



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

IZABELA MENDONÇA DA SILVA MENDES
PAULINNE MAYSII MASTOP DO RÊGO

**DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO
PARÁ COM FOCO NAS OBRAS DE DRENAGEM RODOVIÁRIA**

BELÉM
2021

IZABELA MENDONÇA DA SILVA MENDES
PAULINNE MAYSÍ MASTOP DO RÊGO

**DETERMINAÇÃO DE EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO
PARÁ COM FOCO NAS OBRAS DE DRENAGEM RODOVIÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar

BELÉM
2021

IZABELA MENDONÇA DA SILVA MENDES

PAULINNE MAYSIMASTOP DO RÊGO

**Determinação de equações de chuvas intensas para o estado do Pará com
foco nas obras de drenagem rodoviária**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Belém, 06 de outubro de 2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar
Orientador



Prof. M. Sc. Francisco das Chagas de Oliveira Cacela Filho
Examinador interno



Eng. M. Sc. Rogério Riker de Souza
Examinador externo

Aprovado, com conceito EXC, em
06 de outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por seu amor e misericórdia nos momentos difíceis, iluminando nossas mentes e nos permitindo chegar até o final do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, mesmo e apesar dos obstáculos que surgiram em nosso caminho durante a graduação.

Agradecemos as nossas famílias, parentes e amigos, que nos deram força e entusiasmo durante as tribulações, nos incentivando e apoiando. E aquelas pessoas que nos ajudaram e incentivaram no decorrer da graduação, direta e indiretamente. Em especial ao nosso orientador Professor Dr. Marcelo Figueiredo Massulo Aguiar, que nos instruiu e repassou seus conhecimentos, da maneira mais clara e objetiva possível, nos permitindo alcançar nossos objetivos em relação ao tema que nos foi proposto.

RESUMO

Os projetos e obras de drenagem de rodovias, assim como diversas outras atividades econômicas, precisam de dados sobre o histórico de chuvas tais como duração, intensidade e frequência para que funcionem de maneira adequada. No entanto, para o Estado do Pará, há carência de estudos recentes que visem determinar equações de chuvas intensas, visto que essas equações são modificadas à medida que novos dados são coletados. Por isso, o objetivo do presente trabalho é gerar curvas intensidade-duração-frequência (IDF) e equações de chuvas intensas para 12 municípios paraenses, sendo um município por região de integração, a fim de abranger todo o território do estado. Para isto, foram analisadas as séries históricas de precipitação, disponíveis no Portal HIDROWEB e, a partir delas, foram obtidas as precipitações máximas anuais, médias e desvios-padrão. As curvas IDF foram obtidas a partir da distribuição de probabilidades de Gumbel e da desagregação de chuvas (Método das Isozonas). As equações de chuva foram obtidas por linearização e validadas pelo Coeficiente de Eficiência (COE). Os principais resultados foram: 12 equações de chuva intensas com boa confiabilidade, visto que os valores de COE foram superiores a 90%, sendo que a cidade de Marabá obteve o maior Coeficiente Médio (99,08%) e a cidade de Bragança resultou no menor COE Médio (94,60%). Assim, as maiores precipitações, para os dispositivos de drenagem, foram obtidas nas cidades de Cametá, registrando 54,01 mm/h, para um Tempo de Retorno (T_R) igual a 1 ano e um Tempo de Concentração (t_c) de 60 minutos, e em Paragominas, obtendo 228,37 mm/h para $T_R = 10$ anos e $t_c = 5$ minutos, e 192,80 mm/h, para $T_R = 25$ anos e $t_c = 10$ minutos. E as menores intensidades foram obtidas, majoritariamente, para a cidade de Breves, registrando 150,96 mm/h e 128,37 mm/h, para os pares de $T_R = 1$ ano e $t_c = 60$ minutos, $T_R = 25$ anos e $t_c = 10$ minutos, respectivamente, mas, também, para a cidade de Belém, com o registro de 150,96 mm/h para $T_R = 10$ anos e $t_c = 5$ minutos. Conclui-se que, as equações geradas são válidas para auxílio de projetos de sistemas de drenagem, atualizando as equações de chuvas existentes, para cada região de integração.

Palavras-chave: Chuvas intensas. Curvas IDF. Equações de chuva. Estado do Pará. Drenagem de rodovias.

ABSTRACT

Highway drainage projects and works, as well as many other economic activities, need historical rainfall data such as duration, intensity and frequency to function properly. However, for the State of Pará, there is a lack of recent studies that aim to determine intense rainfall equations, as these equations are modified as new data are collected. Therefore, the objective of this work is to generate intensity-duration-frequency curves (IDF) and intense rainfall equations for 12 municipalities in Pará, with one municipality per integration region, in order to cover the entire territory of the state. For this, the historical series of precipitation, available on the Portal HIDROWEB, were analyzed and, from them, the maximum annual precipitation, means and standard deviations were obtained. The IDF curves were obtained from the Gumbel probability distribution and rainfall disaggregation (Method of Isozones). The rainfall equations were obtained by linearization and validated by the Coefficient of Efficiency (COE). The main results were: 12 intense rainfall equations with good reliability, as the COE values were above 90%, with the city of Marabá having the highest Average Coefficient (99,08%) and the city of Bragança resulting in the lowest Average COE (94,60%). Thus, the highest rainfall for drainage devices was obtained in the cities of Cametá, recording 54,01 mm/h, for a Return Time (T_R) equal to 1 year and a Concentration Time (t_c) of 60 minutes, and in Paragominas, obtaining 228,37 mm/h for $T_R= 10$ years and $t_c= 5$ minutes, and 192,80 mm/h, for $T_R= 25$ years and $t_c= 10$ minutes. And the lowest intensities were mostly obtained for the city of Breves, recording 150,96 mm/h and 128,37 mm/h, for the pairs of $T_R= 1$ year and $t_c= 60$ minutes, $T_R= 25$ years and $t_c= 10$ minutes, respectively, but also for the city of Belém, with a record of 150,96 mm/h for $T_R= 10$ years and $t_c= 5$ minutes. It is concluded that the generated equations are valid to aid in drainage systems projects, updating the existing rainfall equations for each integration region.

Keywords: Intense Rains. IDF Curves. Rain Equations. State of Pará. Drainage of highways.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma para geração das equações de chuva	27
Figura 2 – Curva IDF gerada para o município de Ipameri – GO	28
Figura 3 – Mapa do Brasil dividido em Zonas proposto por Torrico (1974)	30
Figura 4 – Localização das estações pluviométricas no Estado do Pará utilizadas no estudo	34
Figura 5 – Localização das estações utilizadas no estudo	35
Figura 6 – Regiões de Integração do Estado do Pará	37
Figura 7 – Localização das estações pluviométricas no Estado do Pará	39
Figura 8 – Fluxograma do processo de geração das equações de chuvas intensas.	39
Figura 9 – Curvas IDF para o município de Belém	48
Figura 10 – Curvas IDF para o município de Altamira	49
Figura 11 – Curvas IDF para o município de Bragança	49
Figura 12 – Curvas IDF para o município de Breves	50
Figura 13 – Curvas IDF para o município de Cametá	50
Figura 14 – Curvas IDF para o município de Castanhal	51
Figura 15 – Curvas IDF para o município de Itaituba	51
Figura 16 – Curvas IDF para o município de Marabá	52
Figura 17 – Curvas IDF para o município de Oriximiná	52
Figura 18 – Curvas IDF para o município de Paragominas	53
Figura 19 – Curvas IDF para o município de Redenção	53
Figura 20 – Curvas IDF para o município de Tucuruí	54
Figura 21 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 5$ anos da estação de Belém	58
Figura 22 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 10$ anos da estação de Belém	59
Figura 23 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 15$ anos da estação de Belém	59
Figura 24 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 20$ anos da estação de Belém	59
Figura 25 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 25$ anos da estação de Belém	60

Figura 26 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 50$ anos da estação de Belém	60
Figura 27 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 100$ anos da estação de Belém	60
Figura 28 – Gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a estação de Belém	61
Figura 29 – Pluviometria Mensal de Altamira	84
Figura 30 – Pluviometria Mensal de Belém	84
Figura 31 – Pluviometria Mensal de Bragança	85
Figura 32 – Pluviometria Mensal de Breves	85
Figura 33 – Pluviometria Mensal de Cametá	86
Figura 34 – Pluviometria Mensal de Castanhal	86
Figura 35 – Pluviometria Mensal de Itaituba	87
Figura 36 – Pluviometria Mensal de Marabá	87
Figura 37 – Pluviometria Mensal de Oriximiná	88
Figura 38 – Pluviometria Mensal de Paragominas	88
Figura 39 – Pluviometria Mensal de Redenção	89
Figura 40 – Pluviometria Mensal de Tucuruí	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas	31
Tabela 2 – Classificação dos valores obtidos no COE	33
Tabela 3 – Parâmetros das equações de intensidades de chuvas para as estações analógicas e sintéticas de Altamira e para Souza et al. (2012)	36
Tabela 4 – Informações das séries históricas para os municípios estudados	38
Tabela 5 – Isozonas para cada município estudado	41
Tabela 6 – Tratamento de dados dos municípios estudados	44
Tabela 7 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Belém.....	46
Tabela 8 – Chuvas de 24 horas para o município de Belém	46
Tabela 9 – Coeficientes de desagregação de chuvas para a Isozona C	47
Tabela 10 – Precipitações de 24 horas, 1 hora e 6 minutos, para a cidade de Belém	47
Tabela 11 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos)....	48
Tabela 12 – Relação entre as intensidades das chuvas nos doze municípios para $T_R = 10$ anos	55
Tabela 13 – Relação entre as intensidades das chuvas nos doze municípios para $T_R = 100$ anos	55
Tabela 14 – Obtenção da constante de amorfismo (c) para a cidade de Belém	57
Tabela 15 – Equações da reta e valores (d), $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ extraídos das Figuras 21 a 27, para a cidade de Belém	61
Tabela 16 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) extraídos da Figura 28, para a cidade de Belém	62
Tabela 17 - Parâmetros a, b, c e d das equações de chuvas intensas	62
Tabela 18 – Valores do COE para as cidades de Altamira, Bragança, Breves, Cametá, Castanhal e Itaituba	64
Tabela 19 – Valores do COE para as cidades de Marabá, Oriximiná, Paragominas, Redenção e Tucuruí	65
Tabela 20 – Intensidade de precipitação em mm/h, para um tempo de retorno de 15 anos e um tempo de duração de 30 minutos para os municípios estudados	67

Tabela 21 – Comparação entre os resultados obtidos para o município de Altamira, com os resultados apresentados por Cruz <i>et al.</i> (2019)	68
Tabela 22 – Comparação entre as intensidades para o município de Altamira, com os resultados apresentados por Cruz <i>et al.</i> (2019), para $T_R = 15$ anos e $t_c = 30$ minutos	69
Tabela 23 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem superficial	70
Tabela 24 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem subsuperficial	71
Tabela 25 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem de transposição de talvegues	71
Tabela 26 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem superficial, utilizando as equações de Souza <i>et al.</i> (2012)	73
Tabela 27 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem subsuperficial, utilizando as equações de Souza <i>et al.</i> (2012)	73
Tabela 28 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem de transposição de talvegues, utilizando as equações de Souza <i>et al.</i> (2012)	74
Tabela 29 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Altamira	90
Tabela 30 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Belém	90
Tabela 31 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Bragança	90
Tabela 32 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Breves	91
Tabela 33 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Cametá	91
Tabela 34 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Castanhal	91
Tabela 35 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Itaituba	92
Tabela 36 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Marabá	92
Tabela 37 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Oriximiná	92

Tabela 38 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Paragominas	93
Tabela 39 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Redenção	93
Tabela 40 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Tucuruí	93
Tabela 41 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Altamira.	94
Tabela 42 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Bragança	94
Tabela 43 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Breves...	94
Tabela 44 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Cametá.	95
Tabela 45 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Castanhal	95
Tabela 46 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Itaituba .	95
Tabela 47 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Marabá .	95
Tabela 48 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Oriximiná	96
Tabela 49 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Paragominas	96
Tabela 50 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Redenção	96
Tabela 51 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Tucuruí .	96
Tabela 52 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Altamira	97
Tabela 53 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Bragança	97
Tabela 54 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Breves	97
Tabela 55 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Cametá	98
Tabela 56 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Castanhal	98
Tabela 57 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Itaituba	98

Tabela 58 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Marabá	98
Tabela 59 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Oriximiná	99
Tabela 60 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Paragominas	99
Tabela 61 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Redenção	99
Tabela 62 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Tucuruí	99
Tabela 63 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Altamira	100
Tabela 64 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Altamira	100
Tabela 65 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Bragança	100
Tabela 66 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Bragança	100
Tabela 67 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Breves	101
Tabela 68 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Breves	101
Tabela 69 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Cametá	101
Tabela 70 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Cametá	101
Tabela 71 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Castanhal	102
Tabela 72 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Castanhal	102

Tabela 73 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Itaituba	102
Tabela 74 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Itaituba	102
Tabela 75 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Marabá	103
Tabela 76 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Marabá	103
Tabela 77 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Oriximiná	103
Tabela 78 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Oriximiná	103
Tabela 79 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Paragominas	104
Tabela 80 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Paragominas	104
Tabela 81 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Redenção	104
Tabela 82 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Redenção	104
Tabela 83 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Tucuruí	105
Tabela 84 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) , extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Tucuruí	105
Tabela 85 – Coeficientes “K”, “a”, “b” e “c” das equações de chuvas intensas ajustadas para várias localidades do Estado do Pará e respectivos coeficientes de determinação (R^2) e duração das séries históricas	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Obtenção de $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Belém	58
Quadro 2 – Valores dos Eventos Observados e Simulados para a cidade de Belém	64
Quadro 3 – Comparação entre os resultados obtidos e os apresentados por Souza et al. (2012)	66

LISTA DE ABREVIATURAS

Apud – citado por segundo

cap. – capítulo

ed – edição

E_m – Evento observado

E_s – Evento simulado

$\overline{E_s}$ – Média do evento simulado

et al – e outros

i – Intensidade

K_{TR} – Fator de frequência

n – número do fascículo

p – página

S – Desvio padrão da precipitação máxima

S.I – Sem Informação

t_c – Tempo de Concentração

T_R – Tempo de Retorno

v – volume

\overline{X} – Média da precipitação máxima

X_{TR} – Precipitação máxima diária para determinado tempo de retorno

Y_{TR} – Variável reduzida da distribuição de Gumbel para determinado tempo de retorno

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional das Águas

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CMORPH – Climate Prediction Center Morphing Technique

COE – Coeficiente de Eficiência

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

IDF – Intensidade-Duração-Frequência

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

RHN – Rede Hidrometeorológica Nacional

SNIRH – Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Naturais

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
1.2 Justificativa	20
1.3 Estrutura do trabalho	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Importância de se registrar o histórico de chuvas	22
2.2 Geração das Curvas Intensidade-Duração-Frequência e determinação das Equações de Chuvas Intensas	26
3 MÉTODO	37
3.1 Caracterização da área de estudo	37
3.2 Método	39
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
4.1 Apresentação e análise dos dados das Estações Pluviométricas	43
4.2 Geração das curvas Intensidade- Duração- Frequência (IDF)	45
4.3 Geração das equações de chuvas intensas	56
4.4 Validação das equações de chuvas intensas	63
4.5 Confronto de resultados	65
4.6 Chuvas de Projeto para drenagem de rodovias	69
5 CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS	79
APÊNDICE A – PLUVIGRAMAS DOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS	84
APÊNDICE B – MÁXIMAS CHUVAS MENSAS REGISTRADAS PARA AS SÉRIES HISTÓRICAS DOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS	90
APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES PELO MÉTODO DE GUMBEL PARA AS ESTAÇÕES EM ESTUDO (EXCETO BELÉM)	94

APÊNDICE D – INTENSIDADE DE CHUVA PARA OS MUNICÍPIOS ESTUDADOS (EXCETO BELÉM).....	97
APÊNDICE E – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS PARA AS CIDADES EM ESTUDO (EXCETO BELÉM)	100
ANEXO A	106

1 INTRODUÇÃO

As obras hidráulicas, como sistemas de drenagem urbana e de rodovias, bem como atividades de produção de energia e agricultura, dependem diretamente das características das chuvas para o seu dimensionamento e bom funcionamento (PEREIRA *et al.*, 2017). Por isso, há interesse em se registrar a ocorrência de chuvas ao longo dos anos. Esta medição é feita por órgãos federais, estaduais e municipais, responsáveis pela instalação e manutenção de estações pluviométricas, compostas por equipamentos de medição de precipitação, como pluviômetros e pluviógrafos, os quais registram a precipitação diária, a fim de compor uma série histórica de dados de chuva com o passar dos anos. Além disso, é importante que esta série possua dados longos, contínuos e confiáveis, para o melhor estudo da ocorrência de chuvas e melhor definição dos parâmetros das equações de chuva.

As chuvas de projeto são as precipitações críticas que podem ocorrer em um determinado local, as quais são definidas por meio das relações hidrológicas, como as Equações de Chuvas Intensas. Essas equações são geradas para cada localidade, por meio das séries históricas de chuvas da região, e possuem grande importância para diversas atividades. Vale destacar que, as primeiras equações para o Brasil foram definidas por Otto Pfafstetter (1957), para 98 postos pluviográficos e pluviométricos e, a partir deste estudo, foram atualizando as relações IDF para diversos municípios brasileiros.

As equações de chuvas intensas são imprescindíveis para o dimensionamento de sistema de drenagem urbana e rodoviária, visto que problemas como alagamentos, inundações e erosão dos solos são causados pela chuva, atrelada a má gestão urbana, e para conter esses problemas necessita-se dimensionar infraestruturas hidráulicas com capacidade de suportar a chuva mais intensa, além do melhor gerenciamento das infraestruturas urbanas, por meio dos órgãos competentes. Além disso, o conhecimento dos regimes de chuvas, por meio da pluviometria mensal, que retrata a média de chuvas por mês, tornou-se essencial para a logística e planejamento da agricultura e para a produção de energia hidrelétrica, pois dependem do volume de água para seu devido funcionamento.

Com isso, compreende-se a importância em se estudar o histórico de chuvas e desenvolver as equações de chuvas intensas, porém, ressalta-se que este estudo deve ser contínuo e as equações necessitam ser atualizadas com o passar do tempo, visto que as chuvas sofrem influência das mudanças climáticas, que alteram

seu regime. Ou seja, é necessário entender se as precipitações diárias têm aumentado ou diminuído ao longo dos anos, fator que causará alterações nas equações de chuvas intensas para cada local.

Vale ressaltar que as mudanças climáticas podem ocorrer por fatores naturais, como a incidência de raios solares e movimento da terra, o que causa períodos de chuvas e secas ao longo do ano. Em contrapartida, o ser humano tem influenciado para a ocorrência das alterações climáticas, como pode ser visto com o aumento do efeito estufa, que tem causado o aquecimento da superfície terrestre, alterando o regime de chuvas, visto que o ciclo hidrológico da água depende, diretamente, da temperatura terrestre, por isso, em diversos lugares, tem-se observado a ocorrência de chuvas intensas atípicas e secas extremas, causadas pelas mudanças climáticas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Sendo assim, por conta das constantes ou drásticas alterações no clima, afirma-se a necessidade em se registrar o histórico de chuvas e, a partir disso, desenvolver e atualizar equações de chuvas intensas e as curvas IDF, os quais são objetivos do presente trabalho.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Gerar equações de chuvas intensas para 12 municípios do Estado do Pará, sendo uma para cada região de integração do estado, utilizando o método de Gumbel e o método de Desagregação de Chuvas das Isozonas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os dados históricos de chuvas disponíveis;
- Gerar as curvas de Intensidade-Duração-Frequência para cada cidade;
- Determinar os parâmetros das equações de chuva para cada município estudado;
- Realizar análise comparativa das equações obtidas com as disponibilizadas em trabalhos anteriores;
- Determinar as chuvas de projeto para os dispositivos de drenagem superficial, subsuperficial e de transposição de talvegues.

1.2 Justificativa

O Estado do Pará, por seu clima úmido, caracterizado por alta frequência de chuvas intensas e duradouras, retrata intensos eventos hidrológicos, como enchentes e inundações. As curvas IDF, que relacionam as principais características das chuvas, são de elevada importância, podendo prever precipitações críticas para os municípios do estado, contribuindo para a precaução de catástrofes associados a chuvas. Em obras de drenagem, por exemplo, as chuvas vinculadas as falhas no planejamento urbano podem causar alagamentos, enchentes e inundações de dispositivos de drenagem (como os bueiros de transposição de talwegues), podendo sobrecarregá-los e/ou rompê-los, ocasionando o acúmulo de precipitação na superfície e interrupção do tráfego nas rodovias. Com isso, a partir destas relações, desenvolve-se as equações de curvas intensas, em função do período de retorno das chuvas e seu tempo de concentração, podendo-se analisar, por meio de probabilidade, as precipitações máximas para determinado local, as quais serão utilizadas em obras hidráulicas.

Dessa maneira, ao longo dos anos, algumas equações foram desenvolvidas para o Estado do Pará, porém, sabendo-se da inviabilidade em se realizar o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas a partir de equações com séries históricas antigas, é importante atualizar as equações de chuvas intensas, a fim de contribuir para o estudo hidrológico, principalmente, para o Estado do Pará, em razão do seu clima, com grande ocorrência de chuvas e poucos estudos sobre esta área.

Visto a escassez de equações previamente determinadas e a importância destas, o presente trabalho contribui com os estudos acadêmicos da área ao gerar equações de chuvas intensas para cidades distribuídas pelo território paraense, auxiliando no projeto de obras de drenagem, visando evitar erros que causam super ou subdimensionamentos, além de auxiliar em atividades agrícolas e energéticas.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi estruturado em 5 capítulos. Além desta introdução, o capítulo 2 discorre sobre a revisão da literatura técnica, descrevendo a importância dos registros de chuvas, de como realizam-se as medições e os portais onde se encontram as séries históricas de precipitação. Além disso, o capítulo destaca o

procedimento de cálculo e os métodos disponíveis, para obtenção das curvas IDF e das equações de chuvas intensas, destacando os métodos de Gumbel e das Isozonas para geração das curvas e descrevendo a linearização de Villela (1975) e do Coeficiente de Eficiência, para obtenção e validação das equações, respectivamente. Além de ressaltar estudos prévios semelhantes, que obtiveram equações de chuvas intensas para o Estado do Pará e para outros estados do Brasil.

O desenvolvimento do método de trabalho está contido no Capítulo 3, descrevendo o processo de cálculo, a fim de desenvolver as curvas IDF e as equações de chuva para as cidades de Altamira, Belém, Bragança, Breves, Cametá, Castanhal, Itaituba, Marabá, Oriximiná, Paragominas, Redenção e Tucuruí.

O Capítulo 4 apresenta os dados obtidos para os doze municípios das regiões de integração do Estado do Pará e exhibe, em detalhe, o processo para a geração das curvas IDF e das equações de chuvas intensas, com ênfase na cidade de Belém, permitindo que o mesmo procedimento seja replicado para as outras 11 cidades. Em seguida, exhibe-se a validação das equações de chuvas obtidas, a fim de atestar a confiabilidade dos resultados. Além disso, faz-se a comparação das equações de chuvas intensas obtidas na pesquisa com equações disponíveis na literatura para os municípios estudados e calcula-se as chuvas de projeto típicas de elementos de drenagem superficial, subsuperficial e de transposição de talvegues de rodovias, visando alcançar os objetivos dessa pesquisa,

Por fim, no capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho, ressaltando os principais resultados obtidos, de modo objetivo e direto, além de propor sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos da área de medição de chuva e a importância do registro de série histórica de dados, bem como os processos para a geração de curvas de intensidade-duração-frequência e obtenção de equações de chuva. O capítulo encerra com relatos de estudos semelhantes que geraram equações de chuvas para municípios paraenses e de outros estados.

2.1 Importância de se registrar o histórico de chuvas

A precipitação possui elevada influência no planejamento e no funcionamento de diversas atividades, como produção de energia e construção de obras hidráulicas, com isso, é necessário conhecer algumas características da chuva, como Altura Pluviométrica, Intensidade, Duração e Frequência. A altura pluviométrica expressa a espessura média da lâmina d'água precipitada, já a intensidade da chuva diz respeito a esta altura por unidade de tempo, a duração se trata da unidade de tempo em que perdurar a chuva e a frequência retrata a ocorrência da precipitação. Para dada Intensidade de chuva sobre uma bacia, a duração será igual ao tempo de concentração da bacia, quando a vazão for constante e máxima, por isso, a importância em conhecer a relação intensidade, duração e frequência da precipitação, principalmente, para dimensionamento de infraestruturas hidráulicas (DAEE/USP, 1999).

A análise das chuvas intensas de um determinado local, ao longo do tempo, é importante para a obtenção das chuvas de projeto, parâmetro importante para o planejamento de atividades e obras hidráulicas. A chuva de projeto é calculada por meio das Equações de Chuvas Intensas, as quais são obtidas mediante o tratamento estatístico dos dados históricos de chuva. As séries históricas de chuvas são obtidas por meio de equipamentos coletores de precipitação, como os pluviômetros e pluviógrafos.

O pluviômetro é um aparelho meteorológico utilizado para recolher e medir a quantidade de líquidos ou sólidos precipitados durante um determinado tempo e local, ou seja, é lida a altura total de água precipitada sendo que seus registros são sempre fornecidos em milímetros por dia ou em milímetros por chuva. O pluviógrafo, por sua vez, é o aparelho que possui as mesmas características do pluviômetro, com adição da capacidade de registrar o tempo, ou seja, registra simultaneamente a

quantidade e a duração da precipitação, dispondo de dispositivo de registro das medições (LOPES, 2020; SIMÕES *et al.*, 2008).

O pluviômetro é mais utilizado devido à simplicidade de sua instalação, operação e custo. Atualmente, uma opção mais vantajosa para se cobrir áreas maiores são os pluviômetros digitais que coletam e armazenam os dados diretamente na internet, podendo ser acessados mesmo em longas distâncias. Já o pluviógrafo é mais encontrado nas estações meteorológicas, em decorrência do alto custo desse equipamento.

Dentre os entes que fazem o registro de chuvas por meio desses equipamentos, pode-se mencionar o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o qual possui a missão de prover dados meteorológicos. Além deste, há a Agência Nacional das Águas (ANA), uma autarquia cujo objetivo é gerir os recursos hídricos, regular o acesso a água no Brasil, promovendo seu uso sustentável e, também, é responsável por postos pluviométricos e fluviométricos espalhados pelo Brasil, provendo importantes dados hidrológicos que são base para estudos, ajudam a definir políticas para investimentos, a reagir a eventos críticos e saber a real disponibilidade das águas.

A Agência Nacional de Águas (ANA) é responsável pela coordenação da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), um sistema que hoje abriga 4.641 pontos de monitoramento no país divididos em estações que registram parâmetros relacionados aos rios (1.874), como níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos, e outros que monitoram principalmente as chuvas (2.767) (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2021).

Há outros órgãos responsáveis pela disponibilização do registro de chuvas, como o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), que realiza o monitoramento e prevenção de desastres naturais e, também, entidades e secretarias municipais que auxiliam na provisão de dados hidrológicos. Vale destacar que os registros disponibilizados por estes órgãos se reúnem no Portal HIDROWEB, uma ferramenta do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que abrange um acervo de dados sobre chuva, clima, níveis fluviais, dentre outras informações hidrometeorológicas. Além de dados históricos, são fornecidos dados em tempo real os quais podem ser acessados no Portal HIDRO-TELEMETRIA. Para o Estado do Pará, além do Portal HIDROWEB,

tem-se ainda, o Portal HIDROMET, que disponibiliza os dados atualizados de nível do rio, chuva e vazão, além de indicar a tendência de enchente ou vazante.

“No Brasil, a densidade da rede de pluviógrafos é pequena e os períodos de observação são curtos, o que implica em análises estatísticas menos precisas.” (BATISTA *et al.*, 2018, p. 2). Logo, na ausência de dados pluviográficos, utiliza-se os dados pluviométricos, onde faz-se o tratamento dos registros históricos e aplica-se os métodos de desagregação de chuvas para análise das chuvas intensas. Esse procedimento é importante para a gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento de atividades, como geração de energia, agricultura, navegação, além de obras hidráulicas de pequeno e grande porte, como barragens, vertedouros, drenagem urbana e sistemas prediais de drenagem e águas pluviais, pois auxilia na tomada de decisões.

O conhecimento do histórico de chuvas (início da estação chuvosa, período de maior ocorrência de chuvas, períodos de seca e de chuvas intensas) permite, na agricultura, planejar ações e facilitar a tomada de decisão, visando a produtividade das atividades que devem ser executadas (plantio, colheita, irrigação, entre outras), de acordo com o clima e ocorrência de chuvas em cada época do ano. Além disso, os registros de chuva auxiliam no planejamento de geração de energia elétrica por meio de hidrelétricas, as quais dependem diretamente do volume de água, ou seja, do aumento da vazão do rio, que ocorre por conta da frequência das chuvas (ALIANÇA GERAÇÃO DE ENERGIA S.A., 2021). Sendo assim, conhecer a intensidade, a duração e a frequência das chuvas, possibilita a correta elaboração e dimensionamento de obras hidráulicas, que auxiliam na produção de energia elétrica.

Em relação às infraestruturas hidráulicas, o estudo de chuvas intensas tem elevada importância para seu projeto e execução. São exemplos de obras hidráulicas; as obras de drenagem urbana, vertedouros de barragens, drenagem e água pluvial residencial; estes dependem das chuvas intensas para escolha do tipo de obra a ser projetada, seu dimensionamento e execução, visando suportar a precipitação e manter a qualidade da estrutura.

É importante destacar que a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, causados por meios naturais, pelas mudanças climáticas, que aumentam a ocorrência e a intensidade de chuvas; além do mau planejamento urbano, como o uso incorreto e a ocupação do solo, assim como o acúmulo de lixo descartado

erroneamente nas vias; promovem cheias e acúmulo da água, provocando enchentes e alagamentos.

Esses eventos hidrológicos e o planejamento urbano das cidades possuem grande influência nas obras hidráulicas, visto que há a possibilidade de sobrecarregá-las, impedindo seu funcionamento e causando transbordamentos, podendo até afetar a estrutura da construção. Frequentemente encontram-se relatos sobre transbordamento ou rompimento de obras de drenagem (vertedouros de barragens, canais, entre outros) devido às chuvas extremas oriundas das mudanças climáticas, o que reforça ainda mais a ideia de se estudar as séries históricas de chuvas de cada região, antes de projetar e construir uma obra. Como exemplo, tem-se o rompimento parcial de uma barragem na divisa da Bahia com Sergipe, em julho de 2019, causado pelas fortes chuvas (AGÊNCIA BRASIL, 2019). Outro exemplo foi a Barragem de Sairé, no Agreste de Pernambuco, que rompeu após as fortes chuvas em junho de 2020, o que resultou no desalojamento de inúmeras pessoas nas proximidades (MIRANDA, 2020; PESSOA, 2020).

Em relação a drenagem de rodovias, é importante frisar que se trata do conjunto de instalações que tem como objetivos a captação, a condução e o deságue seguro da água proveniente da chuva, de modo que se mantenha a segurança e durabilidade da via (DNIT, 2006). Este objetivo é alcançado por meio das obras de transposição de talvegues, que captam a água que cai ao redor da rodovia (como o dimensionamento de bueiros, pontilhões e pontes); das obras de drenagem superficial, que conduzem a água que escoar sobre o corpo estradal e taludes; bem como, as obras de drenagem subsuperficial e profunda, que captam a precipitação que infiltram na plataforma e nos taludes, e ao redor da via, respectivamente. Sabendo disso, vê-se que, para o dimensionamento e bom funcionamento do sistema de drenagem, é essencial determinar a precipitação máxima capaz de incidir sobre e no entorno das rodovias, e a vazão de contribuição para as infraestruturas de drenagem, fazendo seu dimensionamento de forma que suporte a vazão, para cada período de retorno e tempo de concentração a serem adotados.

Sendo assim, para o correto dimensionamento dos dispositivos do sistema de drenagem, são necessários estudos hidrológicos que tem a caracterização do regime pluviométrico, que permitem calcular a vazão de projeto para que se determine o tipo de obra que deve ser executada em cada curso d'água (DELGADO,

2008). As mudanças climáticas, que alteram o regime das chuvas, também podem afetar o sistema de drenagem, como exemplo temos: o rompimento de um bueiro de transposição de talvegue no Km-236 da BR-010 no município de Ipixuna do Pará, em abril de 2019, em virtude do forte volume de água gerado pelas chuvas, que ocasionou interrupção da rodovia (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2019). Outro exemplo foi o rompimento de dois bueiros e do encabeçamento da ponte sobre o rio Rabecão, próximo ao município de Xinguara, na BR-155/PA, devido às fortes chuvas que assolaram o Estado do Pará em março de 2020 (MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA, 2020). Assim como o rompimento de uma ponte na Zona da mata em Santa Bárbara do Tugúrio, em janeiro de 2021, onde o aterro no encabeçamento da ponte foi rompido devido às fortes chuvas na região (AGÊNCIA MINAS, 2021).

Mudanças no clima que alterem o regime de chuvas podem provocar o aumento da ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações e longos períodos de seca. Esses eventos afetam a oferta de água, ameaçando o suprimento de recursos hídricos para todos (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Logo, vale ressaltar que as mudanças climáticas no regime de chuvas geram grandes impactos em diversos setores, como na geração e distribuição de energia; nas obras hidráulicas, nos recursos hídricos e na agricultura. Além disso, as mudanças climáticas, alteram as equações de chuva previamente calculadas e as chuvas de projeto definidas para diversas atividades econômicas. Sendo assim, considerando as infraestruturas hidráulicas, torna-se inviável o dimensionamento com base em séries históricas antigas, necessitando a constante atualização das equações de chuva.

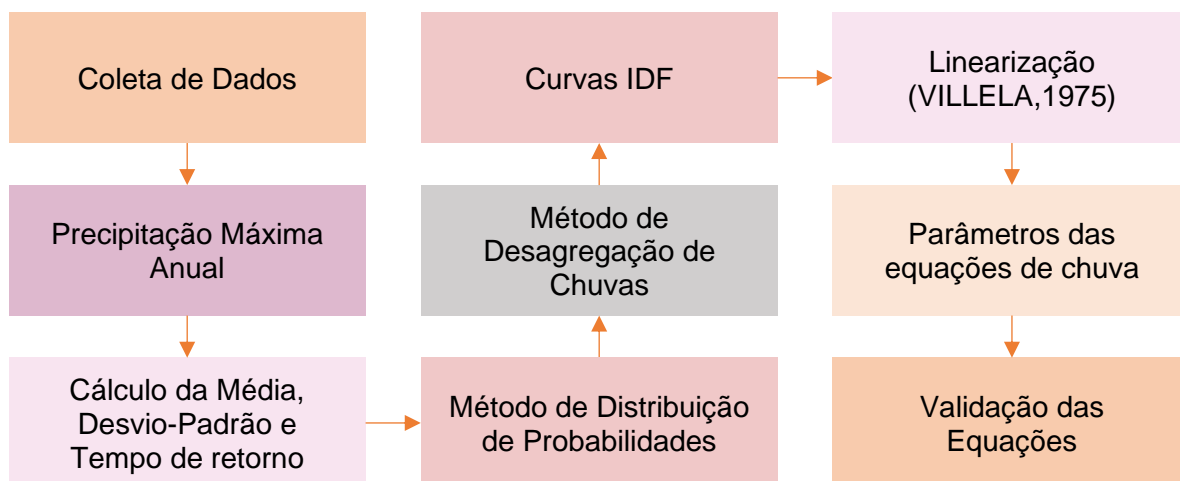
2.2 Geração das Curvas Intensidade-Duração-Frequência e determinação das Equações de Chuvas Intensas

“A equação da chuva, particular de cada localidade, é obtida a partir de registros de pluviógrafos, estabelecendo-se para cada duração de chuva, as máximas intensidades.” (STUDART, 2006, p. 5.14) e esta é definida em função do Tempo de Retorno (T_R) e do Tempo de Concentração (t_c). O tempo de retorno, definido em anos, é escolhido de acordo com a atividade a ser desenvolvida, usualmente, utilizam-se os valores de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos e este

refere-se ao intervalo de ocorrência da chuva de mesma intensidade. É importante frisar que a frequência é o inverso do tempo de retorno e implica na probabilidade dessa chuva calculada ocorrer. Assim, adotando o tempo de retorno de 10 anos, por exemplo, significa que a chuva determinada a partir das equações, será a máxima que ocorrerá, em média, de 10 em 10 anos, ou corre o risco de 10% de ocorrer no ano (SECRETARIA DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO, 2017). Além disso, a equação de chuva é definida, também, em função do tempo de concentração, que retrata o período, em minutos, a partir do início da chuva, que leva para que toda bacia contribua para o escoamento superficial, até chegar em um ponto de controle (SECRETARIA DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO, 2017).

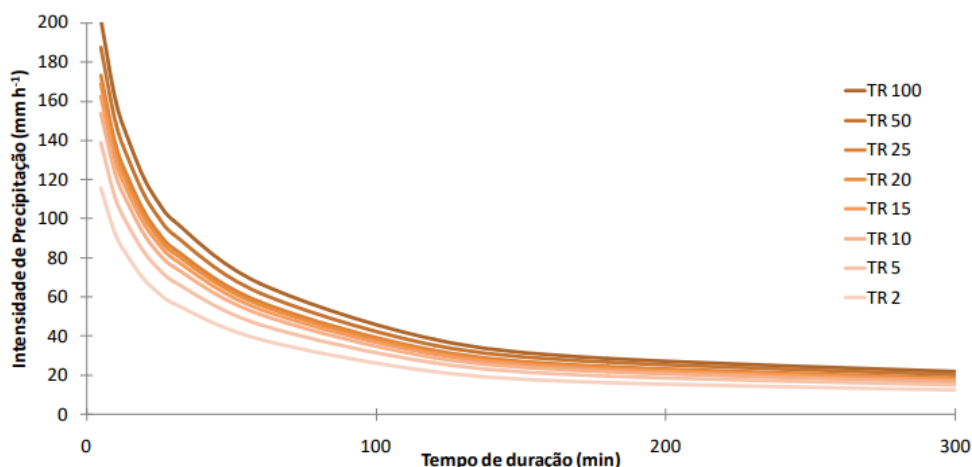
“Devido à escassez de pluviógrafos no Brasil, métodos de desagregação da chuva diária medida por pluviômetros foram desenvolvidos como alternativa para geração das equações IDF.” (BATISTA *et al.*, 2018, p. 1). Para se obter a relação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) e gerar as equações a partir da IDF, tem-se diversos métodos de cálculo, que seguem as etapas do fluxograma apresentando na Figura 1. A Figura 2, apresenta um exemplo das curvas IDF, geradas para o município de Ipameri – GO.

Figura 1 – Fluxograma para geração das equações de chuva



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 2 – Curva IDF gerada para o município de Ipameri - GO



Fonte: Pereira *et al.* (2017).

Para se utilizar dados de qualidade na obtenção das equações IDF, considerando séries anuais ou parciais, a série histórica disposta para estudo deve ser baseada na quantidade de anos de coleta e na qualidade dos dados (BACK, 1997 apud OLIVEIRA, 2017, p. 24). “A determinação da relação IDF deve ser deduzida a partir de uma série histórica suficientemente longa e representativa dos eventos extremos ao local, considerando-se séries anuais ou séries parciais.” (GOMES, 2011, p. 16).

É importante, inicialmente, fazer uso das distribuições de probabilidade para tratamento e ajuste dos dados, visando observar o seu comportamento, isto se dá pela impossibilidade de definir chuvas de projeto para longos tempos de retorno, como 100 anos ou mais, visto que não há registros de chuvas com longo período. Sabendo disso, para o processo de cálculo da distribuição de probabilidade, Batista *et al.* (2018) cita cinco métodos: Gamma II, Gamma III, Log Normal II, Log Normal III e Gumbel. Dos métodos de distribuição de probabilidade o mais usual é o Método de Gumbel, desenvolvido por Emil Julius Gumbel, que visa “modelar os valores máximos de ocorrência de um determinado fenômeno de interesse” (COTTA *et al.*, 2016, p. 204).

Para ajuste dos valores de máxima precipitação diária anual encontrados, foi utilizada a distribuição estatística de Gumbel. Essa escolha se justifica por ser a distribuição de extremos mais utilizada na análise de frequência de variáveis hidrológicas, além de apresentar vantagens em relação as demais, pois para o seu uso não é preciso consultar tabelas de probabilidade, de forma que o ajuste é feito apenas utilizando a média e o desvio padrão dos valores de precipitação máxima diária anual (PEREIRA *et al.*, 2017, p. 236).

Os tempos de retorno, adotados nesse método são de 5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos, visando selecionar os eventos que tiveram as maiores precipitações diárias. Para isso, utilizou-se a sequência 1, 2 e 3 de equações, conforme Pinto (1995), as quais apresentam os parâmetros estatísticos para determinação da precipitação máxima diária (X_{TR}) para cada Tempo de Retorno (T_R), mediante os dados de precipitação máxima (X_{TR}) de cada ano da série histórica e sua média (\bar{X}) e desvio-padrão (S).

$$Y_{TR} = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right] \quad (1)$$

$$K_{TR} = -0,45 + 0,78 \times Y_{TR} \quad (2)$$

$$X_{TR} = \bar{X} + K_{TR} \times S \quad (3)$$

Em que:

Y_{TR} → variável reduzida da distribuição de Gumbel;

T_R → Tempo de retorno (anos);

X_{TR} → precipitação máxima diária para determinado TR (mm);

K_{TR} → fator de frequência (adimensional);

\bar{X} → média da precipitação máxima diária (mm);

S → desvio padrão dos dados de precipitação máxima diária (mm).

Após a aplicação do método de Gumbel, é importante realizar a desagregação de chuvas, transformando as chuvas de 24 horas em chuvas de menor duração. Para o cálculo da desagregação da chuva diária, há diversos métodos: de Bell, da CETESB e das Isozonas, dos quais, será dado maior ênfase ao Método da Isozonas, o qual foi escolhido para ser empregado nesse estudo.

“O método de Bell (1969) consiste na associação da altura pluviométrica de uma chuva intensa para um tempo de duração padrão de 60 min e período de retorno de dois anos” (BATISTA, 2018, p. 23).

O método de desagregação de DAEE/ CETESB (1980), foi desenvolvido pelo Departamento de Águas e Energia do Estado de São Paulo e a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, publicado em São Paulo no livro “Drenagem urbana: Manual de Projeto”. Neste método, utiliza-se o fator médio de 1,14 para a

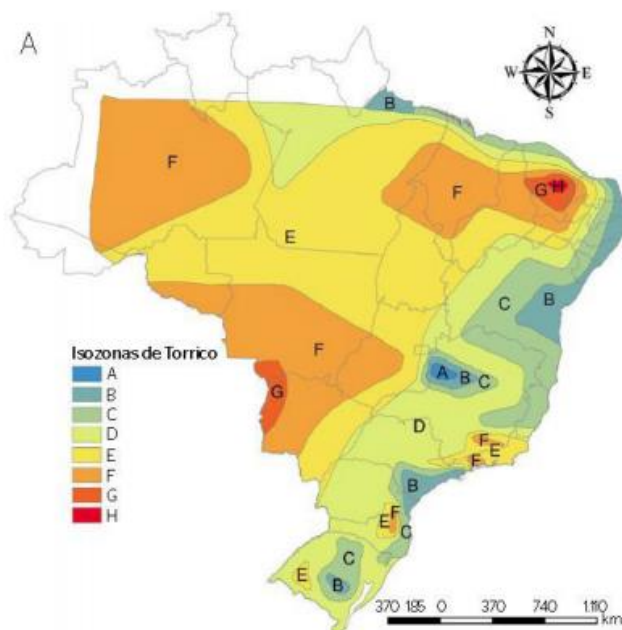
desagregação da chuva máxima de 1 dia em chuva de 24 h e para os demais tempos de duração, empregam-se os coeficientes de desagregação tabelados, disponíveis no método (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

O método das Isozonas é muito utilizado para chuvas intensas de curta duração, principalmente em locais onde há escassez de postos pluviográficos. Este método relaciona os dados de postos pluviométricos e pluviográficos, permitindo deduzir precipitações para período inferiores a 24 horas (BATISTA, 2018).

Entretanto, para aplicação do método, multiplicam-se as precipitações calculadas anteriormente pelo fator de segurança $1,10 \cong 1,095$ (valor proposto pelo engenheiro José Jaime Taborga Torrico), pois os valores de chuva disponíveis nas séries históricas podem iniciar em um dia e terminar em outro, e ao fazer essa multiplicação pelo fator de segurança proposto, os valores das chuvas são convertidos para chuvas de 24h.

Posteriormente, faz-se a mudança das precipitações em chuvas de 24h, 1h e 6 min, com base em coeficientes tabelados, para cada período de retorno (5, 10, 20, 25, 50 e 100 anos). Os coeficientes são obtidos por meio da divisão do Brasil em zonas de A a H, como indicado na Figura 3, nas quais verifica-se em qual faixa está localizada a estação pluviométrica escolhida. Ao determinar a zona escolhida, trabalha-se com os coeficientes de desagregação, mostrados na Tabela 1, para a faixa definida.

Figura 3 – Mapa do Brasil dividido em Zonas proposto por Torrico (1974)



Fonte: Basso *et al.*, 2016 apud Torrico, 1974.

Tabela 1 – Coeficientes de desagregação das chuvas intensas associados às isozonas

Zonas	1h/24h (%)										6 min/24h (%)	
	Tempo de Recorrência (anos)										T _R (anos)	
	5	10	15	20	25	30	50	100	1000	10000	5-50	100
A	36,2	35,8	35,6	35,5	35,4	35,3	35,0	34,7	33,6	32,5	7,0	6,3
B	38,1	37,8	37,5	37,4	37,3	37,2	36,9	36,6	35,4	34,3	8,4	7,5
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	39,1	38,8	38,4	37,2	36,0	9,8	8,8
D	42,0	41,6	41,4	41,2	41,1	41,0	40,7	40,3	39,0	37,8	11,2	10,0
E	44,0	43,6	43,3	43,2	43,0	42,9	42,6	42,2	40,9	39,6	12,6	11,2
F	46,0	45,5	45,3	45,1	44,9	44,8	44,5	44,1	42,7	41,3	13,9	12,4
G	47,9	47,4	47,2	47,0	46,8	46,7	46,4	45,9	44,5	43,4	15,4	13,7
H	49,9	49,4	49,1	48,9	48,6	48,6	48,3	47,8	46,3	44,8	16,7	14,9

Fonte: Torrico, 1974.

Sendo assim, após aplicar a desagregação com os coeficientes da Tabela 1, é possível gerar as curvas IDF para cada série histórica. É importante frisar que para compreender a relação entre a intensidade, duração e frequência das chuvas, para definição das precipitações em determinado local e aplicá-la em diversas atividades econômicas, é necessário desenvolver as curvas IDF e, a partir delas, obter as equações de chuvas intensas, em função dos tempos de retorno e de concentração, conforme a equação 4.

$$i = \frac{a \times T_R^b}{(tc + c)^d} \quad (4)$$

Em que:

i → intensidade (mm/h)

a, b, c, d → constantes relacionadas a cada local de estudo;

T_R → tempo de retorno (anos);

tc → tempo de concentração (minutos).

Então, ao se obter os valores das precipitações de menor duração, é possível desenvolver as curvas IDF e definir os parâmetros (a), (b), (c) e (d). Para definição do parâmetro c usa-se o procedimento abordado em Fendrich (1998), onde se escolhe dois pontos extremos e conhecidos das curvas para cada tempo de retorno (coordenadas i_1, t_1 e i_2, t_2) e considera-se um terceiro ponto (coordenadas i_3, t_3)

dessas mesmas curvas (GOMES, 2011), cuja intensidade é calculada por meio da equação 5.

$$i_3 = \sqrt{i_1 \times i_2} \quad (5)$$

O valor da coordenada t_3 é definida a partir da leitura do gráfico IDF, após isso, calcula-se o valor do parâmetro (c) por meio da equação 6.

$$c = \frac{(t_3)^2 - t_1 \times t_2}{(t_1 + t_2 - 2 \times t_3)} \quad (6)$$

Os parâmetros (a), (b) e (d) podem ser definidos pela linearização proposta por Villela (1975), na qual, considera-se um parâmetro (M) que substitua o numerador da equação 4, o que resulta nas equações 7 e 8.

$$i = \frac{M}{(tc + c)^d} \quad (7)$$

$$M = a \times T_R^b \quad (8)$$

Deste modo, aplica-se o logaritmo natural nas equações 7 e 8 e define-se o coeficiente c, a fim de maximizar o coeficiente de Variância R^2 (OLIVEIRA, 2017) e fazer com que as curvas intensidade-duração se transformem em retas paralelas (VILLELA, 1975), resultando nas equações 9 e 10.

$$\ln(i) = \ln(M) - d \times \ln(tc+c) \quad (9)$$

$$\ln(M) = \ln(a) + b \times \ln(T_R) \quad (10)$$

Visando avaliar o ajuste do modelo hidrológico, utiliza-se o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), o qual é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar sua precisão, conforme Oliveira (2017). Esse modelo é calculado através da equação 11 e avaliado conforme os dados da Tabela 2.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \times (E_m - E_S)^2}{\sum_{i=1}^n \times (E_m - \bar{E}_S)^2} \quad (11)$$

Em que:

E_m → evento observado;

E_S → evento simulado;

n → número de eventos;

\bar{E}_S → média do evento observado no período de simulação.

Tabela 2 – Classificação dos valores obtidos no COE

Varição do COE	Avaliação
Maior que 0,75	Bom Desempenho
Entre 0,36 e 0,75	Desempenho Aceitável
Menor que 0,36	Modelo Inaceitável

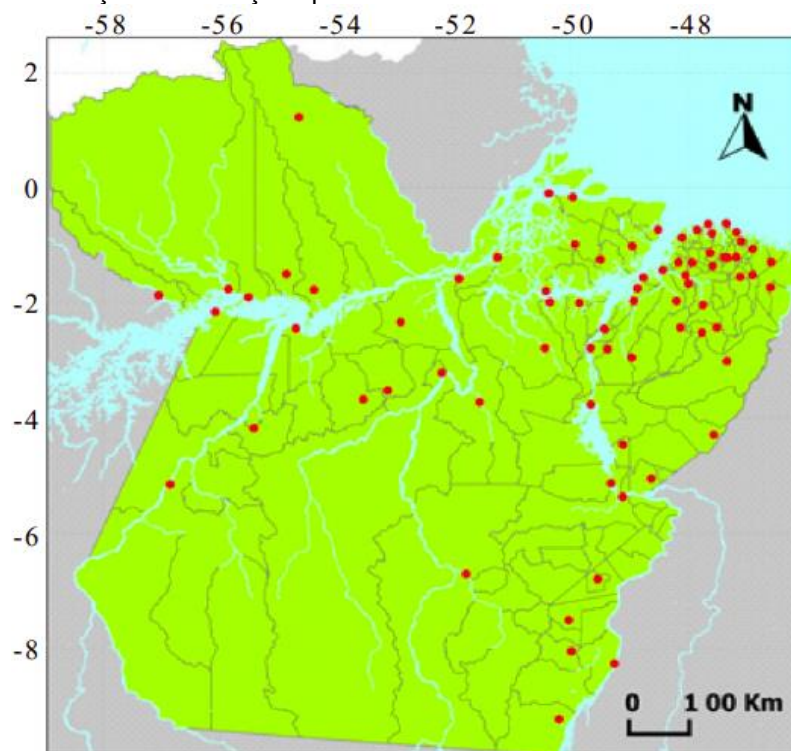
Fonte: SILVA *et. al.* (2008 apud OLIVEIRA, 2017).

2.3 Equações de chuvas intensas publicadas nas literaturas

Em razão da importância de se obter as equações de chuvas intensas para o funcionamento e planejamento de diversas atividades essenciais, Souza *et al.* (2012) desenvolveu equações de chuva para 74 cidades do Pará. Para obtenção destes resultados, os autores utilizaram as séries históricas do banco de dados pluviométricos do SNIRH (disponíveis no Portal HIDROWEB) com no mínimo 10 anos de registros, cuja localização de cada posto está representada na Figura 4.

Com o registro histórico de chuvas dos valores máximos de precipitações, obteve-se a precipitação diária máxima para cada ano de estudo. Segundo Souza *et al.* (2012), os dados de precipitação máxima foram ajustados ao modelo de distribuição de Gumbel e do método de desagregação de chuvas em chuva de menor duração, proposto por DAEE/CETESB (1980).

Figura 4 – Localização das estações pluviométricas no Estado do Pará utilizadas no estudo



Fonte: Souza *et al.* (2012).

Com o intuito de ajustar as equações de chuvas intensas, Souza *et al.* (2012) utilizaram chuvas de diferentes durações e precipitações máximas para diferentes tempos de retorno. Com isso, estimaram-se os parâmetros da equação que expressa a relação IDF para cada estação observada, utilizando o software *Table Curve 3D* para o ajuste das equações de intensidade de precipitação para cada cidade.

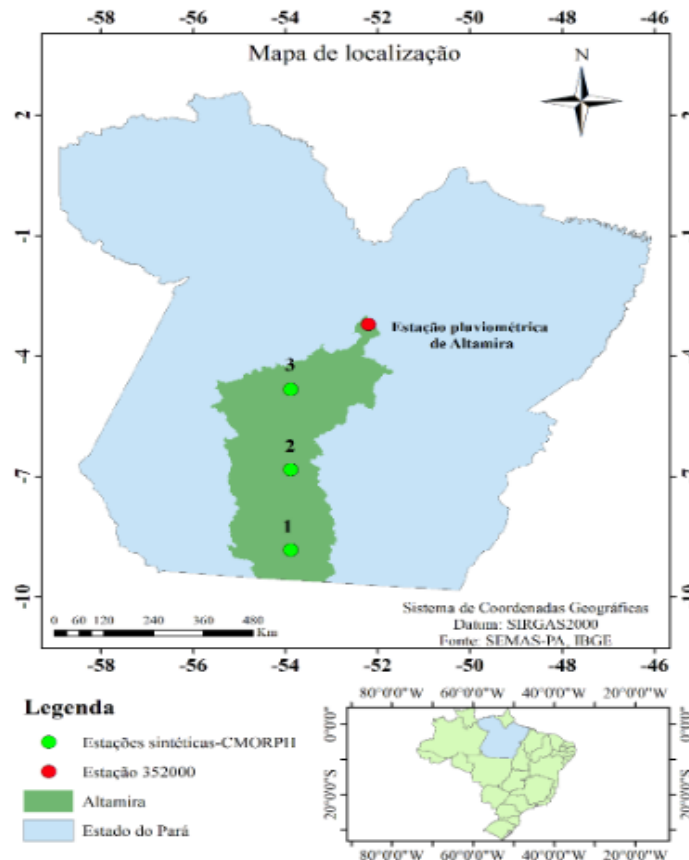
Os parâmetros de cada equação foram obtidos e detalhados na Tabela 85 disponível no Anexo A, bem como seus coeficientes de determinação e duração de suas séries históricas.

Pensando na importância das equações de chuvas intensas para o dimensionamento de projetos hidráulicos, Cruz *et al.* (2019) elaboraram um estudo para a geração das equações de chuvas intensas para a cidade de Altamira, e os resultados obtidos foram comparados aos dados apresentados no artigo de Souza *et al.* (2012).

Para desenvolvimento do trabalho, Cruz *et al.* (2019) utilizaram séries sintéticas diárias de precipitação obtidas por meio de satélites da Climate Prediction Center Morphing Technique (CMORPH) para três pontos de estudo na cidade,

conforme Figura 5 e os dados da estação pluviométrica de Altamira (código ANA: 3520000), disponibilizados no Portal HIDROWEB.

Figura 5 – Localização das estações utilizadas no estudo



Fonte: Cruz *et al.* (2019).

Cruz *et al.* (2019) utilizaram como objeto de estudo, as medições pluviométricas da CMORPH com uma série sintética de 19 anos e a estação de Altamira com uma série histórica de 31 anos, priorizando-se os dados consistidos e confiáveis. O método para gerar as curvas intensidade- duração- frequência (IDF) foi feito de forma similar ao de Souza *et al.* (2012), por meio da distribuição de Gumbel, com verificação de aderência dos dados realizada através do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Depois da distribuição da precipitação, para os tempos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 500, 1000 e 10000 anos, foram feitas desagregações para chuvas sub-diárias de 2, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos utilizando os fatores multiplicativos da CETESB (CRUZ *et al.*, 2019).

Cruz *et al.* (2019) obtiveram os parâmetros dispostos na Tabela 3 para as equações de chuvas intensas de Altamira, onde ao comparar ao estudo de Souza *et al.* (2012), perceberem-se algumas diferenças nos dados.

Tabela 3 – Parâmetros das equações de intensidades de chuvas para as estações analógicas e sintéticas de Altamira e para Souza *et al.* (2012)

Parâmetros	Estação S.1	Estação S.2	Estação S.3	Estação Altamira	Souza <i>et al.</i> (2012)
a	807,92	650,56	836,48	929,23	1068,86
b	0,1235	0,1056	0,1277	0,1045	0,1055
c	6,084	7,009	5,688	6,082	9,7894
d	0,701	0,712	0,697	0,701	0,7244

Fonte: Cruz *et al.* (2019).

Souza *et al.* (2012) em seu estudo, utilizaram uma série histórica de 28 anos para o município, o que difere de Cruz *et al.* (2019) que utilizaram 31 anos de dados. Além disso, Souza *et al.* (2012) não utilizaram auxílio de dados de satélite, o que gera diferenças nos coeficientes obtidos para esses dados (CRUZ *et al.*, 2019).

Além das equações produzidas para o Estado do Pará, houve importantes contribuições para outros estados, como o estudo desenvolvido por Oliveira (2017), para a cidade de Toledo no estado do Paraná, utilizando os dados pluviométricos disponíveis no Portal HIDROWEB e os métodos de Gumbel e DAEE-CETESB, como feito por Souza *et al.* (2012), além de fazer uso da linearização proposta por Villela (1975) para definir os parâmetros das equações de chuva. Há, ainda, os trabalhos desenvolvidos por Oliveira *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2017) para o estado de Goiás, Back *et al.* (2019) e Colombelli e Mendes (2013) para cidades do estado de Santa Catarina e Batista (2018) para o estado do Ceará, os quais ressaltam a importância em se desenvolver as equações de chuvas intensas e determinar as precipitações críticas, visando o uso sustentável da água e a segurança de obras hidráulicas.

3 MÉTODO

Neste capítulo é apresentada a caracterização da área de estudo, dividida entre as doze regiões de integração do Estado do Pará (Araguaia, Baixo Amazonas, Carajás, Guajará, Guamá, Lago do Tucuruí, Marajó, Rio Caeté, Rio Capim, Tapajós, Tocantins e Xingu), assim como os métodos utilizados para geração das curvas de intensidade-duração-frequência e a obtenção de equações de chuva.

3.1 Caracterização da área de estudo

O Pará está situado na Região Geográfica Norte do Brasil, em termos de área da unidade territorial, é o segundo maior estado do país, com uma área de 1.245.870,707 km² (IBGE, 2020) e 144 municípios. Também possui a nona maior população do Brasil, com estimativa de 8.777.124 pessoas (IBGE, 2021). O estado é dividido em 12 Regiões de Integração: Araguaia, Baixo Amazonas, Carajás, Guajará, Guamá, Lago do Tucuruí, Marajó, Rio Caeté, Rio Capim, Tapajós, Tocantins e Xingu, conforme a Figura 6, e as áreas a serem estudadas serão doze municípios, um em cada região de integração, conforme listado na Tabela 4, de modo que as chuvas ao redor de quase todo o extenso território do estado sejam estudadas.

Figura 6 – Regiões de Integração do Estado do Pará



Fonte: NAVEGAPARÁ, 2014.

Tabela 4 – Informações das séries históricas para os municípios estudados

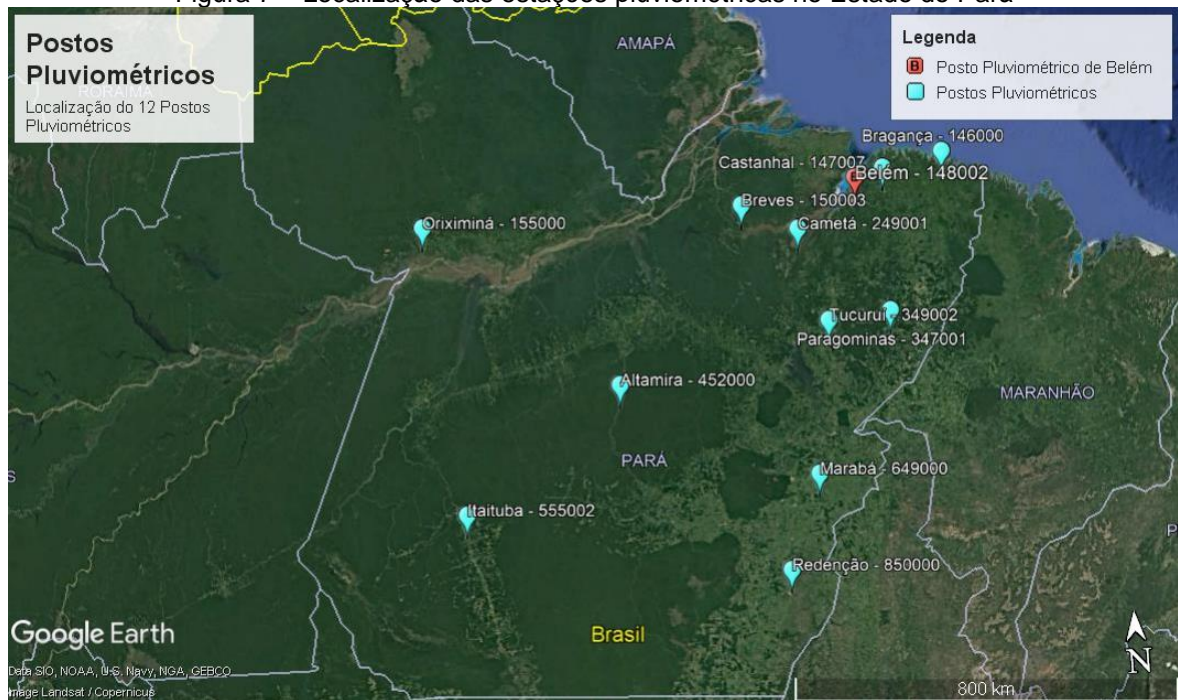
Região de Integração	Município	Código	Latitude	Longitude	Séries Históricas (anos)
Araguaia	Redenção	850000	8°2'38.04" S	50°0'2.16" O	23 (1984-2006)
Baixo Amazonas	Oriximiná	155000	1°45'34.92" S	56°51'41.04" O	38 (1986-2006)
Carajás	Marabá	649000	6°25'40.08" S	49°25'10.92" O	23 (1984-2006)
Guajará	Belém	148002	1°26'6.00" S	48°26'16.08" O	31 (1967-1988)
Guamá	Castanhal	147007	1°17'51.00" S	47°56'21.84" O	34 (1973-2006)
Lago do Tucuruí	Tucuruí	349002	3°50'0.96" S	49°40'0.12" O	20 (1986-2005)
Marajó	Breves	150003	1°47'30.12" S	50°26'4.92" O	22 (1985-2006)
Rio Caeté	Bragança	146000	1°3'48.96" S	46°51'55.08" O	25 (1974-1998)
Rio Capim	Paragominas	347001	3°0'36.00" S	47°20'35.88" O	27 (1980-2006)
Tapajós	Itaituba	555002	6°40'17.04" S	55°29'44.88" O	21 (1987-2007)
Tocantins	Cametá	249001	2°15'0.00" S	49°30'0.00" O	23 (1976-1998)
Xingu	Altamira	452000	4°39'56.16" S	52°43'13.08" O	31 (1977-2007)

Fonte: FAPESPA, 2017; HIDROWEB, 2021.

A escolha das cidades a serem estudadas dentro de cada Região de Integração, se deu pela centralidade dos municípios no mapa, a população de cada cidade, e a duração de cada série histórica apresentada no portal HIDROWEB disponível no site da Agência Nacional de Águas (ANA). Além disso, em alguns casos, levou-se em consideração se a cidade escolhida tem equações de chuva previamente calculada em outros estudos para possibilitar a comparação de resultados.

Nota-se que os registros históricos possuem medições antigas, principalmente em Belém, Bragança e Cametá, isto se dá pela ausência de séries históricas com dados longos, consistidos e recentes no Portal da ANA. A escolha dos postos, representados na Figura 7, produzida por meio dos recursos do Google Earth, objetivou abranger a área central de cada região de integração e cobrir todo o Estado do Pará.

Figura 7 – Localização das estações pluviométricas no Estado do Pará

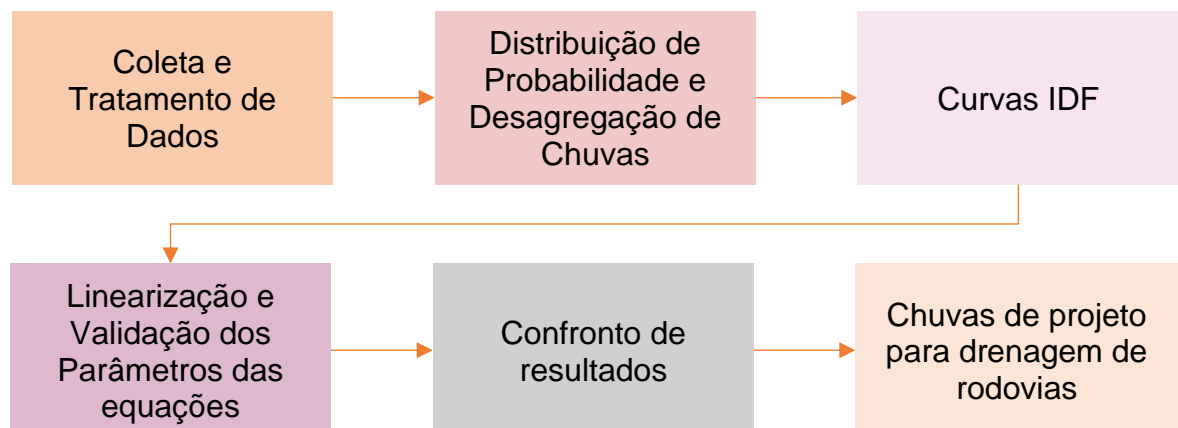


Fonte: Autoria Própria, 2021; HIDROWEB, 2021.

3.2 Método

Com o objetivo de determinar as equações de chuvas intensas para cada um dos doze municípios escolhidos, a partir dos registros de chuvas, disponíveis no Portal HIDROWEB, realizou-se o processo de cálculo descrito no fluxograma da Figura 8, utilizando o Aplicativo Microsoft Excel, para tratamento de dados e obtenção dos resultados. Foram adotados os métodos de Gumbel para realizar a distribuição de probabilidade e das Isozonas de Torrico (1974) para a desagregação das chuvas.

Figura 8 – Fluxograma do processo de geração das equações de chuvas intensas



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Passo 1 – Coleta e tratamento dos dados: Inicialmente foi necessário tratar os dados dos doze postos pluviométricos, escolhidos conforme critérios descritos no item 3.1. Para tanto, organizou-se cada série histórica em ordem crescente dos anos e atribuiu-se um número de ordem para cada uma, depois foram definidas as precipitações máximas para os 12 meses dos anos de estudo.

Visando aumentar a consistência e melhorar a confiabilidade da análise estatística, as descontinuidades na série foram preenchidas com a mediana dos valores, de cada ano, correspondente ao mês em que ocorreu a falha de preenchimento. Vale destacar que, há métodos estatísticos e meios computacionais mais avançados para preenchimento de falhas, tais como: Método de Ponderação regional; Método de Regressão Linear Simples e Múltipla; e Método de Ponderação Regional com base em Regressões Lineares. Entretanto, para facilitar a análise e observando-se que o preenchimento de falhas através das medianas é mais simples, utilizou-se essa técnica.

Com isso, determinaram-se as precipitações máximas para cada ano e fez-se o cálculo da Média e do Desvio-Padrão dessas máximas. A partir desse tratamento dos dados já foi possível extrair resultados sobre cada município, tais como: indicar os anos mais chuvosos, meses com mais e menos chuvas e as chuvas mais críticas registradas.

Passo 2 – Distribuição de probabilidades e desagregação de chuvas: Para a distribuição de probabilidades escolheu-se o método de Gumbel, utilizando as Equações 1, 2 e 3 descritas no capítulo 2, para o processo de cálculo, o qual é mais usual e promove bons resultados para a determinação das equações de chuvas (SOUZA *et al.*, 2012; CRUZ *et al.*, 2019; OLIVEIRA, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2008).

Para a desagregação de chuvas foi adotado o Método de Isozonas, pois diferentes estudos obtiveram um bom desempenho na determinação das precipitações máximas ao utilizar esse método (OLIVEIRA *et al.*, 2008; BATISTA, 2018; BATISTA *et al.*, 2018). Logo, multiplicam-se as precipitações calculadas anteriormente pelo fator de segurança $1,10 \cong 1,095$ (proposto por José Jaime Taborga Torrico), para conversão dos valores das chuvas diárias para chuvas de 24h.

O mapa de isozonas do Brasil proposto por Torrico (1974), possui as seguintes características: a Isozona A coincide com a zona de maior precipitação média anual do Brasil e possui coeficientes de desagregação baixos, as Isozonas B

e C tipificam a zona de influência marítima com coeficientes de desagregação suaves, a Isozona D tipifica as zonas de transição (entre continental e marítima), as Isozonas E e F tipificam as zonas continental e do Noroeste com coeficientes de desagregação altos, e as Isozonas G e H tipificam a zona da caatinga nordestina, com coeficientes de desagregação muito altos. As zonas de cada um dos doze postos de coleta dos dados são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Isozonas para cada município estudado

Região de Integração	Município	Isozona
Araguaia	Redenção	E
Baixo Amazonas	Oriximiná	D
Carajás	Marabá	F
Guajará	Belém	D
Guamá	Castanhal	C
Lago do Tucuruí	Tucuruí	E
Marajó	Breves	E
Rio Caeté	Bragança	B
Rio Capim	Paragominas	F
Tapajós	Itaituba	E
Tocantins	Cametá	E
Xingu	Altamira	E

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Passo 3 – Curvas IDF: De posse das precipitações de 24 horas, 1 hora e 6 minutos, fez-se a plotagem destes dados, visando a obtenção das curvas IDF, para os Períodos de Retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, onde a intensidade é representada em mm/h e a duração em minutos.

Passo 4 – Linearização e validação dos parâmetros das equações: A partir dos dados provenientes dos passos anteriores, foram aplicados o procedimento abordado em Fendrich (1998) e a linearização proposta por Villela (1975), a fim de definir os parâmetros das equações de chuva para as 12 cidades, conforme as equações 5, 6, 7, 8, 9 e 10 (ver capítulo 2). Por fim, fez-se a validação dos resultados, a partir do coeficiente de Eficiência (COE), cuja análise está apresentada na equação 11 e na Tabela 2, também dispostas no capítulo 2.

Passo 5 – Confronto de resultados: Assim, definindo as equações de chuvas intensas para cada cidade, é importante comparar com os dados dispostos nas literaturas técnicas. Logo, foram comparadas as equações propostas por Souza *et al.* (2012) para as 12 cidades estudadas e, exclusivamente, para a cidade de

Altamira, comparou-se, também os resultados de Cruz *et al.* (2019). Com isso, verificou-se se houve variações das equações ao longo do tempo e quais cidades obtiveram maior e menor precipitação.

Passo 6 – Chuvas de projeto para drenagem de rodovias: Além disso, foi possível obter as chuvas de projeto para os elementos de drenagem, de acordo com os pares de Tempo de Retorno e concentração para cada tipo de obra, seguindo as recomendações propostas pelo DNIT (2006):

- Para os dispositivos de Drenagem Superficial: tempo de Retorno de 10 anos e tempo de concentração de 5 minutos;
- Para os dispositivos de Drenagem Subsuperficial ou do Pavimento: tempo de Retorno de 1 ano e tempo de concentração de 60 minutos;
- Para os dispositivos de Drenagem de Transposição de Talvegues: tempo de Retorno de 25 anos e tempo de concentração de 10 minutos.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os dados obtidos para os doze municípios das regiões de integração do Estado do Pará, assim como a validação das equações obtidas. Também se efetuou uma comparação entre os resultados obtidos e os apresentados nas literaturas para os mesmos municípios em estudo (Altamira, Belém, Bragança, Breves, Cametá, Castanhal, Itaituba, Marabá, Oriximiná, Paragominas, Redenção e Tucuruí). Por fim, são apresentadas as chuvas de projeto para cada par de Tempo de retorno e Tempo de concentração referente as obras de drenagem de rodovias.

4.1 Apresentação e análise dos dados das Estações Pluviométricas

O procedimento para obtenção das equações de chuva seguiu o processo de cálculo descrito no fluxograma da Figura 8 (Capítulo 3), onde se destaca que o primeiro passo é a coleta e tratamento dos dados. Logo, houve a análise dos postos pluviométricos das cidades estudadas, disponíveis no Portal HIDROWEB, onde a escolha foi determinada pelos postos com a maior quantidade de dados consecutivos e consistidos, e sua abrangência na área central de cada região de integração. Além disso, em virtude de descontinuidades na série de algumas cidades fez-se o preenchimento das lacunas com a mediana dos valores de cada ano, correspondente ao mês em que ocorreu a falha de preenchimento.

Algumas séries de dados de chuva apresentaram descontinuidades temporais nos dados consistidos, então, para não prejudicar a análise foram utilizados, em alguns meses, os dados brutos disponíveis. Outras séries de dados de chuva não apresentaram dados consistidos (confiáveis) recentes, logo, utilizou-se a maior quantidade de anos contínuos e consistidos possíveis.

Após o tratamento dos dados, foi possível selecionar a média mensal, a máxima diária média e a média de dias de chuvas para os doze meses do ano de todas as séries estudadas, o que permitiu elaborar os pluviogramas de cada município, conforme indicado no Apêndice A. Também foram extraídas, as máximas chuvas mensais registradas para cada ano, indicadas no Apêndice B. Na Tabela 6, apresenta-se o resultado do tratamento dos dados, sintetizando os dados contidos nos apêndices A e B, com os meses mais e menos chuvosos, a chuva crítica, a média e o desvio padrão de cada cidade estudada.

Tabela 6 – Tratamento de dados dos municípios estudados

Município	Meses mais chuvosos	Meses menos chuvosos	Chuva crítica diária	Média da precipitação diária máxima	Desvio Padrão dos dados de precipitação máxima
Altamira	Março e janeiro	Julho e agosto	150,00 mm (1980)	92,40 mm	22,80 mm
Belém	Março e fevereiro	Outubro e novembro	136,90 mm (1985)	93,56 mm	21,19 mm
Bragança	Março e abril	Outubro e novembro	173,20 mm (1995)	106,00 mm	29,20 mm
Breves	Março e abril	Agosto e julho	111,20 mm (1986)	73,10 mm	18,50 mm
Cametá	Março e abril	Setembro e outubro	175,00 mm (1991)	112,20 mm	24,5 mm
Castanhal	Março e abril	Novembro e outubro	228,60 mm (2001)	104,40 mm	40,42 mm
Itaituba	Março e fevereiro	Julho e junho	121,40 mm (1995)	88,00 mm	15,50 mm
Marabá	Março e fevereiro	Julho e agosto	170,00 mm (1997)	91,87 mm	24,93 mm
Oriximiná	Março e abril	Outubro e setembro	181,60 mm (1976)	97,33 mm	29,02 mm
Paragominas	Março e abril	Setembro e agosto	204,50 mm (1989)	94,70 mm	28,7 mm
Redenção	Março e dezembro	Julho e junho	177,00 mm (1988)	103,60 mm	25,51 mm
Tucuruí	Março e abril	Setembro e agosto	150,00 mm (1993)	109,26 mm	24,90 mm

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Com os dados informados na Tabela 6, observa-se que a maior chuva crítica diária foi registrada na cidade de Castanhal (228,60 mm) e a menor chuva crítica diária observada foi na cidade de Breves (111,20 mm). A cidade de Breves, por apresentar baixos registros de precipitação, obteve a menor média de precipitação diária máxima anual (73,10 mm) e um desvio-Padrão baixo. Em contrapartida, mesmo registrando a maior chuva crítica, a cidade de Castanhal não obteve a maior média, pois o Desvio-Padrão para sua série foi elevado, o maior dentre os 12 municípios, indicando uma elevada variação entre as precipitações máximas. Com isso, a cidade de Cametá registrou a maior média de precipitação diária máxima anual (112,20 mm).

Além disso, a cidade de Itaituba foi a que apresentou o menor desvio padrão dos dados de precipitação máxima (15,50 mm), indicando o baixo grau de dispersão

em relação ao conjunto de dados de precipitações máximas e a homogeneidade da amostra. Entretanto, o município de Castanhal, como já comentado, foi o que apresentou o maior desvio padrão dos dados de precipitação máxima (40,42 mm), o que indica que os valores de precipitação máxima estão muito dispersos em torno da média, o que levará a grandes chuvas de projeto, devido ao método de cálculo que majora o valor médio em função do desvio-padrão.

Além disso, percebe-se que, em todas as cidades, coincidiu o mês de março ser o mais chuvoso, seguido pelos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e abril, visto que este período se trata do inverno Amazônico, tendo seu ápice em março, conforme os dados fornecidos. Entretanto, o período com menos chuvas não se equivale para todo o estado, percebe-se que, à medida em que se desloca do Norte ao Sul, o período de estiagem se antecipa, visto que, para as cidades mais ao norte do estado (Belém, Bragança, Castanhal, Oriximiná), a estiagem acontece no mês de outubro, para cidades centrais (Paragominas, Tucuruí e Altamira), a seca ocorre no mês de agosto e, para cidades mais ao sul, no mês de julho (Redenção, Itaituba, Marabá). Destaca-se, ainda, que cidades próximas resultaram em períodos equivalentes de seca, como Belém, Bragança e Castanhal; e Paragominas e Tucuruí.

4.2 Geração das curvas Intensidade- Duração- Frequência (IDF)

O procedimento de cálculo para a geração das curvas IDF será detalhado apenas para a cidade de Belém, visto que o mesmo passo a passo foi desenvolvido para as outras 11 cidades pesquisadas e seus resultados estão disponibilizados nas tabelas expostas no Apêndice C.

Sendo assim, com os dados de precipitação máxima de cada ano, a média aritmética e o desvio-padrão dessas chuvas, aplicou-se o modelo de distribuição de probabilidades de Gumbel para os dados pertencentes a cidade de Belém, por meio das equações 1, 2 e 3 para os Tempos de Retorno (T_R) de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, conforme a Tabela 7. As expressões abaixo indicam o processo de cálculo para a primeira linha da Tabela 7, referente ao $T_R= 5$ anos. As demais linhas são calculadas de forma similar. Cabe lembrar que, os valores de \bar{X} e S são apresentados na Tabela 6.

$$Y_{TR} = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{5} \right) \right] = 1,4999$$

$$K_{TR} = -0,45 + 0,78 \times Y_{TR} = -0,45 + 0,78 \times 1,4999 = 0,7200$$

$$X_{TR} = \bar{X} + K_{TR} \times S = 93,56 + 0,7200 \times 21,19 = 108,81 \text{ mm}$$

Tabela 7 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Belém

T_R (anos)	Variável reduzida da distribuição de Gumbel (Y_{TR})	Fator de Frequência (K_{TR})	Precipitação máxima diária para cada T_R (X_{TR})
5	1,4999	0,7200	108,81
10	2,2504	1,3053	121,21
15	2,6738	1,6355	128,21
20	2,9702	1,8668	133,11
25	3,1985	2,0449	136,88
50	3,9019	2,5935	148,51
100	4,6001	3,1381	160,05

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Para o processo de desagregação das chuvas do município de Belém, utilizou-se o Método das Isozonas, onde multiplicou-se os valores de X_{TR} , indicados na Tabela 7, pelo fator de segurança 1,095, para conversão dos valores das chuvas diárias para chuvas de 24h. Os resultados destes cálculos estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 – Chuvas de 24 horas para o município de Belém

T_R (anos)	X_{TR}	Fator de Segurança	P 24 horas
5	108,81	1,095	119,15
10	121,21	1,095	132,73
15	128,21	1,095	140,39
20	133,11	1,095	145,76
25	136,88	1,095	149,89
50	148,51	1,095	162,62
100	160,05	1,095	175,25

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Belém pertence a Isozona C, logo foram extraídos os respectivos coeficientes, para obtenção das chuvas de 1 hora e de 6 minutos, a partir das chuvas de 24 horas, conforme indicado na Tabela 9. Para as demais cidades, é necessário

verificar a qual isozona pertencem, ver Tabela 1 do capítulo 2, e obter os respectivos coeficientes de conversão de chuvas de 24h para chuvas de 1h e 6 min.

Tabela 9 – Coeficientes de desagregação de chuvas para a Isozona C

Zonas	1h/24h (%)							6 min/24h (%)	
	Tempo de Recorrência (anos)							TR (anos)	
	5	10	15	20	25	50	100	5-50	100
C	40,1	39,7	39,5	39,3	39,2	38,8	38,4	9,8	8,8

Fonte: Torrico, 1974.

De posse dos coeficientes da Isozona C, foram calculadas as precipitações de 1 hora e de 6 minutos para cidade de Belém. As expressões abaixo indicam o processo de cálculo para a primeira linha da Tabela 10, referente ao $T_R = 5$ anos. As demais linhas são calculadas de forma similar.

$$P \text{ 1 hora} = P \text{ 24 horas} \times \text{Percentual do coeficiente}$$

$$P \text{ 1 hora} = 119,15 \times \frac{40,1}{100} = 47,78$$

$$P \text{ 6 minutos} = P \text{ 24 horas} \times \text{Percentual do coeficiente}$$

$$P \text{ 6 minutos} = 119,15 \times \frac{9,8}{100} = 11,68$$

Tabela 10 – Precipitações de 24 horas, 1 hora e 6 minutos, para a cidade de Belém

T_R (anos)	P 24 horas	P 1 hora	P 6 minutos
5	119,15	47,78	11,68
10	132,73	52,69	13,01
15	140,39	55,45	13,76
20	145,76	57,28	14,28
25	149,89	58,76	14,69
50	162,62	63,10	15,94
100	175,25	67,30	15,42

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Em seguida, as precipitações da Tabela 10 foram divididas pelas suas respectivas durações (em horas), de modo a obter a intensidade da precipitação (em mm/h). Ou seja, as precipitações da coluna P 24 horas foram divididas por 24 e as precipitações indicadas nas colunas P 1 hora e P 6 minutos foram divididas por 1 e por 0,1h, respectivamente. Os resultados destes cálculos são exibidos na Tabela 11.

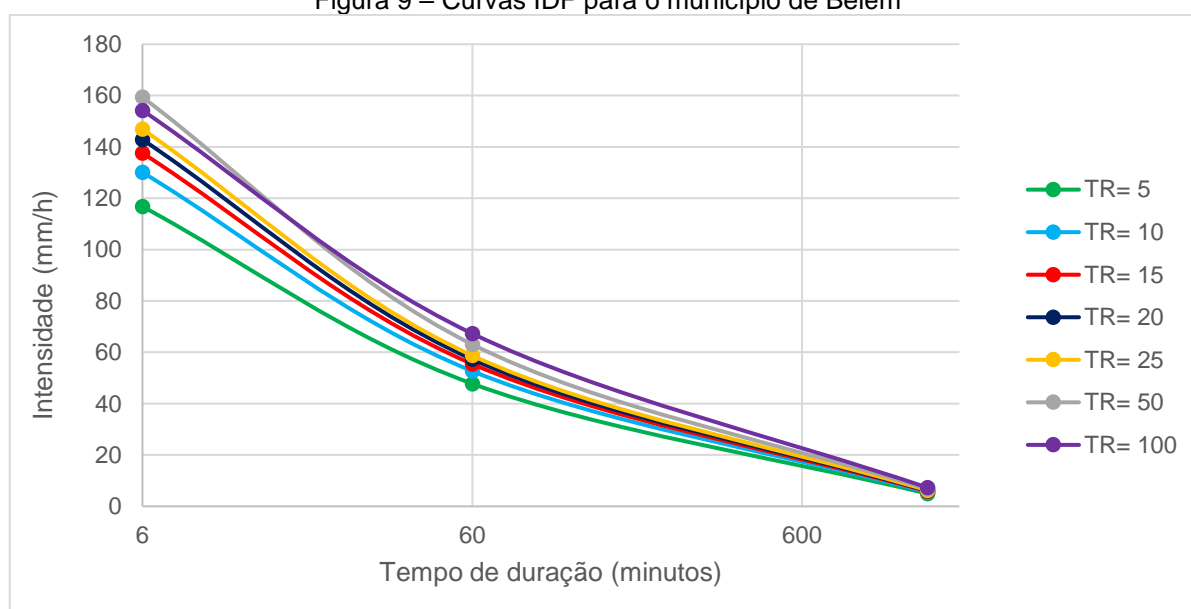
Tabela 11 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos)

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	4,96	47,78	116,77
10	5,53	52,69	130,08
15	5,85	55,45	137,58
20	6,07	57,28	142,84
25	6,25	58,76	146,89
50	6,78	63,10	159,36
100	7,30	67,30	154,22

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

A partir dos dados dispostos na Tabela 11, foi possível gerar a curva IDF de Belém, a qual está indicada na Figura 9, para os Períodos de Retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, onde as ordenadas são os tempos de duração, em minutos, e as abscissas são os valores de intensidade, em mm/h.

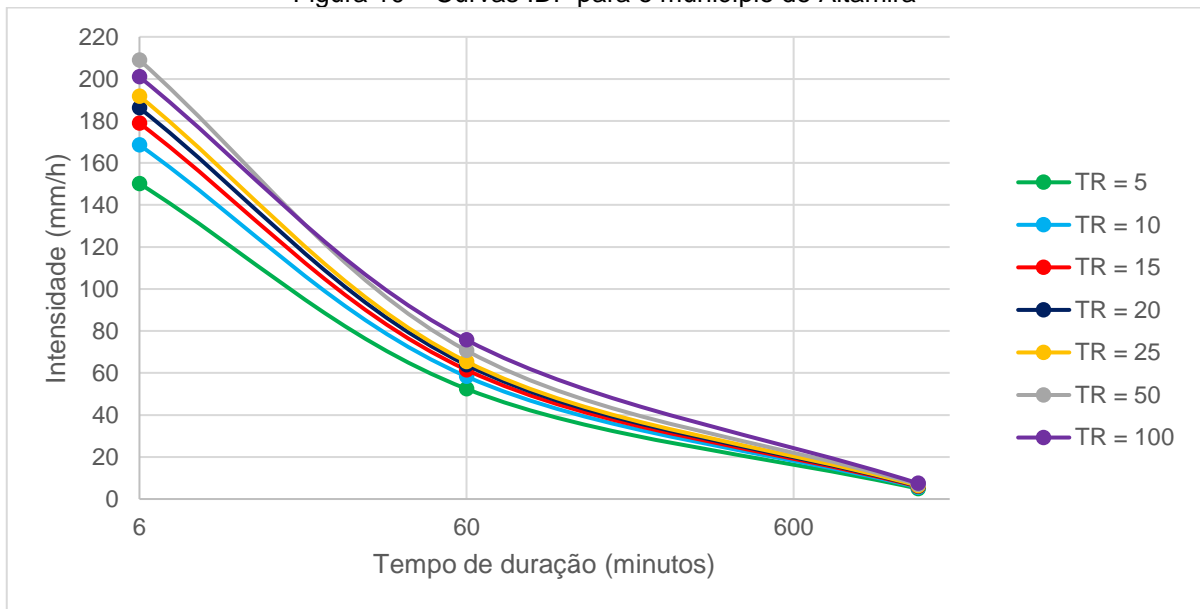
Figura 9 – Curvas IDF para o município de Belém



Fonte: Aatoria Própria, 2021.

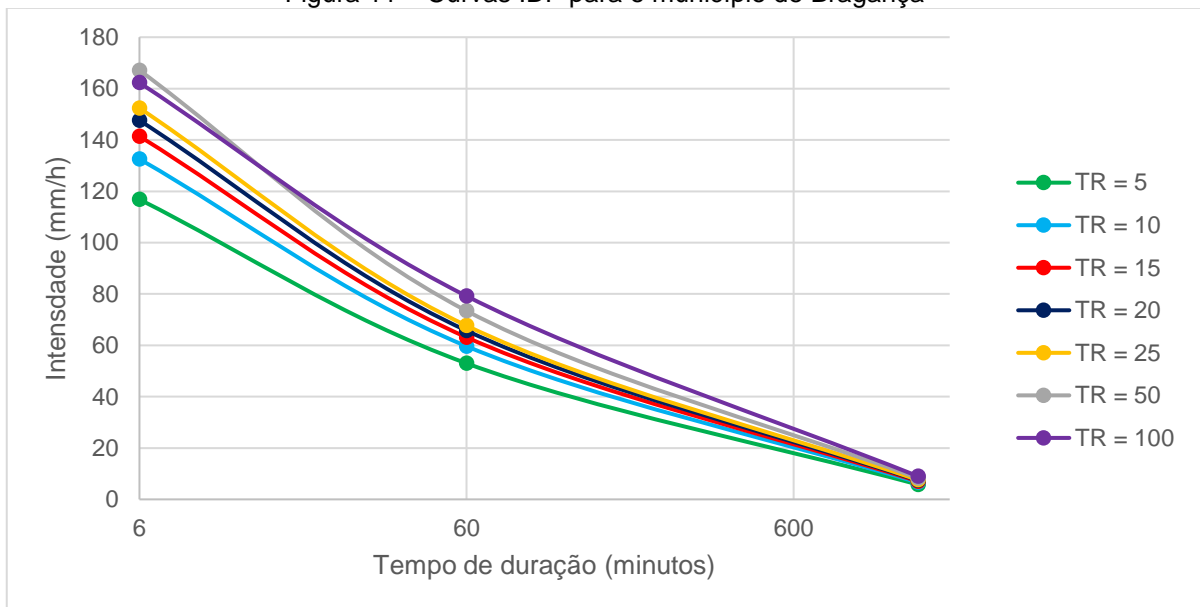
O procedimento para cálculo das curvas IDF para os municípios de Altamira, Bragança, Breves, Cametá, Castanhal, Itaituba, Marabá, Oriximiná, Paragominas, Redenção e Tucuruí é similar ao apresentado para a cidade de Belém, e suas respectivas curvas estão expostas nas Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20. Os dados da relação “intensidade x duração x frequência” que permitiram a plotagem das curvas para cada cidade são apresentados no Apêndice D.

Figura 10 – Curvas IDF para o município de Altamira



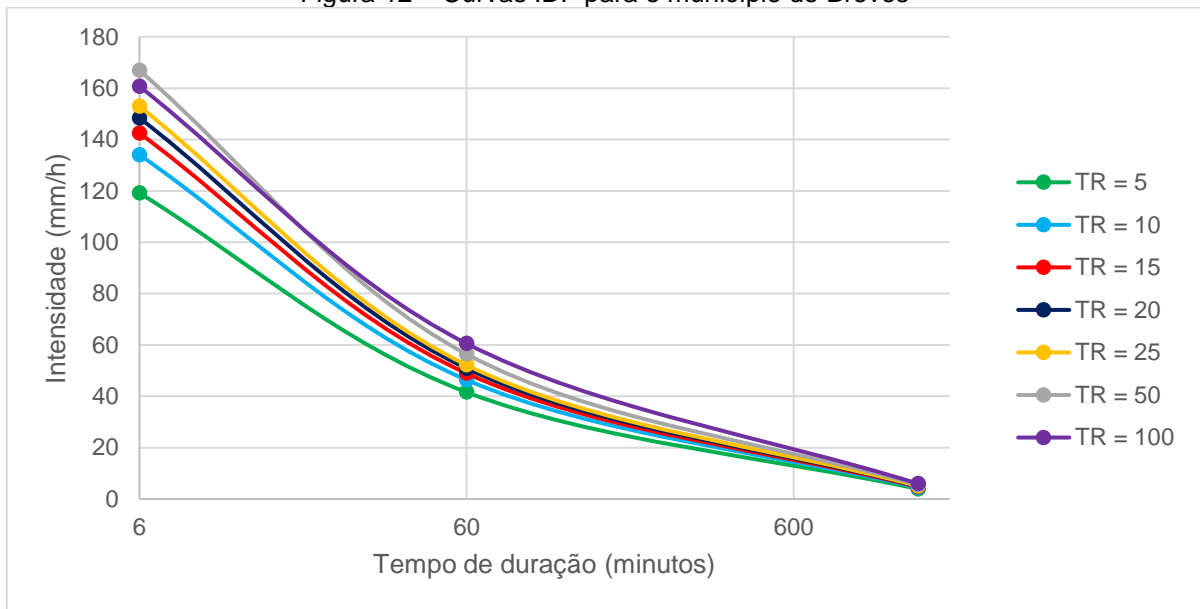
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 11 – Curvas IDF para o município de Bragança



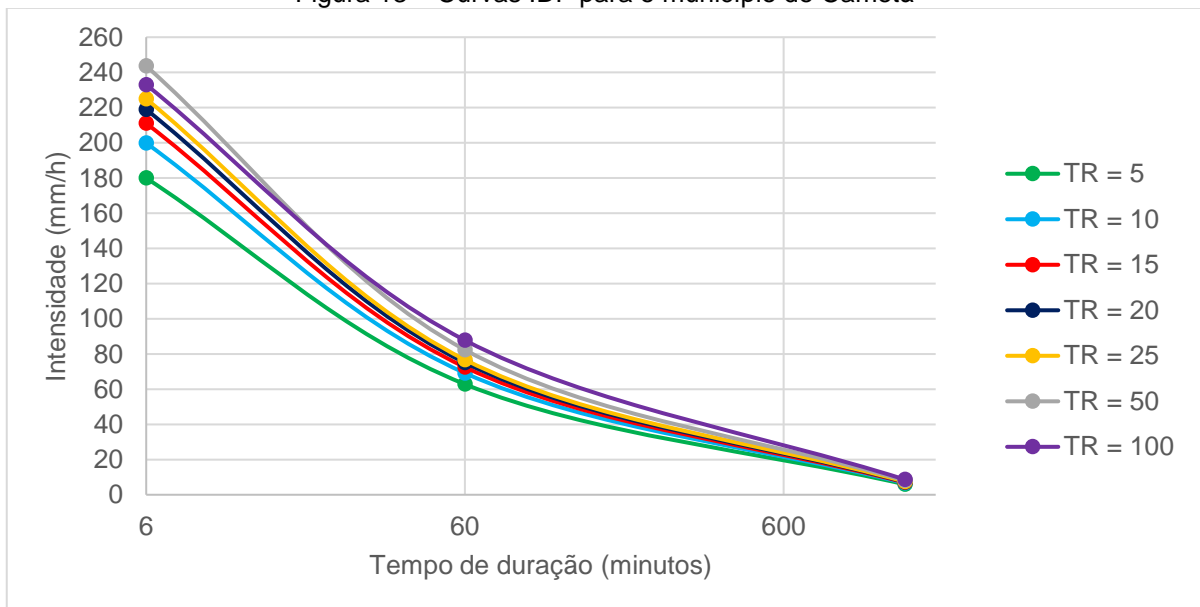
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 12 – Curvas IDF para o município de Breves



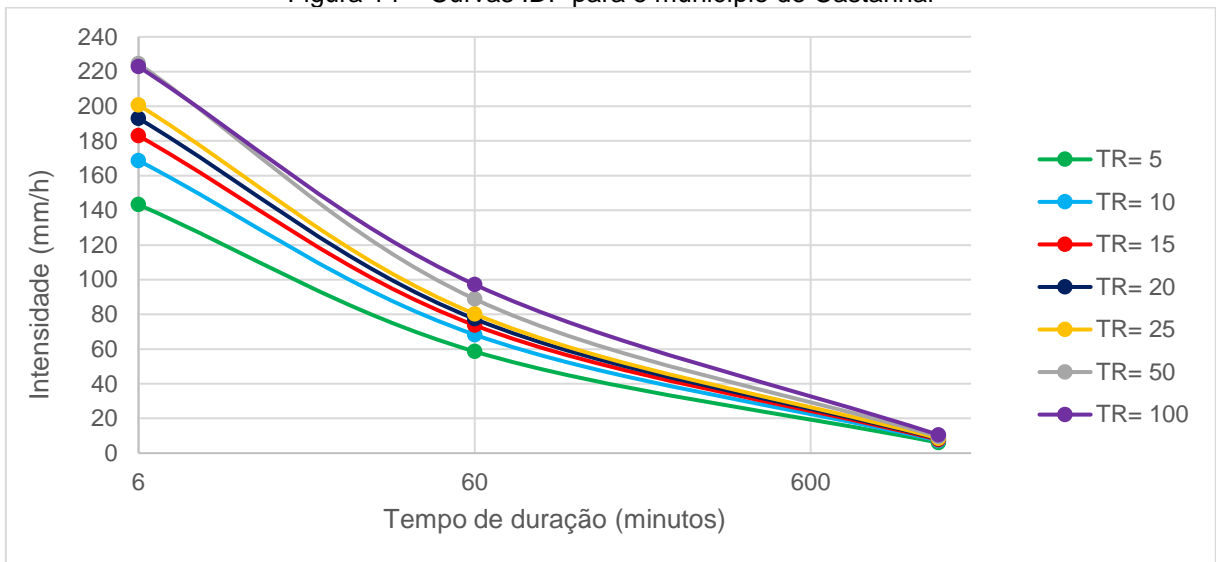
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 13 – Curvas IDF para o município de Cametá



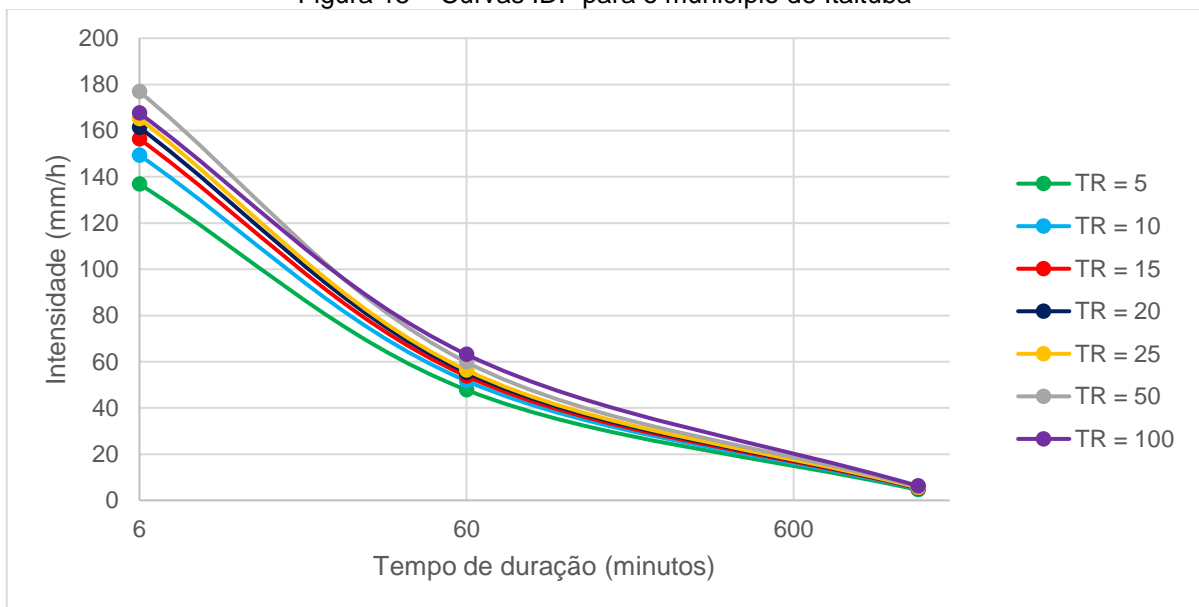
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 14 – Curvas IDF para o município de Castanhal



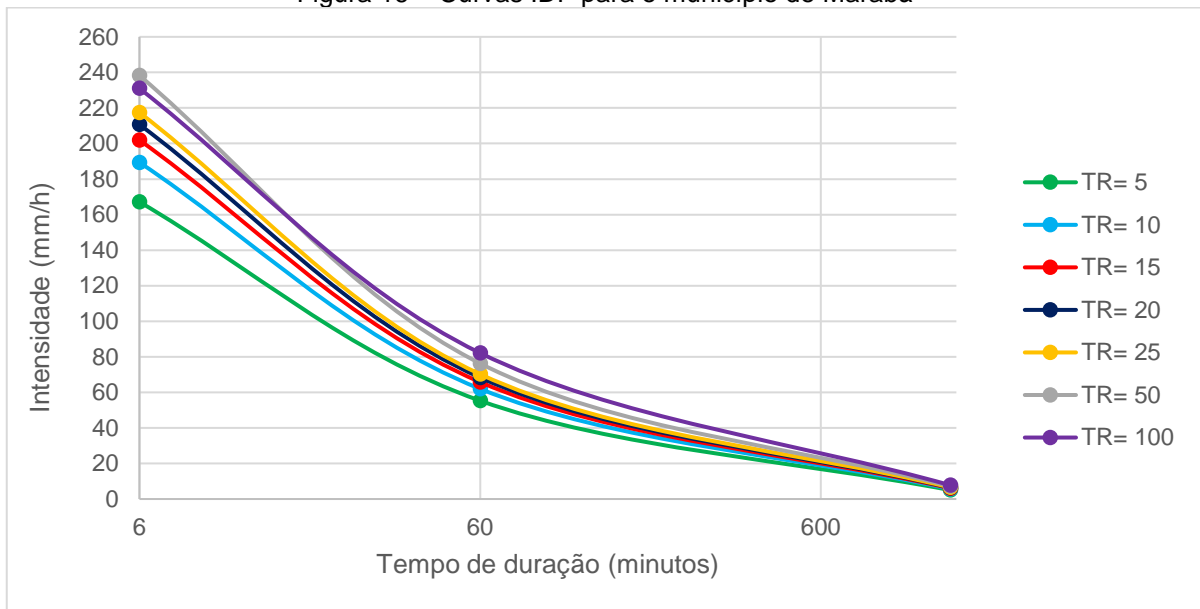
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 15 – Curvas IDF para o município de Itaituba



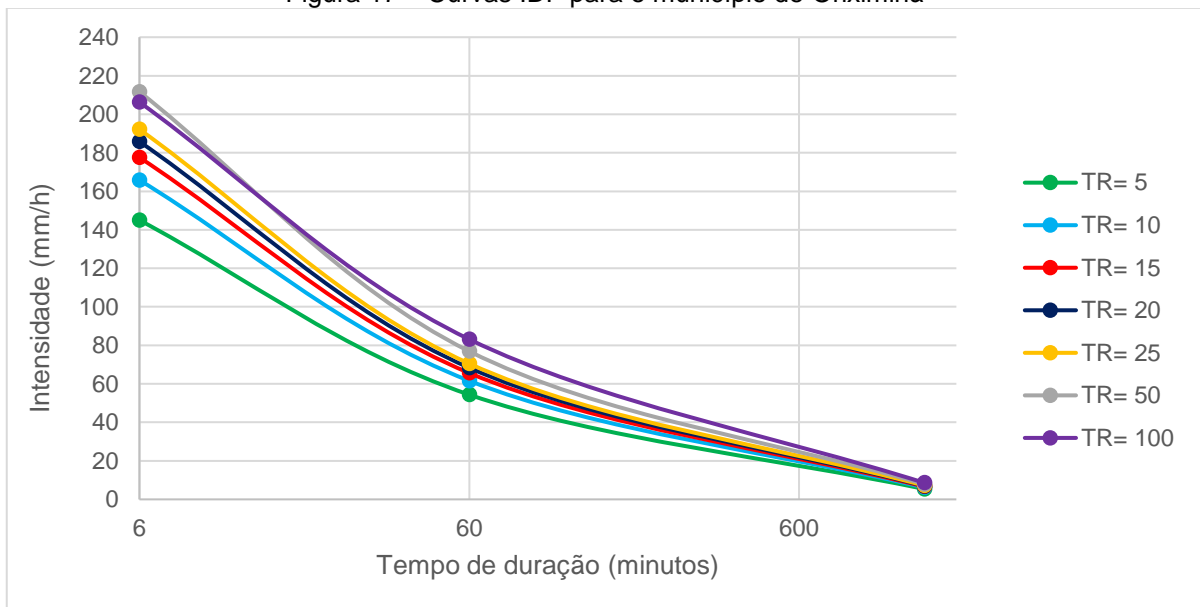
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 16 – Curvas IDF para o município de Marabá



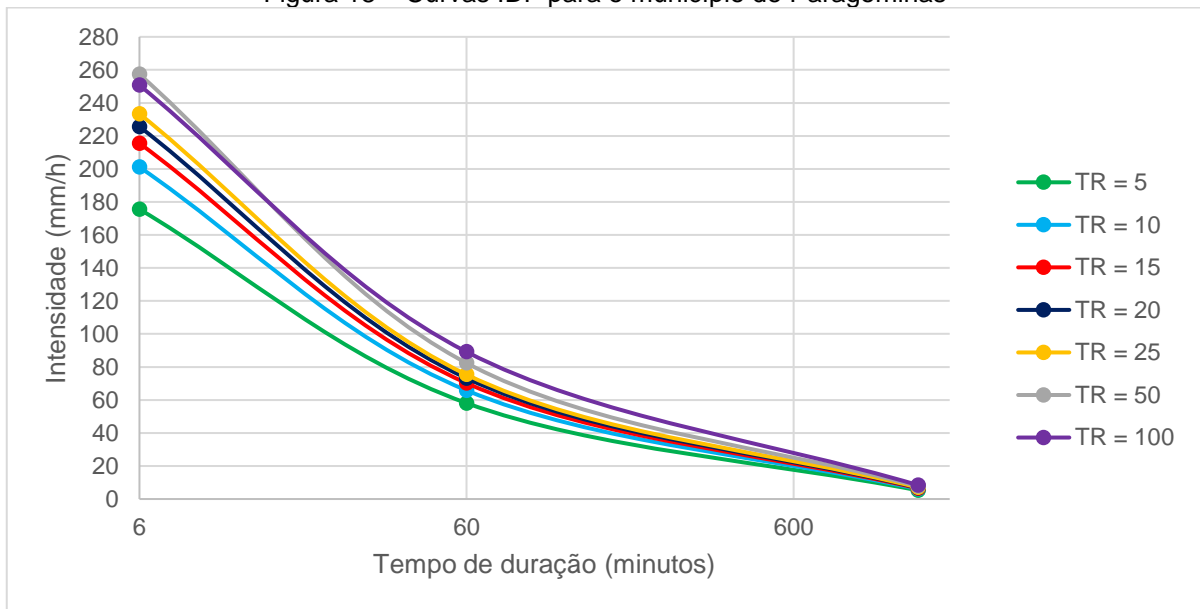
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 17 – Curvas IDF para o município de Oriximiná



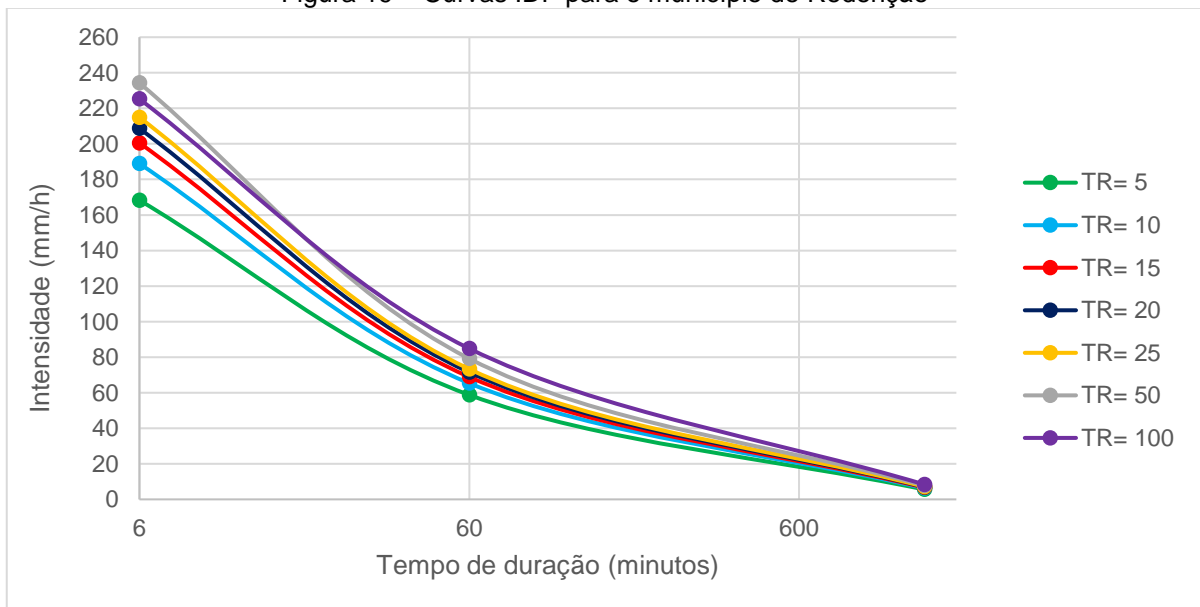
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 18 – Curvas IDF para o município de Paragominas



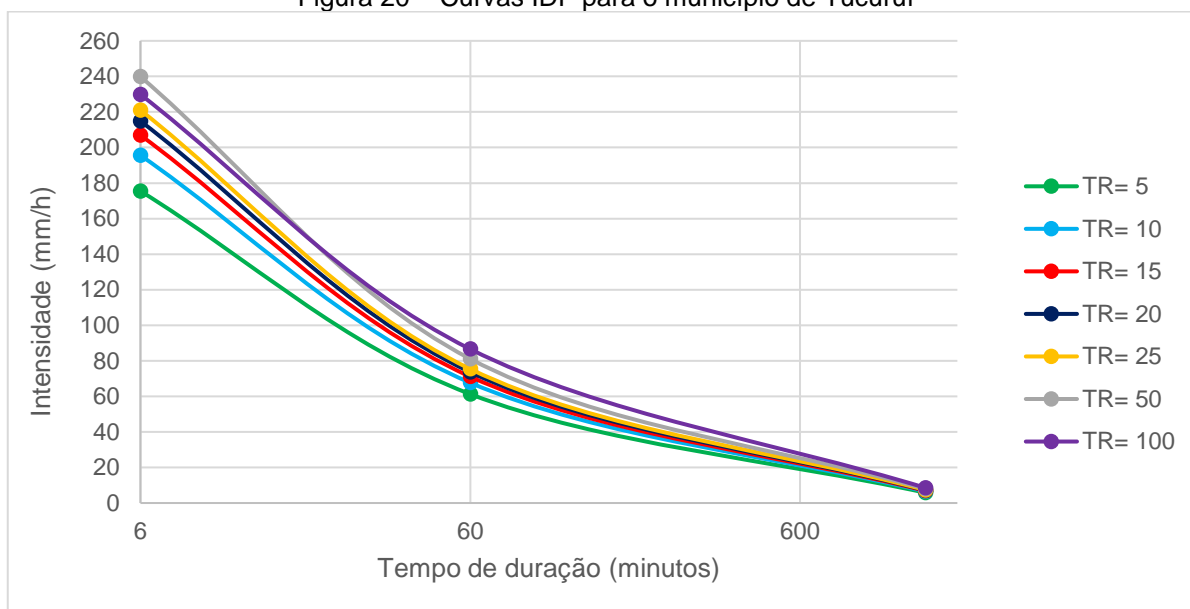
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 19 – Curvas IDF para o município de Redenção



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 20 – Curvas IDF para o município de Tucuruí



Fonte: Autoria Própria, 2021.

É válido destacar que, para o tempo de duração de 6 minutos, a curva $T_R=50$ anos se encontra acima da curva de 100 anos, isto se dá pelo fato do coeficiente de Torrico (1974) para $T_R=100$ e duração de 6 minutos ser menor que o coeficiente para Tempo de Retorno de 5 a 50 anos, com a mesma duração. Sabendo-se que o desvio-padrão influencia na obtenção dos valores de precipitação e a fim de verificar a confiabilidade dos dados obtidos, observou-se que, com a realização de testes, as precipitações para Tempo de Retorno de 100 anos tornam-se maiores com valores de Desvio-Padrão acima de 60 mm, o que não ocorreu no presente trabalho, no qual o maior desvio-padrão observado foi de 40,42 mm, conforme indicado na Tabela 6.

Com a geração das curvas IDF de cada cidade, consolidou-se, em duas tabelas, as intensidades de chuva para as durações de 24h, 1h e 0,1h para T_R igual a 10 anos (Tabela 12) e T_R igual a 100 anos (Tabela 13), para cada município, a fim de verificar as chuvas críticas, para comparação dos dados de precipitação máxima diária disponíveis na Tabela 6.

Tabela 12 – Relação entre as intensidades das chuvas nos doze municípios para $T_R = 10$ anos

Município	6 minutos	60 minutos	1440 minutos
Altamira	168,51	58,31	5,57
Belém	130,08	52,69	5,53
Bragança	132,54	59,64	6,57
Breves	134,07	46,39	4,43
Cametá	199,83	69,15	6,61
Castanhal	168,64	68,32	7,17
Itaituba	149,35	51,68	4,94
Marabá	189,36	61,98	5,68
Oriximiná	165,81	61,59	6,17
Paragominas	201,10	65,83	6,03
Redenção	188,88	65,36	6,25
Tucuruí	195,59	67,68	6,47

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 13 – Relação entre as intensidades das chuvas nos doze municípios para $T_R = 100$ anos

Município	6 minutos	60 minutos	1440 minutos
Altamira	200,93	75,71	7,48
Belém	154,22	67,30	7,30
Bragança	162,27	79,19	9,01
Breves	160,72	60,56	5,98
Cametá	233,01	87,80	8,67
Castanhal	222,81	97,23	10,55
Itaituba	167,56	63,13	6,23
Marabá	230,98	82,15	7,76
Oriximiná	206,28	83,13	8,59
Paragominas	250,72	89,17	8,42
Redenção	225,23	84,86	8,38
Tucuruí	229,84	86,60	8,55

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Com a análise da Tabela 12, percebe-se que, para o tempo de retorno de 10 anos, tem-se os maiores valores de intensidade de chuvas em Paragominas e Cametá, para um tempo de duração de 6 minutos, e em Cametá e Castanhal, para os tempos de duração de 60 e 1440 minutos. Os menores valores de intensidade de chuvas foram obtidos para as cidades de Belém e Bragança, para o tempo de duração de 6 minutos, e para as cidades de Breves e Itaituba, para os tempos de duração de 60 e 1440 minutos. Ou seja, Paragominas tende a ter chuvas muito intensas em pouco tempo, o que é preocupante para fins de drenagem de rodovia. Para chuvas mais duradouras, Paragominas deixa de ser crítica. Isso se dá não só

em função da chuva média, mas também em função do desvio-padrão dos dados e da isozona na qual a cidade está inserida.

Em relação ao tempo de retorno de 100 anos, utilizado no dimensionamento de pontes (dispositivo de drenagem de transposição de talvegues), apresentado na Tabela 13, verificou-se que os maiores valores de precipitação foram determinados em Paragominas e Cametá, para o tempo de duração de 6 minutos; em Castanhal e Paragominas, para o tempo de duração de 60 minutos; e em Castanhal e Bragança, para o tempo de duração de 1440 minutos. Enquanto, Belém e Breves obtiveram os menores valores, para o tempo de duração de 6 minutos; e Breves e Itaituba, para os tempos de duração de 60 e 1440 minutos.

Com isso, percebe-se que as maiores precipitações ocorreram nas cidades de Castanhal e Paragominas, que obtiveram as maiores chuvas críticas diárias (Tabela 6) e na cidade de Cametá e Bragança que tiveram a quinta e sexta maiores chuvas críticas diária, respectivamente, enquanto os menores valores para as precipitações se concentraram nas cidades de Belém, Breves e Itaituba que registraram as menores chuvas críticas diárias. Vale destacar que há variações em relação às chuvas definidas, por conta do Desvio Padrão, mas, também, pelos coeficientes de desagregação de chuvas, visto que são isozonas diferentes e pelos pares de tempos analisados.

4.3 Geração das equações de chuvas intensas

O desenvolvimento do cálculo para geração das equações de chuvas intensas será detalhado apenas para a cidade de Belém, em prol da objetividade na apresentação dos resultados, visto que as demais equações foram obtidas seguindo uma rotina de cálculo análoga e estão contidas no Apêndice E. Com isso, após aplicar os métodos para distribuição de probabilidades e desagregação de chuvas para o município de Belém, calcularam-se os parâmetros (a), (b), (c) e (d) da equação de chuvas.

Primeiro, definiu-se a constante de amorfismo (c) por meio das equações 5 e 6, conforme a Tabela 14. Sendo que os pontos (i_1, t_1) e (i_2, t_2) equivalem, respectivamente, à intensidade e ao tempo para a duração de 6 e 60 minutos, de acordo com os dados da Tabela 10. O valor de i_3 foi obtido por meio da equação 5, e o t_3 , através da leitura das curvas IDF, ou seja, faz-se a plotagem dos valores de i_3 em cada curva IDF para seus respectivos tempos de retorno e acha-se o valor de t_3

correspondente a esses pontos. Por fim, utilizando a equação 6, obtém-se o parâmetro (c), resultando em um valor de 6,9643 para a cidade de Belém. Os cálculos para a primeira linha estão discriminados abaixo. Para as demais, segue-se processo análogo.

$$i_3 = \sqrt{i_1 \times i_2} = \sqrt{116,77 \times 47,78} = 74,69$$

$$c = \frac{(t_3)^2 - t_1 \times t_2}{(t_1 + t_2 - 2 \times t_3)} = \frac{(22,5)^2 - 6 \times 60}{(6 + 60 - 2 \times 22,5)} = 6,9643$$

Tabela 14 – Obtenção da constante de amorfismo (c) para a cidade de Belém

T_R	i_1 (mm/h)	t_1 (min)	i_2 (mm/h)	t_2 (min)	i_3 (mm/h)	t_3 (min)	c
5	116,77	6	47,78	60	74,69	22,5	6,9643
10	130,08	6	59,69	60	82,79	22,5	6,9643
15	137,58	6	55,45	60	87,35	22,5	6,9643
20	142,84	6	57,28	60	90,46	22,5	6,9643
25	146,89	6	58,76	60	92,90	22,5	6,9643
50	159,37	6	63,10	60	100,28	22,5	6,9643
100	154,22	6	67,30	60	101,88	22,5	6,9643

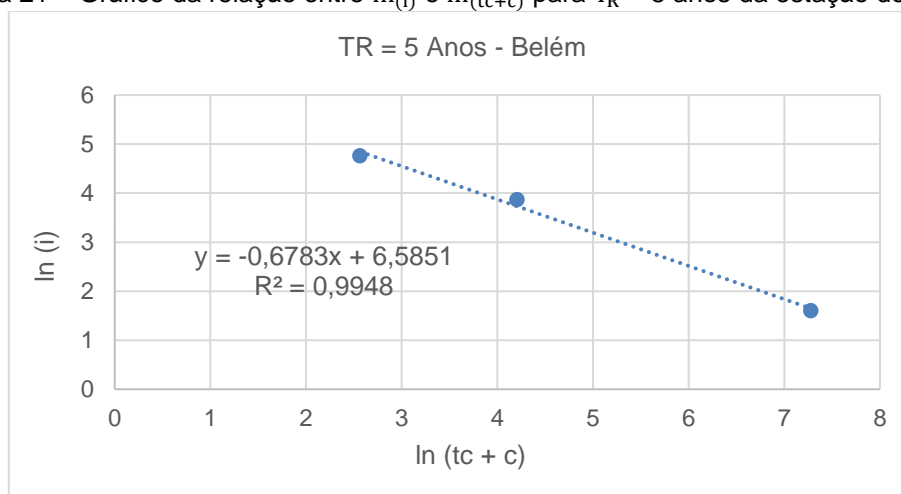
Fonte: Autoria Própria, 2021.

De posse da constante (c), definiu-se o parâmetro (d) através das funções geradas por meio da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para os Tempos de Retorno (T_R) de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos, listados no Quadro 1. Destaca-se que o parâmetro (d) é o coeficiente angular da reta gerada pela regressão linear quando se plotam em um gráfico o $\ln(tc+c)$ no eixo x e o $\ln(i)$ no eixo y. Nas Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27 estão indicadas, respectivamente, as regressões lineares entre os valores de $\ln(tc+c)$ e $\ln(i)$ para Tempos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos.

Quadro 1 – Obtenção de $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Belém

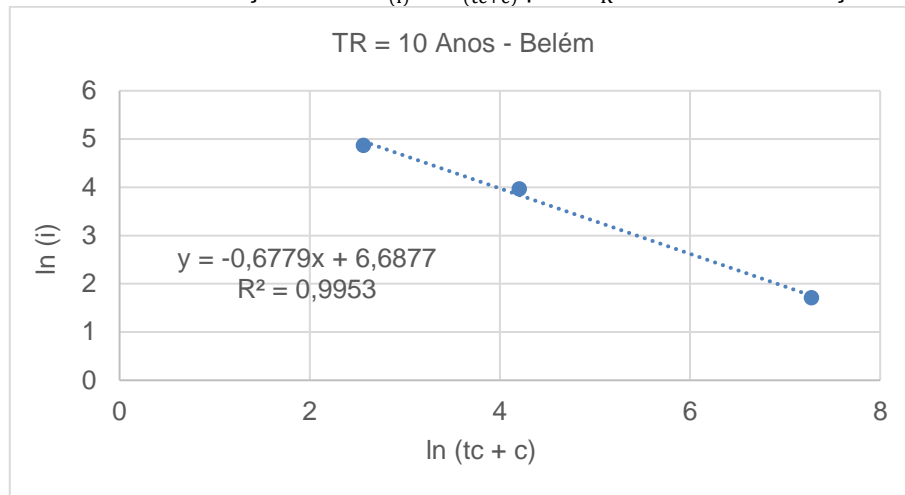
T_R	P	tc (min)	tc (h)	i (mm/h)	$\ln_{(i)}$	tc + c (min)	$\ln_{(tc+c)}$
5 anos	119,15	1440	24,00	4,96	1,6023	1446,96	7,2772
	47,78	60	1,00	47,78	3,8666	66,96	4,2042
	11,68	6	0,10	116,77	4,7602	12,96	2,5622
10 anos	132,73	1440	24,00	5,53	1,7103	1446,96	7,2772
	52,69	60	1,00	52,69	3,9645	66,96	4,2042
	13,01	6	0,10	130,08	4,8681	12,96	2,5622
15 anos	140,39	1440	24,00	5,85	1,7664	1446,96	7,2772
	55,45	60	1,00	55,45	4,0156	66,96	4,2042
	13,76	6	0,10	137,58	4,9242	12,96	2,5622
20 anos	145,76	1440	24,00	6,07	1,8039	1446,96	7,2772
	57,28	60	1,00	57,28	4,0480	66,96	4,2042
	14,28	6	0,10	142,84	4,9617	12,96	2,5622
25 anos	149,89	1440	24,00	6,25	1,8318	1446,96	7,2772
	58,76	60	1,00	58,76	4,0734	66,96	4,2042
	14,69	6	0,10	146,89	4,9897	12,96	2,5622
50 anos	162,62	1440	24,00	6,78	1,9133	1446,96	7,2772
	63,10	60	1,00	63,10	4,1446	66,96	4,2042
	15,94	6	0,10	159,36	5,0712	12,96	2,5622
100 anos	175,25	1440	24,00	7,30	1,9882	1446,96	7,2772
	67,30	60	1,00	67,30	4,2091	66,96	4,2042
	15,42	6	0,10	154,22	5,0384	12,96	2,5622

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 21 – Gráfico da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para $T_R = 5$ anos da estação de Belém

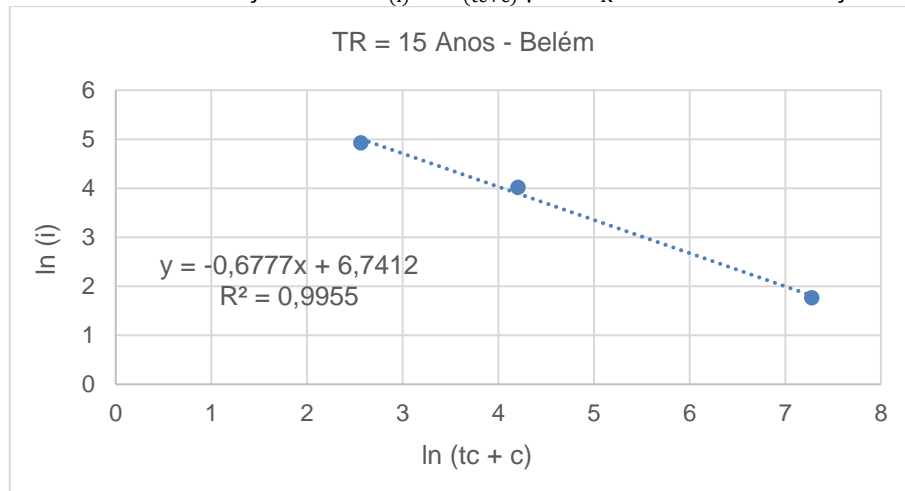
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 22 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 10$ anos da estação de Belém



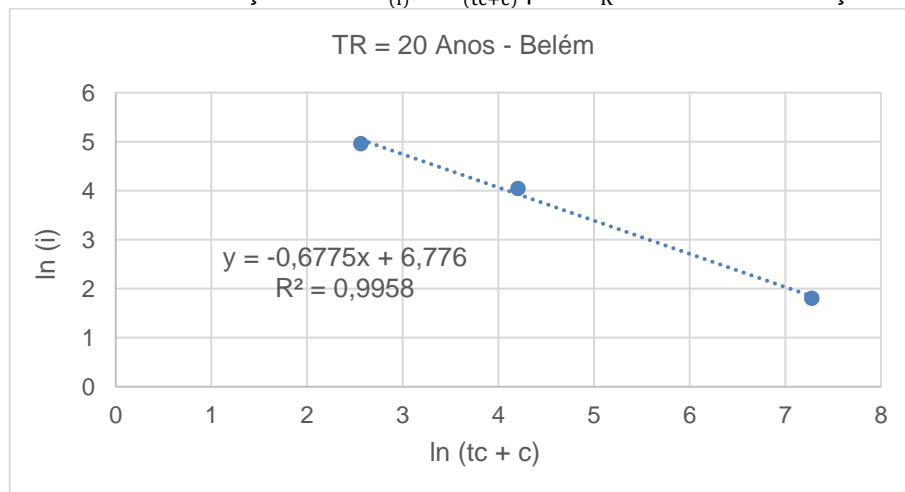
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 23 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 15$ anos da estação de Belém



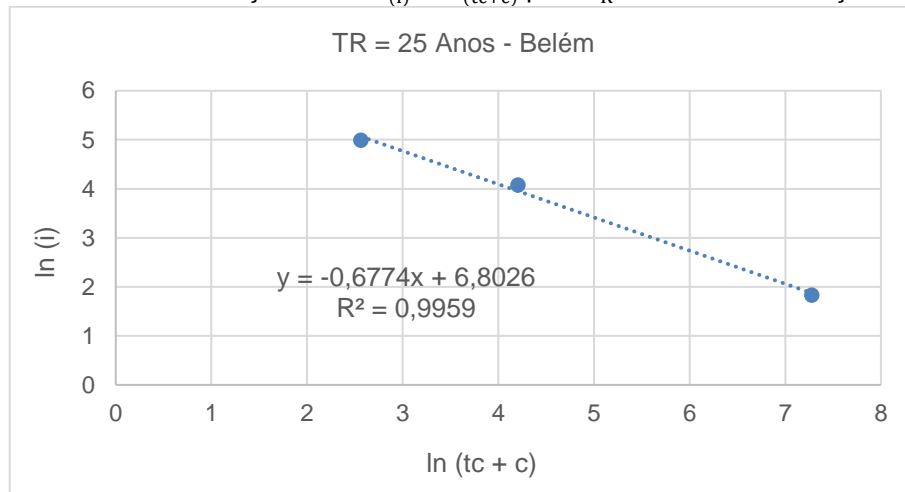
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 24 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 20$ anos da estação de Belém



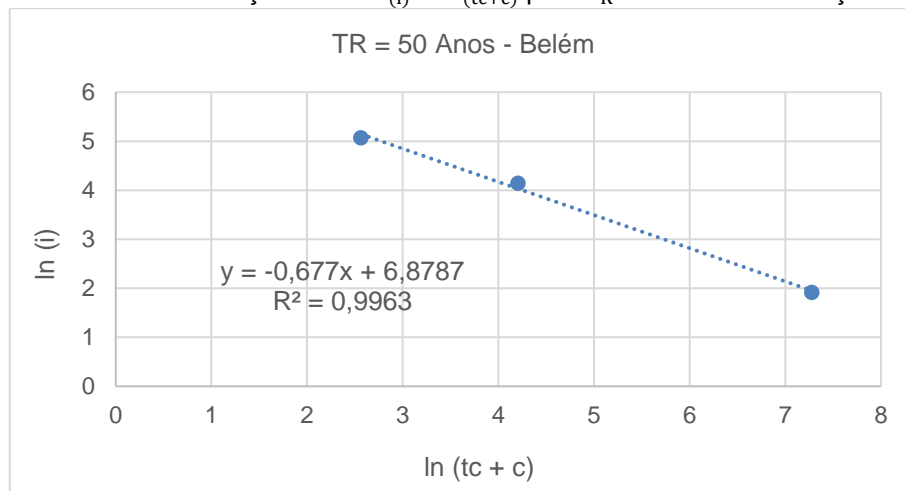
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 25 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 25$ anos da estação de Belém



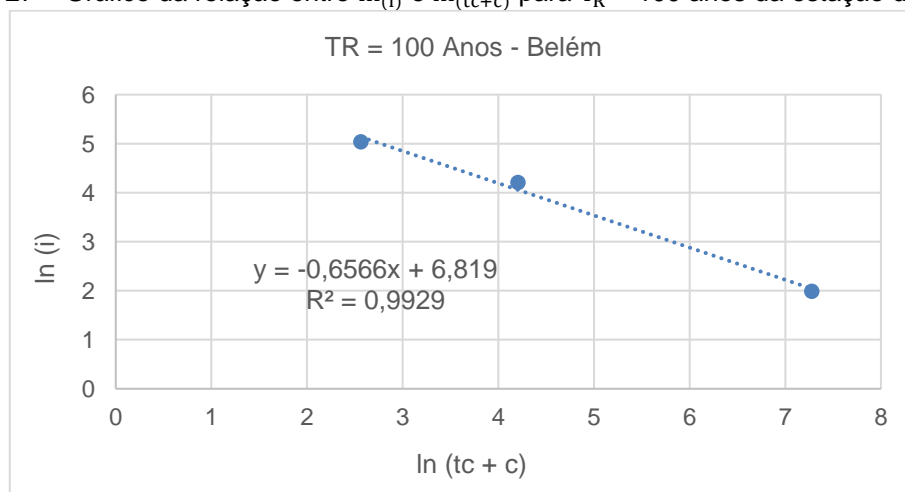
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 26 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 50$ anos da estação de Belém



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 27 – Gráfico da relação entre $\ln(i)$ e $\ln(tc+c)$ para $T_R = 100$ anos da estação de Belém



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Vale ressaltar que as equações das retas obtiveram elevados valores de R^2 , importante para a confiabilidade dos cálculos, como cada equação da reta possui diferentes valores para esta constante (Tabela 15), definiu-se o parâmetro (d) pela média aritmética das constantes de cada equação, resultando em (d) igual a 0,6746. Além disso, foram extraídos também, os valores de $\ln_{(M)}$, que equivale ao valor da constante que não acompanha a variável “x” e $\ln_{(TR)}$, que é o logaritmo natural para cada tempo de retorno, conforme a Tabela 15.

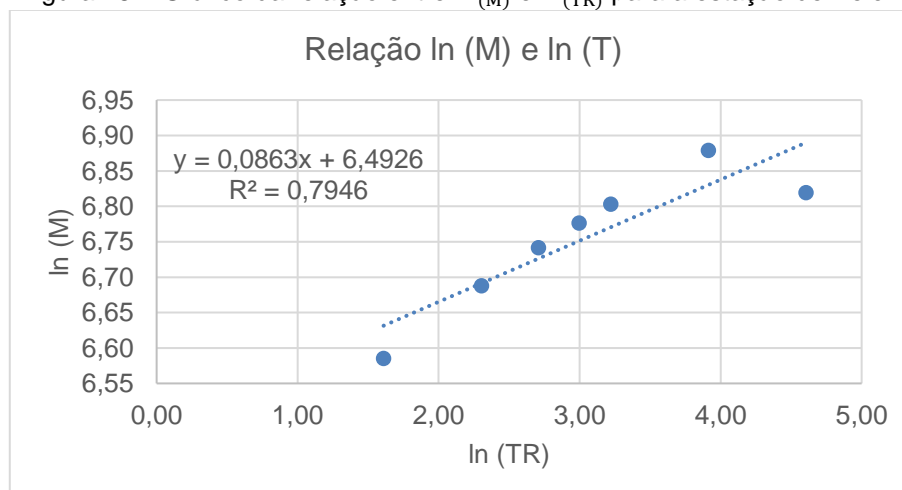
Tabela 15 – Equações da reta e valores (d), $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ extraídos das Figuras 21 a 27, para a cidade de Belém

Equação	R^2	T_R (anos)	d	Média dos valores de (d)	$\ln_{(M)}$	$\ln_{(TR)}$
$y = -0,6783x + 6,5851$	0,9948	5	0,6783		6,5851	1,6094
$y = -0,6779x + 6,6877$	0,9953	10	0,6779		6,6877	2,3026
$y = -0,6777x + 6,7412$	0,9955	15	0,6777		6,7412	2,7081
$y = -0,6775x + 6,776$	0,9958	20	0,6775	0,6746	6,7760	2,9957
$y = -0,6774x + 6,8026$	0,9959	25	0,6774		6,8026	3,2189
$y = -0,677x + 6,8787$	0,9963	50	0,6770		6,8787	3,9120
$y = -0,6566x + 6,819$	0,9929	100	0,6566		6,8190	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Os parâmetros (a) e (b) da equação de chuvas intensas foram extraídos através da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, cujos valores, apresentados na Tabela 15, foram plotados, resultando no gráfico da Figura 28.

Figura 28 – Gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a estação de Belém



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Por meio da equação da reta gerada pelo gráfico da Figura 28, extraíram-se os valores de $\ln_{(a)}$ e dos parâmetros (a) e (b), conforme a Tabela 16. Sendo “a” a operação inversa de $\ln_{(a)}$, ou seja, $\exp(\ln_{(a)})$.

Tabela 16 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b) extraídos da Figura 28, para a cidade de Belém

$\ln_{(a)}$	a	b	R ²
6,4926	660,2378	0,0863	0,7946

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Logo, com a determinação de todos os parâmetros da equação de chuvas, empregou-se a equação 4 para apresentar a equação de chuvas intensas do município de Belém, conforme discriminado abaixo.

$$i = \frac{a \times T_R^b}{(t_c + c)^d} = \frac{660,2378 \times (T_R)^{0,0863}}{(t_c + 6,9643)^{0,6746}}$$

Vale lembrar que, na definição dos parâmetros das equações de chuvas intensas para as demais cidades em estudo, utilizou-se o mesmo passo a passo descrito para a capital paraense, resultando nas Tabelas apresentadas no Apêndice E. Na Tabela 17, estão listados os parâmetros das equações para os 12 municípios estudados.

Tabela 17 - Parâmetros a, b, c e d das equações de chuvas intensas

Município	a	b	c	d
Altamira	877,8713	0,0914	6,1500	0,7156
Belém	660,2378	0,0863	6,9643	0,6746
Bragança	533,8954	0,1043	5,0966	0,6242
Breves	739,0015	0,0936	6,9643	0,7247
Cametá	1136,7175	0,0802	6,9646	0,7247
Castanhal	702,9600	0,1402	5,9935	0,6643
Itaituba	887,1375	0,0618	6,9643	0,7247
Marabá	1069,2364	0,1014	6,9643	0,7448
Oriximiná	786,5844	0,1115	6,1500	0,6923
Paragominas	1038,2584	0,1126	6,1500	0,7355
Redenção	1034,2171	0,0911	6,7970	0,7229
Tucuruí	1048,9029	0,0843	6,3085	0,7174

Fonte: Autoria Própria, 2021.

4.4 Validação das equações de chuvas intensas

Sendo assim, definidas as equações de chuvas intensas para as 12 cidades, fez-se a validação, por meio do Coeficiente de Eficiência (COE), utilizando a equação 11. Para isto, utilizou-se, como Eventos Observados (E_m), os dados de intensidade de chuva definidos para cada tempo de retorno (5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos) e tempo de concentração (24 horas, 1 hora e 0,10 horas), apresentados na Tabela 11, para a cidade de Belém; e no Apêndice D, para os demais municípios.

Em seguida, foram calculados os Eventos Simulados (E_s), os quais correspondem aos valores de intensidade de chuva calculados a partir das equações de chuva de cada município (equação 4) com as constantes “a”, “b”, “c” e “d” indicadas na Tabela 17 para cada município. Para que se pudesse fazer a comparação com os Eventos Observados (E_m) na geração das curvas IDF foram utilizados os mesmos pares de pontos (T_R, t_c), ou seja, T_R (5, 10, 15, 20, 25, 50 e 100 anos) e t_c (24, 1 e 0,1h).

Por fim, calculou-se a média dos eventos simulados e aplicou-se a fórmula descrita na equação 11. Os valores de E_m , E_s e \bar{E}_s para a cidade de Belém, e o resultado do COE estão dispostos no Quadro 2. Assim, validaram-se as equações considerando cada período de retorno, que equivale ao período dos Eventos. As expressões abaixo indicam o processo de cálculo para as três primeiras linhas do Quadro 2, referente ao $T_R= 5$ anos. As demais linhas são calculadas de forma análoga.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \times (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n \times (E_m - \bar{E}_s)^2}$$

$$E_s = \frac{[660,2378 \times (5^{0,0863})]}{(1440 + 6,9643)^{0,6746}} = 5,5973 \text{ mm/h}$$

$$E_s = \frac{[660,2378 \times (5^{0,0863})]}{(60 + 6,9643)^{0,6746}} = 44,4946 \text{ mm/h}$$

$$E_s = \frac{[660,2378 \times (5^{0,0863})]}{(6 + 6,9643)^{0,6746}} = 134,6979 \text{ mm/h}$$

$$COE = 1 - \left[\frac{(4,9646 - 5,5973)^2 + (47,7794 - 44,4946)^2 + (116,7675 - 134,6979)^2}{(4,9646 - 61,5966)^2 + (47,7794 - 61,5966)^2 + (116,7675 - 61,5966)^2} \right]$$

$$COE = 1 - 0,0516 = 0,9484$$

Quadro 2 – Valores dos Eventos Observados e Simulados para a cidade de Belém

T_R	t_c (min)	Em	Es	\bar{E}_s	COE
5 anos	1440	4,9646	5,5973	61,5966	0,9484
5 anos	60	47,7794	44,4946		
5 anos	6	116,7675	134,6979		
10 anos	1440	5,5304	5,9423	65,3937	0,9752
10 anos	60	52,6939	47,2375		
10 anos	6	130,0757	143,0013		
15 anos	1440	5,8497	6,1539	67,7224	0,9827
15 anos	60	55,4548	48,9196		
15 anos	6	137,5841	148,0937		
20 anos	1440	6,0732	6,3086	69,4248	0,9862
20 anos	60	57,2823	50,1494		
20 anos	6	142,8413	151,8164		
25 anos	1440	6,2454	6,4313	70,1375	0,9881
25 anos	60	58,7563	51,1245		
25 anos	6	146,8907	154,7683		
50 anos	1440	6,7757	6,8277	75,1375	0,9914
50 anos	60	63,0955	54,2760		
50 anos	6	159,3650	164,3089		
100 anos	1440	7,3022	7,2486	79,7693	0,9541
100 anos	60	67,2969	57,6218		
100 anos	6	154,2220	174,4375		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

O mesmo procedimento utilizado para a determinação do Coeficiente de Eficiência do município de Belém, foi realizado para as outras 11 cidades de forma análoga e os resultados estão dispostos nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Valores do COE para as cidades de Altamira, Bragança, Breves, Cametá, Castanhal e Itaituba

T_R	Valores de COE por município					
	Altamira	Bragança	Breves	Cametá	Castanhal	Itaituba
5 anos	0,9630	0,9041	0,9675	0,9693	0,9296	0,9713
10 anos	0,9866	0,9455	0,9896	0,9895	0,9712	0,9892
15 anos	0,9924	0,9580	0,9947	0,9945	0,9803	0,9941
20 anos	0,9946	0,9636	0,9964	0,9963	0,9839	0,9961
25 anos	0,9957	0,9669	0,9972	0,9971	0,9857	0,9970
50 anos	0,9968	0,9736	0,9975	0,9975	0,9887	0,9975
100 anos	0,9683	0,9104	0,9735	0,9746	0,9389	0,9757
MÉDIA	0,9853	0,9460	0,9881	0,9884	0,9683	0,9887

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 19 – Valores do COE para as cidades de Marabá, Oriximiná, Paragominas, Redenção e Tucuruí

T_R	Valores de COE por município				
	Marabá	Oriximiná	Paragominas	Redenção	Tucuruí
5 anos	0,9724	0,9514	0,9663	0,9670	0,9650
10 anos	0,9927	0,9812	0,9903	0,9891	0,9871
15 anos	0,9967	0,9882	0,9951	0,9943	0,9927
20 anos	0,9980	0,9910	0,9968	0,9961	0,9949
25 anos	0,9985	0,9924	0,9975	0,9969	0,9960
50 anos	0,9981	0,9944	0,9978	0,9974	0,9970
100 anos	0,9790	0,9576	0,9731	0,9727	0,9699
MÉDIA	0,9908	0,9795	0,9881	0,9876	0,9861

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Analisando os resultados do Coeficiente de Eficiência, destaca-se que os melhores resultados foram obtidos para os Tempos de Retorno de 50 anos, enquanto os Tempos de Retorno de 5 e 100 anos registraram menores coeficientes. Além disso, percebe-se que o maior COE foi obtido em Marabá, registrando a média de 0,9908, definindo que este município possua a equação mais ajustada, e o menor COE foi obtido em Bragança, resultando na média de 0,9460, inferindo que esta cidade possua a equação de chuvas intensas menos precisa.

Quando se compara os resultados obtidos para cada COE, com a isozona a qual cada município pertence, infere-se que, Marabá é uma das cidades com os maiores coeficientes de desagregação de chuvas, pois se encontra na zona F, resultando nos melhores valores de COE. Já Bragança, por se enquadrar na zona B, é a cidade que possui os menores coeficientes de desagregação, o que contribui para obtenção dos menores Coeficientes de Eficiência.

Em suma, percebe-se que os valores obtidos estão bem acima de 0,75, garantindo o bom desempenho das equações, tornando-as válidas, de acordo com a Tabela 2, podendo auxiliar na determinação de precipitações máximas para estruturas de drenagem urbana e rodoviária, atividades agrícolas e energéticas.

4.5 Confronto de resultados

Com a determinação e validação das equações, foi possível compará-las com os dados obtidos por Souza *et al.* (2012), dispostos no Anexo A, para as 12 cidades de estudo, e com os dados obtidos por Cruz *et al.* (2019) para o município de Altamira, a fim de identificar quais valores sofreram acréscimo ou decréscimo com o

passar dos anos. Sendo assim, os dados da presente pesquisa e de Souza *et al.* (2012) foram organizados no Quadro 3 para fins de comparação.

Quadro 3 – Comparação entre os resultados obtidos e os apresentados por Souza *et al.* (2012)

Município	Parâmetro	Presente pesquisa	Souza <i>et al.</i> (2012)	Município	Parâmetro	Presente pesquisa	Souza <i>et al.</i> (2012)
Altamira	a	877,8713	1204,0580	Itaituba	a	887,1375	1073,2685
	b	0,0914	0,1152		b	0,0618	0,1317
	c	6,1500	9,7894		c	6,9643	9,7851
	d	0,7156	0,7243		d	0,7247	0,7242
Belém	a	660,2378	960,5846	Marabá	a	1069,2364	1242,9246
	b	0,0863	0,0954		b	0,1014	0,1057
	c	6,9643	9,7993		c	6,9643	9,7849
	d	0,6746	0,7245		d	0,7448	0,7242
Bragança	a	533,8954	1206,4232	Oriximiná	a	786,5844	1111,7396
	b	0,1043	0,1087		b	0,1115	0,1063
	c	5,0966	9,7844		c	6,1500	9,7954
	d	0,6242	0,7242		d	0,6923	0,7244
Breves	a	739,0015	843,3295	Paragominas	a	1038,2584	1125,9005
	b	0,0936	0,0985		b	0,1126	0,1232
	c	6,9643	9,7958		c	6,1500	9,7922
	d	0,7247	0,7244		d	0,7355	0,7244
Cametá	a	1136,7175	1216,6448	Redenção	a	1034,2171	1156,4648
	b	0,0802	0,0951		b	0,0911	0,1038
	c	6,9643	9,7918		c	6,7970	9,7910
	d	0,7247	0,7244		d	0,7229	0,7243
Castanhal	a	702,9600	1216,7335	Tucuruí	a	1048,9029	1264,6709
	b	0,1402	0,1266		b	0,0843	0,1012
	c	5,9935	9,7886		c	6,3085	9,7852
	d	0,6643	0,7243		d	0,7174	0,7242

Fonte: Autoria Própria, 2021.

O parâmetro “a” da presente pesquisa foi sempre inferior àqueles obtidos na pesquisa de Souza *et al.* (2012), já o parâmetro “b” da presente pesquisa, possui grandes semelhanças, porém, quase sempre é inferior àqueles obtidos na pesquisa de Souza *et al.* (2012), exceto nas cidades de Castanhal e Oriximiná. O parâmetro “c” da presente pesquisa foi sempre inferior àqueles obtidos na pesquisa de Souza *et al.* (2012), enquanto o parâmetro “d” da presente pesquisa, apresentou maior semelhança com àqueles obtidos na pesquisa de Souza *et al.* (2012), sofrendo aumento para as cidades de Breves, Cametá, Itaituba, Marabá e Paragominas.

Vale ressaltar que a diferença entre os parâmetros obtidos pode ter ocorrido por conta de alguns fatores, como a diferença de séries históricas, as quais são, por vezes, maiores no presente trabalho do que no de Souza *et al.* (2012) e vice-versa. Há, também, a diferença entre os métodos utilizados para a desagregação de chuvas, visto que Souza *et al.* (2012) adotaram o método de DAEE-CETESB, enquanto o presente trabalho empregou o método das Isozonas. Além disso, Souza *et al.* (2012) utilizaram o software *Table Curve 3D*, para obtenção das equações de chuva, porém, na presente pesquisa utilizou-se o método descrito no Passo 4 do item 3.2, com uso de logaritmos e regressões realizado no programa Excel.

Além do mais, é importante comparar as intensidades de chuva obtidas e, para isso serão utilizados os valores obtidos por Souza *et al.* (2012) de intensidade de precipitação para o tempo de retorno de 15 anos e o tempo de concentração de 30 minutos, destacados em sua pesquisa. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 20.

Tabela 20 – Intensidade de precipitação em mm/h, para um tempo de retorno de 15 anos e um tempo de duração de 30 minutos para os municípios estudados

Município	Presente pesquisa	Souza <i>et al.</i> (2012)	Diferença percentual (%)
Altamira	86,29	114,14	28
Belém	73,04	86,22	13
Bragança	76,84	112,42	36
Breves	69,59	76,37	7
Cametá	103,23	109,17	6
Castanhal	95,06	118,96	24
Itaituba	76,65	106,43	30
Marabá	95,64	114,88	19
Oriximiná	88,76	102,83	14
Paragominas	100,63	109,02	8
Redenção	97,69	106,29	9
Tucuruí	100,17	115,47	15

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Com os dados da Tabela 20, verifica-se que todas as intensidades de chuva estimadas na presente pesquisa foram menores que as de Souza *et al.* (2012). Em alguns casos, como em Breves, Cametá, Paragominas e Redenção, a diferença foi de menos de 10%. Já em Bragança e Itaituba as diferenças foram mais exacerbadas, superiores a 30%. Tais percentuais podem ser justificados pelas séries de dados utilizadas, haja visto que, as cidades com menos de 10% obtiveram

registros históricos de chuvas com, no máximo, 3 anos de diferença. Enquanto as cidades de Bragança e Itaituba, que obtiveram as maiores diferenças percentuais, apresentaram séries históricas com 6 e 9 anos de diferença, respectivamente. É importante destacar que o estudo de Souza *et al.* (2012) não relata os postos utilizados e seus critérios de seleção dos dados, por isso, em alguns casos, houve grande variação no tamanho da série histórica, além disso, o presente trabalho buscou utilizar apenas dados consistidos disponibilizados pela ANA.

Considerando a cidade de Altamira, os dados obtidos se aproximam dos informados por Cruz *et al.* (2019), conforme a Tabela 21, mesmo os das estações sintéticas S.1, S.2 e S.3 que são dados provenientes de satélites, o que confirma o potencial de dados de sensoriamento remoto no estudo dos eventos hidrológicos. Percebe-se também que, a aproximação dos valores, em comparação a estação analógica, se dá porque os dois estudos utilizaram as mesmas bases de dados (Portal HIDROWEB), com série de dados iguais (31 anos), diferindo apenas a localização do ponto de coleta. Já em comparação ao trabalho de Souza *et al.* (2012) para a cidade de Altamira, percebe-se que há uma variação maior dos parâmetros, principalmente o (a) e o (c), em parte porque o estudo de Souza *et al.* (2012) utilizou uma série histórica menor (28 anos), além de ter sido utilizado diferentes métodos para a desagregação de chuvas e diferentes programas para obtenção das equações, conforme já mencionado.

Tabela 21 – Comparação entre os resultados obtidos para o município de Altamira, com os resultados apresentados por Cruz *et al.* (2019)

Município	Parâmetros	Presente pesquisa	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.1	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.2	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.3	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação Analógica
Altamira	a	877,8713	807,92	650,56	836,48	929,23
	b	0,0914	0,1235	0,1056	0,1277	0,1045
	c	6,1500	7,009	7,009	5,688	6,082
	d	0,7156	0,701	0,712	0,697	0,701

Fonte: Autoria Própria, 2021.

A fim de comparar as equações obtidas, de modo geral, aplicou-se o mesmo par de $T_R = 15$ anos e $t_c = 30$ minutos, utilizado por Souza *et al.* (2012), para as

equações geradas por Cruz *et al.* (2019), nas 4 estações da pesquisa, e os resultados obtidos foram destacados nas Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação entre as intensidades para o município de Altamira, com os resultados apresentados por Cruz *et al.* (2019), para $T_R = 15$ anos e $t_c = 30$ minutos

Município	Presente pesquisa	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.1	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.2	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação S.3	Cruz <i>et al.</i> (2019) Estação Analógica
Altamira	86,29	89,79	66,20	97,84	99,85

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Com isso, ao se comparar o valor do presente trabalho com os valores obtidos por Cruz *et al.* (2019) nas estações de satélites S1 e S3 e a estação Analógica, observa-se que a intensidade de chuva é menor, com diferença de 4,1%, 23,3% e 15,7%, respectivamente. No entanto, ao se comparar com a estação de satélite S2, percebe-se que a intensidade de chuva da presente pesquisa é maior, com diferença de 23,3%. Tais variações podem ser justificadas analisando a grande área territorial da cidade de Altamira, que é o maior município do Brasil, então pode haver diferenças ao se comparar postos mais ao norte do município e postos mais ao sul.

À medida que novos dados são colhidos no decorrer dos anos, podem ocorrer diversas variações na frequência de chuvas em cada região, ocasionadas por fatores naturais ou por interferência humana. Com isso, é importante que sempre haja atualização nas equações de chuva das regiões, de modo que, a análise dos parâmetros seja mais precisa e com mais dados confiáveis.

4.6 Chuvas de Projeto para drenagem de rodovias

As equações obtidas são importantes para a determinação das chuvas de projeto para diversas atividades, principalmente, a drenagem de rodovias, que dependem da intensidade de chuva, ocorrência e duração. Com isso, foram obtidas as precipitações intensas, por meio das equações, utilizando os pares de Tempos de Retorno e de Concentração para cada dispositivo de drenagem. Sendo assim, calculou-se a chuva de projeto para cada tipo de obra nas cidades de estudo.

Para dimensionamento das obras de Drenagem Superficial (como as valetas e sarjetas) utilizou-se o par de tempo de retorno de 10 anos e tempo de

concentração de 5 minutos, conforme recomendação do DNIT, e as intensidades obtidas foram listadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem superficial

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Paragominas	228,37
2º	Cametá	226,31
3º	Tucuruí	223,25
4º	Redenção	214,25
5º	Marabá	212,65
6º	Castanhal	197,47
7º	Altamira	192,93
8º	Oriximiná	191,52
9º	Itaituba	169,30
10º	Bragança	160,31
11º	Breves	151,74
12º	Belém	150,96

Fonte: Autoria Própria, 2021.

É importante ressaltar que, para a drenagem superficial, a chuva mais intensa foi obtida na cidade de Paragominas com 228,37 mm/h e a menos intensa foi a de Belém com 150,96 mm/h, ou seja, a chuva de projeto de uma sarjeta de corte para Paragominas é 51,28% maior que a precipitação para o mesmo dispositivo de drenagem superficial na cidade de Belém.

Em seguida, calculou-se a chuva de projeto para as obras de drenagem subsuperficial, considerando o tempo de retorno de 1 ano e tempo de concentração de 60 minutos, conforme recomendação do DNIT. Feito isso, organizou-se na Tabela 24 os valores obtidos para cada cidade do estudo.

Tabela 24 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem subsuperficial

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Cametá	54,01
2º	Tucuruí	51,75
3º	Redenção	49,60
4º	Paragominas	47,57
5º	Marabá	46,69
6º	Altamira	43,72
7º	Castanhal	43,47
8º	Oriximiná	43,19
9º	Itaituba	42,15
10º	Bragança	39,39
11º	Belém	38,72
12º	Breves	35,11

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Em relação aos dispositivos de drenagem subsuperficial (como as camadas drenantes e os drenos), nota-se que, diferentemente da anterior, a chuva mais intensa foi registrada na cidade de Cametá, com 54,01 mm/h, em contrapartida, a cidade de Breves registrou a precipitação menos intensa, com 35,11mm/h. Sendo assim, um dreno em Breves, possui uma chuva de projeto 35% menor que o mesmo dreno na cidade de Cametá.

Por fim, calculou-se as chuvas de projeto para os dispositivos de drenagem de transposição de talwegues (bueiros de transposição de talwegues), adotando o tempo de retorno de 25 anos e o tempo de concentração de 10 minutos, conforme recomendações do DNIT, e os valores obtidos foram dispostos na Tabela 25.

Tabela 25 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem de transposição de talwegues

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Paragominas	192,80
2º	Cametá	189,11
3º	Tucuruí	185,69
4º	Redenção	180,40
5º	Marabá	179,91
6º	Castanhal	175,04
7º	Oriximiná	164,13
8º	Altamira	160,93
9º	Itaituba	139,10
10º	Bragança	137,22
11º	Belém	129,09
12º	Breves	128,37

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Nota-se que, para os dispositivos de transposição de talvegues, a maior intensidade pluviométrica ocorre em Paragominas (192,80 mm/h), já no município de Breves tem-se a menor intensidade pluviométrica (128,37 mm/h), o que representa uma diferença de aproximadamente 33,42% da maior para a menor chuva.

Observa-se também, que os rankings dos dispositivos de drenagem superficial ($T_R= 10$ anos e $t_c= 5$ min) e de transposição de talvegues ($T_R= 25$ anos e $t_c= 10$ min) são quase iguais, e suas intensidades são maiores quando comparadas ao dispositivo de drenagem subsuperficial ($T_R= 1$ ano e $t_c= 60$ min). Isso acontece, porque com tempos de concentração baixos, a intensidade de chuvas é mais alta para um mesmo Tempo de Retorno. Ou seja, fixando-se um T_R , à medida que se aumenta o t_c o valor das intensidades de chuvas diminui. Em contrapartida, à medida que se diminui o t_c o valor das intensidades de chuva aumenta. Além disso, infere-se que os resultados obtidos, para os dispositivos de drenagem superficial e de transposição de talvegues, com tempos de retorno de 10 e 25 anos, respectivamente, são mais confiáveis, por conta dos valores do COE para estes tempos de retorno, o que não ocorre para os dispositivos de drenagem subsuperficial, que possui um $T_R= 1$ ano, haja visto que, tempos de retorno mais baixos obtiveram menores valores de COE.

Nota-se que, a cidade de Breves obteve a menor intensidade pluviométrica em todos os cálculos, exceto para $T_R= 10$ anos e $t_c= 5$ minutos, no qual Belém apresentou a menor chuva intensa, corroborando com o fato de ambos os municípios terem obtidos as menores chuvas diárias críticas (Tabela 6). Vale destacar que, apesar da cidade de Castanhal ter registrado a maior chuva crítica, a mesma não obteve os maiores valores de intensidade, por alguns motivos, dentre eles a baixa média, comparada com a cidade de Cametá e Paragominas. Além disso, apesar do alto Desvio-Padrão, que aumenta os valores de precipitação, observou-se que a cidade de Castanhal está localizada em uma Isozona com baixos coeficientes, com isso obteve menores valores de Precipitação de 1 hora e 6 minutos, os quais influenciam na geração das curvas IDF e, conseqüentemente, nas equações de chuvas intensas.

Além disso, buscou-se comparar os resultados determinados pelas equações de Souza *et al.* (2012), para os mesmos pares de T_R e t_c , para cada tipo de drenagem de rodovias, com os obtidos na presente pesquisa para esses mesmos

dispositivos de drenagem. Com isso, calculou-se as precipitações e os resultados foram dispostos nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem superficial, utilizando as equações de Souza *et al.* (2012)

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Castanhal	231,43
2º	Tucuruí	226,98
3º	Marabá	225,40
4º	Altamira	223,08
5º	Bragança	220,31
6º	Cametá	215,13
7º	Paragominas	212,39
8º	Redenção	208,69
9º	Itaituba	206,64
10º	Oriximiná	201,68
11º	Belém	169,86
12º	Breves	150,26

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 27 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem subsuperficial, utilizando as equações de Souza *et al.* (2012)

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Altamira	72,51
2º	Tucuruí	58,44
3º	Marabá	57,44
4º	Castanhal	56,20
5º	Cametá	56,17
6º	Bragança	55,75
7º	Redenção	53,42
8º	Paragominas	51,98
9º	Oriximiná	51,33
10º	Itaituba	49,6
11º	Belém	44,33
12º	Breves	38,93

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 28 – Intensidade pluviométrica para obras de drenagem de transposição de talvegues, utilizando as equações de Souza *et al.* (2012)

Ordem	Município	Intensidade (mm/h)
1º	Castanhal	210,47
2º	Tucuruí	201,67
3º	Marabá	201,10
4º	Altamira	200,76
5º	Bragança	197,09
6º	Paragominas	192,55
7º	Cametá	190,08
8º	Itaituba	188,8
9º	Redenção	185,87
10º	Oriximiná	180,04
11º	Belém	150,13
12º	Breves	133,19

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Com os valores das precipitações de Souza *et al.* (2012), para cada dispositivo de drenagem, percebe-se que, assim como foi observado para as equações do presente trabalho, há maior variação para o Tempo de Retorno de 1 ano e tempo de concentração de a 60 minutos. Além disso, observa-se que, para a drenagem superficial, as equações do presente trabalho, resultaram em intensidades maiores para as cidades de Breves (151,74 mm/h), Cametá (226,31 mm/h), Paragominas (228,37 mm/h) e Redenção (214,25 mm/h), enquanto as chuvas intensas obtidas para Belém, Marabá, Oriximiná e Tucuruí, praticamente, não variaram e os municípios de Altamira, Bragança, Castanhal e Itaituba sofreram redução da precipitação.

Já para os dispositivos de drenagem subsuperficial, observa-se que os municípios de Breves, Cametá, Itaituba, Paragominas e Redenção, praticamente, não variaram os valores de intensidade, ao serem comparados com a Tabela 27, enquanto as cidades de Altamira, Belém, Bragança, Castanhal, Marabá, Oriximiná e Tucuruí obtiveram redução dos dados.

Por fim, considerando os valores de precipitação para a drenagem de transposição de talvegues, viu-se que o município de Paragominas (192,80 mm/h) registrou aumento de intensidade. Já as cidades de Breves, Cametá e Redenção quase não variaram e as demais cidades resultaram em chuvas menores que as de Souza *et al.* (2012).

4.7 Considerações Finais

Diante do que foi exposto, vê-se que as equações de chuvas intensas definidas na presente pesquisa mostraram-se confiáveis em razão dos elevados valores do Coeficiente de Eficiência, os quais foram superiores a 90% para todos os pares de T_R e t_c em todas as 12 cidades, apesar das limitações enfrentadas, como a falta ou falha de dados das séries históricas, a qual decorre da falha da Agência Nacional das Águas em disponibilizar dados pluviométricos confiáveis recentes, não atualizando as medições de chuvas em seu Portal, visto que, para o presente trabalho foi possível analisar dados consistidos até 2010, assim, inviabilizou-se a melhor análise de chuvas e, conseqüentemente, a obtenção de melhores equações de chuvas.

Além disso, vale ressaltar que, ao comparar as equações obtidas no presente trabalho com as equações obtidas no estudo de Souza et al. (2012), as variações dos dados de precipitação podem ter ocorrido pela diferença entre os métodos utilizados, visto que Souza et al. (2012) utilizou o método de DAEE-CETESB para desagregação de chuvas, enquanto que, no presente trabalho, usou-se o método das Isozonas, além das séries históricas serem diferentes e os programas para a obtenção das curvas IDF e equações de chuvas, já que Souza et al. (2012) utilizou o programa *Table Curve 3D*. Por outro lado, mesmo com limitações e variação na análise comparativa, ressalta-se que estas podem auxiliar em planejamento de sistemas de drenagem, bem como, em diversas atividades econômicas, provendo dados recentes de precipitações intensas.

É importante lembrar que foram determinadas equações para 1 município de cada Região de Integração do Estado do Pará, com isso, para o desenvolvimento de projetos em outros municípios, fora da área de estudo, e na ausência de estudos mais precisos, pode-se utilizar a equação correspondente a cidade de estudo pertencente a mesma região, isto é válido pois a divisão foi realizada considerando, dentre outros fatores, o clima comum entre os municípios. Ou, visando aumentar a segurança da obra, é possível utilizar a equação com chuvas mais críticas obtida para o Estado ficando a cargo do projetista fazer as devidas adaptações e considerações quanto ao fator de segurança ao usar a equação do município A para um município B.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou a questão das equações de chuvas intensas, visando a sua importância para diversas atividades como agricultura, geração de energia elétrica, obras hidráulicas como vertedouros de barragens e sistemas de drenagem urbana e rodoviária, tendo como objetivo principal gerar as equações de chuva para 12 municípios do Estado do Pará, utilizando a distribuição de probabilidade de Gumbel e a desagregação de chuvas pelo método das Isozonas. Além disso, foi possível gerar as curvas IDF para cada local estudado, a partir da análise das séries históricas do Portal HIDROWEB, bem como, realizar a comparação entre os resultados obtidos e os disponíveis em trabalhos anteriores, e por fim, calcular as chuvas de projeto para os dispositivos de drenagem de rodovias. Sabendo disso, pode-se afirmar que os objetivos foram cumpridos ao longo do trabalho, resultando em 12 equações de chuvas intensas para o Estado do Pará, utilizando os dados mais recentes disponíveis de precipitação, a fim de atualizar as equações definidas em outros estudos, podendo auxiliar, principalmente, o dimensionamento de infraestruturas de drenagem.

Diante dos resultados obtidos, é importante salientar que:

- O mês mais chuvoso, em todas as cidades, foi o mês de março, enquanto os meses com menos chuvas se distribuiu entre julho, agosto e outubro, de acordo com a localização geográfica da cidade. Em linhas gerais, cidades mais ao sul do estado apresentam estiagem crítica em julho e cidades mais ao norte do estado tem o mês de outubro como mais seco;
- Foram geradas as 12 curvas IDF seguindo o método de distribuição de probabilidade de Gumbel e o método de desagregação de Chuvas das Isozonas de Torrico (1974) e, em linhas gerais, observou-se que as curvas seguiram uma coerência, destoando apenas pelas curvas de 50 anos serem maiores, para 6 minutos de duração, por conta do coeficiente de desagregação ser maior que o de 100 anos, para o mesmo tempo de duração;
- Foram obtidas as 12 equações de chuvas intensas, a partir das curvas IDF, pelo método de linearização proposto por Villela (1975), nas quais o coeficiente “a” variou de 533,8954 a 1136,7175; o coeficiente “b” variou de 0,0618 a 0,1402; o parâmetro “c” variou de 5,0966 a 6,9643 e o parâmetro “d” variou de 0,6242 a 0,7448;

- A validação das equações pelo Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), mostrou que as mesmas, possuem um bom desempenho, com COE sempre acima de 0,90. A equação de chuvas intensas que apresentou o maior COE médio foi a de Marabá e a que apresentou o menor COE médio foi a de Bragança;
- As cidades que apresentaram as maiores precipitações foram Paragominas e Cametá. E as cidades que apresentaram as menores precipitações foram Belém e Breves;
- Observou-se que o ranking de chuvas intensas obtido para drenagem superficial e de transposição de talvegues foram equivalentes, havendo diferença no ranking obtido para o sistema de drenagem subsuperficial, devido ao uso de baixo tempo de retorno e elevado tempo de concentração.
- Diante da análise comparativa com as equações de Souza *et al.* (2012), utilizando o Tempo de Retorno de 15 anos e de Concentração de 30 minutos, constatou-se que as equações geradas na presente pesquisa levaram, sempre, a chuvas menos intensas. Em alguns casos como em Breves, Cametá, Paragominas e Redenção, os resultados foram próximos, com diferença de até 10%. Já para as cidades, Belém, Marabá, Oriximiná e Tucuruí as precipitações variaram de 10 a 20%, enquanto nas cidades de Altamira, Bragança, Castanhal e Itaituba as intensidades obtidas na presente pesquisa foram muito menores, com uma variação de 20 a 30%;
- Para a drenagem superficial, ao ser comparado com o estudo de Souza *et al.* (2012), destacou-se que as cidades de Breves, Cametá, Paragominas e Redenção, registraram aumento de intensidade. Enquanto Belém, Marabá, Oriximiná e Tucuruí, praticamente não houve variação; e as cidades de Altamira, Bragança, Castanhal, Itaituba obtiveram redução de intensidade;
- Considerando a drenagem subsuperficial, percebe-se que a variação das intensidades foi pequena, assim, as cidades de Breves, Cametá, Itaituba, Paragominas e Redenção, praticamente, não variou. Entretanto, Altamira, Belém, Bragança, Castanhal, Marabá, Oriximiná, e Tucuruí sofreram redução na intensidade;
- E, para a drenagem de transposição de talvegues, observa-se que a cidade de Paragominas registrou pequeno aumento dos valores de intensidade. As cidades de Breves, Cametá e Redenção, praticamente não variou; e as cidades de

Altamira, Belém, Bragança, Castanhal, Itaituba, Marabá, Oriximiná e Tucuruí obtiveram redução dos valores de intensidade.

Em suma, o trabalho apresentou equações confiáveis, com bons resultados, e poucas variações, comparadas aos estudos anteriores, podendo auxiliar no planejamento das obras hidráulicas, principalmente, os sistemas de drenagem. Em contrapartida, o estudo se deu apenas para 12 municípios do estado, por conta da restrição de tempo e indisponibilidade de dados, visto que o Portal HIDROWEB tem fornecido dados consistidos ainda antigos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

É importante que sejam desenvolvidos outros estudos e pesquisas complementares, visando analisar o comportamento do desvio-padrão em comparação com a quantidade de anos das séries históricas de chuvas, fato que foi identificado no presente trabalho, além disso, propõe-se a atualização das equações para mais municípios do estado e, até para as mesmas cidades do presente estudo, ora utilizando diferentes softwares para geração das equações, ora utilizando outros métodos de cálculo de distribuição de probabilidade e desagregação de chuvas, além da geração das equações em pacotes matemáticos/estatísticos, a fim de análise, comparação e contribuição para a academia e para o Estado do Pará.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. Barragem rompe na Bahia após fortes chuvas. **EL PAÍS**, [S. l.], 11 jul. 2019. Disponível em: https://brasil.elpais.com/brasil/2019/07/11/politica/1562875243_790456.html. Acesso em: 29 set. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Ministério do Desenvolvimento Regional. **Mudanças climáticas e recursos hídricos**. c2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/mudancas-climaticas-recursos-hidricos>. Acesso em: 20 ago. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **HidroWeb**: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>.

AGÊNCIA MINAS. **DER-MG atua em rompimento de ponte causado por fortes chuvas na Zona da Mata**. [S. l.], 12 jan. 2021. Disponível em: <http://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/der-mg-atua-em-rompimento-de-ponte-causado-por-fortes-chuvas-na-zona-da-mata>. Acesso em: 28 set. 2021.

ALIANÇA GERAÇÃO DE ENERGIA S.A. **Influência das chuvas na geração de energia elétrica**. [S. l.], c 2021. Disponível em: <https://aliancaenergia.com.br/br/influencia-das-chuvas-na-geracao-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 27 set. 2021.

ANGELI, Luiz Eduardo Scotta. **Ajuste de equações intensidade – duração – frequência a registros pluviométricos no estado do espírito santo**. 2015. 98 f. Projeto de graduação (Departamento de Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015. Disponível em: https://ambiental.ufes.br/sites/ambiental.ufes.br/files/field/anexo/ajuste_de_equacoes_intensidade_-_duracao_-_frequencia_a_registros_pluviometricos_no_estado_do_espirito_santo_-_luiz_eduardo_scotta_angeli.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

BALBINO, Amanda. **O impacto das mudanças climáticas na agricultura**. [S. l.]: Agrosmart, 3 out. 2016. Disponível em: <https://agrosmart.com.br/blog/impacto-mudancas-climaticas-na-agricultura/>. Acesso em: 19 set. 2021.

BACK, A. J. *et al.* Análise de chuvas intensas para projetos de drenagem. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil**, Santa Catarina, v. 2, n. 1, p. 14-18, 2019. DOI: 10.18616/civiltec.v2i1.5335. Disponível em: <http://periodicos.unesc.net/engcivil/article/view/5335>. Acesso em: 25 set. 2021.

BASSO, R. E. *et al.* Revisão das isozonas de chuvas intensas do Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 635-641, dez. 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016133691. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/gvTWTJsRtbmy95cgLYcjC5y/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 set. 2021.

BATISTA, T. L.; ALVES, F. M.; TAVARES, P. R. L. Utilização de dados pluviométricos para o desenvolvimento de equações IDF da região metropolitana de Fortaleza- CE, Brasil. **Revista DAE**, Ceará, v. 66, n. 211, p 118-129, set. 2018. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_211_n_1718.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

BATISTA, Tatiane Lima. **Geração de equações IDF dos municípios Cearenses pelo Método de desagregação por Isozonas implementado em um programa computacional**. 2018. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/30690/5/2018_dis_tlibatista.pdf. Acesso em: 14 set. 2021.

COLOMBELLI, Karina; MENDES, Rodrigo. Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas para o município de Videira, SC. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 4, n. 2, p. 169–180, dez. 2013. Disponível em: https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/3708/pdf_5. Acesso em: 10 set. 2021.

COTTA, H. H. A.; CORREA, W. de S. C.; ALBUQUERQUE, T. T. de A. Aplicação da distribuição de Gumbel para valores extremos de precipitação no município de Vitória- ES. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, Ano 12, v. 19, p 203-2017, dez. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/39440/29391>. Acesso em: 19 set. 2021.

CRUZ, J. da S. *et al.* Equações de chuvas intensas com dados CPC Morphing Technique (CMORPH) para o município de Altamira - PA. **IRRIGA**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 192–207, 2019. DOI: 10.15809/irriga.2019v24n1p192-207. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3654>. Acesso em: 28 set. 2021.

DAEE/ CETESB – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem urbana**: manual de projeto. 2º ed. corrigida. São Paulo: DAEE/ CETESB, 1980. 492 p.

DAEE/ USP – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Equações de chuvas intensas do estado de São Paulo**. São Paulo: DAEE/ USP, 1999. 141 p. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Fernando/leb1440/Aula%203/DAEE_Eq_Chuvas_SP.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

DELGADO, Neila Carvalho Ferreira. **Hidrologia na drenagem das rodovias**. 2008. 38 p. Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título (Especialização em transporte e Trânsito) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Belo Horizonte. Disponível em: http://www.der.mg.gov.br/index.php?preview=1&option=com_dropfiles&format=&task

=frontfile.download&catid=335&id=2361&Itemid=100000000000. Acesso em: 24 set. 2021.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 133 p. IPR 715. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/715_manual_de_hidrologia_basica.pdf. Acesso em: 28 set. 2021.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Drenagem de Rodovias**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 333 p. IPR 724. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/724_manual_drenagem_rodovias.pdf. Acesso em: 18 set. 2021.

FAPESPA. **Mapas**. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://www.fapespa.pa.gov.br/sistemas/radar2017/mapas.html>. Acesso em: 29 set. 2021.

FENDRICH, Roberto. **Chuvas intensas para obras de drenagem no Estado do Paraná**. 1. ed. Curitiba- PR: Champagnat, 1998. 99 p.

GOMES, Ariel Ortiz. **Modelagem Estatística da Precipitação**: estudo de caso bacia do Rio Taquarizinho/ MS. 2011. 63 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufms.br/bitstream/123456789/2185/1/Ariel%20Ortiz%20Gomes.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE – Cidades @**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/panorama>. Acesso em: 27 set. 2021.

LOPES, Mayrlla Karla Coelho. **Estimativas de precipitação das imagens de satélites comparada a registros pluviométricos na sub-bacia do Rio Piancó-Paraíba**. 2020. 82 p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Pombal, 2020. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/20675/MAYRLLA%20KARLA%20COELHO%20LOPES%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20PPGSA%20ACAD%C3%8AMICO%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 set. 2021.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (Brasil). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Rompimento de bueiro na BR-010/PA ocasiona interrupção da rodovia**. [S. l.], 1 abr. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/rompimento-de-bueiro-na-br-010-pa-ocasiona-interruptao-da-rodovia>. Acesso em: 28 set. 2021.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (Brasil). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT alerta para rompimento de bueiros na BR-**

155/PA. [S. l.], 5 mar. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/central-de-conteudos/noticias-alerta-de-servicos/dnit-alerta-para-rompimento-de-bueiros-na-br-155-pa>. Acesso em: 15 set. 2021.

MIRANDA, Ana Maria Santiago de. Barragem de Sairé transborda e gera apreensão em cidades da região. **NE10 Interior**, [S. l.], p. s.i, 15 jun. 2020. Disponível em: <https://interior.ne10.uol.com.br/noticias/2020/06/15/barragem-de-saire-transborda-e-gera-apreensao-em-cidades-da-regiao-190142>. Acesso em: 15 set. 2021.

NAVEGAPARÁ (Brasil). **Regiões de Integração**. [S. l.], c2014. Disponível em: <http://www.navegapara.pa.gov.br/regioes-integracao>. Acesso em: 15 set. 2021.

OLIVEIRA, Rogério Silva. **Determinação da equação de chuvas intensas para o município de Toledo/PR**. 2017. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/15676/1/determinacaoequacaochuvasintensas.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

OLIVEIRA, L. F. C. *et al.* Métodos de estimativa de precipitação máxima para o Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 620-625, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Y6w5P8JL9RShqcwNcXDyqrG/?format=pdf&>. Acesso em: 10 set. 2021.

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**, Goiás, v. 13, n. 2, p. 233-246, 2017. DOI: 10.5216/reec.v13i2.43330. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/reec/article/download/43330/pdf/203598>. Acesso em: 10 set. 2021.

PESSOA, Marília. Rompimento de barragem de Sairé deixa mais de 1,2 mil desalojados em Barra de Guabiraba. **NE10 Interior**, [S. l.], 16 jun. 2020. Disponível em: <https://interior.ne10.uol.com.br/noticias/2020/06/16/rompimento-de-barragem-de-saire-deixa-mais-de-12-mil-desalojados-em-barra-de-guabiraba-190157>. Acesso em: 28 set. 2021.

PINTO, F. A. **Chuvas intensas no estado de Minas Gerais: análises e modelos**. Viçosa: UFV, 1995. 87p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.

SANTOS, Pedro Rildomar dos. **Análise de métodos para obtenção de chuvas intensas para a cidade de Maceió**. 2018. 148 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/3609>. Acesso em: 15 set. 2021.

SECRETARIA DO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO. **Manual de Drenagem Urbana**. Toledo, 2017. 37 p. Disponível em:

https://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/manual_de_drenagem_urbana_-_volume_i.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

SIMÕES, Camila *et al.* **Pluviômetro de estação automática com resistor variável, reaproveitando um pluviógrafo de estação convencional em desuso**. Disponível em:

http://meteorologia.florianopolis.ifsc.edu.br/formularioPI/arquivos_de_usuario/20082D.pdf. Acesso em: 10 set. 2021.

SOUZA, R. O. R. de M. *et al.* Equações de chuvas intensas para o Estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 999-1005, 2012. Disponível em:

<http://www.agriambi.com.br/revista/v16n09/v16n09a11.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. Hidrologia: **Precipitação**. Universidade Federal do Ceará - UFC. Ceará, Cap. 5, p. 5.1-5.22. 2006. Apostila. Disponível em: https://aedmoodle.ufpa.br/pluginfile.php/320841/mod_folder/content/0/Livro%20Hidrogeologia.pdf?forcedownload=1. Acesso em: 24 ago. 2021

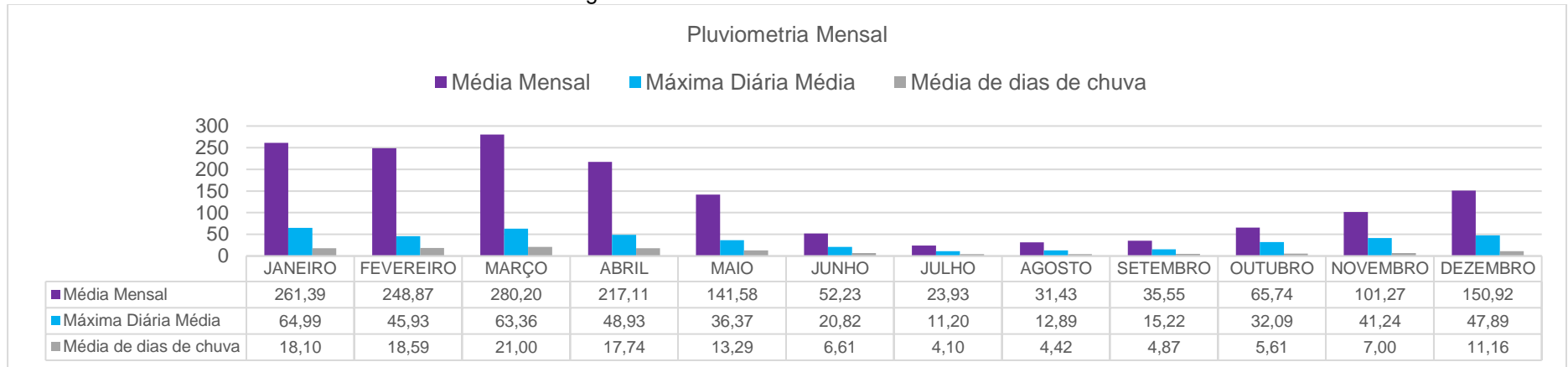
TORRICO, José Jaime Taborga. **Práticas Hidrológicas**. Rio de Janeiro: Transcon, 1974. 120 p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ. Rose Suellen Lisboa. **Guia [de] elaboração de trabalhos acadêmicos**. 2. ed. rev. atual. e aum. Belém: Biblioteca Central, 2021. 101 p. Disponível em: <http://bc.ufpa.br/wp-content/uploads/2019/08/Guia-de-Trabalhos-Academicos-2019.pdf>. Acesso em: 28 set. 2021.

VILLELA, Swami Marcondes; ARTHUR, Mattos. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

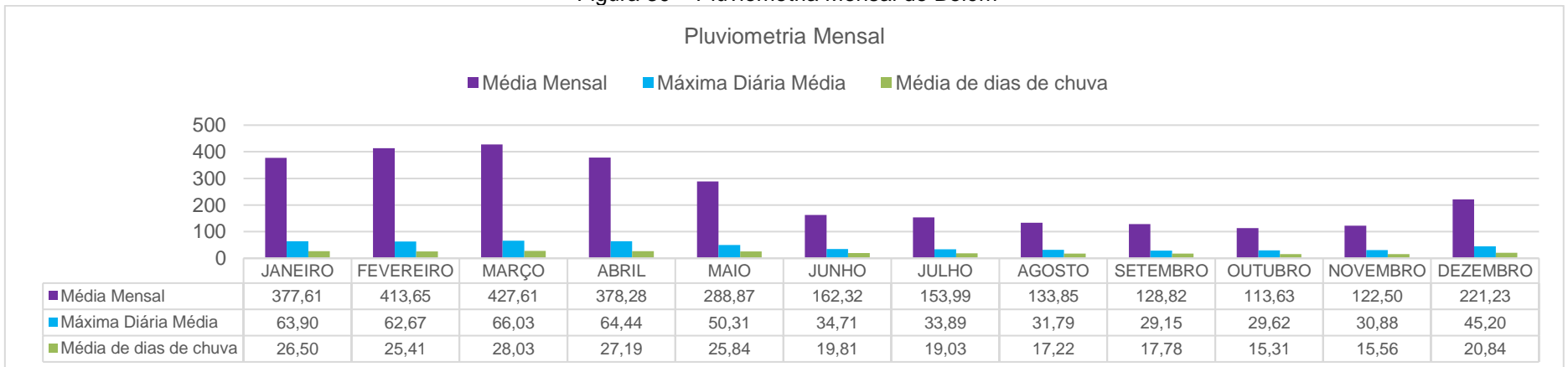
APÊNDICE A – PLUVIGRAMAS DOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS

Figura 29 – Pluviometria Mensal de Altamira



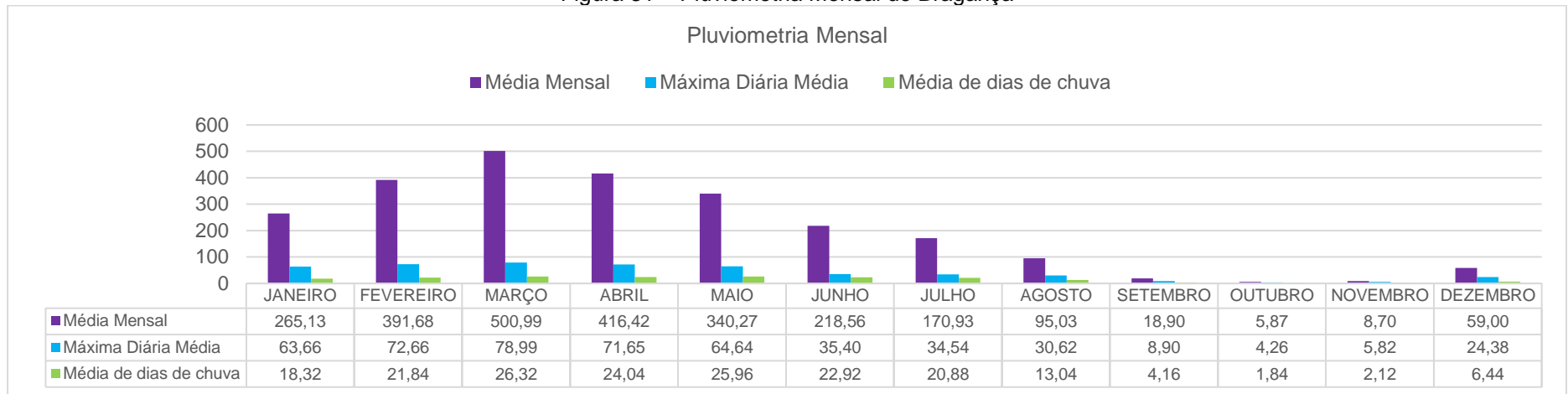
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 30 – Pluviometria Mensal de Belém



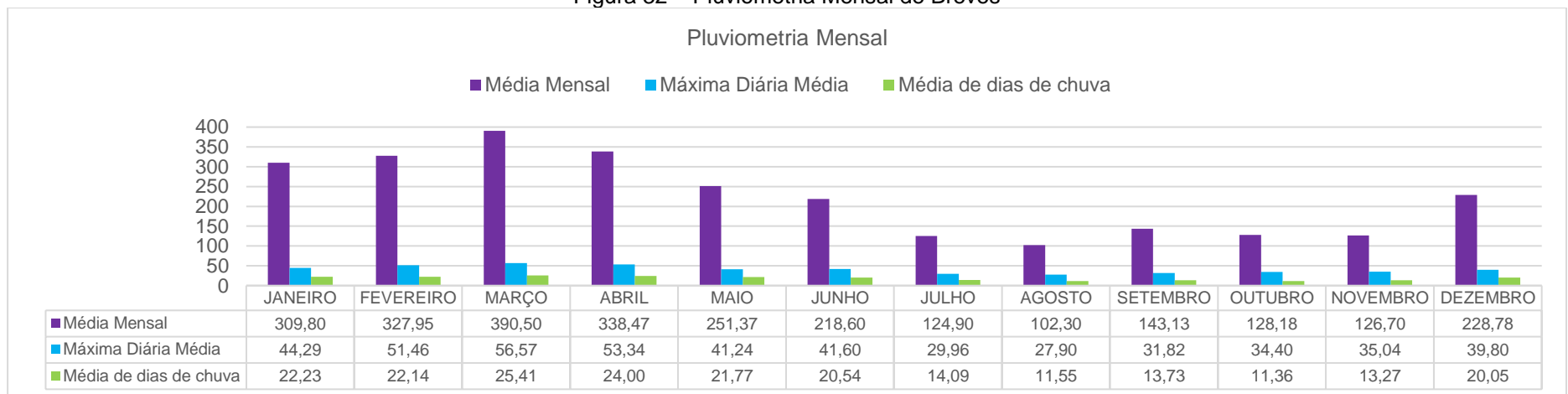
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 31 – Pluviometria Mensal de Bragança



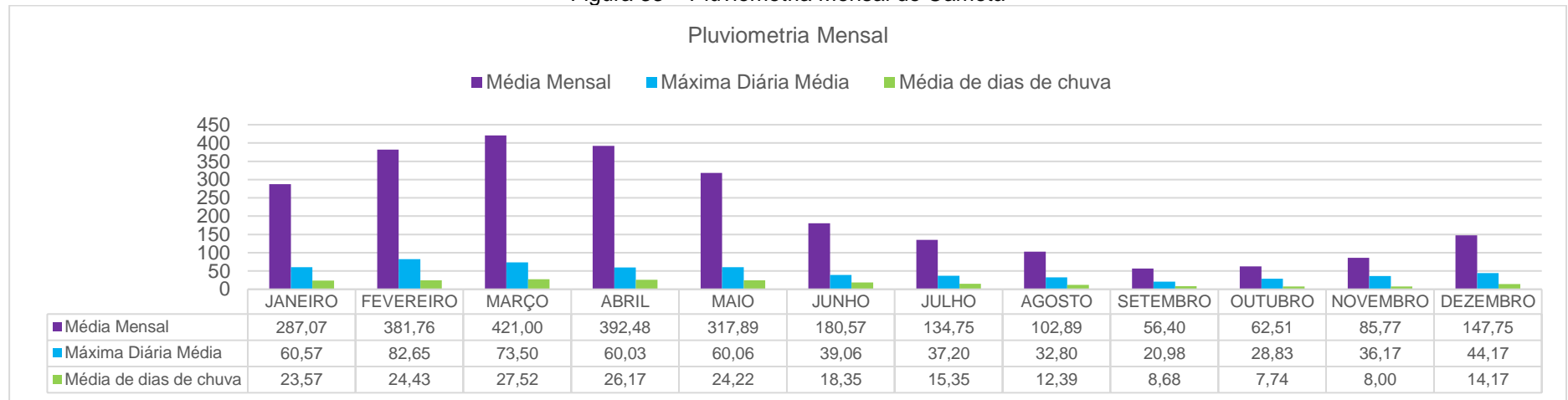
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 32 – Pluviometria Mensal de Breves



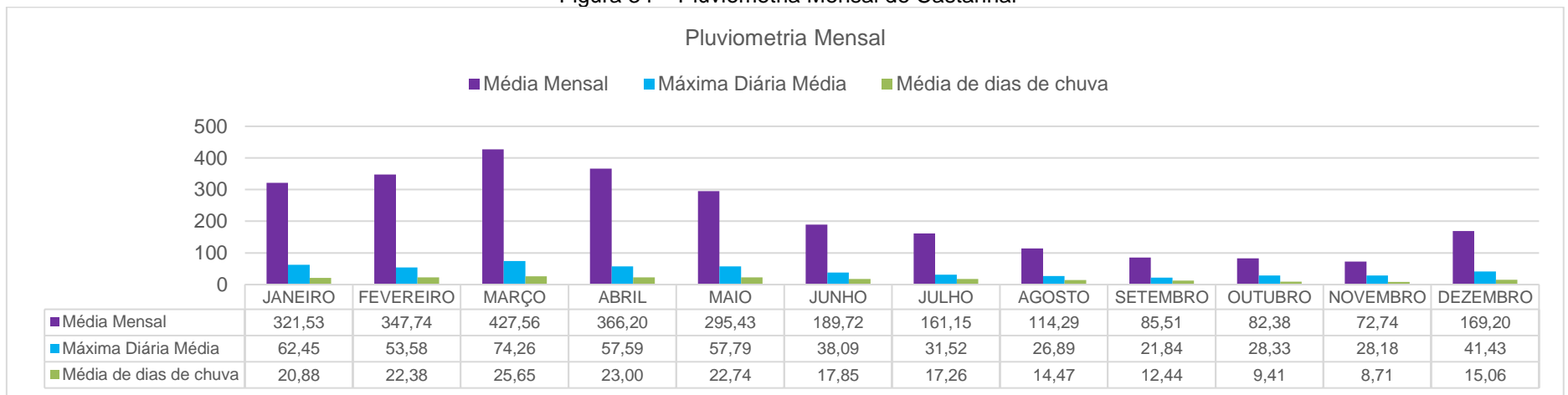
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 33 – Pluviometria Mensal de Cameté



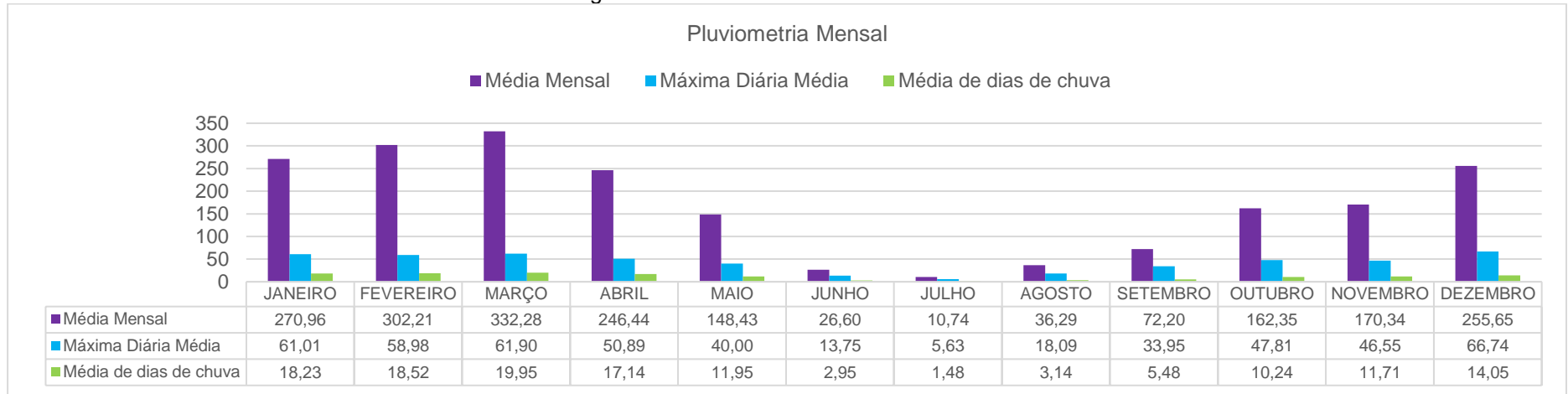
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 34 – Pluviometria Mensal de Castanhal



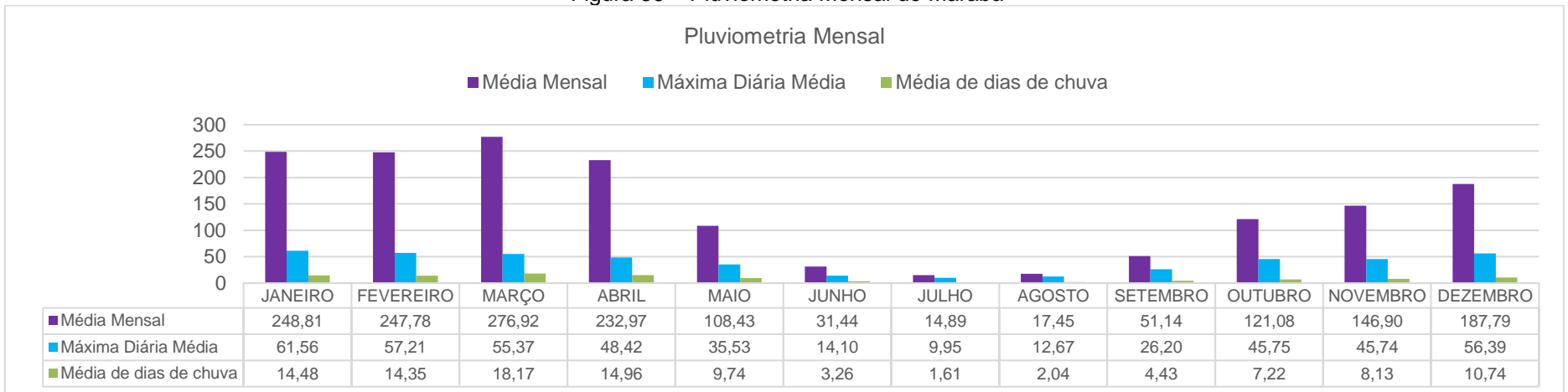
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 35 – Pluviometria Mensal de Itaituba



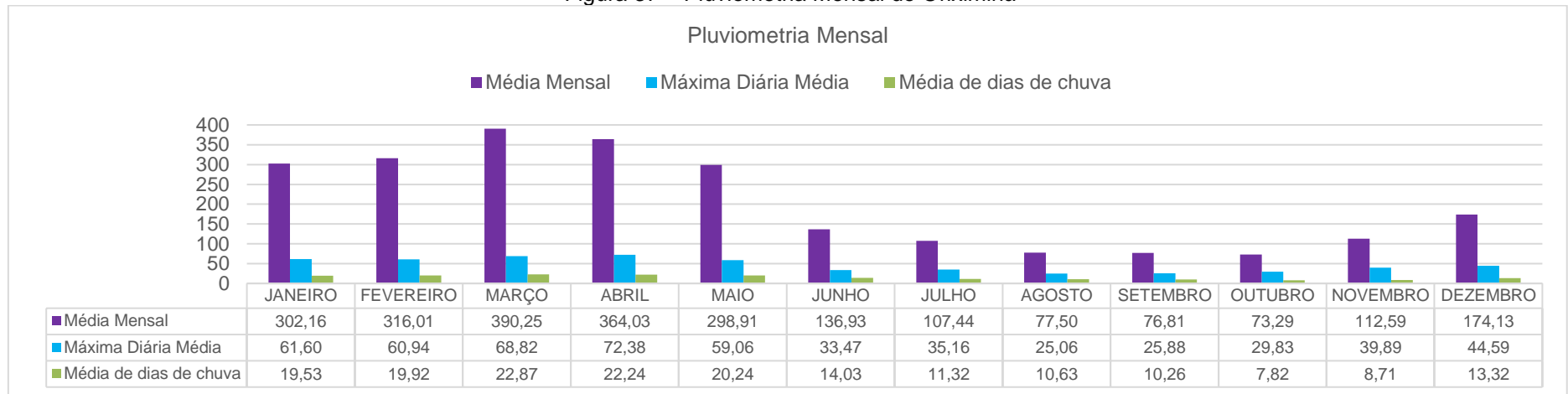
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 36 – Pluviometria Mensal de Marabá



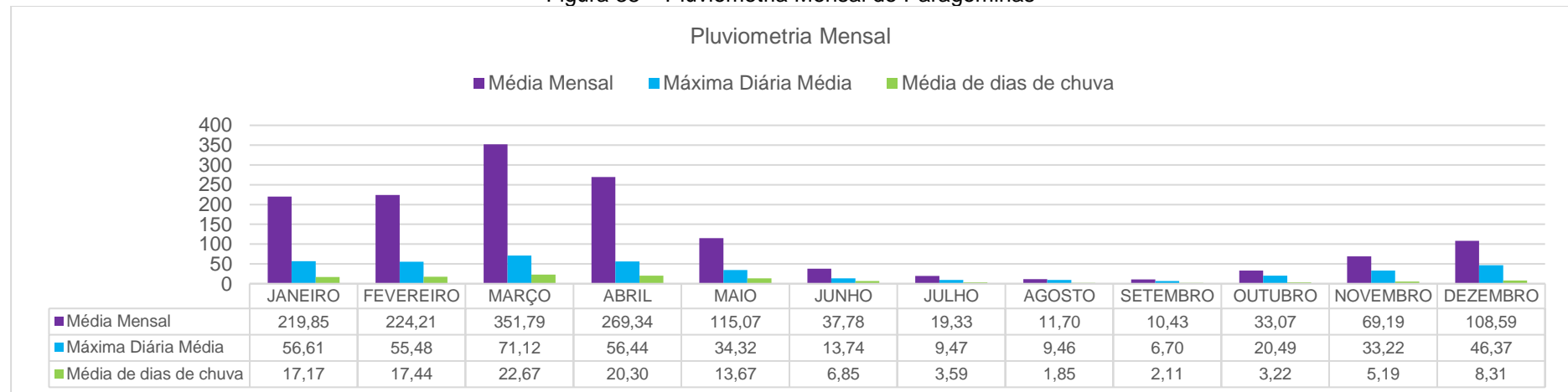
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 37 – Pluviometria Mensal de Oriximiná



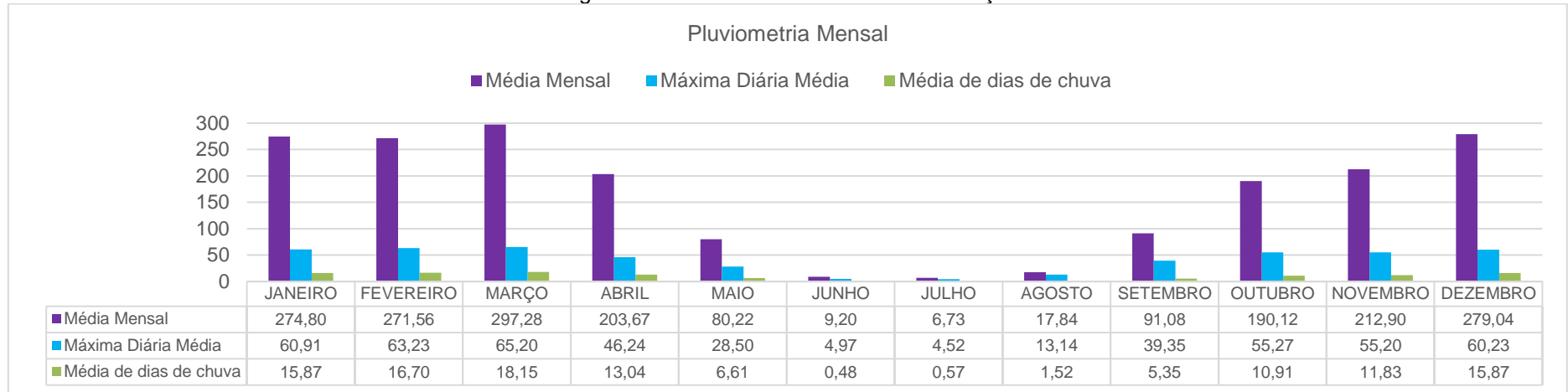
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 38 – Pluviometria Mensal de Paragominas



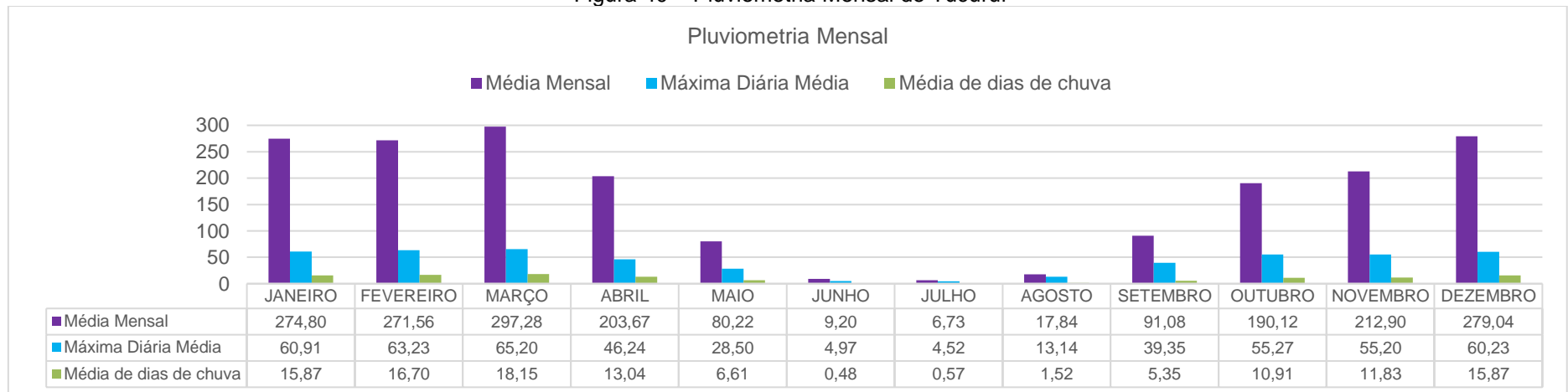
Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 39 – Pluviometria Mensal de Redenção



Fonte: Autoria Própria, 2021.

Figura 40 – Pluviometria Mensal de Tucuruí



Fonte: Autoria Própria, 2021.

APÊNDICE B – MÁXIMAS CHUVAS MENSAIS REGISTRADAS PARA AS SÉRIES HISTÓRICAS DOS MUNICÍPIOS ESTUDADOS

Tabela 29 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Altamira

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1977	111,00	1988	100,60	1999	81,00
1978	88,00	1989	100,00	2000	86,70
1979	66,80	1990	61,45	2001	91,50
1980	150,00	1991	66,20	2002	102,50
1981	69,60	1992	100,00	2003	102,30
1982	74,00	1993	120,00	2004	64,60
1983	75,00	1994	88,80	2005	118,50
1984	85,00	1995	75,80	2006	102,70
1985	114,00	1996	81,30	2007	104,50
1986	64,20	1997	129,30		
1987	61,45	1998	128,80		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 30 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Belém

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1967	112,80	1978	94,60	1989	121,40
1968	102,60	1979	74,40	1990	76,80
1969	82,40	1980	117,40	1991	117,50
1970	84,20	1981	67,60	1992	116,20
1971	118,00	1982	115,10	1993	71,40
1972	61,40	1983	49,60	1994	80,50
1973	106,60	1984	107,00	1995	96,20
1974	111,00	1985	136,90	1996	99,70
1975	82,90	1986	84,20	1997	75,70
1976	95,20	1987	70,90	1998	112,50
1977	65,80	1988	85,40		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 31 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Bragança

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1974	117,20	1983	165,20	1992	131,00
1975	132,30	1984	90,40	1993	73,40
1976	74,30	1985	119,00	1994	111,20
1977	109,60	1986	154,30	1995	173,20
1978	92,50	1987	112,20	1996	78,90
1979	76,80	1988	120,60	1997	122,40
1980	83,90	1989	72,05	1998	85,90
1981	85,10	1990	78,00		
1982	82,20	1991	108,30		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 32 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Breves

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1985	69,80	1996	59,00
1986	111,20	1997	51,90
1987	54,10	1998	61,20
1988	81,40	1999	98,20
1989	80,60	2000	82,50
1990	75,00	2001	100,00
1991	50,15	2002	104,00
1992	70,70	2003	56,50
1993	54,10	2004	91,50
1994	54,10	2005	72,10
1995	67,60	2006	61,50

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 33 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Cametá

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1976	86,7	1984	101,7	1992	89,2
1977	132,5	1985	103,2	1993	121,4
1978	111,6	1986	111,8	1994	109
1979	90,4	1987	150,6	1995	94,2
1980	146,4	1988	103	1996	93,2
1981	101	1989	120,2	1997	86,6
1982	130,4	1990	83	1998	92,8
1983	145,7	1991	175		

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 34 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Castanhal

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1973	147,50	1985	68,50	1997	90,50
1974	115,40	1986	61,00	1998	79,00
1975	92,70	1987	71,90	1999	128,20
1976	108,80	1988	90,10	2000	60,50
1977	93,00	1989	139,10	2001	228,60
1978	100,00	1990	100,00	2002	80,40
1979	77,40	1991	193,40	2003	72,30
1980	134,20	1992	92,00	2004	180,70
1981	104,50	1993	92,00	2005	168,50
1982	74,40	1994	99,00	2006	90,80
1983	61,60	1995	72,30		
1984	63,60	1996	117,80		

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 35 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Itaituba

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1987	97,6	1994	94,8	2001	78,1
1988	91	1995	121,4	2002	95,4
1989	89,6	1996	110,8	2003	63,1
1990	74,8	1997	76,2	2004	86,9
1991	98	1998	60	2005	97,1
1992	82,1	1999	98,5	2006	85,5
1993	73,2	2000	104,4	2007	70,2

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 36 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Marabá

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1984	57,20	1992	99,70	2000	71,00
1985	54,30	1993	86,00	2001	79,00
1986	70,50	1994	84,00	2002	96,80
1987	63,30	1995	98,20	2003	124,60
1988	88,40	1996	97,80	2004	91,50
1989	100,80	1997	170,00	2005	100,40
1990	76,60	1998	91,00	2006	85,50
1991	98,80	1999	127,50		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 37 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Oriximiná

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1969	121,00	1982	161,60	1995	127,90
1970	105,00	1983	92,20	1996	68,70
1971	76,50	1984	120,30	1997	68,70
1972	83,00	1985	126,20	1998	95,00
1973	86,30	1986	93,40	1999	144,50
1974	67,70	1987	71,60	2000	137,60
1975	93,90	1988	82,50	2001	85,00
1976	181,60	1989	68,70	2002	84,20
1977	70,40	1990	68,70	2003	111,60
1978	75,70	1991	128,30	2004	88,40
1979	74,30	1992	64,50	2005	91,10
1980	99,30	1993	65,80	2006	137,30
1981	99,70	1994	80,30		

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 38 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Paragominas

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1980	72,65	1989	204,50	1998	114,00
1981	72,50	1990	106,20	1999	127,80
1982	107,00	1991	84,50	2000	72,00
1983	62,30	1992	79,50	2001	75,60
1984	73,40	1993	78,20	2002	106,10
1985	92,20	1994	115,00	2003	73,00
1986	63,00	1995	96,00	2004	100,00
1987	87,90	1996	75,70	2005	113,30
1988	120,30	1997	85,20	2006	99,50

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 39 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Redenção

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1984	83,20	1992	73,40	2000	105,20
1985	88,60	1993	113,40	2001	86,20
1986	108,90	1994	97,70	2002	99,40
1987	66,40	1995	82,80	2003	132,20
1988	177,00	1996	140,40	2004	83,60
1989	120,00	1997	103,70	2005	84,70
1990	87,50	1998	92,00	2006	139,40
1991	99,90	1999	117,30		

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 40 – Precipitações máximas referentes a cada ano estudado no município de Tucuruí

ANO	P (mm)	ANO	P (mm)
1986	120,00	1996	79,60
1987	115,80	1997	140,50
1988	76,80	1998	90,60
1989	84,20	1999	140,50
1990	133,30	2000	110,30
1991	69,40	2001	123,20
1992	118,50	2002	112,50
1993	150,00	2003	101,50
1994	125,20	2004	111,00
1995	62,20	2005	120,00

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

APÊNDICE C – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADES PELO MÉTODO DE GUMBEL PARA AS ESTAÇÕES EM ESTUDO (EXCETO BELÉM)

Tabela 41 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Altamira

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	108,82
10	2,2504	1,3053	122,14
15	2,6738	1,6355	129,65
20	2,9702	1,8668	134,91
25	3,1985	2,0449	138,97
50	3,9019	2,5935	151,45
100	4,6001	3,1381	163,84

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 42 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Bragança

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	127,01
10	2,2504	1,3053	144,09
15	2,6738	1,6355	153,73
20	2,9702	1,8668	160,48
25	3,1985	2,0449	165,68
50	3,9019	2,5935	181,69
100	4,6001	3,1381	197,59

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 43 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Breves

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	86,36
10	2,2504	1,3053	97,18
15	2,6738	1,6355	103,28
20	2,9702	1,8668	107,55
25	3,1985	2,0449	110,85
50	3,9019	2,5935	120,99
100	4,6001	3,1381	131,05

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 44 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Cameté

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	129,82
10	2,2504	1,3053	144,18
15	2,6738	1,6355	152,28
20	2,9702	1,8668	157,95
25	3,1985	2,0449	162,32
50	3,9019	2,5935	175,78
100	4,6001	3,1381	189,14

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 45 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Castanhal

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	133,50
10	2,2504	1,3053	157,16
15	2,6738	1,6355	170,50
20	2,9702	1,8668	179,85
25	3,1985	2,0449	187,05
50	3,9019	2,5935	209,22
100	4,6001	3,1381	231,23

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 46 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Itaituba

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,49994	0,71995	99,18
10	2,25037	1,30529	108,25
15	2,67375	1,63553	113,36
20	2,97020	1,86675	116,94
25	3,19853	2,04486	119,70
50	3,90194	2,59351	128,19
100	4,60015	3,13812	136,63

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 47 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Marabá

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	109,82
10	2,2504	1,3053	124,41
15	2,6738	1,6355	132,64
20	2,9702	1,8668	138,41
25	3,1985	2,0449	142,85
50	3,9019	2,5935	156,53
100	4,6001	3,1381	170,11

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 48 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Oriximiná

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	118,22
10	2,2504	1,3053	135,20
15	2,6738	1,6355	144,78
20	2,9702	1,8668	151,49
25	3,1985	2,0449	156,66
50	3,9019	2,5935	172,58
100	4,6001	3,1381	188,38

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 49 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Paragominas

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	115,35
10	2,2504	1,3053	132,12
15	2,6738	1,6355	141,59
20	2,9702	1,8668	148,21
25	3,1985	2,0449	153,32
50	3,9019	2,5935	169,04
100	4,6001	3,1381	184,65

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 50 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Redenção

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	121,97
10	2,2504	1,3053	136,90
15	2,6738	1,6355	145,32
20	2,9702	1,8668	151,22
25	3,1985	2,0449	155,76
50	3,9019	2,5935	169,76
100	4,6001	3,1381	183,65

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 51 – Distribuição de probabilidades de Gumbel para a estação de Tucuruí

T_R (anos)	Y_{TR}	K_{TR}	X_{TR}
5	1,4999	0,7200	127,18
10	2,2504	1,3053	141,76
15	2,6738	1,6355	149,99
20	2,9702	1,8668	155,75
25	3,1985	2,0449	160,18
50	3,9019	2,5935	173,85
100	4,6001	3,1381	187,41

Fonte: Autoria Própria, 2021.

APÊNDICE D – INTENSIDADE DE CHUVA PARA OS MUNICÍPIOS ESTUDADOS (EXCETO BELÉM)

Tabela 52 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Altamira

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	4,96	52,43	150,14
10	5,57	58,31	168,51
15	5,92	61,47	178,88
20	6,16	63,82	186,14
25	6,34	65,43	191,73
50	6,91	70,65	208,95
100	7,48	75,71	200,93

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 53 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Bragança

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,79	52,99	116,82
10	6,57	59,64	132,54
15	7,01	63,13	141,40
20	7,32	65,72	147,61
25	7,56	67,67	152,39
50	8,29	73,41	167,12
100	9,01	79,19	162,27

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 54 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Breves

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	3,94	41,61	119,15
10	4,43	46,39	134,07
15	4,71	48,97	142,50
20	4,91	50,88	148,40
25	5,06	52,19	152,93
50	5,52	56,44	166,92
100	5,98	60,56	160,72

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 55 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Cametá

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,92	62,55	179,11
10	6,58	68,83	198,92
15	6,95	72,20	210,10
20	7,21	74,72	217,92
25	7,41	76,43	223,95
50	8,02	81,99	242,52
100	8,63	87,40	231,96

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 56 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Castanhal

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	6,09	58,62	143,26
10	7,17	68,32	168,64
15	7,78	73,75	182,97
20	8,21	77,39	192,99
25	8,53	80,29	200,72
50	9,55	88,89	224,51
100	10,55	97,23	222,81

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 57 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Itaituba

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	4,53	47,79	136,84
10	4,94	51,688	149,35
15	5,17	53,75	156,40
20	5,34	55,32	161,34
25	5,46	56,36	165,15
50	5,85	59,80	176,87
100	6,23	63,13	167,56

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 58 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Marabá

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,01	55,31	167,15
10	5,68	61,98	189,36
15	6,05	65,80	201,89
20	6,32	68,35	210,67
25	6,52	70,23	217,43
50	7,14	76,27	238,25
100	7,76	82,15	230,98

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 59 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Oriximiná

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,39	54,37	144,98
10	6,17	61,59	165,81
15	6,61	65,64	177,56
20	6,91	68,34	185,79
25	7,15	70,50	192,13
50	7,87	76,91	211,65
100	8,60	83,13	206,28

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 60 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Paragominas

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,26	58,10	175,57
10	6,03	65,83	201,10
15	6,46	70,23	215,50
20	6,76	73,19	225,59
25	7,00	75,38	233,36
50	7,71	82,37	257,29
100	8,42	89,17	250,72

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 61 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Redenção

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,56	58,76	168,28
10	6,25	65,36	188,88
15	6,63	68,90	200,50
20	6,90	71,53	208,64
25	7,11	73,34	214,91
50	7,75	79,19	234,22
100	8,38	84,86	225,23

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

Tabela 62 – Relação intensidade (mm/h) x Duração (horas) x Frequência (anos) para a cidade de Tucuruí

T_R (anos)	24 horas	1 hora	0,1 horas
5	5,80	61,28	175,48
10	6,47	67,68	195,59
15	6,84	71,11	206,94
20	7,11	73,67	214,88
25	7,31	75,42	221,00
50	7,93	81,09	239,85
100	8,55	86,60	229,84

Fonte: Aatoria Própria, 2021.

APÊNDICE E – PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE CHUVAS INTENSAS PARA AS CIDADES EM ESTUDO (EXCETO BELÉM)

Tabela 63 – Equações da reta e valores de (d), $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Altamira

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	$\ln_{(M)}$	$\ln_{(TR)}$
$y = -0,7195x + 6,8740$	0,9974	5	0,7195		6,8740	1,6094
$y = -0,7191x + 6,9847$	0,9977	10	0,7191		6,9847	2,3026
$y = -0,7189x + 7,0408$	0,9979	15	0,7189		7,0408	2,7081
$y = -0,7188x + 7,0794$	0,9980	20	0,7188	0,7156	7,0794	2,9957
$y = -0,7186x + 7,1066$	0,9981	25	0,7186		7,1066	3,2189
$y = -0,7182x + 7,1878$	0,9983	50	0,7182		7,1878	3,9120
$y = -0,6962x + 7,1215$	0,9959	100	0,6962		7,1215	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 64 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Altamira

$\ln_{(a)}$	a	b	R ²
6,7775	877,8713	0,0914	0,7860

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 65 – Equações da reta e valores de (d), $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Bragança

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	$\ln_{(M)}$	$\ln_{(TR)}$
$y = -0,6278x + 6,3926$	0,9879	5	0,6278		6,3962	1,6094
$y = -0,6276x + 6,5185$	0,9885	10	0,6276		6,5185	2,3026
$y = -0,6273x + 6,5792$	0,9891	15	0,6273		6,5792	2,7081
$y = -0,6272x + 6,6208$	0,9893	20	0,6272	0,6242	6,6208	2,9957
$y = -0,6271x + 6,6514$	0,9895	25	0,6271		6,6514	3,2189
$y = -0,6267x + 6,7382$	0,9902	50	0,6267		6,7382	3,9120
$y = -0,6057x + 6,6848$	0,9841	100	0,6057		6,6848	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 66 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Bragança

$\ln_{(a)}$	a	b	R ²
6,2802	533,8954	0,1043	0,8301

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 67 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Breves

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7287x + 6,7043$	0,9981	5	0,7287		6,7043	1,6094
$y = -0,7283x + 6,8175$	0,9983	10	0,7283		6,8175	2,3026
$y = -0,7280x + 6,8748$	0,9985	15	0,7280		6,8748	2,7081
$y = -0,7279x + 6,9141$	0,9985	20	0,7279	0,7247	6,9141	2,9957
$y = -0,7277x + 6,9418$	0,9987	25	0,7277		6,9418	3,2189
$y = -0,7273x + 7,0244$	0,9989	50	0,7273		7,0244	3,9120
$y = -0,7051x + 6,9581$	0,9967	100	0,7051		6,9581	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 68 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Breves

ln _(a)	a	b	R ²
6,6053	739,0015	0,0936	0,7891

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 69 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Cametá

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7287x + 7,1165$	0,9981	5	0,7287		7,1165	1,6094
$y = -0,7283x + 7,2166$	0,9983	10	0,7283		7,2166	2,3026
$y = -0,7280x + 7,2676$	0,9985	15	0,7280		7,2676	2,7081
$y = -0,7279x + 7,3030$	0,9985	20	0,7279	0,7247	7,3030	2,9957
$y = -0,7277x + 7,3278$	0,9987	25	0,7277		7,3278	3,2189
$y = -0,7273x + 7,4025$	0,9989	50	0,7273		7,4025	3,9120
$y = -0,7051x + 7,3295$	0,9967	100	0,7051		7,3295	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 70 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Cametá

ln _(a)	a	b	R ²
7,0359	1136,7175	0,0802	0,7468

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 71 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Castanhal

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,6679x + 6,7202$	0,9935	5	0,6679		6,7202	1,6094
$y = -0,6675x + 6,8782$	0,9941	10	0,6675		6,8782	2,3026
$y = -0,6673x + 6,9571$	0,9943	15	0,6673		6,9571	2,7081
$y = -0,6672x + 7,0078$	0,9946	20	0,6672	0,6643	7,0078	2,9957
$y = -0,6671x + 7,0458$	0,9947	25	0,6671		7,0458	3,2189
$y = -0,6667x + 7,1525$	0,9952	50	0,6667		7,1525	3,9120
$y = -0,6465x + 7,1195$	0,9914	100	0,6465		7,1195	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 72 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Castanhal

ln _(a)	a	b	R ²
6,5553	702,9600	0,1402	0,881

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 73 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Itaituba

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7287x + 6,8428$	0,9981	5	0,7284		6,8428	1,6094
$y = -0,7283x + 6,9254$	0,9983	10	0,7283		6,2954	2,3026
$y = -0,7280x + 6,9679$	0,9985	15	0,7280		6,9679	2,7081
$y = -0,7279x + 6,9978$	0,9985	20	0,7279	0,7247	6,9978	2,9957
$y = -0,7277x + 7,0186$	0,9987	25	0,7277		7,0186	3,2189
$y = -0,7273x + 7,0823$	0,9989	50	0,7273		7,0823	3,9120
$y = -0,7051x + 6,9998$	0,9967	100	0,7051		6,9998	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 74 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Itaituba

ln _(a)	a	b	R ²
6,7880	887,1375	0,0618	0,6568

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 75 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Marabá

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7487x + 7,0859$	0,9987	5	0,7487	0,7448	7,0859	1,6094
$y = -0,7482x + 7,2049$	0,9989	10	0,7482		7,2049	2,3026
$y = -0,748x + 7,2666$	0,9990	15	0,7480		7,2666	2,7081
$y = -0,7479x + 7,3068$	0,9991	20	0,7479		7,3068	2,9957
$y = -0,7477x + 7,3361$	0,9992	25	0,7477		7,3361	3,2189
$y = -0,7473x + 7,4228$	0,9993	50	0,7473		7,4228	3,9120
$y = -0,7258x + 7,3643$	0,9977	100	0,7258		7,3643	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 76 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Marabá

ln _(a)	a	b	R ²
6,9747	1069,2364	0,1014	0,8171

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 77 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Oriximiná

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7771x + 7,3458$	0,9961	5	0,6960	0,6923	6,7927	1,6094
$y = -0,7765x + 7,4741$	0,9965	10	0,6956		6,9220	2,3026
$y = -0,7762x + 7,5395$	0,9966	15	0,6954		6,9888	2,7081
$y = -0,7759 + 7,5818$	0,9968	20	0,6953		7,0308	2,9957
$y = -0,7758x + 7,6138$	0,9969	25	0,6952		7,0631	3,2189
$y = -0,7752x + 7,7045$	0,9973	50	0,6948		7,1548	3,9120
$y = -0,7526x + 7,6407$	0,9942	100	0,6736		7,1026	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 78 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Oriximiná

ln _(a)	a	b	R ²
6,6677	786,5844	0,1115	0,8380

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 79 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Paragominas

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7393x + 7,0719$	0,9981	5	0,7393		7,0719	1,6094
$y = -0,7389x + 7,2021$	0,9984	10	0,7389		7,2021	2,3026
$y = -0,7387x + 7,2690$	0,9985	15	0,7387		7,2690	2,7081
$y = -0,7385x + 7,3124$	0,9986	20	0,7385	0,7355	7,3124	2,9957
$y = -0,7338x + 7,3440$	0,9987	25	0,7383		7,3440	3,2189
$y = -0,7380x + 7,437$	0,9989	50	0,7380		7,4370	3,9120
$y = -0,7166x + 7,3849$	0,9969	100	0,7166		7,3849	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 80 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Paragominas

ln _(a)	a	b	R ²
6,9453	1038,2584	0,1126	0,8396

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 81 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Redenção

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7268x + 7,0371$	0,9979	5	0,7268		7,0371	1,6094
$y = -0,7264x + 7,1478$	0,9982	10	0,7264		7,1478	2,3026
$y = -0,7262x + 7,2039$	0,9984	15	0,7262		7,2039	2,7081
$y = -0,7261x + 7,2425$	0,9984	20	0,7261	0,7229	7,2425	2,9957
$y = -0,7259x + 7,2696$	0,9986	25	0,7259		7,2696	3,2189
$y = -0,7255x + 7,3508$	0,9988	50	0,7255		7,3508	3,9120
$y = -0,7033x + 7,2835$	0,9966	100	0,7033		7,2835	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 82 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Redenção

ln _(a)	a	b	R ²
6,9414	1034,2171	0,0911	0,783

Fonte: Autoria Própria, 2021.

Tabela 83 – Equações da reta e valores de (d) , $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$, extraídos dos gráficos da relação entre $\ln_{(i)}$ e $\ln_{(tc+c)}$ para a cidade de Tucuruí

Equação	R ²	T _R (anos)	d	Média dos valores de (d)	ln _(M)	ln _(TR)
$y = -0,7213x + 7,0421$	0,9975	5	0,7213		7,0421	1,6094
$y = -0,7210x + 7,1459$	0,9978	10	0,7210		7,1459	2,3026
$y = -0,7207x + 7,1987$	0,9980	15	0,7207		7,1987	2,7081
$y = -0,7206 + 7,2351$	0,9981	20	0,7206	0,7174	7,2351	2,9957
$y = -0,7204x + 7,2608$	0,9982	25	0,7204		7,2608	3,2189
$y = -0,7200x + 7,3378$	0,9985	50	0,7200		7,3378	3,9120
$y = -0,6980x + 7,2678$	0,996	100	0,6980		7,2678	4,6052

Fonte: Autoria Própria, 2021

Tabela 84 – Valores de $\ln_{(a)}$ e parâmetros (a) e (b), extraídos do gráfico da relação entre $\ln_{(M)}$ e $\ln_{(TR)}$ para a cidade de Tucuruí

ln _(a)	a	b	R ²
6,9555	1048,9029	0,0843	0,7639

Fonte: Autoria Própria, 2021.

ANEXO A

Tabela 85 – Coeficientes “K”, “a”, “b” e “c” das equações de chuvas intensas ajustadas para várias localidades do Estado do Pará e respectivos coeficientes de determinação (R²) e duração das séries históricas

(continua)

Município	K	a	b	c	R ²	Séries Históricas (anos)
Abaetetuba	1086,3999	0,1193	9,7855	0,7242	0,9957	29
Acará	1153,9489	0,0973	9,7945	0,7244	0,9978	27
Afuá	688,6278	0,0505	9,8028	0,7247	0,9995	10
Alenquer	952,4028	0,1078	9,7929	0,7244	0,9969	34
Almeirim	1031,0537	0,1095	9,7988	0,7245	0,9968	30
Altamira	1204,0580	0,1152	9,7894	0,7243	0,9961	28
Anajás	1148,3197	0,1266	9,7913	0,7244	0,9947	11
Augusto Corrêa	1109,8761	0,1056	9,7878	0,7242	0,9971	24
Aurora do Pará	1130,3284	0,1175	9,7859	0,7242	0,9959	22
Aveiro	1003,1550	0,0930	9,7925	0,7244	0,9981	29
Bagre	1283,2098	0,1280	9,7886	0,7242	0,9945	25
Baião	1268,3666	0,1114	9,7940	0,7244	0,9966	18
Barcarena	1007,3605	0,1070	9,7931	0,7243	0,9970	23
Belém	960,5846	0,0954	9,7993	0,7245	0,9979	43
Bom Jesus do Tocantins	1036,5976	0,1017	9,7840	0,7242	0,9974	11
Bragança	1206,4232	0,1087	9,7844	0,7242	0,9968	19
Breves	843,3295	0,0985	9,7958	0,7244	0,9977	21
Bujaru	815,3742	0,0920	9,7957	0,7243	0,9981	16
Cametá	1216,6448	0,0951	9,7918	0,7244	0,9979	21
Capanema	1136,7892	0,1163	9,7866	0,7242	0,9960	43
Castanhal	1216,7335	0,1266	9,7886	0,7243	0,9947	31
Chaves	763,3059	0,1115	9,7930	0,7244	0,9965	11
Conceição do Araguaia	865,9467	0,0959	9,7969	0,7246	0,9979	29
Curuçá	1399,1103	0,0997	9,7918	0,7243	0,9976	27
Dom Eliseu	1128,4211	0,1059	9,8007	0,7246	0,9971	27
Faro	1038,5272	0,1038	9,7916	0,7244	0,9973	20
Gurupá	896,3305	0,1096	9,7851	0,7243	0,9967	18
Igarapé- Açu	1131,1570	0,1121	9,7860	0,7242	0,9965	29
Igarapé- Miri	1008,3703	0,0948	9,7850	0,7242	0,9980	13
Ipixuna do Pará	1106,1890	0,1000	9,7919	0,7244	0,9976	24
Irituia	1040,6804	0,1144	9,7933	0,7243	0,9962	28
Itaituba	1073,2685	0,1317	9,7851	0,7242	0,9939	30
Itupiranga	1242,7328	0,1111	9,7853	0,7242	0,9966	15
Jacundá	1192,2027	0,0809	9,7905	0,7243	0,9987	16
Jurutí	1292,2966	0,1073	9,8015	0,7245	0,9970	26
Magalhães Barata	1248,4018	0,1134	9,7921	0,7244	0,9963	15
Marabá	1242,9246	0,1057	9,7849	0,7242	0,9971	20
Marapanim	1453,3908	0,1225	9,7927	0,7244	0,9953	17
Medicilândia	1065,0031	0,0930	9,7887	0,7243	0,9981	13
Melgaço	886,3028	0,0921	9,7834	0,7241	0,9981	18
Mocajuba	1151,4508	0,0960	9,7964	0,7244	0,9979	15
Moju	1162,7321	0,1023	9,7929	0,7244	0,9974	28
Monte Alegre	999,0226	0,1130	9,7838	0,7241	0,9964	36
Nova Timboteua	859,0256	0,1017	9,7875	0,7243	0,9974	15
Óbidos	990,8133	0,1103	9,7782	0,7241	0,9967	53
Oeiras do Pará	1029,6561	0,0936	9,7975	0,7244	0,9980	21
Oriximiná	1111,7396	0,1063	9,7954	0,7244	0,9970	39
Ourém	887,0707	0,1055	9,7948	0,7245	0,9971	20
Paragominas	1125,9005	0,1232	9,7922	0,7244	0,9952	24
Ponta de Pedras	1211,6537	0,1042	9,7930	0,7244	0,9972	11

Tabela 85 – Coeficientes “K”, “a”, “b” e “c” das equações de chuvas intensas ajustadas para várias localidades do Estado do Pará e respectivos coeficientes de determinação (R²) e duração das séries históricas

(conclusão)

Município	K	a	b	c	R ²	Séries Históricas (anos)
Portel	1112,9052	0,0998	9,7830	0,7241	0,9976	33
Porto de Moz	1137,9609	0,1287	9,7963	0,7244	0,9944	23
Praíha	978,4673	0,1110	9,7883	0,7244	0,9966	29
Primavera	1164,6366	0,0863	9,7956	0,7244	0,9985	28
Redenção	1156,4648	0,1038	9,7910	0,7243	0,9973	26
Rio Maria	1085,4709	0,0831	9,7952	0,7244	0,9986	13
Salinópolis	1474,9764	0,0903	9,7870	0,7243	0,9983	32
Santa Cruz do Arari	968,3271	0,1032	9,7880	0,7242	0,9973	11
Santa Isabel do Pará	1088,7772	0,1227	9,7854	0,7243	0,9953	29
Santa Luzia do Pará	956,0860	0,1176	9,7877	0,7241	0,9959	16
Santa Maria do Pará	1292,0533	0,1480	9,7904	0,7243	0,9911	19
Santana do Araguaia	864,5309	0,1047	9,7907	0,7244	0,9972	23
Santarém	1310,4147	0,1064	9,7941	0,7244	0,9970	41
São Domingos do Capim	1068,8693	0,1055	9,7942	0,7244	0,9971	34
São Felix do Xingu	1030,0221	0,1094	9,7970	0,7244	0,9968	24
São João de Pirabas	1428,9522	0,1109	9,7935	0,7244	0,9966	21
Senador José Porfírio	1243,2061	0,1198	9,7828	0,7241	0,9956	15
Soure	1648,2807	0,1024	9,7886	0,7243	0,9974	38
Tailândia	1089,9101	0,1157	9,7896	0,7243	0,9961	16
Tomé- Açu	1038,3348	0,0833	9,7931	0,7244	0,9986	25
Tucuruí	1264,6709	0,1012	9,7852	0,7242	0,9975	23
Vigia	1071,4102	0,0921	9,7815	0,7241	0,9981	28
Viseu	873,5618	0,0928	9,7850	0,7242	0,9981	33
Xinguara	1023,8456	0,1081	9,7965	0,7244	0,9969	26

Fonte: Souza et al. (2012).