

Análise da precipitação e determinação de equações de chuvas intensas para o município de Crato-CE situado no semiárido do Brasil

Analysis of the precipitation and determination of intensive rainfall equations for the municipality of Crato-CE in the semiarid region of Brazil

Antônio Italcy de Oliveira Júnior¹, Emanuely Soares Martins², Celme Torres Ferreira da Costa³,
 Hidaiane Fayga Matias Caldas¹

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil

² Prefeitura Municipal de Crateús, Ceará

³ Universidade Federal do Cariri, Ceará

Todos autores contribuíram de forma igualitária

Contato: antonioitalcy@hotmail.com

Palavras-Chave

precipitações máximas
 distribuição de Gumbel
 distribuição Gama
 método da desagregação de
 chuvas

RESUMO

O estudo das chuvas intensas, baseado nas equações Intensidade-Duração-Frequência, (IDF) são usadas, por exemplo, para dimensionamento de projetos hidráulicos, planejamento urbano e ambiental, e desenvolvimento de sistemas de alertas de desastres naturais. O rio Granjeiro possui uma área de inundação que engloba grande parte do município de Crato no estado do Ceará, sendo por isso, fundamental o conhecimento das entradas de água no balanço hídrico local. Nesse sentido, este trabalho objetiva determinar as precipitações máximas associadas a diferentes períodos de retorno utilizando métodos probabilísticos e obter os parâmetros da equação IDF de chuvas intensas para o município de Crato. Utilizou-se uma série histórica de 42 anos que foi ajustada através das distribuições de Gumbel e Gama para obtenção das precipitações máximas. Os parâmetros das equações IDF foram determinados através do método de desagregação de chuvas em durações menores que 24 horas. Os resultados dos parâmetros obtidos para equações IDF baseados no método de Gumbel foram $k=1088,87$, $m=0,178$, $b=11,5$ e $n=0,7602$ e para o método de Gama foram $k=1119,01$, $m=0,133$, $b=11$ e $n=0,7558$. As equações IDF obtidas apresentaram boas estimativas, com potencial de uso em aplicações hidráulicas e de planejamento em relação ao rio Granjeiro.

Key-word

maximum precipitation
 distribution of Gumbel
 distribution of Gama
 rain disaggregation method

ABSTRACT

The study of intense rainfall based on the Intensity-Duration-Frequency (IDF) equations is used, for example, for sizing of hydraulic projects, urban and environmental planning, and development of natural disaster warning systems. The Granjeiro River has a flooding area that encompasses a large part of the municipality of Crato in the state of Ceará, so it is essential to know the water inlets in the local water balance. In this sense, this work aims to determine the maximum rainfall associated with different return periods using probabilistic methods and to obtain the parameters of the IDF equation of heavy rainfall for the municipality of Crato. A 42-year historical series was used that was adjusted through the Gumbel and Gama distributions to obtain the maximum precipitations. The parameters of the IDF equations were determined by the rainfall breakdown method for durations less than 24 hours. The results of the parameters obtained for IDF equations based on the Gumbel method were $k=1088.87$, $m=0.178$, $b=11.5$ and $n=0.7602$ and for the Gamma method were $k=1119.01$, $m=0.133$, $b=11$ and $n=0.7558$. The IDF equations obtained presented good estimates, with potential for use in hydraulic and planning applications in relation to the Granjeiro river.

Informações do artigo

Recebido: 08 de outubro, 2019

Aceito: 26 de dezembro, 2019

Publicado: 28 de dezembro, 2019

Introdução

A precipitação é um fenômeno constituinte do ciclo hidrológico. Consiste no processo pelo qual a água retorna para terra através do vapor d'água presente na atmosfera. Portanto, a precipitação, em formato pluviométrico, é uma variável climatológica de suma importância, principalmente em regiões tropicais, tendo em vista que a mesma representa as entradas de água no balanço hídrico proporcionando, conseqüentemente, escoamento superficial, infiltração da água no solo e recargas de aquíferos, com conseqüente perenização de cursos d'água.

Outro fator que destaca a importância das precipitações são seus efeitos, quando ocorrem eventos intensos que geram impactos nos setores produtivos e na sociedade como perdas de vidas humanas e de lavouras, enchentes, assoreamento de rios, queda de barramentos, perda de solos, condicionamento de projetos de obras hidráulicas, dentre outros.

As variáveis que descrevem os eventos intensos são a duração, a intensidade e a frequência de ocorrência associado a um período de retorno (MELLO et al., 2001). A relação dessas três variáveis gera as equações IDF (Intensidade, Duração e Frequência) que possibilitam realizar estimativas da frequência de ocorrência de eventos hidrológicos intensos, baseando-se em modelos matemáticos de distribuição de probabilidades, que utiliza inferência estatística para estimar os parâmetros das estruturas desses modelos (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Em estudos desse tipo, as distribuições de probabilidades contínuas são bastante utilizadas. Para séries de valores máximos diários de precipitações, as distribuições Gumbel e Gama têm sido utilizadas em diversos trabalhos (ABUBAKARI, KUSI e XIAOHUA, 2017).

De acordo com Marengo e Valverde (2007), a história da região Nordeste brasileira é marcada por grandes secas ou grandes cheias, sendo os relatos de secas observados desde o século XVII. O semiárido brasileiro é assolado por uma seca severa a cada década, o que faz agravar problemas na oferta hídrica e no desenvolvimento socioeconômico (FRISCHKORN, ARAÚJO e SANTIAGO, 2003). Oliveira Júnior et al. (2019) também destacam em seu trabalho a forte escassez hídrica observada em regiões semiáridas do Nordeste brasileiro.

O município do Crato situado no estado do Ceará encontra-se inserido nesse contexto de severas secas e grandes inundações. Além do fator climático regional, o crescimento urbano sem planejamento contribui para o agravamento deste cenário, tendo em vista que o município está situado em uma região metropolitana cearense.

Os últimos registros de inundações no município de Crato foram em janeiro de 2011 e março de 2012.

De acordo com Brito e Silva (2012), as inundações destes períodos foram responsáveis por problemas na mobilidade da população tendo em vista a destruição das pontes que conectavam o centro ao bairro seminário (áreas de maior concentração de habitantes) e aos distritos da cidade.

Além disso, os autores destacam que houve a destruição do canal do rio Granjeiro e de parte do centro comercial do município acarretando prejuízos para toda a população, principalmente os comerciantes locais.

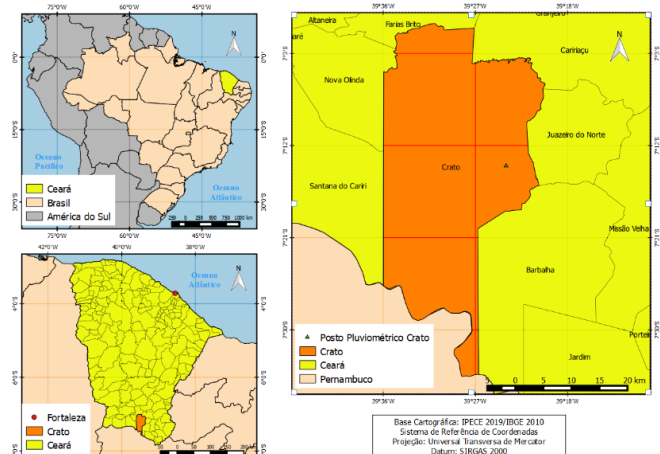
Portanto, torna-se fundamental conhecer o comportamento da precipitação pluviométrica local do município de Crato. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar séries históricas de precipitação dos postos pluviométricos situados na sede do município de Crato-CE, através de estimativas de precipitações máximas obtidas por distribuições de probabilidades contínuas para diferentes períodos de retorno e determinar os parâmetros da equação de intensidade, duração e frequência.

Material e Métodos

Área de estudo

O município de Crato localiza-se no extremo sul do estado do Ceará (Figura 1), numa área caracterizada por um extenso e profundo depósito sedimentar, a bacia Sedimentar do Araripe. O mesmo encontra-se inserido no denominado Polígono das Secas da região Nordeste do Brasil. Crato é um dos municípios da denominada região metropolitana do Cariri, estando localizado entre as coordenadas geográficas 7°00'06" e 7°34'27" de latitude Sul e 39°20'16" e 39°36'01" de longitude Oeste, com altitude média de 426,9 m e compõe a bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe, situado, mais precisamente, na sub-bacia do Salgado.

Figura 1 – Localização do município de Crato – CE



Fonte: Os Autores (2019)

A área de estudo localiza-se ao sopé da Chapada do Araripe e apresenta um clima variando entre tropical quente semiárido brando e tropical quente sub-úmido, com temperatura média anual entre 24 e 26°C (IPECE, 2012), temperaturas máximas (período chuvoso) e mínimas (período seco) de 18 e 34°C, respectivamente, conforme descrito por Araújo et al. (2017).

O município possui uma área de 1.176,467 km² com cerca de 121.428 habitantes e PIB per capita equivalente a R\$ 11.578,96 (IBGE, 2017), o mesmo está situado a 505 km da capital do estado (Fortaleza).

No município existe um significativo crescimento urbano e um expressivo avanço do uso e ocupação do solo, porém como na maioria dos municípios brasileiros não há um planejamento dessa urbanização, sendo ausente muitas vezes investimentos em drenagem urbana, saneamento básico e ambiental.

O relevo do Crato-CE é bastante desnivelado, sendo estimado uma diferença em torno de 400m entre a chapada do Araripe e o vale onde o município está inserido. Isso contribui para geração de grandes descargas d'água que ocasionam grandes impactos socioeconômicos no município.

Obtenção dos dados

Para caracterizar a precipitação pluviométrica do município de Crato foram utilizados os dados de chuvas disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCERME, 2017).

A caracterização foi realizada a partir do posto Crato localizado nas coordenadas geográficas 7°14'18" de latitude sul e 39°24'46" de longitude oeste próximo ao centro comercial do município, área, geralmente, mais afetada pelas inundações.

Foi utilizada uma série histórica de 42 anos, no período de janeiro de 1974 a dezembro de 2015.

Os dados foram organizados em planilha eletrônica e todo o processamento dos mesmos foram realizados através do software Excel® do pacote Office da Microsoft®. Foi realizada uma análise de consistência utilizando o método de dupla massa.

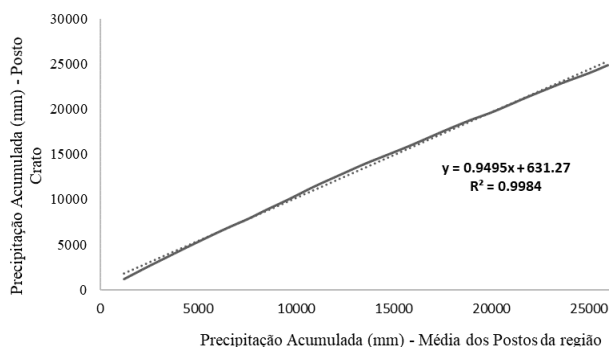
Este procedimento consistiu em comparar os valores acumulados anuais do Posto Crato com os valores acumulados de um posto de referência, que no caso foi utilizado a média dos diversos postos vizinhos.

As séries de dados pluviométricos foram analisadas e descartadas as séries com dados faltosos maior que 10% seguindo o critério de Aryee et al. (2018). Foram verificadas também a homogeneidade absoluta e relativa dos dados pluviométricos, conforme Alexandersson e Moberg (1997).

Na Figura 2 é apresentada a análise de dupla massa do posto. Verifica-se que, os dados do posto, apresentam consistência adequada ao trabalho, visto que a curva não se afasta da reta, nem apresenta mudança de inclinação.

O coeficiente de determinação (R²) apresenta o valor 0,998, que comprova essa consistência. A partir da série histórica de chuvas acumuladas diárias no período citado, realizou-se, então, a seleção da série de precipitações máximas acumuladas diárias por ano do posto Crato (Tabela 1).

Figura 2 - Análise de consistência dos dados obtidos no Posto Crato



Fonte: Os Autores (2019)

Tabela 1 - Série das precipitações máximas anuais do Posto Crato

Ano	Distribuição de Valores de Precipitações Máximas Anuais (mm)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
197...	-	-	-	-	137	84	127	139	82,2	125,1
198...	140	91	127	85	73	100	98	110	110	55
199...	63	72,3	125,2	55,4	94,2	87	82,2	83,6	108,6	83,2
200...	62	66	91,8	120	156	101	98	110,2	93,2	113,2
201...	87,5	162	92,8	75,6	77	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de FUNCERNE (2017)

Análises estatísticas

Foram elaborados gráficos das médias mensais e anuais e suas respectivas variabilidades a partir do cálculo do coeficiente de variação expresso em porcentagem. Além disso foram realizadas análises de distribuição de frequência e teste de aderência Qui-quadrado com nível de confiança de 99%.

Os métodos probabilísticos utilizados foram as distribuições de Gumbel e a Gama. As precipitações máximas foram calculadas para períodos de retornos de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

A distribuição de Gumbel foi selecionada por ser adequada para séries históricas de valores extremos máximos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Seus parâmetros foram estimados por meio do método dos momentos. O método de Gumbel fundamenta-se na seguinte Função Cumulativa de Probabilidade, dada por:

$$P = 1 - e^{-y_i} \tag{Eq.1}$$

Onde P é a probabilidade de qualquer uma das precipitações máximas ser igualada ou superada e y_i é a variável reduzida dada por:

$$y_i = a (X_i - X_f) \tag{Eq.2}$$

Sendo y_i é a variável reduzida das i precipitações máximas registradas, X_i são as precipitações máximas registradas e os parâmetros a e X_f, dados por:

$$a = \frac{S_n}{S_x} \tag{Eq.3}$$

$$X_f = \bar{X} - S_x \left(\frac{\bar{Y}_n}{S_n} \right) \tag{Eq.4}$$

Onde \bar{X} é a média das precipitações máximas registradas, S_x o desvio padrão das precipitações máximas registradas, os parâmetros \bar{Y}_n e S_n os valores associados à variável reduzida e tabelados em função do número de dados, disponibilizados por Villela e Mattos (1975), conforme mostrado na Tabela 2.

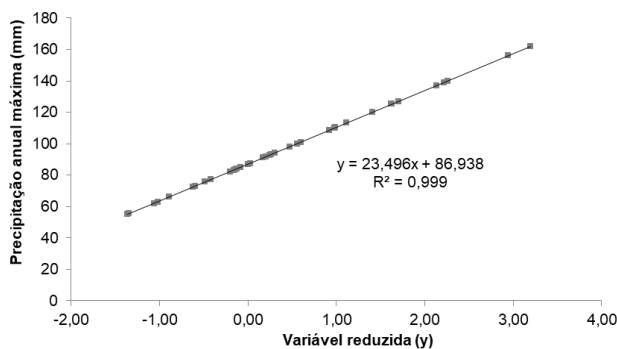
Tabela 2 - Valores esperados da média (\bar{Y}_n) e desvio-padrão (S_n) da variável reduzida (y_i) em função do número de dados (n).

n	\bar{Y}_n	S_n	n	\bar{Y}_n	S_n
20	0,52	1,06	80	0,56	1,19
30	0,54	1,11	90	0,56	1,20
40	0,54	1,14	100	0,56	1,21
50	0,55	1,16	150	0,56	1,23
60	0,55	1,17	200	0,57	1,24
70	0,55	1,19	∞	0,57	1,28

Fonte: Villela e Mattos (1975)

Após o cálculo de todos os parâmetros foram aplicados os mesmos na Equação 2 e com isso obteve-se os valores correspondentes das variáveis reduzidas para cada precipitação máxima registrada na Tabela 1. Em seguida foi construído um gráfico da variável reduzida versus precipitações máximas registradas. Através desse gráfico foi estimada uma equação de regressão linear, conforme apresentado na Figura 3, sendo a mesma utilizada para o cálculo das precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retorno. Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis reduzidas correspondentes para os diversos períodos de retornos conforme descrito por Villela e Mattos (1975). Estes valores foram utilizados na equação obtida na Figura 3 para determinar os valores de precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retornos.

Figura 3 – Gráfico variável reduzida versus precipitação máxima anual registrada do Posto Crato



Fonte: Os Autores (2019)

Tabela 3 - Variável reduzida e período de retorno

Variável Reduzida (y)	Período de Retorno (Tr)
0,000	1,58
0,367	2
0,579	2,33
1,500	5
2,250	10
2,970	20
3,182	25
3,395	30
3,902	50
4,600	100

Fonte: Villela e Mattos (1975)

Já o método da distribuição Gama é aplicável para estimativa da precipitação provável e séries históricas de valores extremos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). No caso de séries histórica de valores extremos, a Função Densidade de Probabilidade (FDP), considerando sua versão para 2 parâmetros, é:

$$FDP:f(x)=\frac{1}{\beta\gamma\Gamma(\gamma)} X^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \tag{Eq.5}$$

Onde Γ é a função Gama, cuja função aproximada foi calculada por:

$$\Gamma(\gamma) = \sqrt{\frac{2\pi}{\gamma}} e^{\gamma[\ln(\gamma)-f(\gamma)]} \tag{Eq.6}$$

Onde $f(\gamma)$ foi calculado por:

$$f(\gamma) = 1 - \frac{1}{12\gamma^2} + \frac{1}{360\gamma^4} - \frac{1}{1260\gamma^6} \tag{Eq.7}$$

Onde γ é o parâmetro de forma e foi calculado por:

$$\gamma = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \tag{Eq.8}$$

Onde A foi calculado por:

$$A = \frac{\ln \bar{X} - X_g}{\beta} \tag{Eq.9}$$

Onde \bar{X} é a média aritmética das precipitações máximas e X_g é a média geométrica das observações.

O parâmetro β foi calculado por:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\gamma} \tag{Eq.10}$$

A probabilidade do evento foi calculada pela Função Cumulativa de Probabilidade (FCP):

$$FCP:F(X)=\frac{1}{\beta\gamma\Gamma(\gamma)} \int_0^X X^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \tag{Eq.11}$$

Os dados foram divididos em classes, aproveitando-se os dados do histograma do posto Crato, gerado na análise de distribuição de frequência. A partir das classes calculou-se a média aritmética e a média geométrica das observações. Calculou-se o parâmetro A pela equação 9 e o seu valor foi inserido na equação 8 para obtenção do parâmetro γ .

Posteriormente, β foi calculado pela equação 10 com o valor obtido da equação 8. A função Gama foi determinada pelos valores das equações 7 e 8 aplicados na equação 6.

Os resultados das equações 6, 8 e 10 foram inseridos na equação 11 e em seguida os valores das precipitações foram estipulados até se encontrar a probabilidade para cada tempo de recorrência pré-definido.

Determinação dos parâmetros das equações IDF

As variáveis de intensidade, duração e frequência das precipitações pluviométricas podem ser estimadas através de regressões lineares e não-lineares.

Essas regressões possibilitam obter equações que auxiliam na compreensão do comportamento da variação de intensidade da precipitação ao longo do tempo, a partir das particularidades locais da série histórica de precipitação. Na Equação 12 é apresentado um exemplo de equação IDF.

$$i = \frac{k \cdot (Tr)^m}{(1+b)^n} \tag{Eq.12}$$

Onde i é a intensidade da precipitação ($mm\ h^{-1}$), Tr é o período de retorno (anos), t é a duração (minutos) e k , m , b e n são os parâmetros a serem calibrados.

Com o objetivo de determinar os parâmetros k , m , b e n , a equação 12 foi ajustada da seguinte forma:

$$i = \frac{C}{(t+b)^n} \tag{Eq.13}$$

A determinação dos parâmetros da equação IDF foi realizada a partir da aplicação de logaritmo em ambos os lados da igualdade da equação 13. Transformando em uma equação de uma reta conforme apresentado na equação 14.

$$\log(i) = \log C - n \log(t+b) \tag{Eq.14}$$

As intensidades foram obtidas a partir das precipitações máximas associadas aos períodos de retorno encontradas pelos dois métodos probabilísticos utilizados no desenvolvimento deste estudo. As mesmas foram desagregadas em precipitações com intervalos de tempo inferiores às 24h, utilizando a metodologia proposta pela Companhia Ambiental de São Paulo (CETESB, 1986). Penner e Lima (2016) relatam que este método proporciona resultados aceitáveis e o recomendam para os casos em que os dados disponíveis são registrados por pluviômetros. Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes de desagregação de chuvas de um dia de duração.

Tabela 4 – Coeficientes de desagregação de dados pluviométricos

Durações	Coeficientes
24h/dia	1,14
12h/24h	0,85
10h/24h	0,82
8h/24h	0,78
6h/24h	0,72
1h/24h	0,42
30min/1h	0,74
25min/1h	0,91
20min/1h	0,81
15min/1h	0,7
10min/1h	0,54
5min/1h	0,34

Fonte: CETESB (1986)

Em seguida foram calculados os logaritmos das intensidades para cada duração e para os diferentes períodos de retorno. O valor de b foi estimado por iteração utilizando regressão linear aplicada aos logaritmos da intensidade em relação aos logaritmos das durações, para um dado período de retorno.

Posteriormente, foram construídos gráficos de dispersão sendo o eixo das abscissas composto por $\log(t+b)$ e no eixo das ordenadas os valores de $\log(i)$, assim, por regressão linear simples obteve-se para cada período

de retorno o coeficiente angular da reta (parâmetro n) e o coeficiente linear ($\log C$).

Já para estimativa dos parâmetros k e m da equação IDF foram estimados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando a Equação 15.

$$\log C = \log k + m \log(Tr) \tag{Eq.15}$$

Onde $\log k$ é o coeficiente linear e m é o coeficiente angular.

Avaliação do desempenho das equações IDF

A eficiência das equações IDF obtidas para os diferentes tratamentos probabilísticos utilizados nas precipitações máximas foram avaliadas a partir de duas metodologias:

- Coeficiente de determinação (R^2);
- Índice de concordância de Willmott (d).

O intuito desta avaliação é analisar o grau de proximidade ou divergência entre os valores estimados pela equação determinada e os valores observados no posto Crato.

O coeficiente de determinação é oriundo da análise de regressão linear e varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais próximos são os dados estimados dos dados observados.

O índice de concordância de Willmott (d) é calculado pela Equação 16. O mesmo estipula o grau de exatidão dos dados estimados e o afastamento entre os valores estimados e observados, variando também entre 0 e 1 (WILLMOTT, 1981).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \tag{Eq.16}$$

Onde d é o índice de concordância, P_i são os valores estimados ($mm\ h^{-1}$), O_i são os valores observados ($mm\ h^{-1}$) e \bar{O} é a média dos valores observados ($mm\ h^{-1}$).

Resultados e Discussões

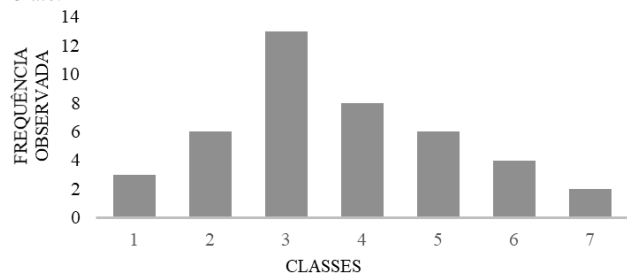
Com base na série histórica, de precipitação máxima diária anual, do posto Crato, a classe que apresenta maior frequência de ocorrência é a classe 3 (Figura 4), com precipitações entre 79,47 mm e 95,98 mm (Tabela 5). Observou-se que os valores dessa classe apresentam precipitações menores que a média das precipitações máximas anuais de 99,26 mm.

Tabela 5 - Distribuição de frequência no Posto Crato

Classe	Intervalos da classe	Frequência observada
1	46,45 - 62,96	3
2	62,96 - 79,47	6
3	79,47 - 95,98	13
4	95,98 - 112,49	8
5	112,49 - 128,99	6
6	128,99 - 145,50	4
7	145,50 - 162,02	2

Fonte: Os Autores (2019)

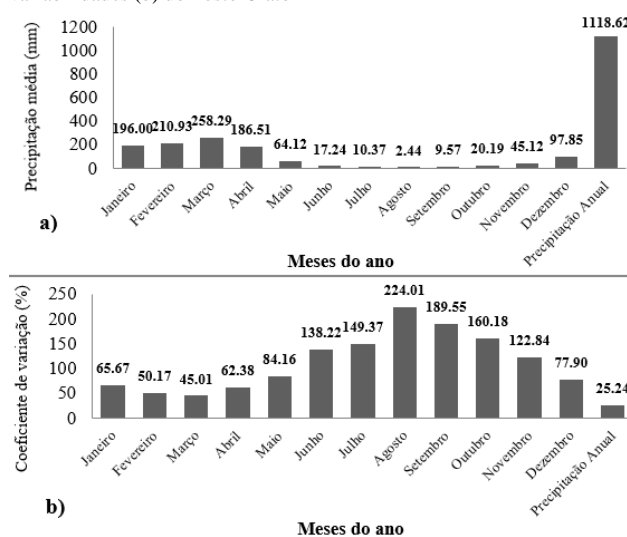
Figura 4 - Histograma da precipitação máxima diária anual no Posto Crato.



Fonte: Os Autores (2019)

A precipitação média anual da série histórica de 42 anos (1974 a 2015) correspondeu em média a aproximadamente 1.119 mm (Figura 5a) com coeficiente de variação de 25,24% (Figura 5b), indicando com isso que a série de dados apresenta dispersão média (ANDRADE et al., 1999).

Figura 5 - Precipitação média mensal e anual (a) e suas respectivas variabilidades (b) do Posto Crato



Fonte: Os Autores (2019)

Observa-se que março é mês de maior precipitação, aproximadamente 258,3 mm em média (Figura 5a), representando 23,1% da precipitação anual. Este mês apresentou coeficiente de variação (CV) da ordem de 45,01%, classificado como alta dispersão, porém foi o menor CV observado quando comparado aos demais meses. Este resultado indica que o mês de março é o que apresenta menor heterogeneidade em relação à dispersão da quantidade precipitada mensalmente.

Por outro lado, agosto é o mês de menor precipitação com apenas 2,44 mm (Figura 5a), representando 0,2% do total da precipitação anual. No que se refere ao coeficiente de variação o mês de agosto foi o que apresentou maior percentual, aproximadamente 224,01%. Estes resultados apontam que o mês de agosto é o mais heterogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada por mês.

Pela Figura 5 identifica-se uma estação chuvosa, uma estação seca e uma pré-estação chuvosa.

A compreensão da distribuição destas estações pode contribuir para o gerenciamento ambiental das áreas mais afetadas pelas chuvas no município e auxiliar no planejamento urbano para reduzir o risco de desastres ocasionados pelas precipitações.

A estação chuvosa compreende os meses de janeiro a abril onde ocorrem aproximadamente 915,85 mm de precipitação pluviométrica, equivalente a 81,9% da precipitação anual.

Os meses que compõem esta estação foram os que apresentaram menores coeficientes de variação (entre 45% a 84%), indicando que a mesma apresenta a menor variabilidade em relação à estação seca e a pré-estação.

A estação seca compreende os meses de junho a setembro onde ocorrem aproximadamente 39,62 mm de precipitação pluviométrica, representando apenas 3,5% da precipitação anual.

De modo geral, observam-se maiores coeficientes de variação nos meses desta estação (entre 138% a 225%), configurando a mesma como a estação de maior variabilidade em relação às demais estações.

A pré-estação chuvosa inicia no mês de outubro e finaliza em dezembro, nesse período ocorrem aproximadamente 163,16 mm de precipitação pluviométrica, isto é, os 14,8% restante da precipitação anual. A maioria dos meses da pré-estação apresentou variabilidade intermediária (entre 77% a 160%) em relação à estação chuvosa e seca.

Esses resultados destacam uma das principais características da distribuição pluviométrica em regiões semiáridas que é a marcante irregularidade temporal (Silva et al., 2011).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o sistema meteorológico que tem forte influência no tempo e no clima, caracteriza-se por ser uma banda de baixa pressão e encontro dos ventos alísios.

Este sistema é o mais influente no regime da abundância ou escassez de chuvas no Norte do Nordeste brasileiro (Ceará e parte do Rio Grande do Norte, Piauí, Maranhão e o Oeste da Paraíba e Pernambuco) (MOLION e BERNARDO, 2002).

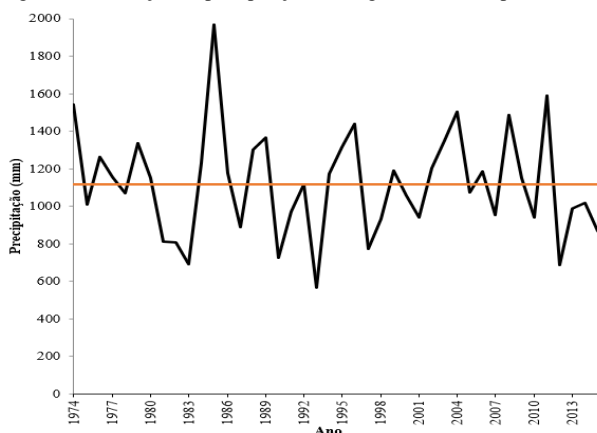
De acordo com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCERNE, 2013), comumente a ZCIT migra sazonalmente da sua posição mais extrema ao norte ($\cong 12^\circ N$), nos meses entre agosto e setembro para posições mais ao sul ($\cong 4^\circ S$), nos meses de março e abril. Logo, parte das precipitações do período chuvoso está associada à migração da ZCIT.

Na Figura 6 apresentam-se as oscilações da precipitação anual da série histórica analisada no posto Crato.

Observou-se que a maior precipitação anual registrada ocorreu em 1985, com aproximadamente 1.970 mm, já a menor precipitação anual ocorreu no ano de 1993, com aproximadamente 568 mm.

De acordo com os dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2017), do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), no ano 1985 houve ocorrência do fenômeno climático “La Niña” de intensidade fraca e nos anos de 1993 e 1997 houve ocorrência do fenômeno climático “El Niño”.

Figura 6 - Oscilação da precipitação ao longo dos anos no posto Crato



Fonte: Os Autores (2019)

Segundo Frischkorn, Araújo e Santiago (2003), o estado do Ceará recebe fortes influências dos fenômenos climáticos “El Niño” e “La Niña” que contribuem significativamente com essas oscilações das precipitações anuais. O fenômeno “El Niño” está relacionado com menores ocorrências de precipitações, já o fenômeno “La Niña” está relacionado com maiores ocorrências de precipitações.

Observa-se também que o ano de 2011 apresentou a segunda maior precipitação anual do posto Crato, aproximadamente 1.588 mm. É de ressaltar que no dia 28 de janeiro de 2011 ocorreu um evento máxima diário com registros de 162 mm, que gerou a maior inundação já registrada na história do município de Crato-CE. O canal do rio Granjeiro, um dos principais cursos d’água que drenam este município, transbordou causando diversos transtornos para os habitantes do Crato e regiões vizinhas, resultando em prejuízos econômicos e sociais, sobretudo na área onde se situa o centro comercial do município.

Os cálculos para determinação das precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retornos obtidos pelas distribuições de Gumbel e Gama foram compilados na Tabela 6. No que se refere ao teste de Qui-Quadrado o valor encontrado para a estatística foi de 1,7833, com 6 graus de liberdade. Para o nível de significância de 1% o valor crítico é de 9,2103, portanto, a distribuição teórica pode representar os valores observados.

Tabela 6 - Precipitações máximas e seus respectivos períodos de retorno para o Posto Crato

Período de Retorno Tr (anos)	Distribuição de Gumbel	Distribuição Gama
	Precipitação Máxima P (mm)	Precipitação Máxima P (mm)
2	95,56	96,59
5	122,18	119,1
10	139,8	138,95
25	162,13	147
50	178,57	157,16
100	195,02	166,68

Fonte: Os Autores (2019)

Pode-se observar probabilisticamente que a cada 2 anos é provável que ocorra um evento igual ou superior a 95,56 mm pela distribuição Gumbel e 96,59 mm pela distribuição Gama, e assim sucessivamente para os demais períodos de retorno.

Foi possível observar que a chuva de 162 mm registrada no Posto Crato no evento do dia 28 de janeiro de 2011 que gerou a inundação do município, corresponde a um período de retorno de 25 anos, ou seja, uma chuva com tempo de recorrência relativamente pequeno.

Já para a distribuição Gama, o evento de 2011, com 162 mm obteve um período de retorno superior a 50 anos, ou seja, maior do que o dobro do período de retorno encontrado pelo método Gumbel. Comparando-se as precipitações resultantes dos dois métodos, notou-se que em períodos de retorno menores, até 10 anos, os valores obtidos são bem próximos. A partir de 25 anos, as diferenças de precipitações variaram entre 15 e 29 mm para os valores de Tr em comum.

Partindo dos valores de precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retorno mostrados na Tabela 6, as precipitações diárias foram convertidas para valores de 24 horas. A partir dessa transformação as precipitações foram corrigidas utilizando os coeficientes mostrados na Tabela 4, obtendo-se assim as precipitações para as diferentes durações, e em seguida calculadas as intensidades de chuvas. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as intensidades de chuvas obtidas a partir das precipitações máximas para os diferentes períodos de retorno pela distribuição de Gumbel e Gama, respectivamente.

Os logaritmos das intensidades de chuvas máximas obtidas das Tabela 7 e 8 foram construídos gráficos, para cada método de distribuição de probabilidade, em função dos logaritmos das durações, somado ao parâmetro “b”, obtido iterativamente a partir da otimização do R² da regressão linear de log (i) versus log (t+b), o critério de parada de iteração foi a obtenção do maior valor de R².

Tabela 7 – Intensidade de Chuvas (mm h⁻¹) obtida pelas precipitações através da distribuição de Gumbel

Duração	Tr - tempo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
24h	4,54	5,80	6,64	7,70	8,48	9,26
12h	7,72	9,87	11,29	13,09	14,42	15,75
10h	8,93	11,42	13,07	15,16	16,69	18,23
8h	10,62	13,58	15,54	18,02	19,85	21,68
6h	13,07	16,71	19,12	22,18	24,43	26,68
1h	45,75	58,50	66,94	77,63	85,50	93,38
30min	67,72	86,58	99,07	114,89	126,54	138,20
25min	73,95	94,55	108,18	125,46	138,18	150,91
20min	92,43	118,18	135,22	156,82	172,73	188,64
15min	94,80	121,21	138,69	160,84	177,15	193,47
10min	109,70	140,26	160,49	186,12	204,99	223,88
5min	138,14	176,62	202,09	234,37	258,14	281,92

Fonte: Os Autores (2019)

Tabela 8 – Intensidade de Chuvas (mm h⁻¹) obtida pelas precipitações através da distribuição de Gama

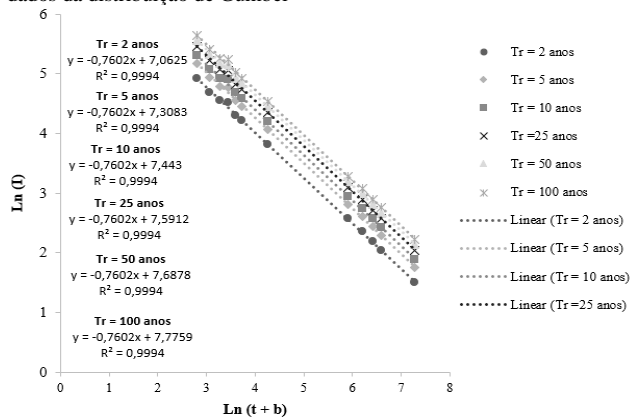
Duração	Tr - tempo de retorno					
	2	5	10	25	50	100
24h	4,59	5,66	6,60	6,98	7,47	7,92
12h	7,80	9,62	11,22	11,87	12,69	13,46
10h	9,03	11,13	12,99	13,74	14,69	15,58
8h	10,74	13,24	15,44	16,34	17,47	18,53
6h	13,21	16,29	19,01	20,11	21,50	22,80
1h	46,25	57,03	66,53	70,38	75,25	79,81
30min	68,45	84,40	98,46	104,17	111,37	118,11
25min	74,74	92,16	107,52	113,75	121,61	128,98
20min	93,43	115,20	134,40	142,19	152,02	161,22
15min	95,82	118,16	137,85	145,83	155,91	165,36
10min	110,88	136,72	159,51	168,75	180,42	191,34
5min	139,63	172,17	200,87	212,50	227,19	240,95

Fonte: Os Autores (2019)

Para o gráfico construído com os dados oriundos da distribuição de Gumbel o R^2 obtido foi de 0,9994 para $b = 11,5$. No entanto, para o gráfico construído com os dados obtidos a partir da distribuição Gama o R^2 obtido também foi de 0,9994, porém para $b=11$. Observa-se que para o parâmetro b , não houve uma variação significativa em relação aos métodos probabilísticos utilizados na determinação das precipitações máximas. Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os resultados da regressão para a melhor aderência do logaritmo das intensidades em função do logaritmo das durações mais o parâmetro b referente aos dados obtidos por distribuição de Gumbel e Gama, respectivamente.

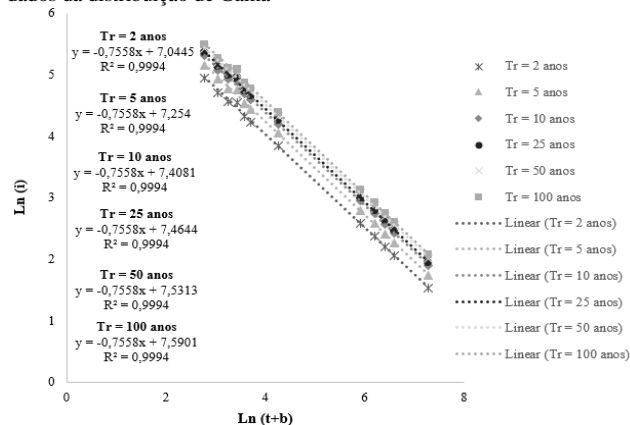
O parâmetro n da equação IDF corresponde ao coeficiente angular das retas das Figuras 7 e 8. Portanto, o n da equação IDF obtido a partir dos dados da distribuição de Gumbel corresponde a 0,7602 (Figura 7) tendo em vista que as retas apresentaram o mesmo valor de inclinação. Para os dados obtidos pelo método (Figura 8), o n da curva IDF corresponde a 0,7558, tendo em vista também que as retas apresentaram o mesmo valor de inclinação. Observa-se que houve uma diferença do parâmetro n da ordem 0,0044 o que demonstrou que este parâmetro da curva IDF, não apresentou sensibilidade em relação aos diferentes métodos probabilísticos utilizados neste estudo.

Figura 7 – Aderência otimizada à regressão linear dos logaritmos das intensidades versus logaritmos da duração mais o parâmetro b para os dados da distribuição de Gumbel



Fonte: Os Autores (2019)

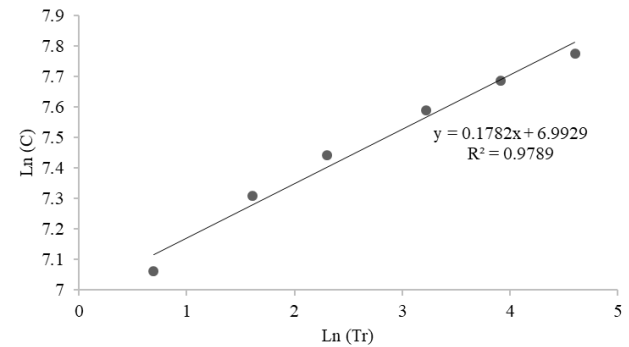
Figura 8 – Aderência otimizada à regressão linear dos logaritmos das intensidades versus logaritmos da duração mais o parâmetro b para os dados da distribuição de Gama



Fonte: Os Autores (2019)

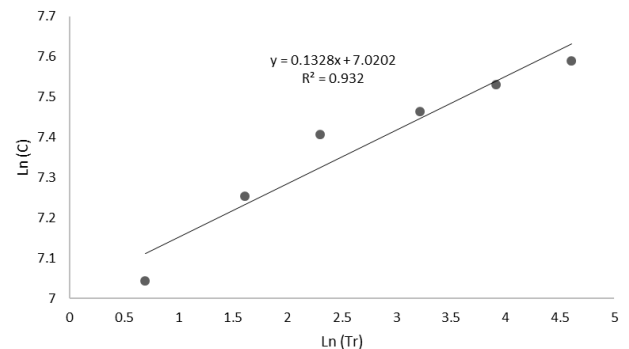
Os coeficientes lineares das regressões obtidos nas Figuras 7 e 8 representam o $\log C$. Os mesmos foram construídos em função dos logaritmos dos períodos de retorno de cada curva, obtendo-se, assim, via regressão linear, os parâmetros m e k da equação IDF. O coeficiente angular da reta equivale ao parâmetro m e o exponencial (do coeficiente linear corresponde ao parâmetro k . Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os gráficos plotados $\log(C)$ versus $\log(Tr)$ para dados obtidos pelo método de Gumbel e Gama, respectivamente.

Figura 9 - Regressão linear dos logaritmos de C versus os logaritmos dos períodos de retornos para os dados obtidos via distribuição de Gumbel.



Fonte: Os Autores (2019)

Figura 10 - Regressão linear dos logaritmos de C versus os logaritmos dos períodos de retornos para os dados obtidos via distribuição Gama



Fonte: Os Autores (2019)

Os coeficientes angular e linear da reta da Figura 9 apresentaram, respectivamente, valores aproximados de $m = 0,178$ e $k = 1088,875$ para curva IDF referente os dados tratados utilizando a distribuição de Gumbel. Já os coeficientes angular e linear da reta da Figura 10 apresentaram, respectivamente, valores aproximados de $m = 0,133$ e $k = 1119,01$ para curva IDF em relação aos dados obtidos pela distribuição gama. Nota-se que estes parâmetros da equação IDF apresentam maior sensibilidade, em relação aos métodos probabilísticos adotados, quando comparado com os demais parâmetros da equação.

Os valores dos parâmetros das equações de chuvas intensas encontrados neste trabalho corroboram com os valores descritos por Silva, Palácio Júnior e Campos (2013) que desenvolveram equações para o município de Fortaleza utilizando dados pluviométricos gerados pela Universidade Federal do Ceará.

Os parâmetros necessários para a equação IDF, após serem estimados pelo método da desagregação da chuva diária podem ser substituídos e a equação IDF toma a forma da equação 17 para os parâmetros obtidos via distribuição de Gumbel e da equação 18 para os parâmetros obtidos via distribuição Gama:

$$i = \frac{1088,875 Tr^{0,178}}{(t+11,5)^{0,7602}} \tag{Eq.17}$$

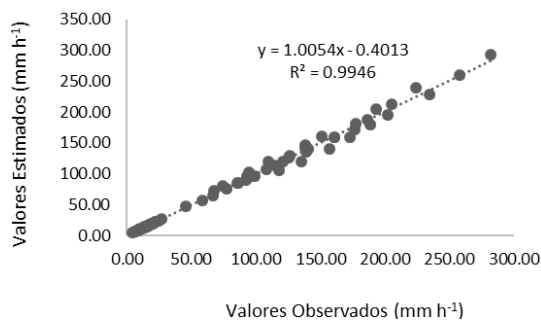
$$i = \frac{1119,01 Tr^{0,133}}{(t+11)^{0,7558}} \tag{Eq.18}$$

As Equações 17 e 18 são válidas para períodos de retornos inferiores à 100 anos. Vale ressaltar que para obter valores de intensidade em mm.h⁻¹, o valor do período de retorno deve ser utilizado em anos e a duração em minutos.

As equações IDF obtidas para o município de Crato podem auxiliar na gestão dos recursos hídricos locais, bem como no planejamento e projeto dos sistemas de drenagem urbana com vistas a controlar as inundações e reduzir os prejuízos socioambientais causados por esses desastres naturais. No que se refere à avaliação das intensidades das chuvas estimadas pelas equações IDF, foram utilizados dois indicadores (o coeficiente de determinação e o índice de concordância). O coeficiente de determinação apresentou boa qualidade, mostrando que houve um ajuste adequado das Equações 17 e 18 aos dados observados pelo método de Gumbel e gama, respectivamente. O valor de R² foi equivalente a 0,9946 para a equação 17 e 0,9920 para a equação 18.

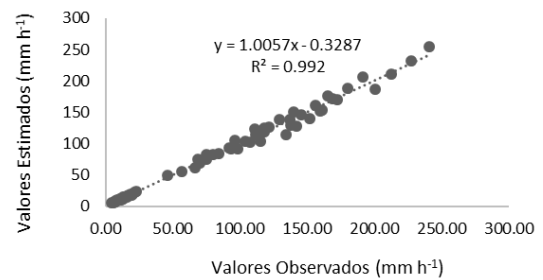
Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas as relações entre os valores estimados e observados, bem como a regressão linear dos valores e o R² das equações 17 e 18. Quanto ao índice de concordância de Willmott, ambas as equações apresentaram um bom desempenho, sendo que a equação 17 apresentou um valor de d = 0,9978 e a equação 18 um valor de d = 0,9979.

Figura 11 - Relação entre intensidade máxima de precipitação observada e estimada pela Equação 17



Fonte: Os Autores (2019)

Figura 12 - Relação entre intensidade máxima de precipitação observada e estimada pela Equação 18



Fonte: Os Autores (2019)

Na Tabela 9 são apresentados os valores de desvios relativos médios entre os valores observados e estimados para cada equação IDF, em relação aos diferentes períodos de retorno e durações utilizados.

Tabela 9 - Desvios médios entre os valores observados e estimados para cada tempo de recorrência (Tr) e tempo de duração (t) analisado

Valores referentes a equação 17		Valores referentes a equação 18	
Tr (Anos)	Desvio Médio	Tr (Anos)	Desvio Médio
2	5,56%	2	7,06%
5	-2,81%	5	-1,92%
10	-3,91%	10	-7,81%
25	-2,46%	25	-1,57%
50	0,19%	50	0,96%
100	3,78%	100	4,39%
T (minutos)	Desvio Médio	T (minutos)	Desvio Médio
5	0,34%	5	1,15%
10	3,32%	10	3,72%
15	1,98%	15	2,12%
20	-8,28%	20	-8,30%
25	2,50%	25	2,38%
30	1,53%	30	1,33%
60	-0,64%	60	-0,97%
360	-0,63%	360	-0,67%
480	-1,14%	480	-1,08%
600	-0,44%	600	-0,30%
720	0,58%	720	0,79%
1440	1,56%	1440	2,05%

Fonte: Os Autores (2019)

Observou-se que em relação ao período de retorno, os maiores desvios médios obtidos foram para o tempo de 2 anos em ambas as equações ID, superestimando as precipitações em 5,56% para equação 17 e 7,06% para a Equação 18. Isso indica que os valores dos parâmetros obtidos para a equação de chuvas intensas do município de Crato, baseado na distribuição de Gumbel são mais confiáveis do que os valores dos parâmetros obtidos para equação baseado na distribuição Gama.

Em relação às durações, nota-se que os maiores valores dos desvios médios positivos e negativos para a Equação 17 foram, respectivamente, 3,32 e -8,28%. Já para a Equação 18 o maior desvio médio positivo foi de 3,72 e maior desvio médio negativo foi de -8,30%. Ao comparar os desvios médios das equações em relação à duração, evidencia-se que os valores são relativamente parecidos. Isso demonstra que para esta variável os parâmetros obtidos para as equações de chuvas intensas do município de Crato possuem graus de confiabilidade próximos.

Os desvios médios para as equações de chuvas intensas obtidos neste trabalho podem ser considerados aceitáveis, quando comparados aos desvios relatados por Rodrigues et al. (2008), no estudo de chuvas intensas dos municípios de Fortaleza e Pentecoste no estado do Ceará. Em geral, os autores descrevem que as respectivas equações IDF dos municípios apresentaram desvios máximos superiores a 10%.

Conclusão

Com o estudo de caracterização das precipitações pluviométricas do município de Crato conclui-se que os meses com maiores volumes de chuva são fevereiro e março e os meses com menores volumes são agosto e setembro. Isso demonstra que nos primeiros trimestres do ano há uma maior probabilidade de ocorrerem eventos extremos que gerem inundações, podendo ser um indicativo para ações da defesa civil e implantação de sistemas de redução do risco de inundações. O comportamento das precipitações no município de Crato é característico do clima semiárido do nordeste brasileiro, porém observou-se que os volumes pluviométricos normalmente são maiores que os típicos para este tipo de clima que é entorno de 800 mm/ano. Provavelmente, isso deve-se ao fato de o município estar localizado no sopé da chapada do Araripe, apresentando clima mais ameno e maiores propensões para chuvas orográficas.

A série histórica obtida do posto Crato se adequou bem aos métodos probabilísticos utilizados neste trabalho. Isso foi evidenciado pelo teste de aderência de Qui-quadrado. No que se refere a ocorrência do evento extremo do ano de 2011, a precipitação de 162 mm foi associada há um período de retorno de 25 anos pelo método de distribuição de Gumbel e superior a 50 anos pela distribuição Gama.

Através das análises de precipitações máximas diárias associadas a diferentes períodos de retorno, obtidos via distribuição de Gumbel e Gama, utilizando o método das desagregações de chuvas foi possível desenvolver as curvas da relação entre a intensidade, duração e frequência de chuvas intensas para o município de Crato. Foram ajustadas duas equações que apresentaram estimativas de qualidade para o cálculo de intensidade máxima de chuvas com períodos de retorno entre 2 e 100 anos e durações de 5 a 1440 minutos. As equações IDF ajustada neste trabalho podem auxiliar em projetos de engenharia hidráulica, planejamento urbano, gerenciamento ambiental, dimensionamento de drenagem urbana e no estudo do comportamento hidrológico das chuvas intensas visando implantar sistemas de redução do risco de inundação no município de Crato-CE.

Referências

- ABUBAKARI, S.; KUSI, K. A.; XIAOHUA, D. Revision of the Rainfall Intensity Duration Frequency Curves for the City of Kumasi-Ghana. **The International Journal Of Engineering And Science**, v.6, n.1, p.51-56, 2017.
- ALEXANDERSSON, H.; MOBERG, A. Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. **International Journal of Climatology**, v.17, p. 25–34, 1997.
- ANDRADE, A. R. de; BALDO, M. C.; NERY, J. T. Variabilidade sazonal da precipitação pluviométrica de Santa Catarina. **Acta Scientiarum. Technology**, v.21, n.4, p.923-928, 1999.
- ARAÚJO, A. O.; MENDONÇA, L. A. R.; LIMA, M. G. de S.; MENDONÇA, E. de S.; SILVA, F. J. A. da; SASAKI, J. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. de; FEITOSA, J. V. Adjustment of decay rates of organic matter in a Latossolo Vermelho-Amarelo in the Araripe National Forest, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 8, p. 588 – 596, 2017.
- ARYEE, J. N. A., AMEKUDZI, L. K., QUANSAH, E., KLUTSE, N. A. B., ATIAH, W. A., & YORKE, C. Development of high spatial resolution rainfall data for Ghana. **International Journal of Climatology**, v.38, n.3, p. 1201–1215, 2018.
- BRITO, D. da S.; SILVA, J. M. O. Estudo dos impactos pluviométricos e os eventos extremos no município de Crato-CE. **Revista Geonorte**, v.3, n.8, p.964-976, 2012.
- Companhia Ambiental de São Paulo. **Drenagem Urbana—Manual de Projeto**. São Paulo: CETESB/ASCETESB. 1986.
- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Monitoramento e previsão do fenômeno El-Niño e La-Niña**. Cachoeira Paulista: CPTEC. Disponível em <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em 17 de fevereiro de 2017.
- FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. de; SANTIAGO, M. M. F. **Water resources of Piauí and Ceará**. Gaiser; Krol; Frischkorn; Aratjo.(Org.). *Global change and regional impacts*, v.1, p.87-94, 2003.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Sistemas meteorológicos causadores de chuva na região nordeste do Brasil**. Fortaleza: FUNCEME. Disponível em http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Grafico_chuvas_postos_pluviometricos/entender/entender2.htm. Acessado em 03/07/2017.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/crato/panorama>. Acessado em 28/06/2017.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal de Crato**. Fortaleza: IPECE. Disponível em: . Acessado em 14/07/2017.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v.8, p.5-28, 2007.
- MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; SILVA, A. M.; LIMA, J. M. Análise de modelos matemáticos aplicados ao estudo de chuvas intensas. **Revista brasileira de ciência do solo**, v.25, n.3, p.693-698, 2001.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. D. O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p.1-10, 2002.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM. 2007.
- PENNER, G. C.; LIMA, M. P. Comparação entre métodos de determinação da equação de chuvas intensas para a cidade de Ribeirão Preto. **Geociências (São Paulo)**, v.35, n.4, p.542-559, 2016.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. I. de; MENDONÇA, L. A. R.; FONTENELE, S. de B.; ARAÚJO, A. O.; BRITO, M. G. de S. L. Statistical multivariate analysis applied to environmental characterization of soil in semiarid region. **Revista Caatinga**, v. 32, n. 1, p. 200 – 210, 2019.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M. D.; OLIVEIRA, T. S. D.; LOBATO, F. A. de O. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para as localidades de Fortaleza e Pentecoste, Ceará. **Scientia Agraria**, v.9, n.4, p.511-520, 2008.
- SILVA, F. O. E. D., PALÁCIO JÚNIOR, F. F. R.; CAMPOS, J. N. B. Equação de chuvas para Fortaleza-CE com dados do pluviógrafo da UFC. **Revista DAE**, v.192, p.48-59, 2013.
- SILVA, V. P. da; PEREIRA, E. R.; AZEVEDO, P. V.de; SOUSA, F. D. A.de; SOUSA, I. F.de. Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p.131-138, 2011.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill. 1975.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, v.2, n.2, p.184-194, 1981.