., 2016](#)).

O Algoritmo 2.5 apresenta um pseudo-código com todos os procedimentos básicos de uma ED (adaptado de [Araújo et al. \(2016\)](#)). Nele pode-se verificar os seguintes parâmetros de entrada: limite inferior (l_i) e limite superior (l_s) do espaço de projeto, número de gerações (N_{ger}), tamanho da população (N_{ind}), taxa de perturbação (F) e probabilidade de cruzamento (P_c).

Algoritmo 2.5: Evolução Diferencial (ED).

Entrada: $FO, l_i, l_s, N_{ger}, N_{ind}, F$ e P_c

- 1 Inicialização da população;
- 2 Avaliação do valor de cada indivíduo;
- 3 **enquanto** critério de parada não seja satisfeito **faça**
- 4 Selecione 3 indivíduos de acordo com a estratégia de mutação adotada;
- 5 **para** cada indivíduo **faça**
- 6 Realize a mutação (F);
- 7 Realize o cruzamento (P_c);
- 8 Avalie o valor de cada novo indivíduo;
- 9 **para** cada indivíduo **faça**
- 10 Selecione o melhor valor entre o antigo e o novo indivíduo;

Saída: Solução ótima local.

2.2.8 Avaliação do ajuste do modelo

A avaliação do ajuste consiste no cálculo de alguns coeficientes, a fim de se avaliar o ajuste realizado, determinando, assim, se o modelo estimado é aceitável ou não. Para isso,

esses coeficientes vão medir qual é o desempenho da equação encontrada, avaliando o grau de afastamento entre os valores estimados e observados. Nesse trabalho, escolheu-se utilizar o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de segurança para se avaliar o ajuste.

2.2.8.1 Coeficiente de determinação ajustado

O coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) é uma medida do grau de ajuste na análise de regressão múltipla que penaliza a adição de novas variáveis independentes ao modelo, sendo considerado mais atraente que o coeficiente de determinação (R^2). O R^2 , apesar de quantificar o quanto a variável independente explica a variável dependente, nunca diminui quando acrescentada uma nova variável independente ao modelo de regressão. Desse modo, se houverem muitas variáveis independentes, o valor de R^2 tende a ser 1 (ajuste perfeito), mas não explicaria o comportamento do modelo, levando a uma avaliação errada. Como R_{aj}^2 penaliza a adição de novas variáveis, ele acaba por se tornar um ajuste mais atraente, ajudando a comparar modelos com diferentes números de variáveis independentes (WOOLDRIDGE, 2006).

2.2.8.2 Índice de concordância de Willmott

O índice de concordância de Willmott (d) possui como função determinar o desempenho do modelo proposto. Ele está relacionado com o afastamento dos valores estimados em relação aos observados e varia de zero (para nenhuma concordância) à 1 (para concordância perfeita). De acordo com Willmott (1981), esse coeficiente foi proposto para ser uma medida padronizada que avalia de maneira rápida qual dentre vários modelos propostos é o melhor, tendo em vista que alguns outros coeficientes são incapazes de discernir diferenças entre as proporcionalidades dos modelos avaliados.

2.2.8.3 Coeficiente de Confiança

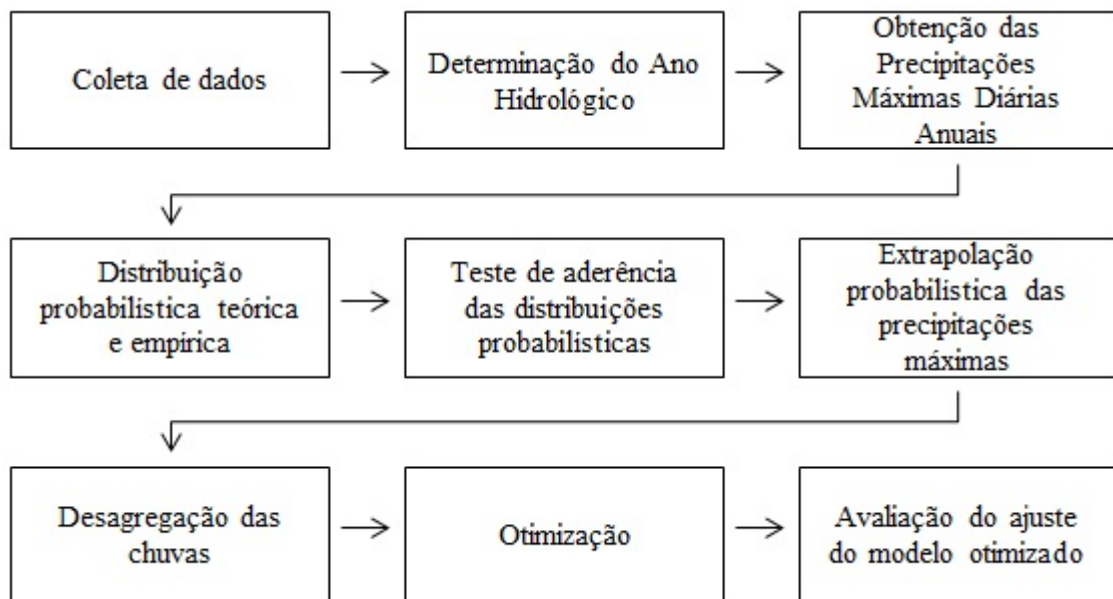
O coeficiente de confiança, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), tem por objetivo avaliar simultaneamente a exatidão e a precisão do método que se está utilizando. Ele foi proposto em um relatório para o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, sendo utilizado como um parâmetro de ajuste, pois possui um critério de interpretação do desempenho, diferindo-o dos demais índices apresentados.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O cálculo dos parâmetros da curva IDF através da metodologia de desagregação de chuvas da CETESB (1980), segue diversos passos ligados de maneira interdependente, como já mencionados anteriormente. A Figura 3.1 mostra um fluxograma de todos os passos relacionados no cálculo dos parâmetros da curva IDF.

Figura 3.1 – Fluxograma para o cálculo dos parâmetros da curva IDF através da metodologia de desagregação da CETESB (1980).



Fonte: O autor.

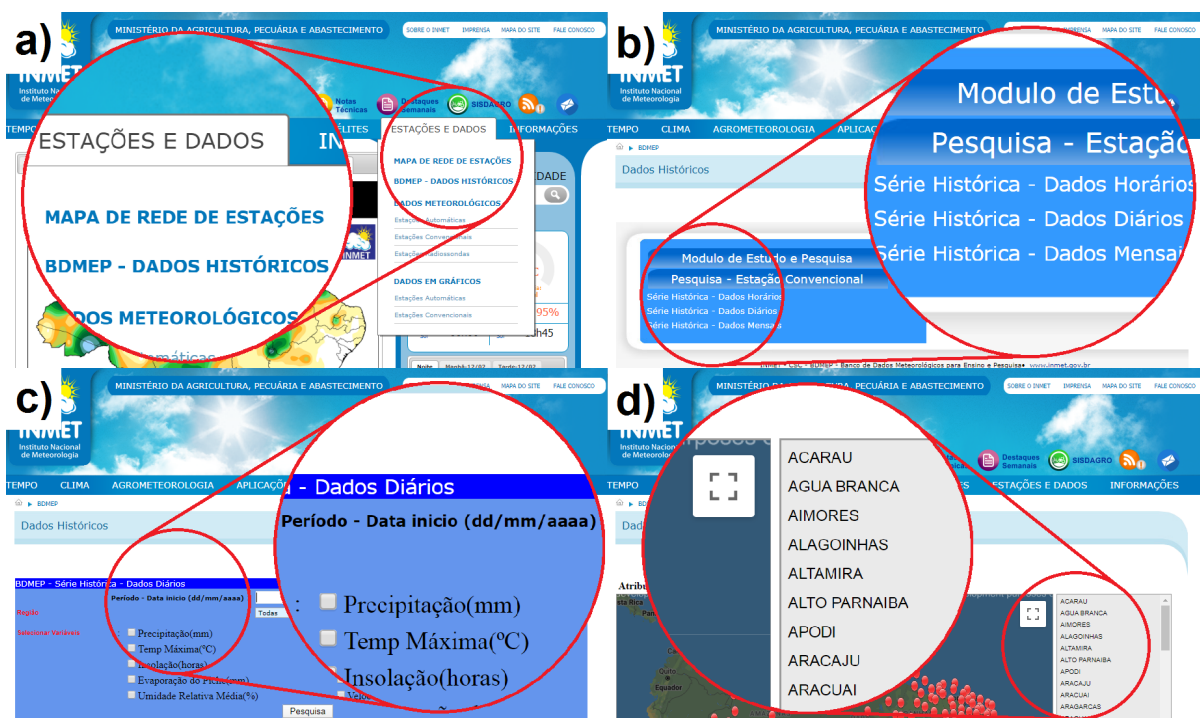
3.1 Coleta de Dados Pluviométricos

Primeiramente foi acessado o site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a fim de se obter a série histórica de dados diários de precipitação. Para realizar o download da série basta acessar o menu Estações e Dados, em seguida a opção "BDMEP - Dados histó-

ricos" (Figura 3.2-a), realizar o cadastro e então acessar os dados em "Série histórica - Dados diários" (Figura 3.2-b). Nesta opção é preciso preencher o início e o final período dos dados a serem coletados (dd/mm/aaaa) e marcar a opção "Precipitação(mm)" (Figura 3.2-c). No presente trabalho, foram utilizados todos os dados de chuva presentes no banco de dados, a fim de se obter uma boa amostra das principais tendências climáticas que estão ocorrendo.

Ao preencher os dados necessários para que o site gere os valores solicitados, a página é redirecionada para o mapa do Brasil, no qual é possível escolher uma estação localizada em diferentes cidades (Figura 3.2-d). Por fim clicando na cidade em que se deseja realizar o estudo (ou na própria estação no mapa), uma nova janela é aberta com as informações da estação e a opção de "Baixar os dados". Ao clicar nesta opção abre-se uma nova guia onde o usuário encontra as informações da estação e a série histórica com as seguintes informações: estação, data, hora e precipitação. O usuário então seleciona todo o arquivo e em geral salva o mesmo no formato ".txt" para que possa ser tratado no EXCEL® ou em outros programas.

Figura 3.2 – Plataforma do site INMET mostrando como acessar os dados diários de precipitação.



Fonte: Adaptado de INMET (2020).

No algoritmo em questão, a entrada de dados ocorre a partir do uso de um arquivo .txt, sendo que os dados são colocados em uma matriz contendo 4 colunas (estação, data, hora e precipitação). O usuário irá salvar o arquivo com o nome de DADOS.txt, irá excluir todo o cabeçalho e usar o comando *Ctrl+H* para substituir todos as vírgulas por espaço, para que o algoritmo funcione corretamente.

3.2 Ano Hidrológico

De posse da matriz com os dados diários de toda a série histórica, determinou-se o ano hidrológico através do Algoritmo 3.1. Para isso foi realizado o somatório de todos os dados diários para cada um dos meses, de cada um dos anos, durante toda a série histórica, obtendo-se assim a precipitação mensal para cada um deles. Em seguida, realizou-se a média aritmética dos dados de precipitação mensal para cada um dos meses. Os meses que não possuíam nenhum dado diário não geraram dados de precipitação mensal e não foram incluídos no cálculo da média, fazendo com que a média mensal fosse realizada com um número de elementos menor que o número de anos da série histórica. De posse dos valores mensais foi montado um gráfico de precipitações médias mensais, determinando qual o início do período de chuvas e o mês de início e fim de cada ano hidrológico.

Algoritmo 3.1: Algoritmo para Determinação do Ano Hidrológico.

Entrada: dados diários de precipitação

- 1 **para cada ano faça faça**
- 2 **para cada mês faça faça**
- 3 Some as precipitações de cada dia;
- 4 Some o número de dias que contém dados;
- 5 **para cada mês faça**
- 6 **para cada ano faça**
- 7 **se existem dados diários no mês então**
- 8 Some as precipitações do mês para cada ano;
- 9 Some o número de meses com dados;
- 10 **para cada mês faça**
- 11 Divida a soma mensal das precipitações pelo número de meses com dados
 (média das precipitações mensais);
- 12 Ordene a média das precipitações mensais em ordem decrescente;
- 13 Verifique se a média das precipitações mensais máximas estão em ordem;
- 14 Plote um gráfico com a média das precipitações mensais;

Saída: Início do ano hidrológico e gráfico da média das precipitações mensais

3.3 Precipitações Máximas Anuais

De posse do ano hidrológico foram obtidas as precipitações diárias máximas para cada ano hidrológico que possuíam todos os valores de precipitação diária (ano hidrológico completo). Após esse processo, os casos em que as séries ficam com menos de 10 anos não são utilizadas na determinação dos parâmetros, pois ocorreriam muitos erros caso fosse utilizado uma série com uma quantidade de dados menor.

Nessa etapa, representada pelo Algoritmo 3.2, foi realizada a contagem de todos os dados para cada ano hidrológico, aqueles anos que não possuísem 365 dados (ou 366 dados, no caso dos anos bissextos), que representam o número de dias de cada ano, foram descartados, obtendo-se a precipitação diária máxima anual dos demais anos. Por fim, a série de dados foi montada tendo como limite inferior a quantidade de 10 dados.

Algoritmo 3.2: Algoritmo para Determinação das Máximas Anuais.

Entrada: dados diários de precipitação e início do ano hidrológico

```

1 para cada ano hidrológico faça
2   Determine a precipitação máxima diária;
3   para cada mês faça
4     Determine a quantidade de dados para cada mês;
5 para cada ano hidrológico faça
6   Some a quantidade de dados de cada mês (TOTDIAS);
7   se ano hidrológico é bissexto e TOTDIAS > 365 então
8     Salve o valor da precipitação desse ano hidrológico num vetor de
      precipitações;
9   senão
10    se ano hidrológico não é bissexto e TOTDIAS > 364 então
11      Salve o valor da precipitação desse ano hidrológico num vetor de
        precipitações;
12 Determine a dimensão do vetor de precipitações;
13 se dimensão do vetor de precipitações < 10 então
14   Finalize o processo de cálculo de cálculo da IDF;
15 senão
16   Continue o processo de cálculo de cálculo da IDF;
```

Saída: saída lógica para continuar ou encerrar o cálculo da curva IFD, tamanho do vetor de precipitações e vetor de precipitações

3.4 Distribuição Probabilística Teórica e Empírica

De acordo com Aragão *et al.* (2013) e Tucci (2014) a função de distribuição Gumbel apresenta a seguinte função cumulativa de probabilidade (eq. 3.1), em que P_T é a probabilidade de um evento ser igualado ou superado e y é a variável reduzida de Gumbel.

$$P_T(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (3.1)$$

A variável reduzida de Gumbel é dada pela eq. 3.2, onde as variáveis α e β representam o parâmetro de escala, que interfere no valor máximo que a função de densidade de

probabilidade pode assumir (moda da distribuição), e o parâmetro de posição, que interfere na posição onde o valor máximo irá se encontrar, respectivamente. Esses parâmetros podem ser obtidos utilizando-se o método dos momentos e suas estimativas amostrais, média aritmética (μ) e desvio padrão (σ), obtendo-se as eq. 3.3 e 3.4.

$$y = \alpha * (x - \beta) \quad (3.2)$$

$$\alpha = 1,2826/\sigma \quad (3.3)$$

$$\beta = \bar{x} - 0,451 * \sigma \quad (3.4)$$

Substituindo as eq. 3.3 e 3.4 na eq. 3.2 e, posteriormente na eq. 3.1, a distribuição de probabilidade de Gumbel fica somente em função da média aritmética (\bar{x}) e do desvio padrão (σ) (eq. 3.5), dadas pelas eq. 3.6 e 3.7 respectivamente.

$$P_T(X \geq x) = 1 - e^{-e^{-\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma)}} \quad (3.5)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.7)$$

Após se determinar a probabilidade teórica ligada a cada um dos dados, determinou-se a probabilidade empírica. Ela foi determinada pelo Método de Kimbal, de acordo com Villela e Mattos (1975) e CETESB (1980), e é dada pela eq. 3.8, onde P_E indica a probabilidade de um evento ser igualado ou superado e m o seu número de ordem, dado a cada um dos dados da amostra após os mesmos serem colocados em ordem decrescente, sendo que o maior dado recebe $m = 1$, o segundo maior $m = 2$ e assim sucessivamente.

$$P_E(X \geq x) = \frac{m}{n + 1} \quad (3.8)$$

Nessa etapa, representada pelo Algoritmo 3.3, aplicou-se as fórmulas das duas probabilidades (empírica e teórica) e armazenou-se os resultados para cada uma delas. Esses resultados então foram plotados em um gráfico (precipitação máxima de um dia (mm) x probabilidade), a fim de se poder visualizar ambas as probabilidades.

Algoritmo 3.3: Algoritmo para Cálculo das Distribuições.**Entrada:** tamanho do vetor de precipitações e vetor de precipitações

- 1 Ordene o vetor de precipitações em ordem decrescente;
- 2 Calcule a probabilidade empírica (Kimbal);
- 3 Calcule a média das precipitações;
- 4 Calcule o desvio padrão das precipitações;
- 5 Calcule a probabilidade teórica (Gumbel);

Saída: média, desvio-padrão, probabilidade teórica e empírica

3.5 Teste de Aderência das Distribuições Probabilísticas

Após o cálculo das probabilidades, realizou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) para testar a distribuição probabilística teórica. De acordo com [Naghettini e Pinto \(2007\)](#), a estatística do teste KS é dada pela maior diferença entre as probabilidades empírica e teórica (eq. 3.9, onde N é o número de dados distribuídos).

$$D_N = \sup_{-\infty < x < +\infty} |P_E(X \geq x) - P_T(X \geq x)| \quad (3.9)$$

Em seguida esse valor foi comparado com os valores máximos aceitáveis (valores críticos) de acordo com a Tabela 3.1 considerado-se um nível de significância de 1% ($\alpha = 0,01$). Desse modo, caso o valor de $D_N \leq D_{N,0,01}$, onde N é o número de dados utilizados na distribuição, considera-se que a estatística se ajusta de forma adequada aos valores de precipitação máxima anual.

Tabela 3.1 – Valores críticos da estatística D_N do teste de aderência de KS, considerando-se um nível de significância de 1%.

N	D_N	N	D_N	N	D_N	N	D_N
10	0,369	18	0,279	26	0,233	34	0,205
11	0,352	19	0,271	27	0,229	35	0,202
12	0,338	20	0,265	28	0,225	36	0,199
13	0,325	21	0,259	29	0,221	37	0,196
14	0,314	22	0,253	30	0,218	38	0,194
15	0,304	23	0,247	31	0,214	39	0,191
16	0,295	24	0,242	32	0,211	40	0,189
17	0,286	25	0,238	33	0,208	> 40	$1,22/\sqrt{N}$

Fonte: [Naghettini e Pinto \(2007\)](#).

Nessa etapa, representada pelo Algoritmo 3.4, realizou-se o cálculo do módulo das diferenças para cada par de probabilidades, teórica e empírica, comparando-os imediatamente após o cálculo, obtendo-se assim o valor de D_N . Esse valor então foi comparado com

o valor máximo aceitável apresentado através do uso de um vetor com os dados de comparação da Tabela 3.1.

Algoritmo 3.4: Algoritmo para Teste de Aderência.

Entrada: tamanho do vetor de precipitações e probabilidade teórica e empírica

- 1 Calcule o módulo da diferença entre a probabilidade teórica e empírica (TKSPG);
- 2 Determine o valor crítico da estatística de acordo com a dimensão do vetor de precipitações (VCTKS);
- 3 **se** $VCTKS \geq TKSPG$ **então**
- 4 | Continue o processo de cálculo da curva IDF;

Saída: saída lógica para continuar ou encerrar o cálculo da curva IFD

3.6 Extrapolação Probabilística das Máximas

Caso o teste de aderência seja aceito, nesse caso o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), faz-se a extrapolação dos dados probabilísticos para diferentes períodos de retorno (Tr) utilizando-se a distribuição testada, nesse caso a distribuição de Gumbel, para se determinar a precipitação máxima de 1 dia.

Sabendo que a probabilidade é igual ao inverso do período de retorno ($P_T(X \geq x) = 1/Tr$) e isolando x na eq. 3.5, a fórmula para o cálculo da precipitação máxima de 1 dia em função do período de retorno pode ser calculada através da eq. 3.10. Neste trabalho, realizou-se a extrapolação de dados para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100, 250, 500 e 1000 anos.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Tr} &= 1 - e^{-e^{-\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma)}} \\ 1 - \frac{1}{Tr} &= e^{-e^{-\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma)}} \\ \frac{Tr - 1}{Tr} &= e^{-e^{-\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma)}} \\ \frac{Tr}{Tr - 1} &= e^{e^{-\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma)}} \\ \ln \left[\ln \frac{Tr}{Tr - 1} \right] &= -\frac{1,2826}{\sigma} * (x - \bar{x} + 0,451 * \sigma) \\ x &= \bar{x} - 0,451 * \sigma - \frac{\sigma}{1,2826} * \ln \left[\ln \frac{Tr}{Tr - 1} \right] \\ x &= \bar{x} - \sigma * \left\{ 0,451 + 0,7797 * \ln \left[\ln \frac{Tr}{Tr - 1} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Nessa etapa, representada pelo Algoritmo 3.5, aplicou-se a eq. 3.10 através do uso de vetores para se melhorar o procedimento de cálculo e tendo em vista que a média (\bar{x}) e o desvio-padrão (σ) no passo anterior.

Algoritmo 3.5: Algoritmo para Extrapolação Probabilística.

Entrada: períodos de retorno, média e desvio-padrão das precipitações máximas

- 1 **para cada período de retorno faça**
- 2 | Calcule a precipitação máxima de um dia;

Saída: precipitação máxima de um dia para cada período de retorno

3.7 Desagregação das Chuvas

Após a determinação das precipitações máximas de 1 dia, foi realizado o método de desagregação de chuvas proposto pela CETESB (1980) aplicando-se os coeficiente de desagregação para cada período de retorno. Assim, a precipitação de 24 horas foi obtida através da multiplicação da precipitação de 1 dia pelo coeficiente 1,14, a precipitação de 12 horas através da multiplicação da precipitação de 24 horas pelo coeficiente de 0,85 e assim sucessivamente.

Após ser realizada a desagregação, foi feito a comparação dos valores obtidos com os valores mínimos de precipitação, onde para cada tempo de concentração há um valor mínimo de precipitação correspondente. Caso os valores obtidos forem inferiores aos mínimos tabelados, esses devem ser desconsiderados e os valores mínimos devem ser adotados. Os valores dos coeficientes de desagregação para cada período de retorno e os valores mínimos de precipitação para comparação estão indicados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficientes de desagregação e valores mínimos de precipitação adotados para diferentes durações de chuva.

Tempo		Coeficiente de desagregação	Valores mínimos(mm)
Desejado	Referência		
5 mim	30 mim	0,34	8
10 mim	30 mim	0,54	10
15 mim	30 mim	0,70	15
20 mim	30 mim	0,81	15
30 mim	1 h	0,74	20
1 h	24 h	0,42	25
2 h	24 h	0,48	30
3 h	24 h	0,54	33
6 h	24 h	0,72	40
8 h	24 h	0,78	40
12 h	24 h	0,85	47
24 h	1 dia	1,14	55

Fonte: Adaptado de CETESB (1980) e Aragão *et al.* (2013).

Então, calculou-se os valores de intensidade de precipitação fazendo a divisão entre o valor desagregado e a sua respectiva duração (horas) para cada período de retorno. Dessa maneira obteve-se os valores de intensidade máxima de chuva para cada duração e período de retorno, que são os pontos utilizados na otimização para determinar os parâmetros da curva IDF. Todo esse processo está representado no Algoritmo 3.6.

Algoritmo 3.6: Algoritmo para Extrapolação dos Dados.

Entrada: precipitação máxima de um dia para cada período de retorno, tempos de concentração e períodos de retorno

1 **para cada período de retorno faça**

2 Calcule as chuvas de 24 horas e as chuvas de 12 horas a 1 hora;

3 Calcule as chuvas de 30 minutos e as chuvas de 20 minutos a 5 minutos;

4 **para cada tempo de concentração faça**

5 **para cada período de retorno faça**

6 Calcule a intensidade de chuva;

Saída: matriz de intensidade de chuva (mm/h)

3.8 Otimização

O problema abordado neste trabalho, tem como objetivo determinar os parâmetros da curva IDF que melhor descrevem a variação dos dados observados. Desse modo, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para modelar o problema, tendo em vista que o objetivo dele é encontrar a função de regressão que minimize a soma das distâncias entre a função ajustada e os pontos observados. Assim, a função objetivo da regressão pode ser expressa pela eq. 3.11, onde y_e é o valor estimado da variável dependente (intensidade máxima de precipitação), y_r é o valor observado da variável dependente e n é o número total de pontos observados.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{j=1}^n (y_e - y_r)^2 \quad (3.11)$$

Contudo, o valor estimado da variável dependente é expresso pela equação da intensidade máxima de precipitação ($y_e = i_{max}$), ou seja, a curva IDF. De acordo com [Villela e Mattos \(1975\)](#), a eq. 3.12 é a expressão empírica mais usual utilizada em hidrologia para determinar a relação entre a altura precipitada e sua duração, onde i_{max} é a intensidade máxima de precipitação (mm/h), T_r é o período de retorno (anos), t_c é o tempo de concentração (min) e a, b, c, K são os parâmetros regionais a se determinar.

$$i_{max} = \frac{K * T_r^a}{(t_c + b)^c} \quad (3.12)$$

Desse modo, substituindo a eq. 3.12 na eq. 3.11, o modelo a ser otimizado é dado pela eq. 3.13.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{j=1}^n \left(\frac{K * T_r^a}{(t_c + b)^c} - y_r \right)^2 \quad (3.13)$$

Esse modelo foi então implementado e rodado 100 vezes, assim como feito em [Vargas et al. \(2016\)](#) e [Souza, Oliveira e Silva Junior \(2017\)](#), para cada um dos algoritmos apresentados no Capítulo 2, a fim de testar a capacidade dos mesmos, tendo em vista que a solução encontrada não foi testada matematicamente, o que não garante que a solução encontrada seja uma ótima global. Destaca-se que, antes de rodar os algoritmos, os parâmetros utilizados em cada um, como o número de gerações e de indivíduos na população, foram ajustados através de tentativa, até que a variação do valor da função objetivo fosse da ordem de 10^{-8} .

Para esse trabalho o critério de parada dos algoritmos foi definido como sendo o número máximo de gerações e seus limites, inferior e superior, como sendo 500, 0, 0 e 0 (limite inferior) e 1750, 0,5, 20 e 1 (limite superior), para os parâmetros K, a, b e c, respectivamente, com base em curvas IDF determinadas por [Campos et al. \(2017\)](#) e [Oliveira et al. \(2011\)](#).

Os demais parâmetros utilizados em cada um dos algoritmos foram: para o AG, população (N_{ind}) igual a 300, número de gerações (N_{ger}) igual a 250, probabilidade de cruzamento (P_c) igual a 0,9 e probabilidade de mutação (P_m) igual a 0,1; para o ACO, tamanho da população (N_{ind}) igual a 100, número de gerações (N_{ger}) igual a 1250 e a taxa de evaporação do feromônio (T_f) igual a 0,1; para o PSO, tamanho da população (N_{ind}) igual a 125, número de gerações (N_{ger}) 500, velocidade inicial e final de cada partícula iguais a 2,5 e 0,5 (respectivamente) e da melhor partícula iguais 0,5 e 2,5 (respectivamente) e fator de inércia inicial e final (F_i) iguais a 0,9 e 0,4 (respectivamente); para o FPA, tamanho da população (N_{ind}) igual a 10, número de gerações (N_{ger}) igual a 1000 e probabilidade de ocorrer polinização global ou não (P_t) igual a 0,8; e para o ED, tamanho da população (N_{ind}) igual a 50, número de gerações (N_{ger}) igual a 250, taxa de perturbação (F) igual a 0,5 e probabilidade de cruzamento (P_c) igual a 0,8.

Os valores de tempo de processamento de cada algoritmo, do número de avaliações e do desvio-padrão da função objetivo e das variáveis foram obtidos através do próprio código, aplicando-se uma função de tempo e a fórmula do desvio-padrão dentro do próprio algoritmo. Nessa etapa as rotinas de cada heurística foram chamadas, retornando os valores dos parâmetros.

3.9 Avaliação do Ajuste do Modelo

Por fim, foram calculados o coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de confiança (Ic), para determinar se o ajuste

encontrado representava adequadamente os dados. O coeficiente de determinação ajustado é calculado a partir do coeficiente de determinação, dado pela eq. 3.14, onde y_e é o valor estimado da variável dependente (intensidade máxima de precipitação), y_r é o valor observado da variável dependente e \bar{y} é o valor observado médio da variável dependente.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (y_r - y_e)^2}{\sum_{j=1}^N (y_r - \bar{y})^2} \quad (3.14)$$

O coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) é dado pelo eq. 3.15, onde n é o número total de pontos observados, p é o número de variáveis independentes (t_c e T_r , ou seja, $p = 2$) e R^2 é o coeficiente de determinação.

$$R_{aj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-(p+1)} \right) * (1 - R^2) \quad (3.15)$$

Sendo que R_{aj}^2 varia de 0 à 1, isso significa que quanto mais próximo de 1 for o seu valor, mais próximos os valores observados e os valores estimados estão e a equação empírica utilizada representa de maneira adequada o modelo.

O índice de concordância de Willmott (d) pode ser obtido a partir da eq. 3.16, onde y_e é o valor estimado da variável dependente (intensidade máxima de precipitação), y_r é o valor observado da variável dependente e \bar{y} é o valor observado médio da variável dependente.

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (y_e - y_r)^2}{\sum_{j=1}^N (|y_e - \bar{y}| + |y_r - \bar{y}|)^2} \quad (3.16)$$

Já o coeficiente de de confiança (Ic), pode ser obtido através do produto entre o índice de concordância de Willmott (d) e o coeficiente de correlação (r), ou seja, $Ic = d * r$. O coeficiente de correlação é um índice adimensional, dado pela eq. 3.17, onde x e y são os valores observados e estimados, respectivamente, e \bar{x} e \bar{y} são a média dos valores observados e estimados, respectivamente.

$$r = \frac{\sum_{j=1}^N (x - \bar{x}) * (y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x - \bar{x})^2 * \sum_{j=1}^N (y - \bar{y})^2}} \quad (3.17)$$

O valor do Ic obtido é então classificado de acordo com o critério de interpretação do desempenho dado pela Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Critério de interpretação do desempenho pelo I_c .

Valor de " I_c "	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Fonte: [Camargo e Sentelhas \(1997\)](#).

Nesse etapa, representado pelo Algoritmo 3.7, foram realizados

Algoritmo 3.7: Pseudocódigo para Cálculo dos Coeficientes de Ajuste.

Entrada: valores dos parâmetros K , a , b e c retornados por cada algoritmo heurístico

- 1 Calcule o coeficiente de determinação (R^2);
- 2 Calcule o coeficiente de determinação (R_a^2);
- 3 Calcule o índice de concordância de Willmott (d);
- 4 Calcule o coeficiente de correlação (r);
- 5 Calcule o coeficiente de confiança (IC);

Saída: avaliação do ajuste

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados para cada uma das estações pluviométricas utilizadas no trabalho, porém devido a extensão de alguns dados e a quantidade de estações analisadas, a estação de Catalão será tomada como exemplo em algumas partes dos resultados, sendo as demais apresentadas em apêndice.

4.1 Ano Hidrológico e Precipitações Máximas

A Tabela 4.1 mostra as informações de cada uma das estações pluviométricas utilizadas nesse trabalho. Nela estão contidas o código da estação, sua latitude, longitude, altitude, o início de sua operação. Além disso, ela também mostra o início do ano hidrológico determinado a partir da distinção entre um período de chuva (outubro à março) e um período de estiagem (abril à setembro) através do gráfico da média mensal dos somatórios de chuvas diárias disponíveis no banco de dados do INMET para cada mês (Figura 4.1).

Tabela 4.1 – Informações das estações pluviométricas e início do ano hidrológico.

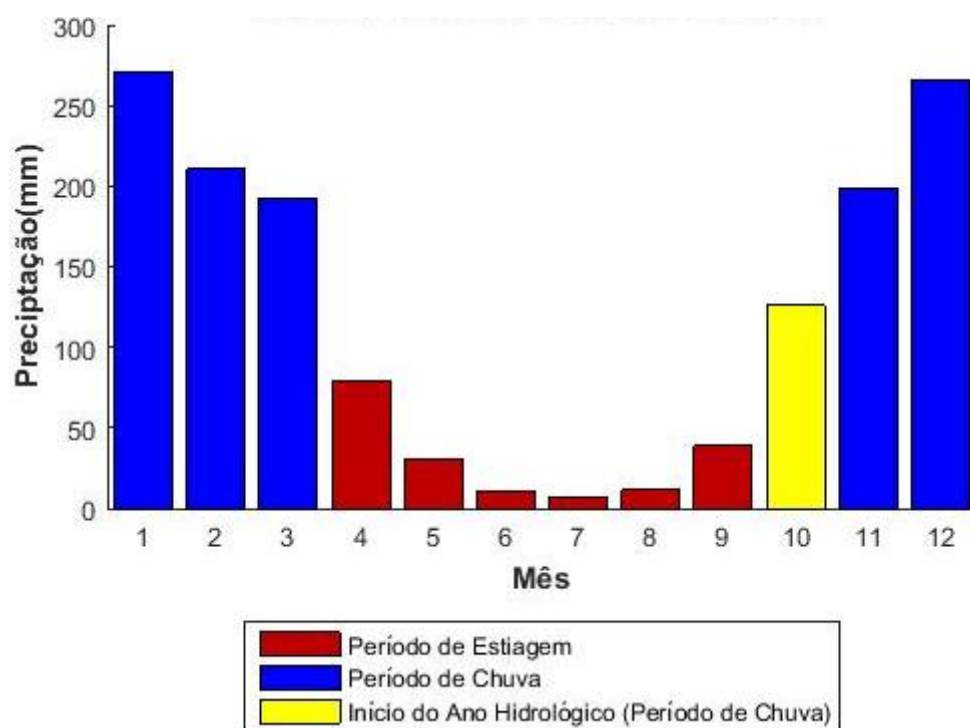
Estação	Código	Latitude(°)	Longitude(°)	Altitude(m)	Início da Operação	Início Ano Hidrológico
Aragarças - GO	83368	-15,90	-52,23	345,00	19/07/1970	Outubro
Brasília - DF	83377	-15,78	-47,92	1159,54	12/09/1961	Outubro
Catalão - GO	83526	-18,18	-47,95	840,47	01/01/1913	Outubro
Formosa - GO	83379	-15,54	-47,33	935,19	01/01/1925	Outubro
Goiânia - GO	83423	-16,66	-49,25	741,48	11/07/1937	Outubro
Goiás - GO	83374	-15,91	-50,13	512,22	20/04/1946	Outubro
Ipameri - GO	83522	-17,71	-48,16	772,99	10/02/1977	Outubro
Itumbiara - GO	83523	-18,41	-49,21	449,00	10/06/1989	Outubro
Jataí - GO	83464	-17,91	-51,71	662,86	24/11/1978	Outubro
Pirenópolis - GO	83376	-15,85	-48,96	740,00	17/02/1977	Novembro
Posse - GO	83332	-14,10	-46,36	825,64	04/08/1975	Novembro
Rio Verde - GO	83470	-17,80	-50,91	774,62	01/01/1971	Outubro
Roncador - DF	83373	-15,93	-47,88	1100,57	28/05/1979	Outubro

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Nesse exemplo, para a cidade de Catalão, pode-se observar que o mês onde se inicia

o período de chuva é o mês de outubro, marcando assim o início do ano hidrológico, que irá terminar no fim do período de estiagem, no mês de setembro. Além disso, pode-se perceber que o mês de julho e o mês de janeiro são os meses de menor e de maior precipitação média mensal, respectivamente.

Figura 4.1 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Catalão - GO, no período de 1961 a 2010.



Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Os demais municípios analisados (Apêndice A) apresentam meses de maior e menor precipitação como sendo os meses de dezembro/janeiro e o mês de julho, respectivamente. Esses resultados corroboram com os valores apresentados nos mapas pluviométricos elaborados pela CPRM (2006), a qual apresenta os dados do mês de maior e de menor precipitação para todo o Brasil, intitulados "Mês Mais Chuvoso" e "Mês Mais Seco", para os anos de 1977 a 2006. Nesses mapas é possível perceber que, apesar de estarem situados em duas bacias hidrográficas diferentes, os municípios estudados apresentam praticamente o mesmo período de chuva e de estiagem, tendo em vista que os mesmos se encontram muito próximos geograficamente.

Na Tabela 4.2 estão apresentadas as precipitações máximas para a cidade de Catalão, para o período de 1961 à 2019 (58 anos hidrológicos), de acordo com cada ano hidrológico completo. Nota-se que durante esse período, 17 anos não possuem dados completos. Outro dado importante é que o ano hidrológico que possui maior lâmina de precipitação, entre os anos analisados, é o de 1969/1970, com 132,4 mm. Além disso, percebe-se uma variação entre os eventos máximos, com destaque dado aos anos 1963/1964, 1965/1966 e 2012/2013,

que possuem altura de precipitação máxima diária superior a 100 mm. Com relação ao menor valor máximo, destaca-se o ano 1974/1975, com 49,6 mm de precipitação máxima diária.

Tabela 4.2 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Catalão - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	04/03/1962	62,80	1981/1982	-	-	2001/2002	15/01/2002	55,70
1962/1963	16/02/1963	78,80	1982/1983	06/03/1983	92,40	2002/2003	27/12/2002	83,10
1963/1964	20/12/1963	116,90	1983/1984	26/12/1983	90,10	2003/2004	05/03/2004	93,80
1964/1965	01/10/1964	67,20	1984/1985	-	-	2004/2005	-	-
1965/1966	13/01/1966	106,90	1985/1986	-	-	2005/2006	17/04/2006	69,40
1966/1967	23/12/1966	77,00	1986/1987	-	-	2006/2007	05/01/2007	55,30
1967/1968	25/12/1967	86,30	1987/1988	-	-	2007/2008	21/02/2008	82,00
1968/1969	23/10/1968	88,30	1988/1989	-	-	2008/2009	14/02/2009	70,40
1969/1970	26/01/1970	132,40	1989/1990	15/02/1990	91,60	2009/2010	28/02/2010	70,30
1970/1971	-	-	1990/1991	14/01/1991	86,30	2010/2011	25/12/2010	86,00
1971/1972	30/11/1971	71,70	1991/1992	-	-	2011/2012	01/02/2012	73,70
1972/1973	-	-	1992/1993	-	-	2012/2013	02/03/2013	104,60
1973/1974	08/01/1974	82,60	1993/1994	-	-	2013/2014	02/12/2013	69,80
1974/1975	05/01/1975	49,60	1994/1995	08/02/1995	95,10	2014/2015	13/12/2014	63,70
1975/1976	-	-	1995/1996	21/02/1996	52,00	2015/2016	29/02/2016	60,80
1976/1977	09/04/1977	74,00	1996/1997	17/02/1997	71,50	2016/2017	09/02/2017	63,90
1977/1978	13/01/1978	83,40	1997/1998	30/05/1998	61,40	2017/2018	01/11/2017	75,10
1978/1979	-	-	1998/1999	14/11/1998	63,00	2018/2019	31/12/2018	77,30
1979/1980	-	-	1999/2000	13/11/1999	77,50			
1980/1981	-	-	2000/2001	-	-			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Para os demais municípios foi elaborada a Tabela 4.3 contendo o número de anos hidrológicos, que compreende a diferença entre o ano de 2019 e o maior valor entre o período de início de operação da estação ou o ano de 1961, data de início do banco dados do INMET (Total de Anos); o número de anos hidrológicos incompletos (Anos Incompletos); o ano hidrológico e o valor da menor e da maior precipitação máxima diária (Ano Hidrológico e Precipitação Máxima) e a quantidade de anos com precipitação igual ou superior à 100 mm (Quant. Anos Precip. \geq 100 mm).

Tabela 4.3 – Resumo das principais informações relacionadas às precipitações máximas dos municípios estudados.

Município	Total de Anos	Anos Incompletos	Menor		Maior		Quant. Anos Precip. \geq 100 mm
			Ano Hidrológico	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Precipitação Máxima	
Aragarças - GO	49	23	1998/1999	56,80	1973/1974	179,20	8
Brasília - DF	58	23	1998/1999	53,10	1963/1964	132,80	4
Catalão - GO	58	17	1974/1975	49,60	1969/1970	132,40	4
Formosa - GO	58	26	1974/1975	50,00	2008/2009	110,30	3
Goiânia - GO	58	19	1998/1999	50,80	2005/2006	136,60	5
Goiás - GO	58	27	1973/1974	59,00	1969/1970	138,20	8
Ipameri - GO	42	14	1984/1985	58,40	1997/1998	119,10	8
Itumbiara - GO	30	24	1998/1999	52,60	2008/2009	83,60	0
Jataí - GO	41	14	1992/1993	46,20	2004/2005	151,40	8
Pirenópolis - GO	42	12	1998/1999	45,50	1989/1990	167,30	5
Posse - GO	44	15	2014/2015	46,60	2012/2013	132,40	3
Rio Verde - GO	48	28	2016/2017	50,50	1999/2000	137,20	4
Roncador - DF	40	30	1998/1999	39,30	2000/2001	163,30	1

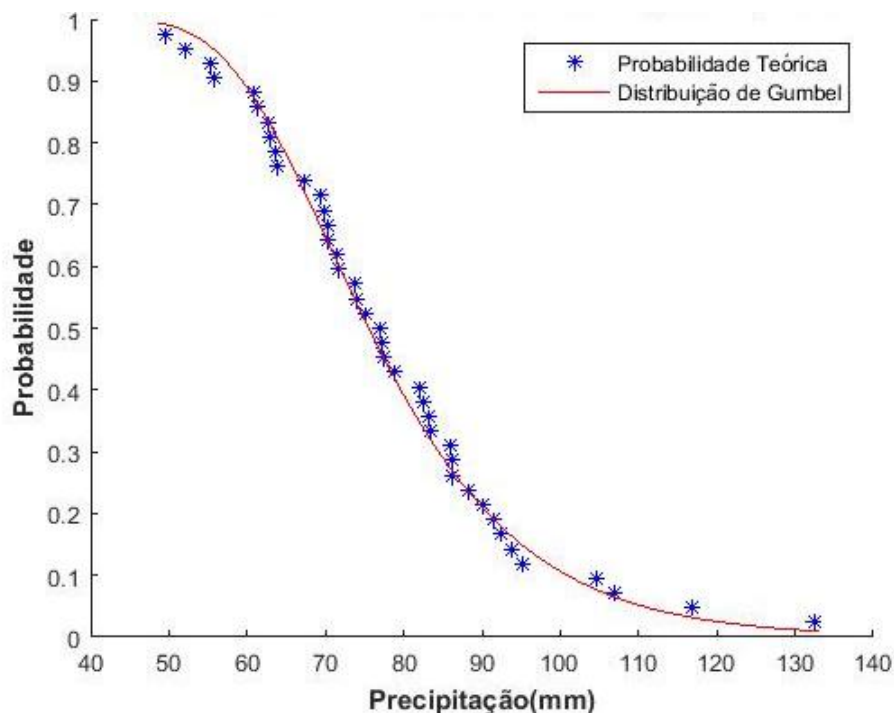
Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Fazendo uma análise à cerca dos dados contidos na Tabela 4.3 pode-se inferir que as precipitações máximas diárias estão contidas entre 39,3 mm e 179,2 mm, chuvas essas precipitadas no município de Roncador no ano hidrológico de 1998/1999 e no município de Aragarças no ano hidrológico de 1973/1974, respectivamente. Devido à falta de vários dados (que chegam à cerca de 80%), fica difícil determinar se ocorre um padrão de chuvas entre os municípios de acordo com a sua localização geográfica.

4.2 Distribuições Probabilísticas e Teste de Aderência

A Figura 4.2 mostra o comportamento da série de precipitações máximas em relação a sua probabilidade de ocorrência obtidas através do método empírico de Kimbal e da curva de distribuição teórica de Gumbel, para o município de Catalão. É possível observar que há um bom ajuste entre a distribuição de valores observados e os estimados pela distribuição teórica (mostrada pela proximidade entre os pontos e à curva). As demais distribuições para os outros municípios estudados encontram-se no Apêndice C.

Figura 4.2 – Distribuição da probabilidade empíricas e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Catalão - GO.



Fonte: O autor.

Os resultados da média aritmética e o desvio padrão das precipitações máximas para cada uma das estações (utilizadas na elaboração dos gráficos de distribuição probabilística) e o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS), para um nível de significância de 1%, de todas as estações analisadas são apresentadas na Tabela 4.4. Nela também são apresentadas

as quantidade de dados disponíveis para uso na distribuição de cada uma das estações e se a probabilidade foi aceita ou não pelo teste de aderência KS.

Para Catalão, o valor obtido no teste de KS foi de 0,0562, o que para uma amostra de tamanho igual a 41, de acordo com a Tabela 3.1, considerando um nível de significância de 0,01 é considerada aceitável, confirmando o exposto na Figura 4.2. Assim, a distribuição de Gumbel pode ser utilizada para representar o comportamento dos valores de precipitação máxima analisados, podendo ser utilizada para realizar a extrapolação probabilística dos dados.

Fazendo uma análise de todos os municípios, pode-se perceber que Catalão é o que possui o maior número de dados disponíveis para uso e o melhor ajuste em relação à probabilidade de Gumbel. No entanto, nota-se que não há uma relação entre esses dois fatores, o que indica na necessidade de uso de outras distribuições para um melhor ajuste dos dados, mesmo que estes tenham sido aceitos pelo teste de aderência. Outro detalhe importante é quantidade de dados para a cidade de Itumbiara - GO, que em sua análise resultou numa grande perda de dados e impossibilitou o uso da metodologia adotada neste trabalho, tendo em vista que o mínimo de dados necessários é de 10 anos, como mencionado no Capítulo 3.

Tabela 4.4 – Resumo do teste de Kolmogorov-Smirnov aplicado à estação de Catalão - GO.

Estação	Quantidade de Dados	Média	Desvio Padrão	Gumbel	
				KS	
Aragarças - GO	26	93,3154	27,2696	0,0719	Aceito
Brasília - DF	35	81,0486	17,6686	0,0889	Aceito
Catalão - GO	41	78,3829	17,2614	0,0562	Aceito
Formosa - GO	32	73,9688	17,1171	0,1459	Aceito
Goiânia - GO	39	81,3256	20,5845	0,0784	Aceito
Goiás - GO	31	90,7516	21,2994	0,1175	Aceito
Ipameri - GO	28	86,3036	19,297	0,1646	Aceito
Itumbiara - GO	6	75,1167	11,6548	-	-
Jataí - GO	27	91,4889	29,4656	0,1079	Aceito
Pirenópolis - GO	30	84,63	24,2241	0,0686	Aceito
Posse - GO	29	76,069	20,78	0,0826	Aceito
Rio Verde - GO	20	85,235	24,3261	0,122	Aceito
Roncador - DF	10	82,8	32,6837	0,122	Aceito

Fonte: O autor.

4.3 Extrapolação dos Dados

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores de extrapolação dos dados aplicados para cada uma das estações pluviométricas referentes a duração de 1 dia, de acordo com a distribuição aderente, ou seja, a distribuição de Gumbel. Nela pode-se notar que ocorre um aumento da quantidade de chuva precipitada de acordo com o aumento do período de retorno (T_r),

tendo em vista que quanto maior o período, menor é a probabilidade de ocorrência dessa chuva, o que aumenta significativamente seu valor.

Tabela 4.5 – Altura máxima de chuva de acordo com Gumbel para a estação de Catalão - GO.

Estação	T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
Aragarças - GO	88,81	112,91	128,86	137,87	144,17	149,02	163,98	178,83	198,37	213,13	227,88
Brasília - DF	78,13	93,74	104,08	109,91	114,00	117,14	126,83	136,45	149,12	158,68	168,24
Catalão - GO	75,53	90,79	100,89	106,58	110,57	113,65	123,11	132,51	144,88	154,23	163,56
Formosa - GO	71,14	86,27	96,28	101,93	105,89	108,94	118,33	127,64	139,91	149,18	158,43
Goiânia - GO	77,92	96,12	108,16	114,96	119,71	123,38	134,67	145,87	160,63	171,77	182,90
Goiás - GO	87,23	106,06	118,52	125,55	130,47	134,26	145,95	157,54	172,81	184,34	195,86
Ipameri - GO	83,12	100,17	111,46	117,83	122,29	125,73	136,31	146,81	160,65	171,09	181,53
Jataí - GO	86,62	112,66	129,90	139,63	146,44	151,68	167,84	183,89	205,01	220,95	236,89
Pirenópolis- GO	80,63	102,04	116,21	124,21	129,80	134,12	147,40	160,59	177,95	191,06	204,17
Posse - GO	72,64	91,00	103,16	110,02	114,82	118,52	129,92	141,23	156,12	167,37	178,61
Rio Verde - GO	81,22	102,71	116,95	124,98	130,60	134,93	148,27	161,52	178,95	192,12	205,27
Roncador - DF	77,40	106,28	125,41	136,20	143,75	149,57	167,49	185,29	208,71	226,40	244,08

Fonte: O autor.

Além disso, se olharmos atentamente a precipitação máxima diária entre os períodos de retorno de 2 a 100 anos para o município de Catalão, veremos que esta varia de 75,53 à 163,56 mm, o que corrobora com os dados apresentados por [Oliveira et al. \(2008\)](#), que mostram uma variação entre 83,3 a 158,4 mm, para cidade de Catalão. Neste mesmo trabalho, [Oliveira et al. \(2008\)](#), também fizeram a extrapolação de dados diários para diversas outras cidades localizadas dentro do estado de Goiás, encontrando uma variação entre 75,2 e 224,2 mm, semelhante à variação encontrada, cujo valor está entre 71,14 e 244,08 mm.

Outro fato importante que pode ser analisado em relação à Tabela 4.5 é o funcionamento à cerca da distribuição probabilística de Gumbel. Se olharmos atentamente para os valores iniciais e finais dos municípios de Aragarças e Goiás pode-se perceber que os valores para o T_r de 2 anos são iguais a 88,81 mm e 87,23 mm e os valores para o T_r de 1000 anos são iguais a 227,88 mm e 195,89 mm, respectivamente. Desse modo, percebe-se que, apesar de próximas no início, ocorreu um aumento significativo ao final da distribuição das chuvas máximas para um dia.

Esse fato pode ser explicado através da análise da Tabela 3.1, onde pode-se perceber que existe uma proximidade entre as médias de ambos os municípios, mas uma diferença significativa no desvio-padrão. Além disso, se comparados a outros locais como Pirenópolis e Rio Verde iremos perceber que os valores para um T_r de 2 e 1000 anos são muito próximos devido a proximidade da média e do desvio-padrão.

4.4 Desagregação de Chuvas

A Tabela 4.6 mostra os dados de desagregação de chuva após sua extrapolação para a cidade de Catalão. Esses dados então são comparados com os valores mínimos, Tabela 3.2, resultando nas lâminas de água correspondentes a cada período de retorno (T_r) e duração (t_c). Por fim, através da divisão de cada lâmina pela sua respectiva duração, obteve-se as intensidades médias de precipitação máxima (Tabela 4.7). Os resultados da desagregação dos dados para os demais municípios não constam nesse trabalho, sendo apresentadas somente as tabelas de intensidade de chuva no Apêndice D.

Tabela 4.6 – Desagregação de chuvas para o município de Catalão - GO.

Duração	h_{max} (mm) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	9,10	10,94	12,15	12,84	13,32	13,69	14,83	15,96	17,45	18,58	19,70
10 min	14,45	17,37	19,30	20,39	21,16	21,74	23,56	25,35	27,72	29,51	31,29
15 min	18,73	22,52	25,02	26,43	27,42	28,19	30,53	32,86	35,93	38,25	40,57
20 min	21,68	26,05	28,95	30,59	31,73	32,62	35,33	38,03	41,58	44,26	46,94
30 min	26,76	32,17	35,74	37,76	39,18	40,27	43,62	46,95	51,33	54,64	57,95
60 min	36,16	43,47	48,30	51,03	52,94	54,41	58,95	63,45	69,37	73,84	78,31
2 h	41,33	49,68	55,20	58,32	60,51	62,19	67,37	72,51	79,28	84,39	89,50
3 h	46,50	55,89	62,10	65,61	68,07	69,96	75,79	81,57	89,19	94,94	100,69
6 h	62,00	74,52	82,81	87,48	90,76	93,28	101,05	108,76	118,92	126,59	134,25
8 h	67,16	80,73	89,71	94,77	98,32	101,05	109,47	117,83	128,83	137,14	145,44
12 h	73,19	87,97	97,76	103,28	107,15	110,12	119,30	128,40	140,39	149,44	158,49
24 h	86,11	103,50	115,01	121,51	126,05	129,56	140,35	151,06	165,17	175,82	186,46

Fonte: O autor.

Tabela 4.7 – Intensidade de chuvas para o município de Catalão - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	109,19	131,24	145,84	154,08	159,84	164,29	177,97	191,56	209,44	222,95	236,44
10 min	86,71	104,22	115,81	122,35	126,93	130,46	141,33	152,12	166,32	177,05	187,76
15 min	74,93	90,07	100,09	105,74	109,70	112,75	122,14	131,46	143,73	153,00	162,26
20 min	65,03	78,16	86,86	91,77	95,20	97,85	106,00	114,09	124,74	132,78	140,82
30 min	53,52	64,33	71,49	75,53	78,35	80,53	87,24	93,90	102,67	109,29	115,90
60 min	36,16	43,47	48,30	51,03	52,94	54,41	58,95	63,45	69,37	73,84	78,31
2 h	20,67	24,84	27,60	29,16	30,25	31,09	33,68	36,25	39,64	42,20	44,75
3 h	15,50	18,63	20,70	21,87	22,69	23,32	25,26	27,19	29,73	31,65	33,56
6 h	10,33	12,42	13,80	14,58	15,13	15,55	16,84	18,13	19,82	21,10	22,38
8 h	8,40	10,09	11,21	11,85	12,29	12,63	13,68	14,73	16,10	17,14	18,18
12 h	6,10	7,33	8,15	8,61	8,93	9,18	9,94	10,70	11,70	12,45	13,21
24 h	3,59	4,31	4,79	5,06	5,25	5,40	5,85	6,29	6,88	7,33	7,77

Fonte: O autor.

Essa metodologia é bastante difundida e utilizada em diversos trabalhos, tais como Cardoso, Ullmann e Bertol (1998), Oliveira *et al.* (2008), Oliveira *et al.* (2011), Aragão *et al.* (2013), Damé *et al.* (2016), Pereira, Duarte e Sarmiento (2017), Campos *et al.* (2017) e Silva

et al. (2018). No entanto, somente dois desses autores (*Aragão et al.* (2013) e *Pereira, Duarte e Sarmiento* (2017)) compararam os dados desagregados com os valores mínimos apresentados na Tabela 3.2.

Além disso, esses trabalhos não mencionam nada a respeito do fato de que os coeficientes de desagregação e os valores mínimos não coexistem para todas as durações, o que faz com que algumas das chuvas desagregadas não possam ser comparadas, gerando um conflito na metodologia apresentada, o que poderia ser resolvido evitando-se o uso de algumas durações (solução adotada nesse trabalho), tendo em vista que ainda existem diversos pontos para a determinação dos parâmetros da curva IDF.

4.5 Otimização e Avaliação do Ajuste

Na Tabela 4.8 são apresentados a média do tempo de processamento de cada um dos algoritmos após as 100 execuções, a quantidade de avaliações da função objetivo para 1 execução e a média dos tempos médios em relação a cada algoritmo. Nela, pode-se observar que o FPA possui o processamento mais rápido, provavelmente devido ao seu pequeno número de avaliações da função objetivo, seguido da ED. Além disso, o ACO é o que foi mais demorado, o que está claramente ligado ao número de avaliações da função objetivo.

Tabela 4.8 – Tempo de processamento médio após as 100 execuções, número de avaliações da função objetivo (FO) para uma execução e média dos tempos médios para cada algoritmo.

Estação	Tempo de processamento (s)				
	AG	ACO	PSO	FPA	ED
Aragarças - GO	16,5141	35,1933	13,0788	1,9700	2,7638
Brasília - DF	16,8003	34,5755	13,4268	1,9653	2,6805
Catalão - GO	16,8097	34,0012	13,3899	1,9513	2,6806
Formosa - GO	17,0301	34,3819	13,4993	1,9546	2,6627
Goiânia - GO	17,2315	34,3203	13,5205	1,9672	2,6956
Goiás - GO	17,1647	34,5054	13,5835	1,9720	2,7201
Ipameri - GO	17,1459	34,4824	13,6539	1,9649	2,6961
Jataí - GO	17,0504	34,3664	13,4609	1,9477	2,6858
Pirenópolis- GO	17,0998	34,4586	13,5507	1,9831	2,6856
Posse - GO	17,0267	34,3743	13,7125	1,9896	2,7149
Rio Verde - GO	16,9899	34,3654	13,4566	1,9751	2,7243
Roncador - DF	17,0567	34,4561	13,6301	1,9788	2,6879
Tempo Médio (s)	16,9933	34,4567	13,4969	1,9683	2,6998
nº Avaliações	75300	125100	62625	10010	12550

Fonte: O autor.

No entanto, fazendo uma análise à cerca do menor e do maior desvio padrão da função objetivo (FO), bem como de todas as variáveis percebe-se, através da Tabela 4.9, que o ACO retorna os menores desvios. No entanto, se levado em conta o tempo de processamento

apresentados anteriormente, ele se apresenta como sendo o pior. Nesse sentido, o FPA e o ED apresentam-se como os mais eficientes, possuindo um tempo de processamento extremamente rápido, inferior a 3 segundos, e desvio-padrão baixo, da ordem de $E - 8$ à $E - 10$.

Tabela 4.9 – Desvio-padrão máximo e mínimo para a função objetivo (FO) e os parâmetros k , a , b e c após as 100 execuções para cada algoritmo.

Algoritmo	Desvio Padrão	FO	K	a	b	c
AG	Maior	1,05E-10	9,89E-05	2,02E-09	1,00E-06	2,28E-08
	Menor	5,15E-11	6,94E-05	1,49E-09	5,90E-07	1,42E-08
ACO	Maior	3,55E-11	3,84E-05	2,92E-10	3,75E-07	9,38E-09
	Menor	7,48E-12	2,12E-05	1,78E-10	2,28E-07	5,32E-09
PSO	Maior	2,26E-08	8,51E-04	8,67E-09	9,04E-06	1,99E-07
	Menor	1,02E-09	2,62E-04	1,25E-09	2,24E-06	5,51E-08
FPA	Maior	2,73E-08	6,60E-04	1,11E-08	5,32E-06	1,81E-07
	Menor	1,87E-10	4,22E-05	1,92E-09	4,91E-07	1,15E-08
ED	Maior	8,04E-09	3,20E-04	7,52E-09	4,27E-06	7,77E-08
	Menor	5,17E-10	1,31E-04	3,52E-09	1,33E-06	2,79E-08

Fonte: O autor.

Além disso, destaca-se que, exceto o ACO e o FPA, todos os demais algoritmos foram utilizados em trabalhos relacionados à área de águas, tais como: a operação ótima de um sistema urbano de distribuição de água (RIGHETTO, 2002) e o ajuste de modelo hidrológico distribuído para a previsão sazonal de vazão em bacias hidrográficas (COLLISCHONN; TUCCI, 2005), utilizando o AG; a otimização de tanques hidropneumáticos para a proteção da tubulação de adutoras devido à variação de pressão (SIERRA, 2019), utilizando o PSO; e a determinação dos parâmetros da curva IDF (GOMES; VARGAS JUNIOR, 2018), utilizando a ED.

Ressalta-se que, este último trabalho mencionado, relacionado a determinação dos parâmetros da curva IDF utilizando a ED não foi encontrado no mapeamento sistemático realizado neste trabalho. Desse modo, somente três dos cinco algoritmos utilizados estão vinculados à curva IDF, tendo em vista que os estudos de Karahan, Ceylan e Ayvaz (2007) e Karahan (2012), apresentados no mapeamento sistemático, utilizaram o AG e o PSO na determinação da curva, respectivamente.

Por fim, a Tabela 4.10 traz os valores dos parâmetros K , a , b e c para as estações pluviométricas, utilizando-se cada um dos métodos de otimização abordados, juntamente com os coeficientes de avaliação do ajuste e a classificação de desempenho do mesmo de acordo com o Coeficiente de Confiança (Ic). Nela, pode-se notar que, para cada cidade, todos os valores são iguais, devido a proximidade dos parâmetros encontrados, exceto o valor de K , o qual mostra variações à partir da terceira casa decimal. Esses valores iguais corroboram com o fato de que esses algoritmos tenham encontrado uma solução ótima global para o problema, mesmo que esta não tenha sido provada matematicamente.

Tabela 4.10 – Resultado dos parâmetros K , a , b , c e dos coeficientes de ajuste empregados.

Estação	Otimização	K	a	b	c	R^2_{aj}	d	IC	Desempenho
Aragarças - GO	AG	1067,5019	0,1320	10,5140	0,7520	0,9965	0,9968	0,9951	Ótimo
	ACO	1067,5021	0,1320	10,5140	0,7520	0,9965	0,9968	0,9951	Ótimo
	PSO	1067,5019	0,1320	10,5140	0,7520	0,9965	0,9968	0,9951	Ótimo
	FPA	1067,5020	0,1320	10,5140	0,7520	0,9965	0,9968	0,9951	Ótimo
	ED	1067,5019	0,1320	10,5140	0,7520	0,9965	0,9968	0,9951	Ótimo
Brasília - DF	AG	904,6836	0,1111	10,5140	0,7520	0,9978	0,9980	0,9969	Ótimo
	ACO	904,6838	0,1111	10,5140	0,7520	0,9978	0,9980	0,9969	Ótimo
	PSO	904,6838	0,1111	10,5140	0,7520	0,9978	0,9980	0,9969	Ótimo
	FPA	904,6836	0,1111	10,5140	0,7520	0,9978	0,9980	0,9969	Ótimo
	ED	904,6841	0,1111	10,5140	0,7520	0,9978	0,9980	0,9969	Ótimo
Catalão - GO	AG	875,4686	0,1118	10,5140	0,7520	0,9978	0,9979	0,9968	Ótimo
	ACO	875,4686	0,1118	10,5140	0,7520	0,9978	0,9979	0,9968	Ótimo
	PSO	875,4700	0,1118	10,5140	0,7520	0,9978	0,9979	0,9968	Ótimo
	FPA	875,4685	0,1118	10,5140	0,7520	0,9978	0,9979	0,9968	Ótimo
	ED	875,4683	0,1118	10,5140	0,7520	0,9978	0,9979	0,9968	Ótimo
Formosa - GO	AG	828,8429	0,1153	10,5140	0,7520	0,9976	0,9978	0,9966	Ótimo
	ACO	828,8429	0,1153	10,5140	0,7520	0,9976	0,9978	0,9966	Ótimo
	PSO	828,8428	0,1153	10,5140	0,7520	0,9976	0,9978	0,9966	Ótimo
	FPA	828,8428	0,1153	10,5140	0,7520	0,9976	0,9978	0,9966	Ótimo
	ED	828,8427	0,1153	10,5140	0,7520	0,9976	0,9978	0,9966	Ótimo
Goiânia - GO	AG	917,5216	0,1216	10,5140	0,7520	0,9972	0,9974	0,9961	Ótimo
	ACO	917,5217	0,1216	10,5140	0,7520	0,9972	0,9974	0,9961	Ótimo
	PSO	917,5216	0,1216	10,5140	0,7520	0,9972	0,9974	0,9961	Ótimo
	FPA	917,5216	0,1216	10,5140	0,7520	0,9972	0,9974	0,9961	Ótimo
	ED	917,5216	0,1216	10,5140	0,7520	0,9972	0,9974	0,9961	Ótimo
Goiás - GO	AG	1017,9067	0,1162	10,5140	0,7520	0,9975	0,9977	0,9965	Ótimo
	ACO	1017,9068	0,1162	10,5140	0,7520	0,9975	0,9977	0,9965	Ótimo
	PSO	1017,9067	0,1162	10,5140	0,7520	0,9975	0,9977	0,9965	Ótimo
	FPA	1017,9068	0,1162	10,5140	0,7520	0,9975	0,9977	0,9965	Ótimo
	ED	1017,9067	0,1162	10,5140	0,7520	0,9975	0,9977	0,9965	Ótimo
Ipameri - GO	AG	964,8550	0,1128	10,5140	0,7520	0,9977	0,9979	0,9968	Ótimo
	ACO	964,8551	0,1128	10,5140	0,7520	0,9977	0,9979	0,9968	Ótimo
	PSO	964,8550	0,1128	10,5140	0,7520	0,9977	0,9979	0,9968	Ótimo
	FPA	964,8550	0,1128	10,5140	0,7520	0,9977	0,9979	0,9968	Ótimo
	ED	964,8550	0,1128	10,5140	0,7520	0,9977	0,9979	0,9968	Ótimo
Jataí - GO	AG	1058,9101	0,1391	10,5140	0,7520	0,9959	0,9963	0,9943	Ótimo
	ACO	1058,9104	0,1391	10,5140	0,7520	0,9959	0,9963	0,9943	Ótimo
	PSO	1058,9103	0,1391	10,5140	0,7520	0,9959	0,9963	0,9943	Ótimo
	FPA	1058,9103	0,1391	10,5140	0,7520	0,9959	0,9963	0,9943	Ótimo
	ED	1058,9105	0,1391	10,5140	0,7520	0,9959	0,9963	0,9943	Ótimo
Pirenópolis - GO	AG	965,9753	0,1305	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	ACO	965,9755	0,1305	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	PSO	965,9754	0,1305	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	FPA	965,9754	0,1305	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	ED	965,9752	0,1305	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
Posse - GO	AG	864,1468	0,1271	10,5140	0,7520	0,9969	0,9971	0,9956	Ótimo
	ACO	864,1470	0,1271	10,5140	0,7520	0,9969	0,9971	0,9956	Ótimo
	PSO	864,1470	0,1271	10,5140	0,7520	0,9969	0,9971	0,9956	Ótimo
	FPA	864,1470	0,1271	10,5140	0,7520	0,9969	0,9971	0,9956	Ótimo
	ED	864,1471	0,1271	10,5140	0,7520	0,9969	0,9971	0,9956	Ótimo
Rio Verde - GO	AG	972,5798	0,1303	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	ACO	972,5800	0,1303	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	PSO	972,5800	0,1303	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	FPA	972,5794	0,1303	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
	ED	972,5805	0,1303	10,5140	0,7520	0,9966	0,9969	0,9952	Ótimo
Roncador - DF	AG	988,8455	0,1540	10,5140	0,7520	0,9945	0,9950	0,9923	Ótimo
	ACO	988,8457	0,1540	10,5140	0,7520	0,9945	0,9950	0,9923	Ótimo
	PSO	988,8455	0,1540	10,5140	0,7520	0,9945	0,9950	0,9923	Ótimo
	FPA	988,8455	0,1540	10,5140	0,7520	0,9945	0,9950	0,9923	Ótimo
	ED	988,8453	0,1540	10,5140	0,7520	0,9945	0,9950	0,9923	Ótimo

Fonte: O autor.

Em relação aos testes de aderência, os resultados são excelentes. O R_{aj}^2 não apresentou valores inferiores à 0,9945, o que indica que a equação utilizada representa de maneira adequada a relação entre as variáveis do modelo, explicando o comportamento do mesmo. Em relação ao índice de concordância de Willmott pode-se inferir que os dados estimados se ajustam de maneira adequada aos dados observados, tendo em vista que esse coeficiente não apresentou valores inferiores à 0,9950. Por fim, o Ic não ficou abaixo de 0,9923 para nenhum dos ajustes feitos, isso indica que há uma grande concordância entre os dados, recebendo classificação de desempenho ótimo.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base na revisão bibliográfica, pode-se dizer que foi possível descrever uma metodologia de cálculo para a determinação dos parâmetros da curva IDF e implementá-la de maneira eficaz. Os resultados obtidos durante todo o processo de tratamento dos dados até os valores dos parâmetros foram coerentes com os resultados obtidos na literatura.

Além disso, os valores dos coeficientes de avaliação do ajuste demonstram que os valores obtidos descrevem de maneira eficaz o problema proposto, tanto do ponto de vista do comportamento em relação à curva formada pelos dados, quanto em relação à diferença entre os dados reais e estimados.

Em relação aos algoritmos utilizados, pode-se concluir que a heurística é uma ótima ferramenta na análise de problemas matemáticos como este, pois possibilita a resolução com rapidez, apresentando baixo desvio-padrão e não necessitando de derivadas de primeira ou de segunda ordem para sua análise, evitando assim problemas de condicionamento. Outro fator importante, é que apesar de não possuir uma prova matemática à cerca da resposta, pode-se dizer que ela é muito satisfatória, tendo em vista que as 5 heurísticas adotadas no problema deram resultados extremamente próximos.

Por fim, vale destacar que a metodologia de desagregação de chuvas abordada neste trabalho, apesar de trabalhosa devido à grande quantidade de dados a serem analisados, torna-se um processo muito rápido através do uso do algoritmo, facilitando o desenvolvimento e a atualização dos parâmetros das curvas IDF. Desse modo, pode-se concluir que a ferramenta de cálculo elaborada nesse trabalho cumpre bem a sua função, servindo não só como uma ferramenta de cálculo prático, mas também como material de estudo.

No entanto, apesar de eficaz, ressalva-se que a falta de dados hidrológicos em muitos anos compromete diversas análises que poderiam ser feitas, bem como os próprios valores das curvas estimadas, tendo em vista que o estudo de chuvas se baseia nas ocorrências do

passado para realizar seus estudos.

Para trabalhos futuros, aconselha-se:

- Implementar a interpolação de dados de lugares próximos para preencher as lacunas dos dados;
- Acrescentar outras distribuições probabilísticas teóricas apontadas pelo mapeamento;
- Acrescentar outros testes de aderência apontados pelo mapeamento;
- Otimização do algoritmo para diminuição do tempo de processamento;
- Utilizar outros critérios de parada para a análise em relação aos algoritmos utilizados;
- Fazer análises para mais estações pluviométricas;
- Elaborar mapas de regionalização dos parâmetros de chuva, através da interpolação dos dados, para melhor visualização e formação de um mapa contendo parâmetros para qualquer ponto geográfico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS (ANA). *Hidrologia Basica*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

ALHASSOUN, S. A. Developing an empirical formulae to estimate rainfall intensity in Riyadh region. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Elsevier, v. 23, n. 2, p. 81–88, 2011. Citado na página 30.

ARAGÃO, R. D. *et al.* Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, v. 17, n. 3, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 52, 56, 67 e 68.

ARAÚJO, R. L. d. *et al.* Evolução diferencial para problemas de otimização com restrições lineares. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2016. Citado na página 46.

BASTOS, E. A. *Otimização de seções retangulares de concreto armado submetidas à flexo-compressão oblíqua utilizando algoritmos genéticos*. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 40, 41 e 42.

CAMARGO, A.; SENTELHAS, P. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de são paulo, brasil. *Revista Brasileira de Agro-meteorologia*, v. 5, p. 89–97, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 60.

CAMPOS, A. R. *et al.* Estimate of intense rainfall equation parameters for rainfall stations of the paraíba state, brazil. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, SciELO Brasil, v. 47, n. 1, p. 15–21, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 67.

CARDOSO, C.; ULLMANN, M.; BERTOL, I. Análise de chuvas intensas a partir da desagregação das chuvas diárias de Lages e de Campos Novos (SC). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 22, n. 1, p. 131–140, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 67.

CASTILHO, V. C. de. *Otimização de componentes de concreto pré-moldado protendidos mediante algoritmos genéticos*. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Citado na página 41.

- CASTRO, R. E. de. *Otimização de estruturas com multi-objetivos via algoritmos genéticos*. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Citado na página 42.
- CECILIO, R.; PRUSKI, 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, p. 501–504, 2003. Citado na página 37.
- COELHO, L. d. S. Fundamentos, potencialidades e aplicações de algoritmos evolutivos. *Notas em Matemática Aplicada*, SBMAC, São Carlos, v. 2, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 46.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Previsão sazonal de vazão na bacia do rio uruguai 1: Ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 43–59, 2005. Citado na página 69.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. *Atlas Pluviométrico do Brasil*. 2006. Disponível em: <<http://ftp.tex.ac.uk/tex-archive/macros/latex/contrib/listings/listings.pdf>>. Acesso em: 07/09/2019. Citado na página 62.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Drenagem Urbana*: Manual de projeto. São Paulo, 1980. Citado 8 vezes nas páginas 15, 37, 38, 39, 40, 49, 53 e 56.
- COSTA, C.; STAUT, S.; ILHA, M. Projeto de sistemas prediais hidráulicos sanitários com BIM: mapeamento da literatura. In: . [S.l.: s.n.], 2014. p. 2760–2769. Citado na página 25.
- DAMÉ, R. d. C. F. *et al.* Relação intensidade-duração-frequência da precipitação pluvial diária desagregada no sul do rio grande do sul. *Engenharia Agrícola*, SciELO Brasil, v. 34, n. 4, 2016. Citado na página 67.
- DAR, A. Q.; MAQBOOL, H.; RAAZIA, S. An empirical formula to estimate rainfall intensity in Kupwara region of Kashmir valley, J and K, India. In: EDP SCIENCES. *MATEC Web of Conferences*. [S.l.], 2016. v. 57, p. 03010. Citado na página 30.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Positive feedback as a search strategy. *Tech rep., 91-016, Dip Elettronica, Politecnico di Milano, Italy*, p. 20, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- EBERHART, R.; KENNEDY, J. Particle swarm optimization. In: CITESEER. *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks*. [S.l.], 1995. v. 4, p. 1942–1948. Citado na página 43.
- FRANCO, C. S. *et al.* Distribuição de probabilidades para precipitação máxima diária na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 18, n. 7, p. 735–741, 2014. Citado na página 30.
- GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. *Hidrologia*. São Paulo: Blucher, 1988. Citado na página 34.
- GOMES, G. J. C.; VARGAS JUNIOR, E. d. A. A coupled system based on differential evolution for the determination of rainfall intensity equations. *RBRH*, SciELO Brasil, v. 23, 2018. Citado na página 69.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 2020. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 31/01/2020. Citado 17 vezes nas páginas 50, 61, 62, 63, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93 e 94.

KARAHAN, H. Determining rainfall-intensity-duration-frequency relationship using particle swarm optimization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 16, p. 667–675, 2012. Citado na página 69.

KARAHAN, H.; CEYLAN, H.; AYVAZ, M. T. Predicting rainfall intensity using a genetic algorithm approach. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.6245, p. 470–475, 2007. Citado na página 69.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Citeseer, 2007. Citado na página 25.

MALAGOLI, J. A. *et al.* Projeto de rotor de máquina de indução trifásica usando o algoritmo de evolução diferencial. In: . [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 41.

MAMOON, A. A.; RAHMAN, A. Selection of the best fit probability distribution in rainfall frequency analysis for Qatar. *Natural hazards*, Springer, v. 86, n. 1, p. 281–296, 2017. Citado na página 30.

MEDEIROS, J. A. C. C. *Enxame de partículas como ferramenta de otimização em problemas complexos de engenharia nuclear*. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear) — Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 41.

MORAIS, V. W. C.; ASSIS, L. P. de; ANDRADE, A. V. Comparação entre duas abordagens bio-inspiradas aplicadas ao problema de roteamento de veículos com coleta e entrega simultâneas andré luiz maravilha silva universidade federal dos vales do jequitinhonha e mucuri (ufvjm). 2010. Citado na página 41.

MÜLLER, V. *Otimização de layouts industriais através do método enxame de partículas*. 79 f. Dissertação (Mestrado em Controle e Otimização de Processos Industriais) — Programa de Pós-Graduação Sistemas e Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2007. Citado na página 41.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007. Citado 6 vezes nas páginas 33, 35, 36, 38, 39 e 54.

OLIVEIRA, F. de *et al.* Métodos de estimativa de precipitação máxima para o estado de goiás. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 12, n. 6, p. 620–625, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 67.

OLIVEIRA, L. C. de *et al.* Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de goiás e distrito federal. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 35, p. 13–18, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 37.

OLIVEIRA, L. F. C. de *et al.* Modelos de predição de chuvas intensas para o estado do mato grosso, brasil. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Universidade de Taubaté, v. 6, n. 3, p. 274–290, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 67.

PEREIRA, D. C.; DUARTE, L. R.; SARMENTO, A. P. Determinação da curva de intensidade, duração e frequência do município de Ipameri–Goiás. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 13, n. 2, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 23, 67 e 68.

PINTO, N. L. de S. *et al. Hidrologia Básica*. São Paulo: Blucher, 1976. Citado 5 vezes nas páginas 23, 33, 34, 35 e 36.

PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z.; MARCELLINI, S. S. PHD 307 - hidrologia aplicada. *Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária*, 2000. Disponível em: <http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=3857>. Acesso em: 13/02/2020. Citado na página 35.

RIGHETTO, A. M. Operação ótima de sistema urbano de distribuição de água. *Seminário-Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água. O Estado da Arte e Questões Avançadas, João Pessoa, Brasil, CD-Rom, 16p*, p. 2, 2002. Citado na página 69.

RODRIGUES, S. B. *A metaheurística colônia de formigas aplicada a um problema de roteamento de veículos: caso da Itaipu Binacioanal*. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) — Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 43.

SARAMAGO, S. F. P. Métodos de otimização randômica: algoritmos genéticos e simulated annealing. *Notas em Matemática Aplicada*, SBMAC, São Carlos, v. 6, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 44.

SERAPIÃO, A. B. d. S. Fundamentos de otimização por inteligência de enxames: uma visão geral. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática*, SciELO Brasil, v. 20, n. 3, p. 271–304, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.

SIERRA, D. A. *Otimização do dimensionamento de tanques hidropneumáticos para proteção contra transitórios hidráulicos*. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2019. Citado na página 69.

SILVA FILHO, F. G. S. da. *Otimização do posicionamento de múltiplas small cells em ambientes outdoor da região amazônica utilizando enxame de partículas e polinização de flores*. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 45.

SILVA, J. B. L. da *et al.* Nota técnica: Equações de intensidade, duração e frequência de chuvas máximas para o estado do rio grande do norte, brasil. *Revista Engenharia na Agricultura*, Revista Engenharia na Agricultura, v. 26, n. 2, p. 160–170, 2018. Citado na página 68.

SOUZA JUNIOR, D. A. de. *Otimização pelo método dos algoritmos genéticos e dimensionamento de estruturas tubulares metálicas espaciais com barras cruzadas para coberturas*. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005. Citado na página 41.

SOUZA, R. O. G.; OLIVEIRA, E. S.; SILVA JUNIOR, I. C. Algoritmo de polinização de flores aplicado ao problema do despacho econômico com múltiplos combustíveis e efeito do ponto de válvula. *Anais do XLIX SBPO*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 58.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, v. 11, p. 341–359, 1997. Citado na página 46.

TASSI, R.; COLLISCHONN, W. *Notas de aula de hidrologia*. [S.l.]: sn], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

TORRICO, J. J. T. *Práticas hidrológicas*. [S.l.]: Transcon, 1975. Citado na página 37.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 52.

VARGAS, D. *et al.* Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Elsevier, v. 32, n. 2, p. 91–99, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 58.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 38, 53 e 57.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical geography*, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Citado na página 47.

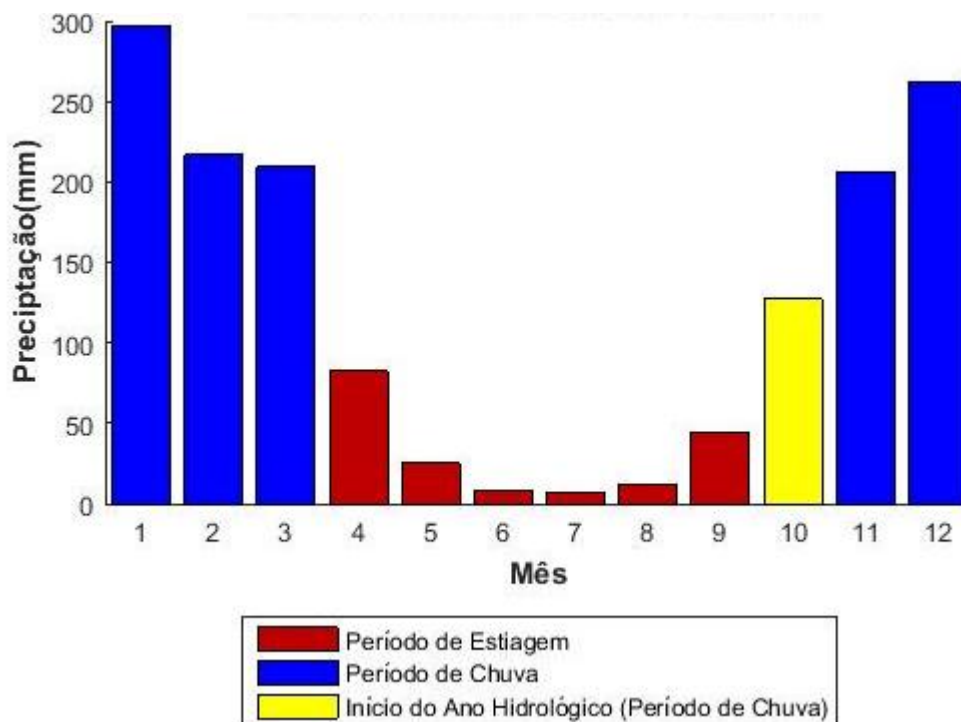
WOOLDRIDGE, J. M. *Introdução à econometria: uma abordagem moderna*. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2006. Citado na página 47.

YANG, X.-S. Flower pollination algorithm for global optimization. In: SPRINGER. *International conference on unconventional computing and natural computation*. [S.l.], 2012. p. 240–249. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

APÊNDICE A

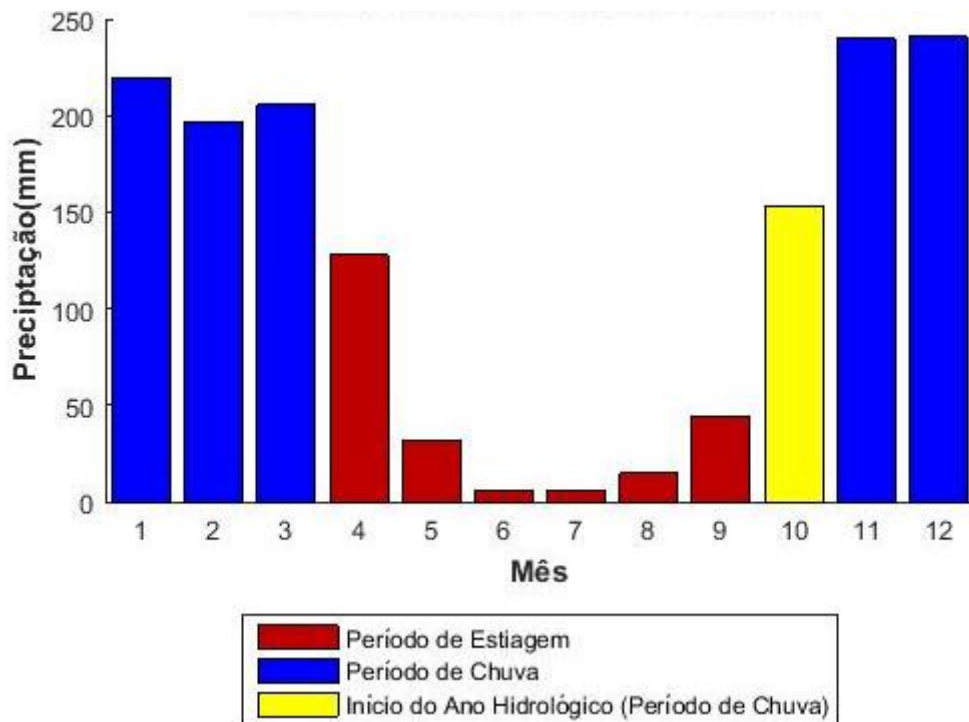
Precipitações Médias Mensais

Figura A.1 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Aragarças - GO, no período de 1970 a 2019.



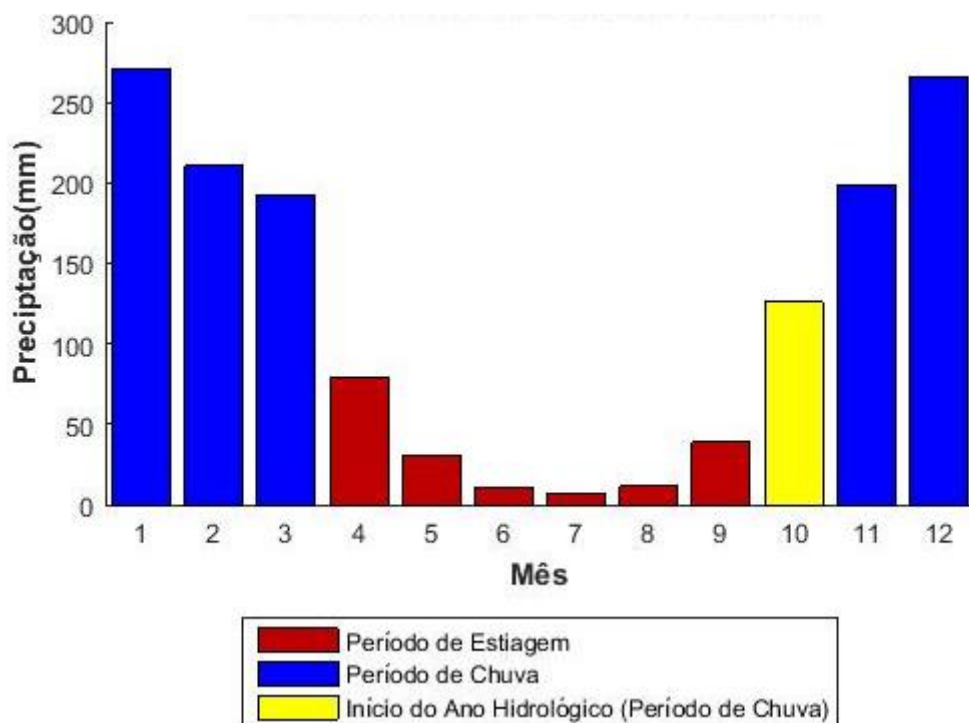
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.2 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Brasília - DF, no período de 1961 a 2019.



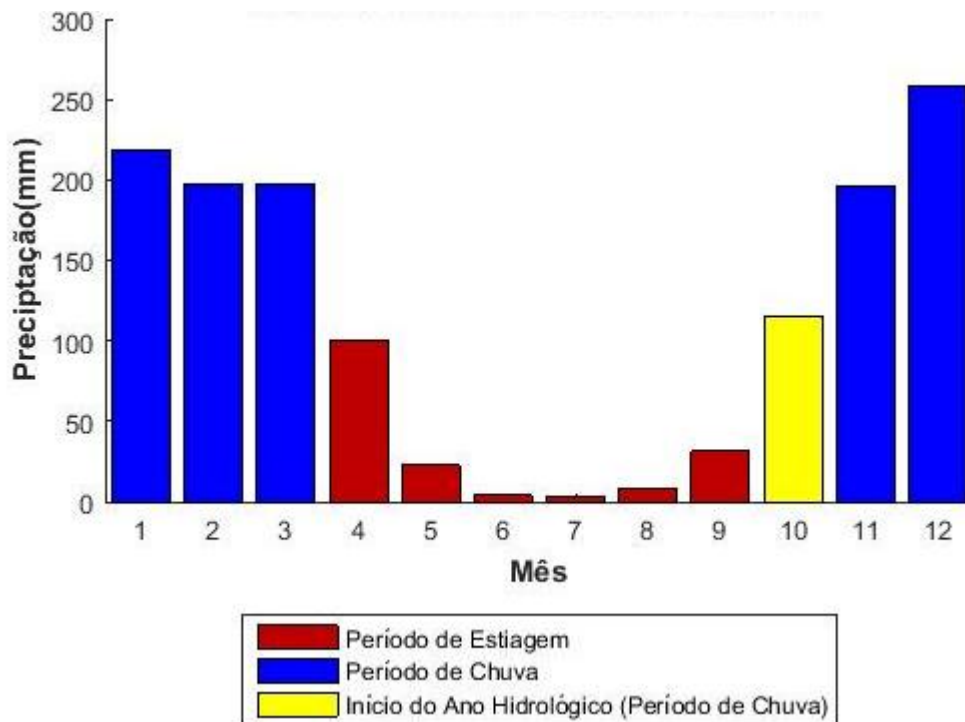
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.3 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Catalão - GO, no período de 1961 a 2019.



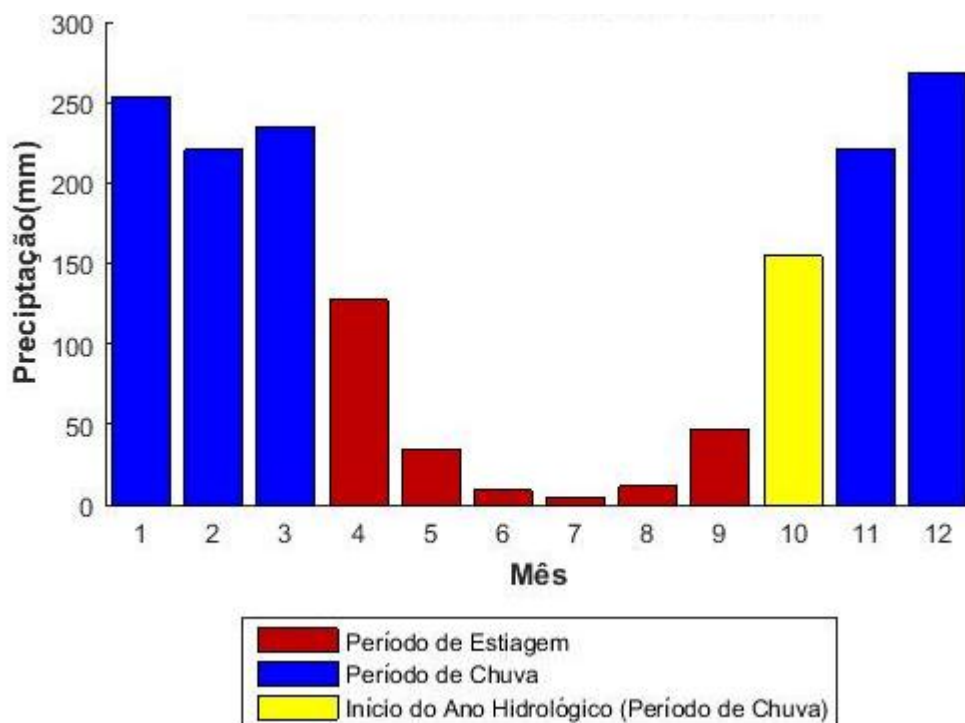
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.4 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Formosa - GO, no período de 1961 a 2019.



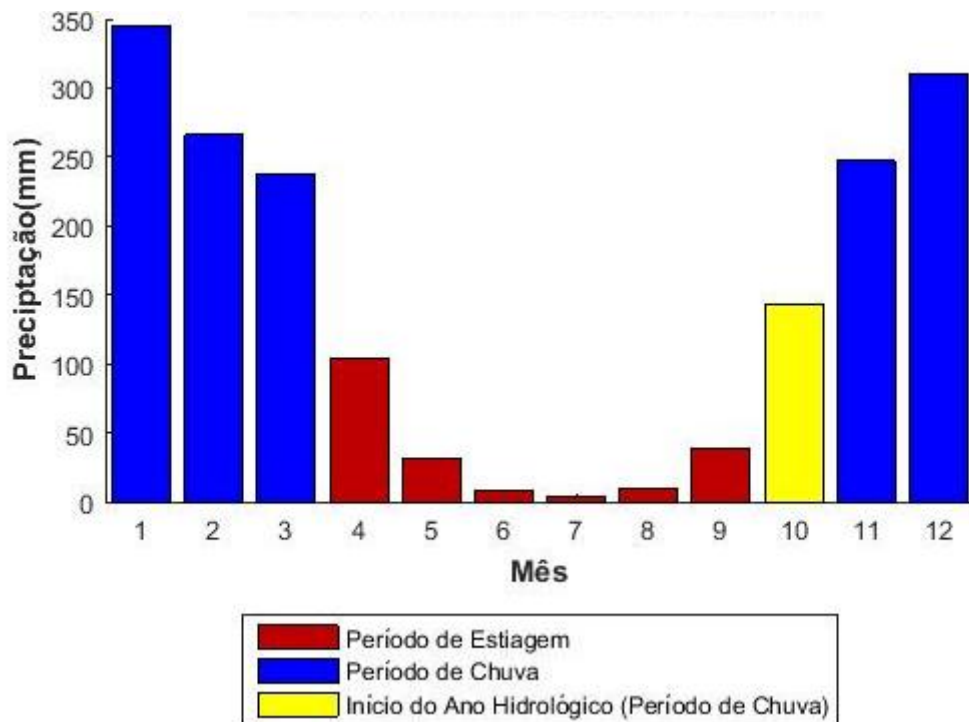
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.5 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Goiânia - GO, no período de 1961 a 2019.



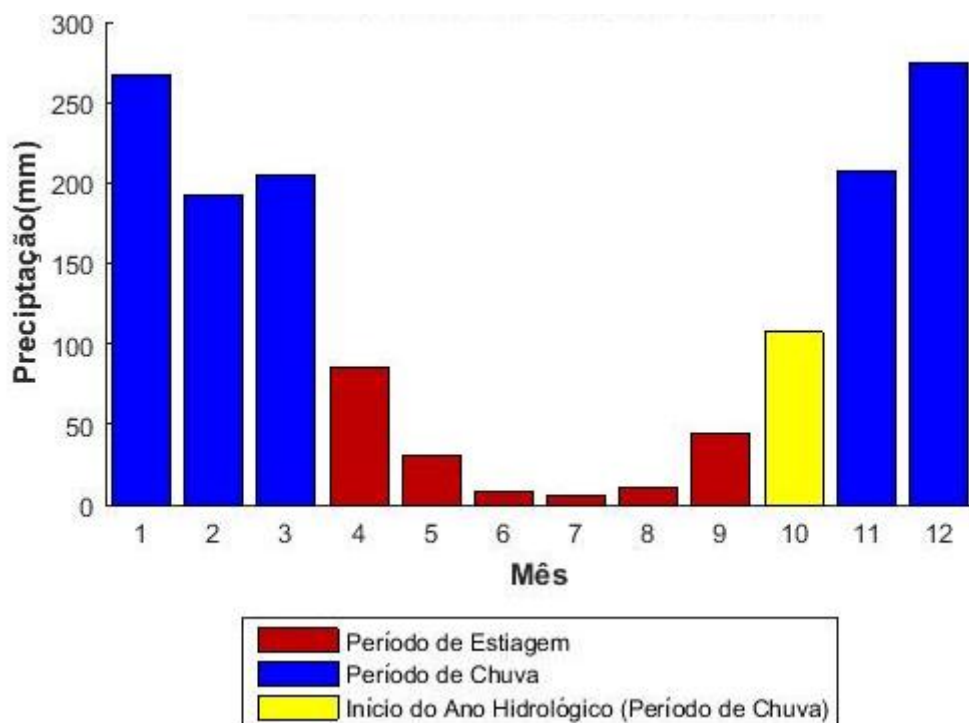
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.6 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Goiás - GO, no período de 1961 a 2019.



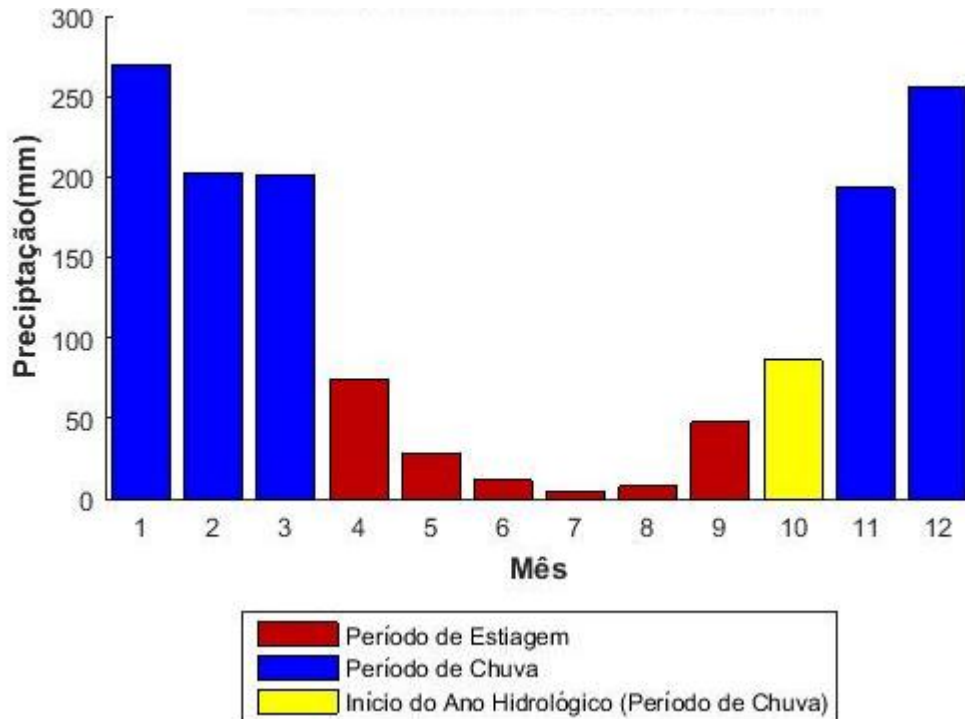
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.7 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Ipameri - GO, no período de 1977 a 2019.



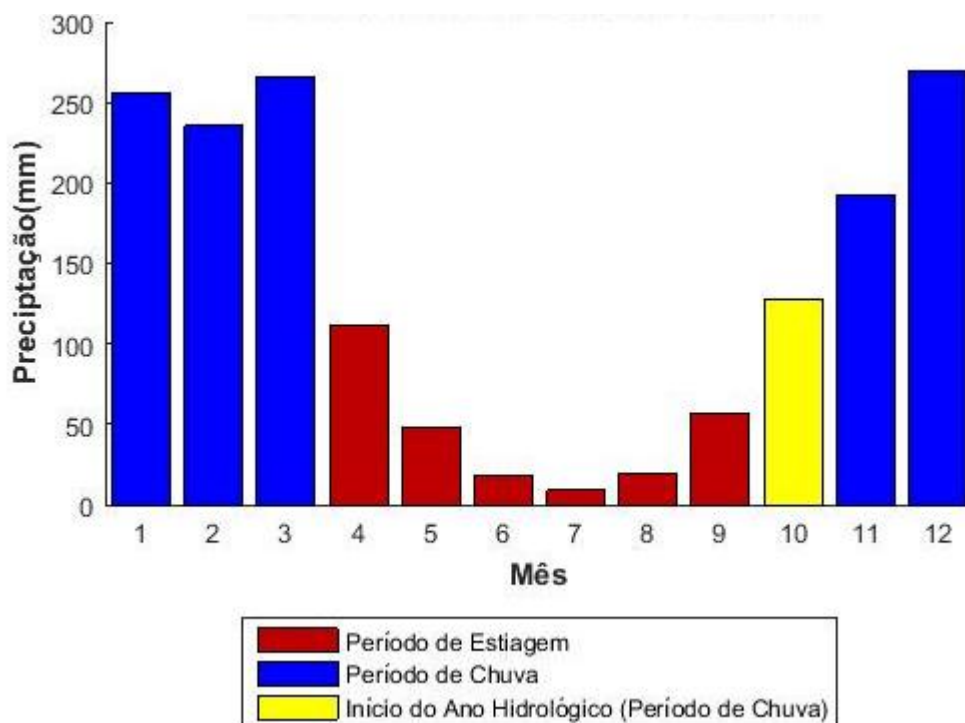
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.8 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Itumbiara - GO, no período de 1989 a 2019.



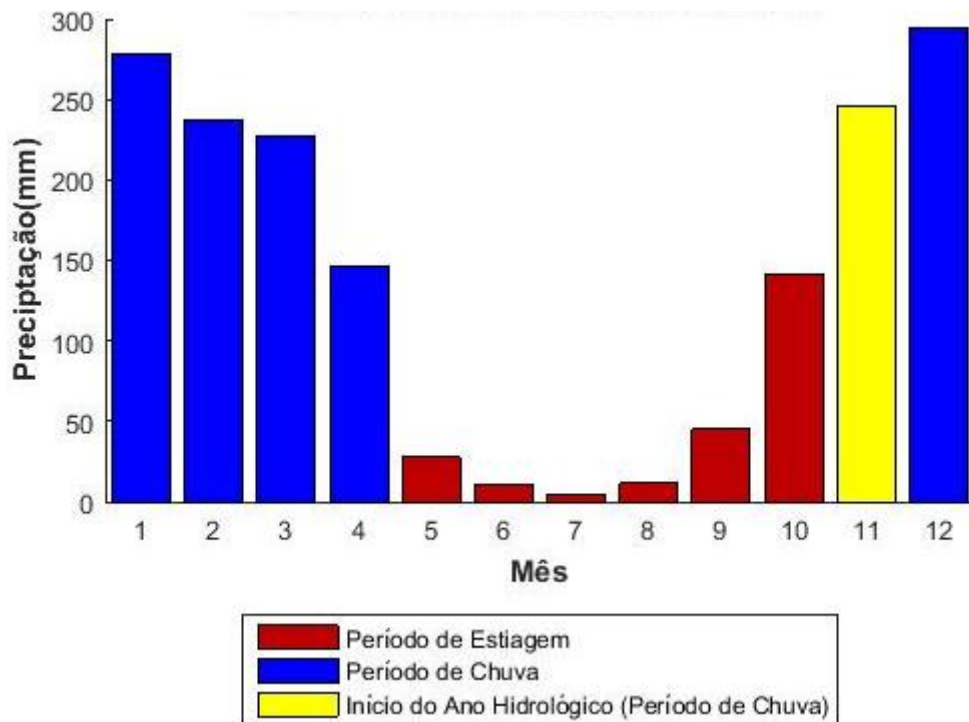
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.9 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Jataí - GO, no período de 1978 a 2019.



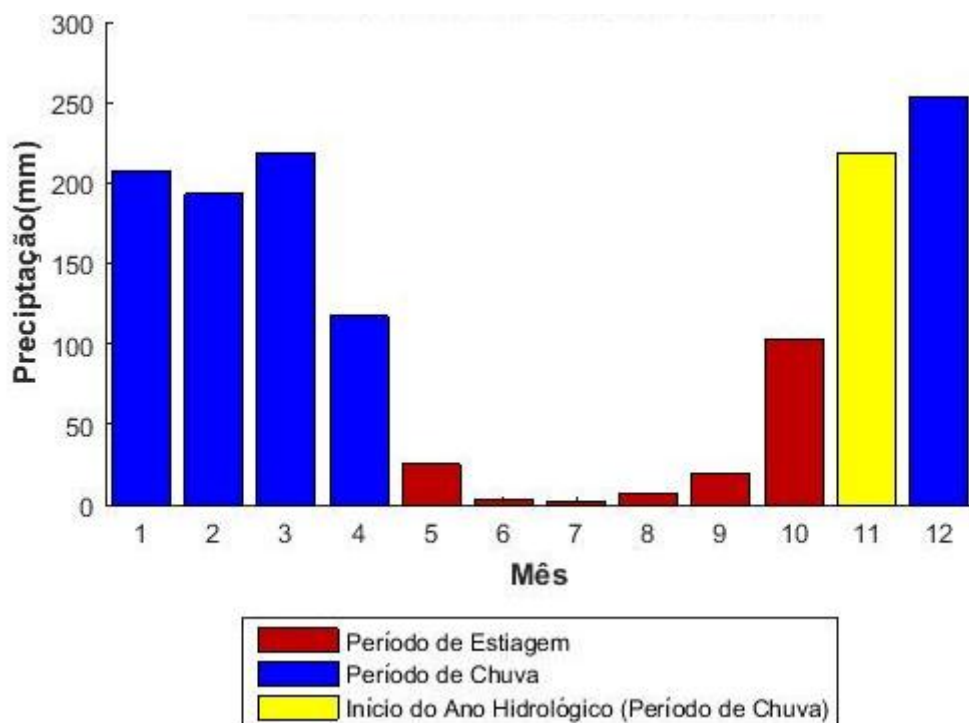
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.10 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Pirenópolis- GO, no período de 1977 a 2019.



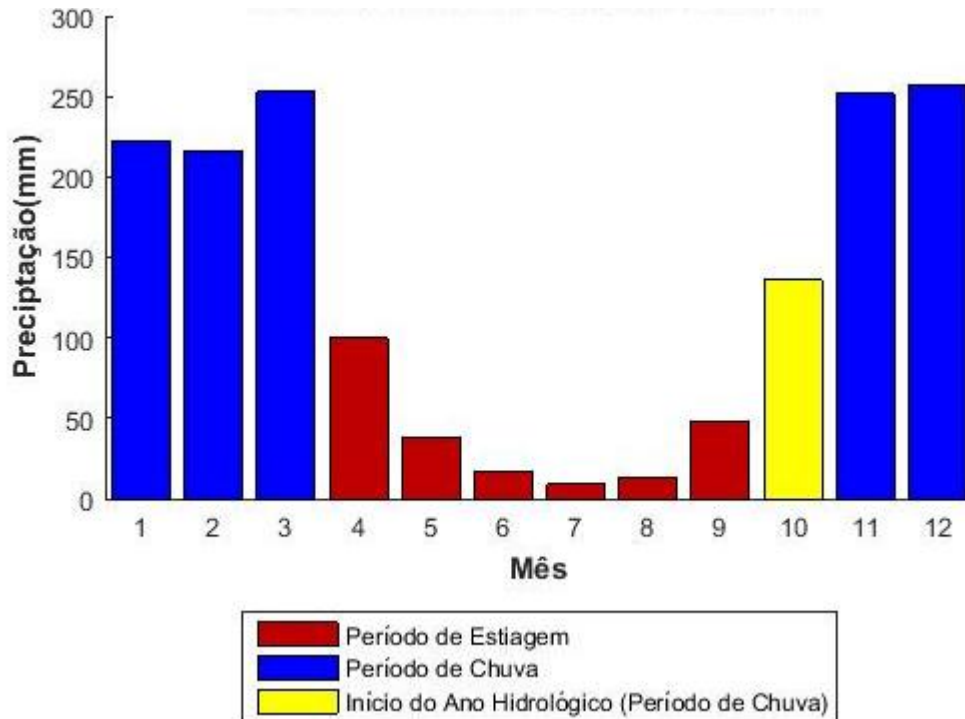
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.11 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Posse - GO, no período de 1975 a 2019.



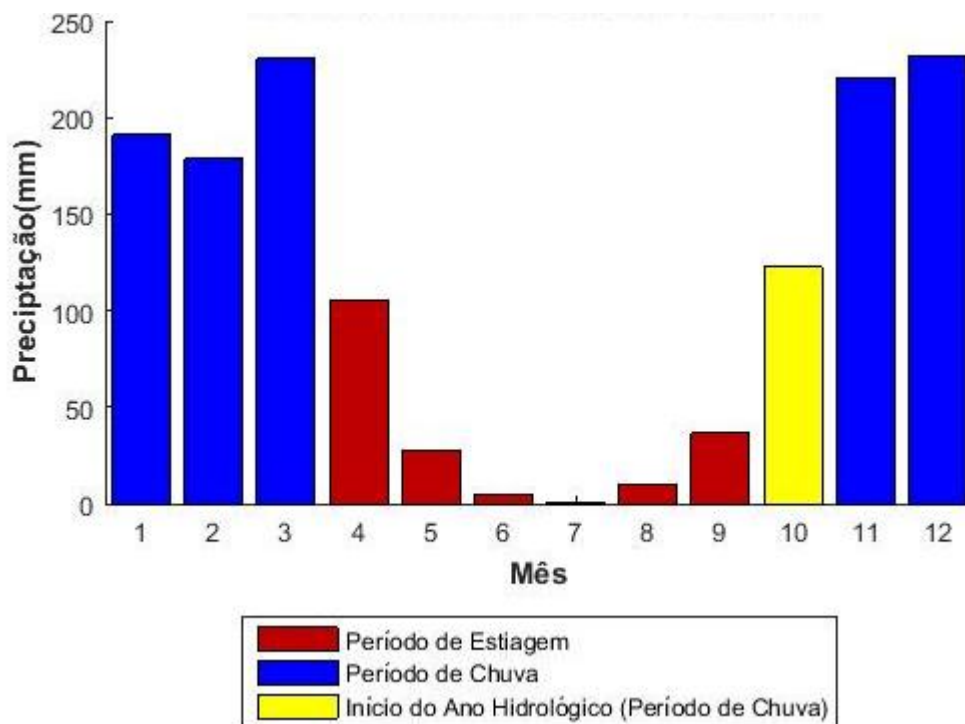
Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.12 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Rio Verde - GO, no período de 1971 a 2019.



Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

Figura A.13 – Média dos valores de precipitação mensal disponíveis para o município de Roncador - DF, no período de 1979 a 2019.



Fonte: INMET (2020), dados tratados pelo autor.

APÊNDICE B

Precipitações Máximas Diárias Anuais

Tabela B.1 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Aragarças - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1970/1971	-	-	1987/1988	27/11/1987	80,00	2004/2005	-	-
1971/1972	-	-	1988/1989	13/03/1989	73,70	2005/2006	30/10/2005	71,10
1972/1973	-	-	1989/1990	-	-	2006/2007	05/02/2007	107,20
1973/1974	19/03/1974	179,20	1990/1991	-	-	2007/2008	10/12/2007	85,60
1974/1975	-	-	1991/1992	-	-	2008/2009	25/12/2008	71,00
1975/1976	-	-	1992/1993	-	-	2009/2010	07/12/2009	74,60
1976/1977	-	-	1993/1994	-	-	2010/2011	02/01/2011	147,10
1977/1978	-	-	1994/1995	19/03/1995	94,40	2011/2012	10/04/2012	66,40
1978/1979	-	-	1995/1996	-	-	2012/2013	29/01/2013	63,40
1979/1980	-	-	1996/1997	04/01/1997	118,60	2013/2014	18/01/2014	96,00
1980/1981	-	-	1997/1998	-	-	2014/2015	11/05/2015	83,20
1981/1982	-	-	1998/1999	02/03/1999	56,80	2015/2016	06/01/2016	82,40
1982/1983	30/01/1983	102,40	1999/2000	16/03/2000	90,80	2016/2017	22/11/2016	109,20
1983/1984	02/10/1983	88,60	2000/2001	-	-	2017/2018	11/11/2017	113,40
1984/1985	22/11/1984	81,40	2001/2002	15/10/2001	84,00	2018/2019	08/11/2018	127,00
1985/1986	-	-	2002/2003	09/01/2003	78,70			
1986/1987	-	-	2003/2004	-	-			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.2 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Brasília - DF.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	-	-	1981/1982	-	-	2001/2002	11/04/2002	71,40
1962/1963	-	-	1982/1983	-	-	2002/2003	-	-
1963/1964	15/11/1963	132,80	1983/1984	-	-	2003/2004	28/12/2003	70,40
1964/1965	-	-	1984/1985	11/04/1985	62,70	2004/2005	28/02/2005	110,70
1965/1966	-	-	1985/1986	-	-	2005/2006	02/02/2006	62,50
1966/1967	-	-	1986/1987	03/04/1987	90,00	2006/2007	27/10/2006	103,10
1967/1968	-	-	1987/1988	11/12/1987	69,10	2007/2008	21/02/2008	76,50
1968/1969	03/05/1969	73,60	1988/1989	-	-	2008/2009	13/04/2009	98,10
1969/1970	21/01/1970	86,50	1989/1990	13/07/1990	80,70	2009/2010	02/04/2010	74,40
1970/1971	03/11/1970	91,70	1990/1991	07/04/1991	88,60	2010/2011	23/11/2010	55,30
1971/1972	-	-	1991/1992	-	-	2011/2012	21/11/2011	68,20
1972/1973	-	-	1992/1993	-	-	2012/2013	16/01/2013	94,40
1973/1974	-	-	1993/1994	-	-	2013/2014	10/03/2014	73,70
1974/1975	-	-	1994/1995	23/11/1994	77,00	2014/2015	17/12/2014	85,80
1975/1976	26/02/1976	99,50	1995/1996	09/12/1995	56,10	2015/2016	20/01/2016	99,60
1976/1977	18/11/1976	88,50	1996/1997	04/01/1997	75,20	2016/2017	26/02/2017	56,40
1977/1978	03/10/1977	68,30	1997/1998	20/01/1998	93,60	2017/2018	08/02/2018	80,20
1978/1979	-	-	1998/1999	25/11/1998	53,10	2018/2019	-	-
1979/1980	-	-	1999/2000	04/10/1999	66,90			
1980/1981	-	-	2000/2001	29/10/2000	102,10			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.3 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Catalão - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	04/03/1962	62,80	1981/1982	-	-	2001/2002	15/01/2002	55,70
1962/1963	16/02/1963	78,80	1982/1983	06/03/1983	92,40	2002/2003	27/12/2002	83,10
1963/1964	20/12/1963	116,90	1983/1984	26/12/1983	90,10	2003/2004	05/03/2004	93,80
1964/1965	01/10/1964	67,20	1984/1985	-	-	2004/2005	-	-
1965/1966	13/01/1966	106,90	1985/1986	-	-	2005/2006	17/04/2006	69,40
1966/1967	23/12/1966	77,00	1986/1987	-	-	2006/2007	05/01/2007	55,30
1967/1968	25/12/1967	86,30	1987/1988	-	-	2007/2008	21/02/2008	82,00
1968/1969	23/10/1968	88,30	1988/1989	-	-	2008/2009	14/02/2009	70,40
1969/1970	26/01/1970	132,40	1989/1990	15/02/1990	91,60	2009/2010	28/02/2010	70,30
1970/1971	-	-	1990/1991	14/01/1991	86,30	2010/2011	25/12/2010	86,00
1971/1972	30/11/1971	71,70	1991/1992	-	-	2011/2012	01/02/2012	73,70
1972/1973	-	-	1992/1993	-	-	2012/2013	02/03/2013	104,60
1973/1974	08/01/1974	82,60	1993/1994	-	-	2013/2014	02/12/2013	69,80
1974/1975	05/01/1975	49,60	1994/1995	08/02/1995	95,10	2014/2015	13/12/2014	63,70
1975/1976	-	-	1995/1996	21/02/1996	52,00	2015/2016	29/02/2016	60,80
1976/1977	09/04/1977	74,00	1996/1997	17/02/1997	71,50	2016/2017	09/02/2017	63,90
1977/1978	13/01/1978	83,40	1997/1998	30/05/1998	61,40	2017/2018	01/11/2017	75,10
1978/1979	-	-	1998/1999	14/11/1998	63,00	2018/2019	31/12/2018	77,30
1979/1980	-	-	1999/2000	13/11/1999	77,50			
1980/1981	-	-	2000/2001	-	-			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.4 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Formosa - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	-	-	1981/1982	-	-	2001/2002	25/11/2001	64,60
1962/1963	-	-	1982/1983	25/01/1983	67,40	2002/2003	22/01/2003	53,50
1963/1964	-	-	1983/1984	06/04/1984	59,20	2003/2004	10/02/2004	89,90
1964/1965	-	-	1984/1985	13/01/1985	66,00	2004/2005	-	-
1965/1966	-	-	1985/1986	-	-	2005/2006	07/09/2006	59,70
1966/1967	-	-	1986/1987	15/10/1986	81,60	2006/2007	08/10/2006	77,80
1967/1968	-	-	1987/1988	13/03/1988	98,20	2007/2008	04/04/2008	84,80
1968/1969	-	-	1988/1989	08/03/1989	69,80	2008/2009	17/12/2008	110,30
1969/1970	-	-	1989/1990	02/12/1989	67,00	2009/2010	01/12/2009	61,20
1970/1971	-	-	1990/1991	25/02/1991	62,00	2010/2011	02/01/2011	67,10
1971/1972	-	-	1991/1992	-	-	2011/2012	27/11/2011	101,00
1972/1973	-	-	1992/1993	-	-	2012/2013	18/11/2012	108,60
1973/1974	-	-	1993/1994	-	-	2013/2014	07/03/2014	69,00
1974/1975	08/12/1974	50,00	1994/1995	21/12/1994	89,20	2014/2015	26/11/2014	93,00
1975/1976	-	-	1995/1996	05/11/1995	61,20	2015/2016	20/01/2016	63,20
1976/1977	31/01/1977	59,60	1996/1997	-	-	2016/2017	11/02/2017	59,30
1977/1978	-	-	1997/1998	27/03/1998	99,20	2017/2018	-	-
1978/1979	-	-	1998/1999	01/01/1999	61,00	2018/2019	11/12/2018	59,10
1979/1980	-	-	1999/2000	29/11/1999	91,10			
1980/1981	-	-	2000/2001	06/11/2000	62,40			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.5 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Goiânia - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	12/11/1961	57,40	1981/1982	-	-	2001/2002	19/02/2002	67,40
1962/1963	20/10/1962	60,50	1982/1983	-	-	2002/2003	07/02/2003	95,20
1963/1964	27/09/1964	72,00	1983/1984	01/04/1984	81,60	2003/2004	14/11/2003	74,40
1964/1965	17/01/1965	66,80	1984/1985	-	-	2004/2005	27/03/2005	79,10
1965/1966	-	-	1985/1986	-	-	2005/2006	09/12/2005	136,60
1966/1967	13/12/1966	89,80	1986/1987	25/12/1986	69,60	2006/2007	08/11/2006	60,30
1967/1968	22/02/1968	73,80	1987/1988	-	-	2007/2008	07/03/2008	89,00
1968/1969	19/01/1969	124,70	1988/1989	07/02/1989	58,20	2008/2009	06/04/2009	81,20
1969/1970	04/11/1969	66,80	1989/1990	08/12/1989	60,70	2009/2010	07/12/2009	107,60
1970/1971	-	-	1990/1991	12/11/1990	93,20	2010/2011	29/12/2010	74,60
1971/1972	25/01/1972	97,80	1991/1992	-	-	2011/2012	-	-
1972/1973	22/12/1972	134,00	1992/1993	-	-	2012/2013	17/01/2013	87,50
1973/1974	11/11/1973	67,40	1993/1994	-	-	2013/2014	11/04/2014	116,80
1974/1975	05/04/1975	67,00	1994/1995	-	-	2014/2015	06/12/2014	75,50
1975/1976	-	-	1995/1996	14/04/1996	71,50	2015/2016	20/01/2016	99,10
1976/1977	-	-	1996/1997	-	-	2016/2017	21/04/2017	78,20
1977/1978	-	-	1997/1998	25/01/1998	72,10	2017/2018	06/04/2018	80,20
1978/1979	-	-	1998/1999	22/10/1998	50,80	2018/2019	23/04/2019	67,30
1979/1980	-	-	1999/2000	27/10/1999	92,70			
1980/1981	-	-	2000/2001	15/12/2000	73,30			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.6 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Goiás - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1961/1962	16/11/1961	120,00	1981/1982	-	-	2001/2002	30/12/2001	77,80
1962/1963	-	-	1982/1983	31/01/1983	120,80	2002/2003	05/11/2002	81,40
1963/1964	-	-	1983/1984	13/03/1984	97,40	2003/2004	20/02/2004	70,10
1964/1965	-	-	1984/1985	29/01/1985	100,80	2004/2005	05/11/2004	86,40
1965/1966	-	-	1985/1986	-	-	2005/2006	09/12/2005	81,30
1966/1967	-	-	1986/1987	-	-	2006/2007	17/10/2006	95,10
1967/1968	-	-	1987/1988	07/12/1987	64,20	2007/2008	26/02/2008	84,70
1968/1969	03/05/1969	90,00	1988/1989	-	-	2008/2009	24/03/2009	118,30
1969/1970	14/11/1969	138,20	1989/1990	-	-	2009/2010	09/10/2009	86,30
1970/1971	-	-	1990/1991	23/03/1991	96,10	2010/2011	10/01/2011	78,20
1971/1972	-	-	1991/1992	-	-	2011/2012	31/01/2012	71,30
1972/1973	-	-	1992/1993	-	-	2012/2013	07/11/2012	80,60
1973/1974	20/03/1974	59,00	1993/1994	-	-	2013/2014	19/10/2013	65,80
1974/1975	-	-	1994/1995	03/01/1995	132,30	2014/2015	10/02/2015	86,30
1975/1976	-	-	1995/1996	06/12/1995	118,80	2015/2016	23/01/2016	90,30
1976/1977	-	-	1996/1997	12/12/1996	122,20	2016/2017	-	-
1977/1978	12/01/1978	62,60	1997/1998	17/12/1997	73,00	2017/2018	-	-
1978/1979	-	-	1998/1999	29/01/1999	86,70	2018/2019	-	-
1979/1980	-	-	1999/2000	-	-			
1980/1981	-	-	2000/2001	15/11/2000	77,30			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.7 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Ipameri - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1977/1978	-	-	1991/1992	-	-	2005/2006	12/12/2005	99,10
1978/1979	-	-	1992/1993	-	-	2006/2007	01/01/2007	77,80
1979/1980	-	-	1993/1994	-	-	2007/2008	20/01/2008	64,00
1980/1981	-	-	1994/1995	-	-	2008/2009	18/11/2008	64,80
1981/1982	-	-	1995/1996	-	-	2009/2010	06/12/2009	106,30
1982/1983	07/03/1983	71,50	1996/1997	04/01/1997	76,20	2010/2011	06/12/2010	96,40
1983/1984	03/04/1984	109,00	1997/1998	10/01/1998	119,10	2011/2012	07/10/2011	106,20
1984/1985	09/01/1985	58,40	1998/1999	06/01/1999	65,00	2012/2013	02/03/2013	68,60
1985/1986	-	-	1999/2000	08/11/1999	88,20	2013/2014	30/12/2013	85,80
1986/1987	-	-	2000/2001	18/12/2000	96,60	2014/2015	29/11/2014	93,60
1987/1988	-	-	2001/2002	19/11/2001	65,00	2015/2016	19/01/2016	112,90
1988/1989	28/10/1988	107,20	2002/2003	16/02/2003	67,30	2016/2017	19/01/2017	107,60
1989/1990	-	-	2003/2004	06/02/2004	63,00	2017/2018	11/03/2018	108,20
1990/1991	14/12/1990	59,20	2004/2005	09/01/2005	98,30	2018/2019	09/11/2018	81,20

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.8 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Itumbiara - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1989/1990	-	-	1999/2000	05/12/1999	81,00	2009/2010	-	-
1990/1991	-	-	2000/2001	14/11/2000	81,80	2010/2011	-	-
1991/1992	-	-	2001/2002	-	-	2011/2012	-	-
1992/1993	-	-	2002/2003	-	-	2012/2013	-	-
1993/1994	-	-	2003/2004	-	-	2013/2014	-	-
1994/1995	31/01/1995	72,70	2004/2005	-	-	2014/2015	-	-
1995/1996	-	-	2005/2006	-	-	2015/2016	-	-
1996/1997	-	-	2006/2007	-	-	2016/2017	-	-
1997/1998	10/01/1998	79,00	2007/2008	-	-	2017/2018	-	-
1998/1999	14/11/1998	52,60	2008/2009	14/12/2008	83,60	2018/2019	-	-

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.9 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Jataí - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1978/1979	-	-	1992/1993	23/02/1993	46,20	2006/2007	-	-
1979/1980	-	-	1993/1994	-	-	2007/2008	19/11/2007	62,70
1980/1981	-	-	1994/1995	-	-	2008/2009	20/11/2008	68,80
1981/1982	-	-	1995/1996	-	-	2009/2010	25/03/2010	131,20
1982/1983	05/01/1983	90,20	1996/1997	-	-	2010/2011	03/10/2010	149,20
1983/1984	01/12/1983	80,60	1997/1998	-	-	2011/2012	12/02/2012	95,40
1984/1985	23/01/1985	59,60	1998/1999	-	-	2012/2013	17/03/2013	88,40
1985/1986	-	-	1999/2000	03/01/2000	83,00	2013/2014	10/04/2014	70,90
1986/1987	25/12/1986	128,40	2000/2001	28/10/2000	99,20	2014/2015	29/11/2014	69,30
1987/1988	09/03/1988	135,70	2001/2002	11/01/2002	99,00	2015/2016	01/03/2016	65,10
1988/1989	10/01/1989	135,60	2002/2003	24/02/2003	69,70	2016/2017	16/12/2016	102,00
1989/1990	09/12/1989	78,80	2003/2004	13/02/2004	78,00	2017/2018	02/02/2018	101,60
1990/1991	03/02/1991	61,00	2004/2005	21/03/2005	151,40	2018/2019	-	-
1991/1992	-	-	2005/2006	03/12/2005	69,20			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.10 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Pirenópolis - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1977/1978	-	-	1991/1992	-	-	2005/2006	09/12/2005	99,60
1978/1979	-	-	1992/1993	-	-	2006/2007	-	-
1979/1980	-	-	1993/1994	-	-	2007/2008	09/12/2007	88,20
1980/1981	-	-	1994/1995	01/01/1995	79,90	2008/2009	12/11/2008	80,90
1981/1982	-	-	1995/1996	15/12/1995	85,10	2009/2010	02/04/2010	126,20
1982/1983	11/02/1983	92,90	1996/1997	19/11/1996	70,20	2010/2011	06/12/2010	87,60
1983/1984	02/04/1984	91,60	1997/1998	18/10/1998	106,10	2011/2012	22/11/2011	67,50
1984/1985	30/01/1985	118,30	1998/1999	12/11/1998	45,50	2012/2013	27/01/2013	79,70
1985/1986	-	-	1999/2000	07/11/1999	93,60	2013/2014	30/11/2013	78,80
1986/1987	-	-	2000/2001	12/03/2001	76,00	2014/2015	16/04/2015	71,80
1987/1988	13/03/1988	91,20	2001/2002	02/11/2001	45,80	2015/2016	23/01/2016	86,70
1988/1989	18/10/1989	60,70	2002/2003	12/01/2003	61,90	2016/2017	03/10/2017	69,30
1989/1990	17/12/1989	167,30	2003/2004	10/02/2004	73,20	2017/2018	-	-
1990/1991	31/12/1990	64,20	2004/2005	31/01/2005	106,50	2018/2019	16/03/2019	72,60

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.11 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Posse - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1975/1976	-	-	1990/1991	02/04/1991	82,60	2006/2007	31/12/2006	80,10
1976/1977	-	-	1991/1992	-	-	2007/2008	13/03/2008	48,10
1977/1978	-	-	1992/1993	-	-	2008/2009	25/10/2009	74,50
1978/1979	-	-	1993/1994	-	-	2009/2010	19/11/2009	92,70
1979/1980	-	-	1994/1995	31/03/1995	90,90	2010/2011	11/01/2011	71,80
1980/1981	-	-	1995/1996	-	-	2011/2012	07/01/2012	126,10
1981/1982	-	-	1996/1997	19/01/1997	64,60	2012/2013	15/11/2012	132,40
1982/1983	12/04/1983	48,50	1997/1998	16/03/1998	78,90	2013/2014	27/12/2013	66,30
1983/1984	27/11/1983	83,40	1998/1999	24/02/1999	100,00	2014/2015	23/11/2014	46,60
1984/1985	-	-	1999/2000	11/02/2000	67,20	2015/2016	06/01/2016	86,40
1985/1986	-	-	2000/2001	09/12/2000	85,20	2016/2017	31/03/2017	49,00
1986/1987	-	-	2001/2002	30/10/2002	63,20	2017/2018	23/03/2018	61,20
1987/1988	10/02/1988	60,80	2002/2003	22/02/2003	74,40	2018/2019	25/03/2019	64,40
1988/1989	-	-	2003/2004	18/01/2004	53,70			
1989/1990	18/12/1989	76,20	2004/2005	03/02/2005	89,20			

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.12 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Rio Verde - GO.

Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1971/1972	-	-	1987/1988	-	-	2003/2004	07/12/2003	77,50
1972/1973	01/10/1972	66,20	1988/1989	-	-	2004/2005	29/09/2005	69,40
1973/1974	-	-	1989/1990	-	-	2005/2006	01/10/2005	74,30
1974/1975	-	-	1990/1991	-	-	2006/2007	05/02/2007	129,10
1975/1976	-	-	1991/1992	-	-	2007/2008	26/03/2008	78,10
1976/1977	-	-	1992/1993	-	-	2008/2009	26/03/2009	88,00
1977/1978	-	-	1993/1994	-	-	2009/2010	27/12/2009	83,40
1978/1979	-	-	1994/1995	-	-	2010/2011	05/03/2011	82,40
1979/1980	-	-	1995/1996	-	-	2011/2012	-	-
1980/1981	-	-	1996/1997	-	-	2012/2013	-	-
1981/1982	-	-	1997/1998	17/01/1998	68,70	2013/2014	-	-
1982/1983	-	-	1998/1999	19/03/1999	78,90	2014/2015	14/04/2015	90,60
1983/1984	24/12/1983	59,80	1999/2000	12/03/2000	137,20	2015/2016	01/03/2016	96,10
1984/1985	23/01/1985	102,10	2000/2001	17/12/2000	133,60	2016/2017	16/12/2016	50,50
1985/1986	-	-	2001/2002	09/01/2002	82,00	2017/2018	-	-
1986/1987	-	-	2002/2003	18/03/2003	56,80	2018/2019	-	-

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

Tabela B.13 – Precipitações máximas diárias anuais para a cidade de Roncador - DF.

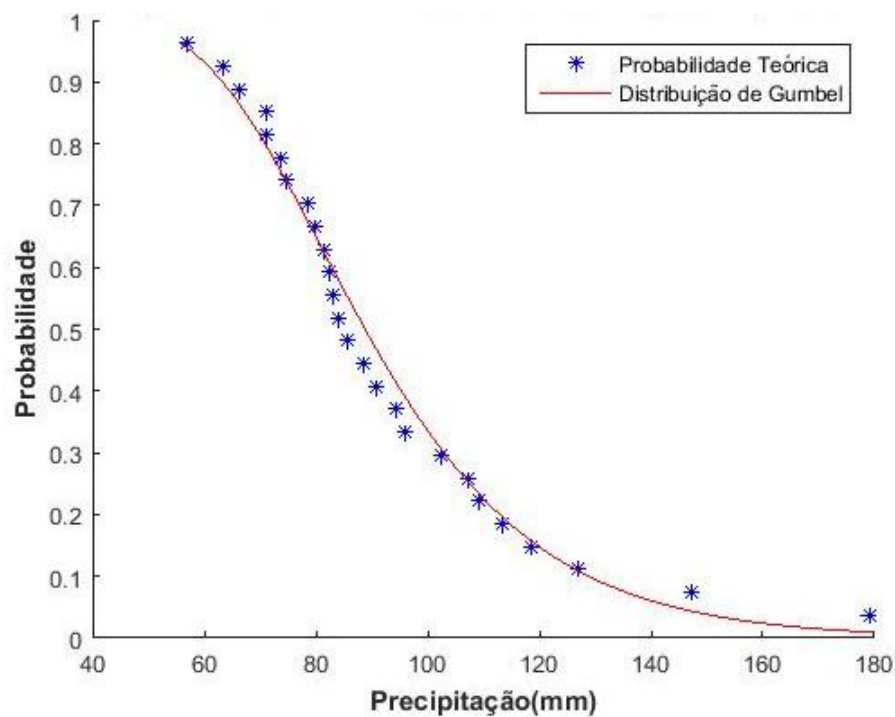
Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima	Ano Hidrológico	Dia da Ocorrência	Precipitação Máxima
1979/1980	-	-	1993/1994	-	-	2007/2008	-	-
1980/1981	-	-	1994/1995	22/04/1995	87,50	2008/2009	-	-
1981/1982	-	-	1995/1996	07/03/1996	83,30	2009/2010	-	-
1982/1983	-	-	1996/1997	20/01/1997	68,40	2010/2011	-	-
1983/1984	-	-	1997/1998	25/02/1998	87,60	2011/2012	-	-
1984/1985	-	-	1998/1999	04/12/1998	39,30	2012/2013	-	-
1985/1986	-	-	1999/2000	11/11/1999	63,60	2013/2014	-	-
1986/1987	-	-	2000/2001	31/12/2000	163,30	2014/2015	-	-
1987/1988	-	-	2001/2002	20/10/2001	66,60	2015/2016	-	-
1988/1989	-	-	2002/2003	-	-	2016/2017	-	-
1989/1990	-	-	2003/2004	-	-	2017/2018	-	-
1991/1992	-	-	2004/2005	-	-	2018/2019	-	-
1992/1993	-	-	2005/2006	30/10/2005	70,90	-	-	-

Fonte: INMET (2020), dados tabelados pelo autor.

APÊNDICE C

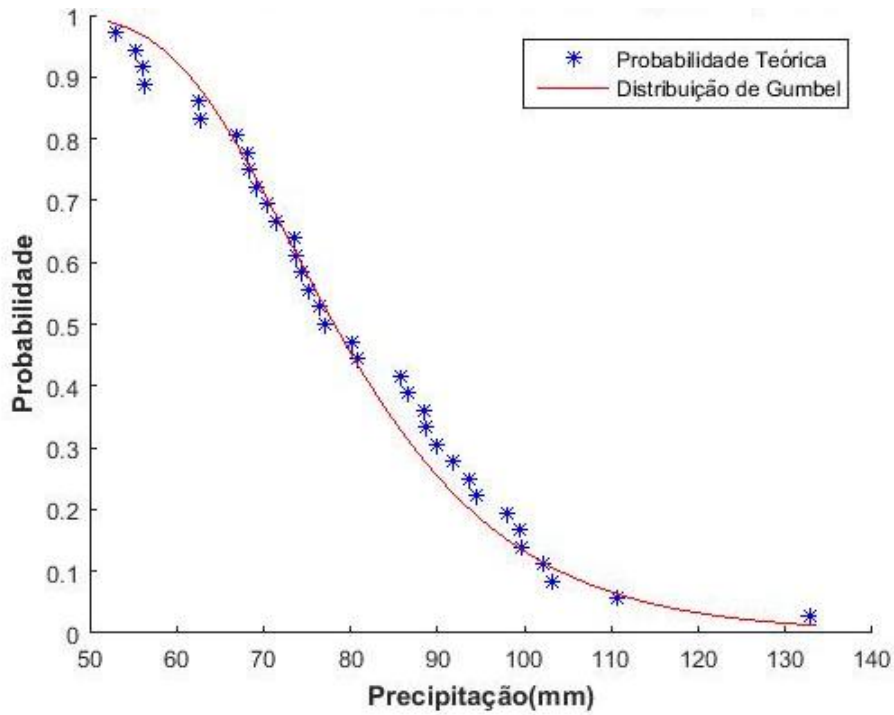
Distribuição Probabilística de Gumbel

Figura C.1 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Aragarças - GO.



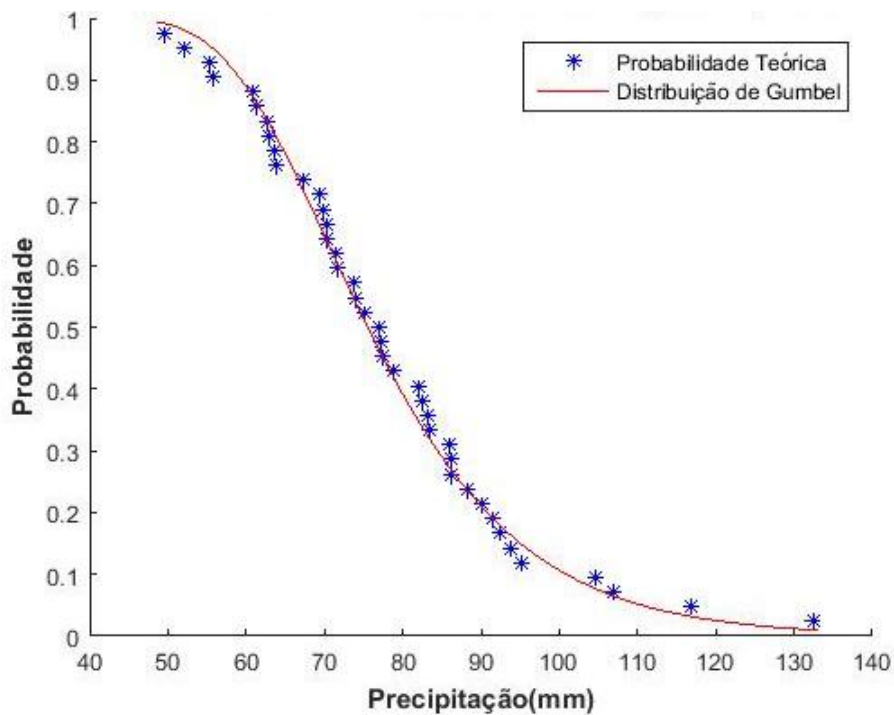
Fonte: O autor.

Figura C.2 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Brasília - DF.



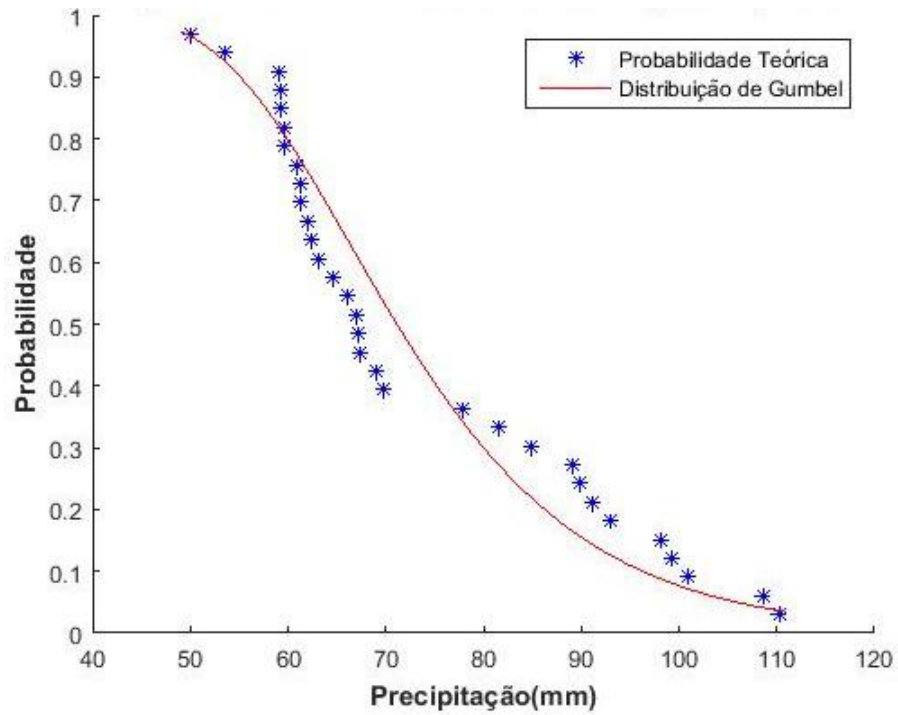
Fonte: O autor.

Figura C.3 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Catalão - GO.



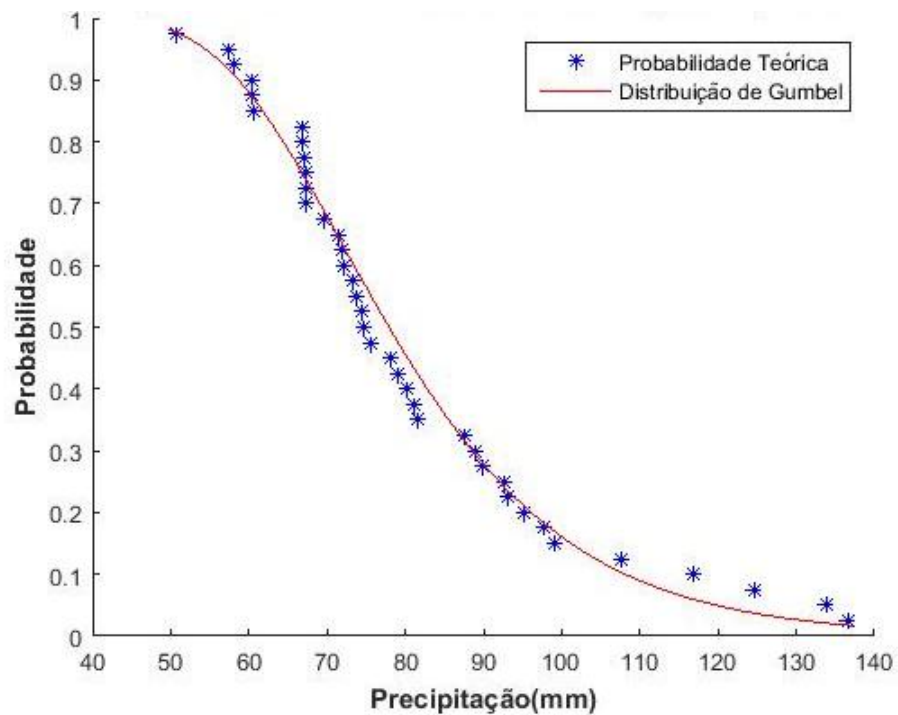
Fonte: O autor.

Figura C.4 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Formosa - GO.



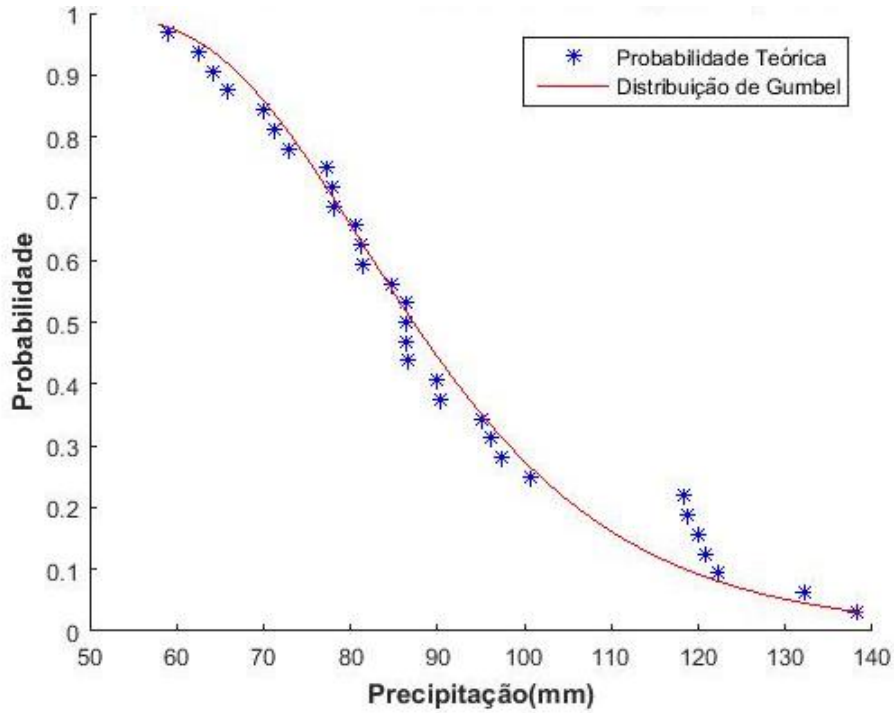
Fonte: O autor.

Figura C.5 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Goiânia - GO.



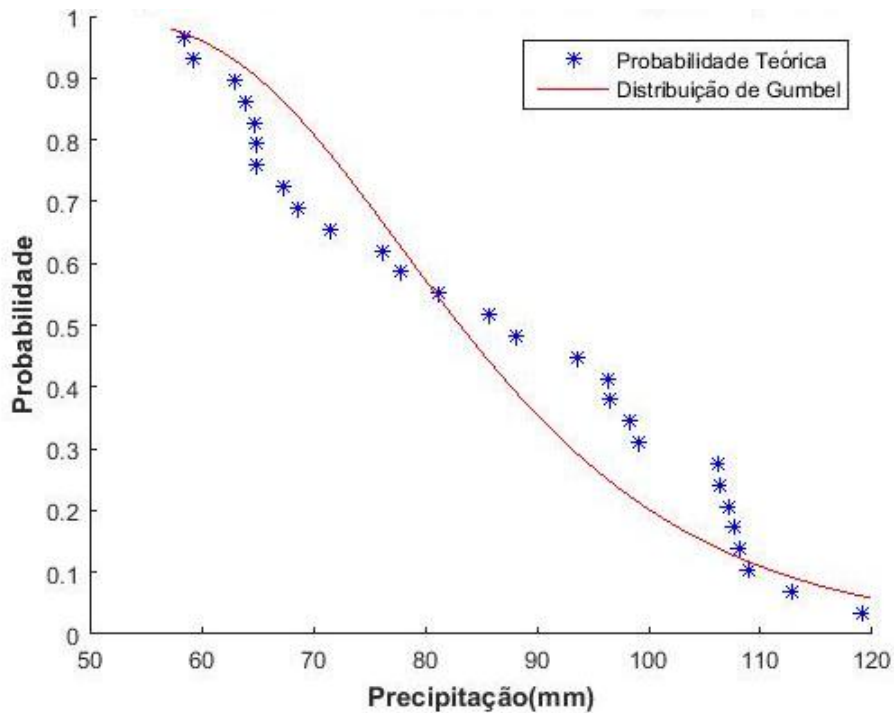
Fonte: O autor.

Figura C.6 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Goiás - GO.



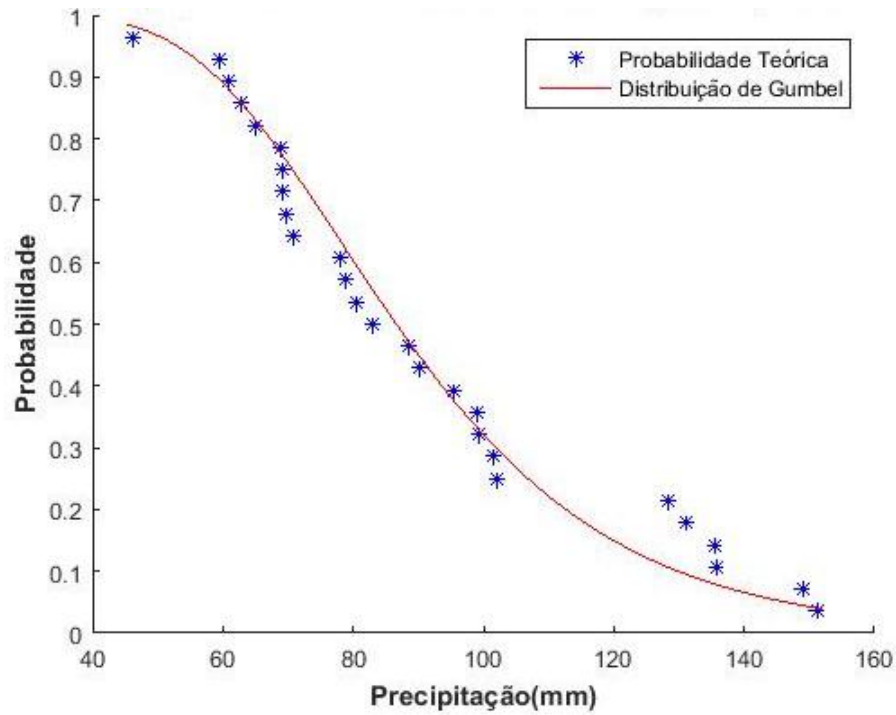
Fonte: O autor.

Figura C.7 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Ipameri - GO.



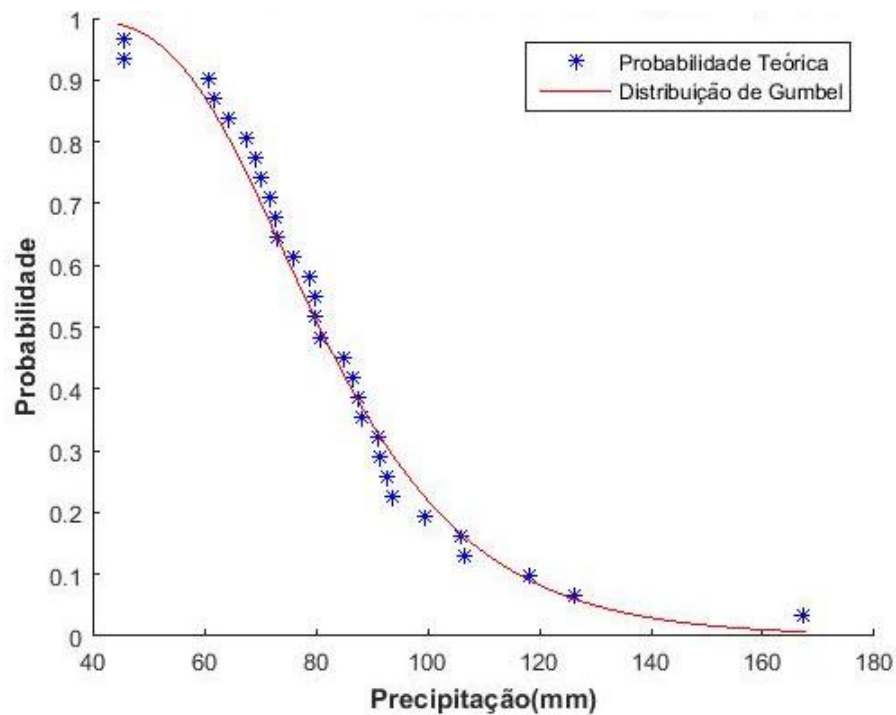
Fonte: O autor.

Figura C.8 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Jataí - GO.



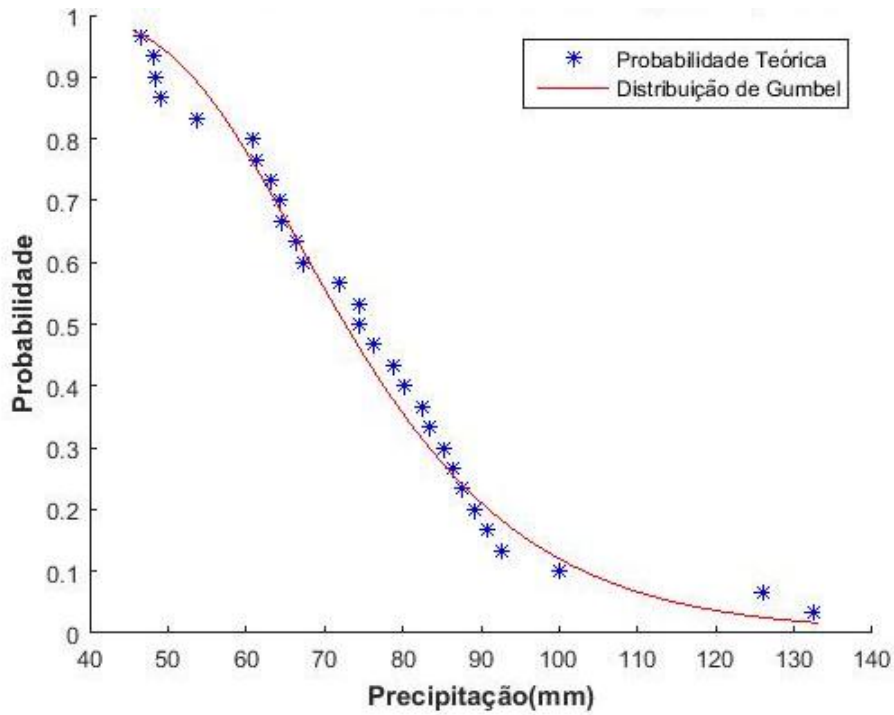
Fonte: O autor.

Figura C.9 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Pirenópolis- GO.



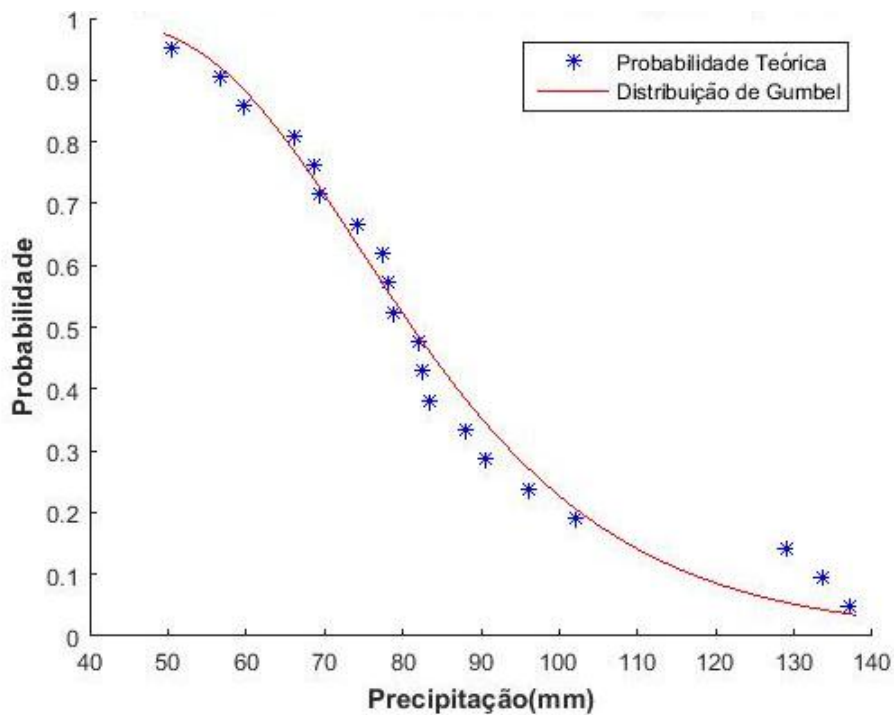
Fonte: O autor.

Figura C.10 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Posse - GO.



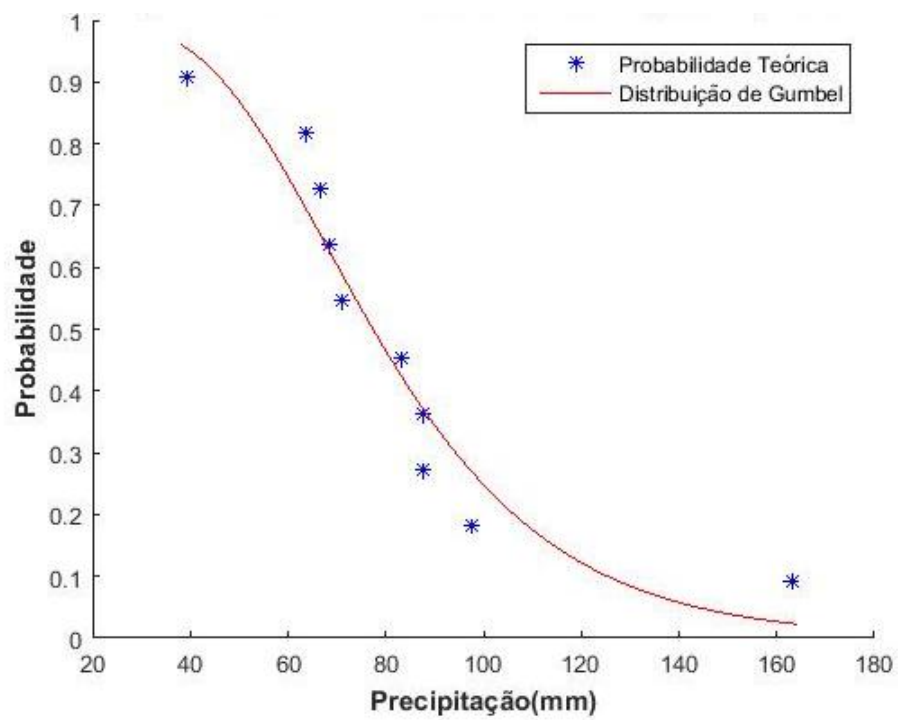
Fonte: O autor.

Figura C.11 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Rio Verde - GO.



Fonte: O autor.

Figura C.12 – Distribuição da probabilidade empírica e teórica estimados pelo modelo de Gumbel, para o município de Roncador - DF.



Fonte: O autor.

APÊNDICE D

Intensidade de Chuva

Tabela D.1 – Intensidade de chuvas para o município de Aragarças - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	128,38	163,22	186,29	199,30	208,41	215,43	237,05	258,51	286,77	308,10	329,42
10 min	101,95	129,62	147,93	158,27	165,50	171,08	188,24	205,29	227,73	244,67	261,60
15 min	88,11	112,01	127,84	136,77	143,03	147,84	162,68	177,41	196,80	211,44	226,07
20 min	76,46	97,21	110,95	118,70	124,13	128,31	141,18	153,97	170,79	183,50	196,20
30 min	62,93	80,01	91,32	97,70	102,16	105,60	116,20	126,72	140,57	151,03	161,48
60 min	42,52	54,06	61,70	66,01	69,03	71,35	78,51	85,62	94,98	102,05	109,11
2 h	24,30	30,89	35,26	37,72	39,44	40,77	44,87	48,93	54,27	58,31	62,35
3 h	18,22	23,17	26,44	28,29	29,58	30,58	33,65	36,70	40,71	43,73	46,76
6 h	12,15	15,45	17,63	18,86	19,72	20,39	22,43	24,46	27,14	29,16	31,17
8 h	9,87	12,55	14,32	15,32	16,02	16,56	18,23	19,88	22,05	23,69	25,33
12 h	7,17	9,12	10,41	11,13	11,64	12,03	13,24	14,44	16,02	17,21	18,40
24 h	4,22	5,36	6,12	6,55	6,85	7,08	7,79	8,49	9,42	10,12	10,82

Fonte: O autor.

Tabela D.2 – Intensidade de chuvas para o município de Brasília - DF.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	112,94	135,51	150,46	158,89	164,79	169,34	183,35	197,26	215,56	229,39	243,20
10 min	89,69	107,61	119,48	126,18	130,87	134,48	145,60	156,64	171,18	182,16	193,13
15 min	77,51	93,00	103,26	109,04	113,09	116,22	125,83	135,37	147,94	157,42	166,90
20 min	67,27	80,71	89,61	94,63	98,15	100,86	109,20	117,48	128,39	136,62	144,85
30 min	55,36	66,43	73,75	77,89	80,78	83,01	89,88	96,69	105,67	112,44	119,22
60 min	37,41	44,88	49,83	52,63	54,58	56,09	60,73	65,33	71,40	75,98	80,55
2 h	21,38	25,65	28,48	30,07	31,19	32,05	34,70	37,33	40,80	43,41	46,03
3 h	16,03	19,24	21,36	22,55	23,39	24,04	26,03	28,00	30,60	32,56	34,52
6 h	10,69	12,82	14,24	15,04	15,59	16,03	17,35	18,67	20,40	21,71	23,01
8 h	8,68	10,42	11,57	12,22	12,67	13,02	14,10	15,17	16,57	17,64	18,70
12 h	6,31	7,57	8,40	8,88	9,21	9,46	10,24	11,02	12,04	12,81	13,59
24 h	3,71	4,45	4,94	5,22	5,41	5,56	6,02	6,48	7,08	7,54	7,99

Fonte: O autor.

Tabela D.3 – Intensidade de chuvas para o município de Catalão - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	109,19	131,24	145,84	154,08	159,84	164,29	177,97	191,56	209,44	222,95	236,44
10 min	86,71	104,22	115,81	122,35	126,93	130,46	141,33	152,12	166,32	177,05	187,76
15 min	74,93	90,07	100,09	105,74	109,70	112,75	122,14	131,46	143,73	153,00	162,26
20 min	65,03	78,16	86,86	91,77	95,20	97,85	106,00	114,09	124,74	132,78	140,82
30 min	53,52	64,33	71,49	75,53	78,35	80,53	87,24	93,90	102,67	109,29	115,90
60 min	36,16	43,47	48,30	51,03	52,94	54,41	58,95	63,45	69,37	73,84	78,31
2 h	20,67	24,84	27,60	29,16	30,25	31,09	33,68	36,25	39,64	42,20	44,75
3 h	15,50	18,63	20,70	21,87	22,69	23,32	25,26	27,19	29,73	31,65	33,56
6 h	10,33	12,42	13,80	14,58	15,13	15,55	16,84	18,13	19,82	21,10	22,38
8 h	8,40	10,09	11,21	11,85	12,29	12,63	13,68	14,73	16,10	17,14	18,18
12 h	6,10	7,33	8,15	8,61	8,93	9,18	9,94	10,70	11,70	12,45	13,21
24 h	3,59	4,31	4,79	5,06	5,25	5,40	5,85	6,29	6,88	7,33	7,77

Fonte: O autor.

Tabela D.4 – Intensidade de chuvas para o município de Formosa - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	102,84	124,71	139,19	147,35	153,07	157,48	171,05	184,52	202,26	215,65	229,03
10 min	81,67	99,03	110,53	117,02	121,56	125,06	135,83	146,53	160,62	171,25	181,88
15 min	70,58	85,58	95,52	101,13	105,05	108,07	117,39	126,63	138,80	147,99	157,18
20 min	61,25	74,27	82,90	87,76	91,17	93,79	101,88	109,90	120,46	128,44	136,41
30 min	50,41	61,13	68,23	72,23	75,04	77,20	83,85	90,45	99,15	105,71	112,27
60 min	34,06	41,30	46,10	48,81	50,70	52,16	56,65	61,12	66,99	71,43	75,86
2 h	19,46	23,60	26,34	27,89	28,97	29,81	32,37	34,92	38,28	40,81	43,35
3 h	14,60	17,70	19,76	20,92	21,73	22,35	24,28	26,19	28,71	30,61	32,51
6 h	9,73	11,80	13,17	13,94	14,49	14,90	16,19	17,46	19,14	20,41	21,67
8 h	7,91	9,59	10,70	11,33	11,77	12,11	13,15	14,19	15,55	16,58	17,61
12 h	5,74	6,97	7,77	8,23	8,55	8,80	9,55	10,31	11,30	12,05	12,79
24 h	3,38	4,10	4,57	4,84	5,03	5,17	5,62	6,06	6,65	7,09	7,53

Fonte: O autor.

Tabela D.5 – Intensidade de chuvas para o município de Goiânia - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	112,65	138,94	156,36	166,18	173,06	178,35	194,67	210,87	232,20	248,31	264,40
10 min	89,46	110,34	124,16	131,97	137,43	141,63	154,59	167,46	184,40	197,19	209,97
15 min	77,31	95,35	107,30	114,04	118,76	122,40	133,60	144,72	159,35	170,41	181,45
20 min	67,09	82,75	93,12	98,97	103,07	106,23	115,95	125,59	138,30	147,89	157,47
30 min	55,22	68,11	76,64	81,46	84,83	87,43	95,43	103,37	113,82	121,72	129,61
60 min	37,31	46,02	51,79	55,04	57,32	59,07	64,48	69,84	76,91	82,24	87,57
2 h	21,32	26,30	29,59	31,45	32,75	33,76	36,84	39,91	43,95	47,00	50,04
3 h	15,99	19,72	22,19	23,59	24,57	25,32	27,63	29,93	32,96	35,25	37,53
6 h	10,66	13,15	14,80	15,73	16,38	16,88	18,42	19,96	21,97	23,50	25,02
8 h	8,66	10,68	12,02	12,78	13,31	13,71	14,97	16,21	17,85	19,09	20,33
12 h	6,29	7,76	8,73	9,28	9,67	9,96	10,87	11,78	12,97	13,87	14,77
24 h	3,70	4,57	5,14	5,46	5,69	5,86	6,40	6,93	7,63	8,16	8,69

Fonte: O autor.

Tabela D.6 – Intensidade de chuvas para o município de Goiás - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	126,10	153,31	171,33	181,49	188,61	194,09	210,98	227,74	249,81	266,47	283,13
10 min	100,14	121,75	136,05	144,13	149,78	154,13	167,54	180,85	198,38	211,61	224,84
15 min	86,54	105,21	117,58	124,55	129,44	133,20	144,79	156,29	171,44	182,87	194,30
20 min	75,11	91,31	102,04	108,09	112,33	115,60	125,66	135,64	148,78	158,71	168,63
30 min	61,81	75,15	83,98	88,97	92,46	95,14	103,42	111,64	122,46	130,62	138,79
60 min	41,77	50,78	56,75	60,11	62,47	64,29	69,88	75,43	82,74	88,26	93,78
2 h	23,87	29,02	32,43	34,35	35,70	36,73	39,93	43,10	47,28	50,43	53,59
3 h	17,90	21,76	24,32	25,76	26,77	27,55	29,95	32,33	35,46	37,83	40,19
6 h	11,93	14,51	16,21	17,18	17,85	18,37	19,97	21,55	23,64	25,22	26,79
8 h	9,70	11,79	13,17	13,95	14,50	14,92	16,22	17,51	19,21	20,49	21,77
12 h	7,04	8,56	9,57	10,14	10,54	10,84	11,79	12,72	13,95	14,89	15,82
24 h	4,14	5,04	5,63	5,96	6,20	6,38	6,93	7,48	8,21	8,76	9,30

Fonte: O autor.

Tabela D.7 – Intensidade de chuvas para o município de Ipameri - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	120,15	144,80	161,12	170,33	176,78	181,75	197,05	212,23	232,23	247,33	262,41
10 min	95,41	114,99	127,95	135,26	140,39	144,33	156,48	168,54	184,42	196,41	208,39
15 min	82,46	99,37	110,58	116,90	121,32	124,73	135,23	145,65	159,37	169,73	180,09
20 min	71,56	86,24	95,96	101,45	105,29	108,25	117,36	126,40	138,31	147,30	156,29
30 min	58,90	70,98	78,98	83,50	86,66	89,09	96,59	104,04	113,84	121,24	128,63
60 min	39,80	47,96	53,37	56,42	58,55	60,20	65,26	70,29	76,92	81,92	86,91
2 h	22,74	27,41	30,50	32,24	33,46	34,40	37,29	40,17	43,95	46,81	49,67
3 h	17,06	20,55	22,87	24,18	25,09	25,80	27,97	30,13	32,96	35,11	37,25
6 h	11,37	13,70	15,25	16,12	16,73	17,20	18,65	20,08	21,98	23,41	24,83
8 h	9,24	11,13	12,39	13,10	13,59	13,97	15,15	16,32	17,86	19,02	20,18
12 h	6,71	8,09	9,00	9,51	9,87	10,15	11,01	11,86	12,97	13,82	14,66
24 h	3,95	4,76	5,29	5,60	5,81	5,97	6,47	6,97	7,63	8,13	8,62

Fonte: O autor.

Tabela D.8 – Intensidade de chuvas para o município de Itumbiara - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	125,22	162,86	187,78	201,84	211,69	219,27	242,63	265,82	296,35	319,41	342,45
10 min	99,44	129,33	149,12	160,29	168,11	174,13	192,68	211,09	235,34	253,65	271,94
15 min	85,93	111,77	128,87	138,52	145,28	150,48	166,51	182,43	203,38	219,20	235,01
20 min	74,58	97,00	111,84	120,22	126,08	130,60	144,51	158,32	176,51	190,24	203,96
30 min	61,38	79,83	92,05	98,94	103,77	107,49	118,94	130,31	145,27	156,57	167,87
60 min	41,47	53,94	62,20	66,85	70,11	72,63	80,36	88,04	98,16	105,79	113,42
2 h	23,70	30,82	35,54	38,20	40,07	41,50	45,92	50,31	56,09	60,45	64,81
3 h	17,77	23,12	26,66	28,65	30,05	31,13	34,44	37,73	42,07	45,34	48,61
6 h	11,85	15,41	17,77	19,10	20,03	20,75	22,96	25,16	28,04	30,23	32,41
8 h	9,63	12,52	14,44	15,52	16,28	16,86	18,66	20,44	22,79	24,56	26,33
12 h	6,99	9,10	10,49	11,27	11,82	12,25	13,55	14,85	16,55	17,84	19,13
24 h	4,11	5,35	6,17	6,63	6,96	7,20	7,97	8,73	9,74	10,50	11,25

Fonte: O autor.

Tabela D.9 – Intensidade de chuvas para o município de Jataí - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	125,22	162,86	187,78	201,84	211,69	219,27	242,63	265,82	296,35	319,41	342,45
10 min	99,44	129,33	149,12	160,29	168,11	174,13	192,68	211,09	235,34	253,65	271,94
15 min	85,93	111,77	128,87	138,52	145,28	150,48	166,51	182,43	203,38	219,20	235,01
20 min	74,58	97,00	111,84	120,22	126,08	130,60	144,51	158,32	176,51	190,24	203,96
30 min	61,38	79,83	92,05	98,94	103,77	107,49	118,94	130,31	145,27	156,57	167,87
60 min	41,47	53,94	62,20	66,85	70,11	72,63	80,36	88,04	98,16	105,79	113,42
2 h	23,70	30,82	35,54	38,20	40,07	41,50	45,92	50,31	56,09	60,45	64,81
3 h	17,77	23,12	26,66	28,65	30,05	31,13	34,44	37,73	42,07	45,34	48,61
6 h	11,85	15,41	17,77	19,10	20,03	20,75	22,96	25,16	28,04	30,23	32,41
8 h	9,63	12,52	14,44	15,52	16,28	16,86	18,66	20,44	22,79	24,56	26,33
12 h	6,99	9,10	10,49	11,27	11,82	12,25	13,55	14,85	16,55	17,84	19,13
24 h	4,11	5,35	6,17	6,63	6,96	7,20	7,97	8,73	9,74	10,50	11,25

Fonte: O autor.

Tabela D.10 – Intensidade de chuvas para o município de Pirenópolis - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	116,55	147,50	167,99	179,55	187,64	193,88	213,08	232,15	257,25	276,20	295,14
10 min	92,56	117,13	133,40	142,58	149,01	153,96	169,21	184,35	204,29	219,34	234,38
15 min	79,99	101,23	115,29	123,22	128,78	133,05	146,23	159,32	176,54	189,55	202,55
20 min	69,42	87,85	100,05	106,94	111,76	115,47	126,91	138,26	153,21	164,50	175,78
30 min	57,13	72,30	82,35	88,02	91,98	95,04	104,45	113,80	126,10	135,39	144,68
60 min	38,60	48,85	55,64	59,47	62,15	64,22	70,58	76,89	85,20	91,48	97,75
2 h	22,06	27,92	31,79	33,98	35,51	36,69	40,33	43,94	48,69	52,28	55,86
3 h	16,54	20,94	23,85	25,49	26,64	27,52	30,25	32,95	36,52	39,21	41,89
6 h	11,03	13,96	15,90	16,99	17,76	18,35	20,16	21,97	24,34	26,14	27,93
8 h	8,96	11,34	12,92	13,81	14,43	14,91	16,38	17,85	19,78	21,24	22,69
12 h	6,51	8,24	9,38	10,03	10,48	10,83	11,90	12,97	14,37	15,43	16,49
24 h	3,83	4,85	5,52	5,90	6,17	6,37	7,00	7,63	8,45	9,08	9,70

Fonte: O autor.

Tabela D.11 – Intensidade de chuvas para o município de Posse - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	105,00	131,55	149,12	159,04	165,98	171,33	187,81	204,16	225,69	241,95	258,20
10 min	83,38	104,46	118,42	126,30	131,81	136,06	149,14	162,13	179,23	192,14	205,04
15 min	72,06	90,28	102,34	109,15	113,91	117,58	128,89	140,11	154,89	166,04	177,19
20 min	62,54	78,35	88,82	94,72	98,86	102,04	111,86	121,60	134,42	144,10	153,78
30 min	51,47	64,48	73,10	77,96	81,36	83,99	92,06	100,08	110,63	118,60	126,57
60 min	34,78	43,57	49,39	52,68	54,98	56,75	62,20	67,62	74,75	80,14	85,52
2 h	19,87	24,90	28,22	30,10	31,41	32,43	35,55	38,64	42,72	45,79	48,87
3 h	14,90	18,67	21,17	22,58	23,56	24,32	26,66	28,98	32,04	34,34	36,65
6 h	9,94	12,45	14,11	15,05	15,71	16,21	17,77	19,32	21,36	22,90	24,43
8 h	8,07	10,11	11,47	12,23	12,76	13,17	14,44	15,70	17,35	18,60	19,85
12 h	5,87	7,35	8,33	8,88	9,27	9,57	10,49	11,40	12,61	13,52	14,42
24 h	3,45	4,32	4,90	5,23	5,45	5,63	6,17	6,71	7,42	7,95	8,48

Fonte: O autor.

Tabela D.12 – Intensidade de chuvas para o município de Rio Verde - GO.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	117,40	148,48	169,06	180,67	188,79	195,05	214,34	233,49	258,69	277,72	296,74
10 min	93,23	117,91	134,25	143,47	149,92	154,90	170,21	185,41	205,43	220,55	235,65
15 min	80,57	101,90	116,02	123,99	129,56	133,86	147,10	160,23	177,53	190,59	203,65
20 min	69,92	88,43	100,69	107,60	112,44	116,17	127,66	139,06	154,07	165,41	176,74
30 min	57,55	72,79	82,87	88,56	92,55	95,62	105,07	114,45	126,81	136,14	145,46
60 min	38,89	49,18	55,99	59,84	62,53	64,60	70,99	77,33	85,68	91,99	98,29
2 h	22,22	28,10	32,00	34,19	35,73	36,92	40,57	44,19	48,96	52,56	56,16
3 h	16,67	21,08	24,00	25,65	26,80	27,69	30,43	33,14	36,72	39,42	42,12
6 h	11,11	14,05	16,00	17,10	17,87	18,46	20,28	22,10	24,48	26,28	28,08
8 h	9,03	11,42	13,00	13,89	14,52	15,00	16,48	17,95	19,89	21,35	22,82
12 h	6,56	8,29	9,44	10,09	10,55	10,90	11,97	13,04	14,45	15,51	16,58
24 h	3,86	4,88	5,55	5,94	6,20	6,41	7,04	7,67	8,50	9,13	9,75

Fonte: O autor.

Tabela D.13 – Intensidade de chuvas para o município de Roncador - DF.

Duração	Intensidade (mm/h) para cada T_r (anos)										
	2	5	10	15	20	25	50	100	250	500	1000
5 min	111,89	153,64	181,29	196,88	207,80	216,22	242,13	267,85	301,72	327,29	352,84
10 min	88,85	122,01	143,96	156,35	165,02	171,70	192,28	212,70	239,60	259,91	280,20
15 min	76,79	105,44	124,41	135,12	142,61	148,38	166,17	183,82	207,06	224,61	242,15
20 min	66,64	91,51	107,97	117,26	123,77	128,78	144,21	159,53	179,70	194,93	210,15
30 min	54,85	75,31	88,87	96,51	101,87	105,99	118,69	131,30	147,90	160,44	172,96
60 min	37,06	50,89	60,04	65,21	68,83	71,61	80,20	88,72	99,93	108,40	116,87
2 h	21,18	29,08	34,31	37,26	39,33	40,92	45,83	50,69	57,10	61,94	66,78
3 h	15,88	21,81	25,73	27,95	29,50	30,69	34,37	38,02	42,83	46,46	50,09
6 h	10,59	14,54	17,16	18,63	19,67	20,46	22,91	25,35	28,55	30,97	33,39
8 h	8,60	11,81	13,94	15,14	15,98	16,62	18,62	20,59	23,20	25,16	27,13
12 h	6,25	8,58	10,13	11,00	11,61	12,08	13,53	14,96	16,85	18,28	19,71
24 h	3,68	5,05	5,96	6,47	6,83	7,10	7,96	8,80	9,91	10,75	11,59

Fonte: O autor.