

Estudo hidrológico da área do lixão do Roger em João Pessoa-PB, Brasil

Hydrological study of the Roger dump area in João Pessoa-PB, Brazil

Antônio Italczy de Oliveira Júnior¹; Camila de Melo Tavares²; Maria Odete Holanda Mariano³ José Fernando Thomé Jucá⁴; Mário Augusto Tavares Russo⁵

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife-PE, Brasil. Email: antonio.italczy@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8297-5068>

² Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife-PE, Brasil. Email: camila.mtavares@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-1480>

³ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife-PE, Brasil. Email: odete.mariano@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6027-0510>

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife-PE, Brasil. Email: jucah@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8956-7905>

⁵ Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Viana do Castelo, Portugal. Email: mariorusso@estg.ipv.pt
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4515-5554>

Resumo: Os tempos de recorrência ou períodos de retorno das precipitações intensas podem ser obtidos a partir de estimativas, sendo possível avaliar a inundação ocasionado pela elevação do nível de água dos corpos d'água de uma região. Tal avaliação possibilita mapear as manchas d'água e assim verificar as áreas que podem ser atingidas pelas inundações. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar séries históricas de precipitação dos postos pluviométricos situados próximo à área do Lixão do Roger em João Pessoa-PB, estimar as precipitações máximas utilizando distribuição de probabilidade contínua (Gumbel) para diferentes tempos de recorrência e mapear as inundações geradas por estas precipitações associadas aos tempos de recorrência estudados, visando a segurança na área para implantação de um parque. A partir da modelagem hidrológica e da delimitação permitiu identificar as áreas de inundação na área do Lixão do Roger e prever a cota altimétrica atingida pelas manchas de inundação para cada tempo de recorrência. Para o Posto Cabelo Cagepa e considerando um tempo de recorrência de 100 anos é possível verificar que até 30% da área do Lixão do Roger é atingida por inundações e a cota altimétrica interceptada pela água foi de aproximadamente 5,87 m.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Áreas inundáveis; Mapeamento hidrológico.

Abstract: The recurrence times or return periods of intense precipitation can be obtained from estimates, making it possible to evaluate the flooding caused by the rise in the water level of water bodies in a region. Such an assessment makes it possible to map water spots and thus verify the areas that could be affected by floods. In this context, this work aimed to evaluate historical precipitation series from pluviometric stations located close to the Lixão do Roger area in João Pessoa-PB, estimate maximum precipitation using continuous probability distribution (Gumbel) for different recurrence times and map the floods generated by these precipitations associated with the recurrence times studied, aiming at safety in the area for the implementation of a park. Using hydrological modeling and delimitation, it was possible to identify the flood areas in the Lixão do Roger area and predict the altitude reached by the flood spots for each recurrence time. For the Cabelo Cagepa Post and considering a recurrence time of 100 years, it is possible to verify that up to 30% of the Lixão do Roger area is affected by floods and the elevation intercepted by the water was approximately 5.87 m.

Keywords: Solid waste; Floodable areas; Hydrological mapping.

1. Introdução

O encerramento das atividades dos lixões leva à redução dos impactos negativos causados ao meio em função de seu funcionamento, no entanto, a desativação não erradica todos os impactos relativos à sua existência, sendo necessária a realização de projetos de recuperação das áreas dos lixões desativados (RESENDE *et al.*, 2015).

O processo de recuperação de um lixão desativado apresenta diversos desafios, desde os estudos preliminares geotécnicos e geofísicos, como também análises mais detalhadas dos dados para possível utilização da área degradada. É de extrema importância avaliar os processos hidrológicos que ocorrem na área onde o lixão está inserido, para que possa ser levado em consideração este aspecto frente a uma possível utilização da área degradada e evitar problemas futuros com precipitações intensas (LISBOA *et al.*, 2016).

A precipitação pluviométrica é uma variável climatológica fundamental, sobretudo em área de antigo depósito de resíduos, pois os volumes de água precipitada representam a principal entrada de água no balanço hídrico de uma área, contribuindo para o aumento do lixiviado. Cabe salientar também que as precipitações possuem efeitos adversos, quando ocorrem eventos intensos e potencializados pelos fatores antrópicos, como enchentes e inundações. Em depósitos de resíduos sólidos urbanos, a precipitação pode acarretar problemas além do aumento de lixiviado como, por exemplo, a elevação dos níveis de água de rios e riachos, conduzindo a problemas de inundações na área.

Além da magnitude das precipitações é fundamental compreender os tempos de recorrência das precipitações (MELLO *et al.*, 2001). Os tempos de recorrência ou períodos de retorno das precipitações intensas podem ser obtidos a partir de estimativas, baseando-se em modelos matemáticos de distribuição de probabilidade, que utiliza inferência estatística para estimar os parâmetros das estruturas desses modelos (NAGHETTIN e PINTO, 2007). Em tais estudos, as distribuições de probabilidades contínuas são bastante utilizadas. Para séries de valores máximos diários de precipitações, a distribuição Gumbel é uma das mais utilizadas em diversos trabalhos (ABUBAKARI, KUSI e XIAOHUA, 2017, OLIVEIRA JÚNIOR, *et al.*, 2019).

A partir das chuvas intensas associadas aos tempos de recorrência é possível avaliar o aumento de nível dos corpos d'água de uma região e mapear as manchas d'água possibilitando assim a verificação das áreas que podem ser atingidas pelas inundações. Silva *et al.* (2023), cita alguns problemas causados pela incidência de uma precipitação intensa sob uma região, como por exemplo: erosão do solo, destruição de lavouras, ocorrência de enchentes, inundações e alagamentos, intensificação do processo de assoreamento, rompimento de barragens.

Neste sentido, é importante a realização de estudos que caracterizem a área degradada de lixões desativados, antes de determinar as técnicas de recuperação, afinal, a partir do conhecimento da área torna-se possível determinar as técnicas que serão realmente eficientes no processo de recuperação destas áreas (Rezende *et al.*, 2013).

Portanto, o objetivo do presente trabalho é avaliar séries históricas de precipitação dos postos pluviométricos situados próximo à área do Lixão do Roger em João Pessoa-PB, estimar as precipitações máximas utilizando distribuição de probabilidade contínua (Gumbel) para diferentes tempos de recorrência e mapear as inundações geradas por estas precipitações associadas aos tempos de recorrência estudados, garantindo a segurança da área requalificada.

2. Metodologia

A área do Lixão do Roger se encontra no município de João Pessoa, na bacia do Rio Paraíba, estando localizada nas coordenadas geográficas 7° 6'18.89"S e 34°53'5.08"O, altitude de 15 m. Em termos hidrológicos, a área de estudo se encontra na região do baixo curso do Rio Paraíba, sendo drenada por um afluente o rio Sanhauá. Na Figura 1 é apresentado um esquema de localização da área de estudo.

Para caracterizar a precipitação pluviométrica da área de estudo foram utilizados os dados de chuva disponibilizados pelo site da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022). Os dados estão disponíveis para download no site Hidroweb v.3.2.6.

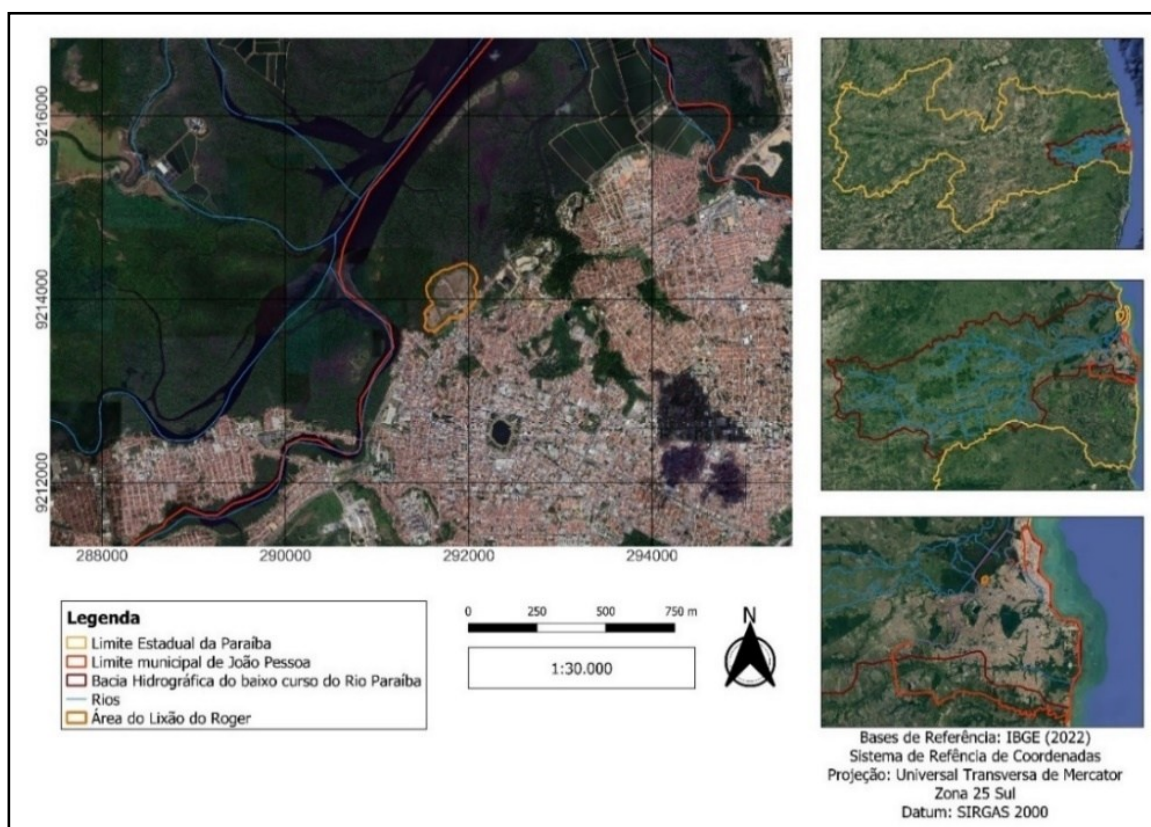


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Fonte: Autores (2024).

A caracterização foi realizada a partir do Posto CAGEPA situado em Cabedelo (Código da estação 734042), Posto INMET situado em João Pessoa (Código da estação 734006) e Posto Cemaden situado em Bayeux (Código da estação 734044) especializados na bacia de contribuição da Área do Lixão do Roger conforme mostrado na Figura 2.

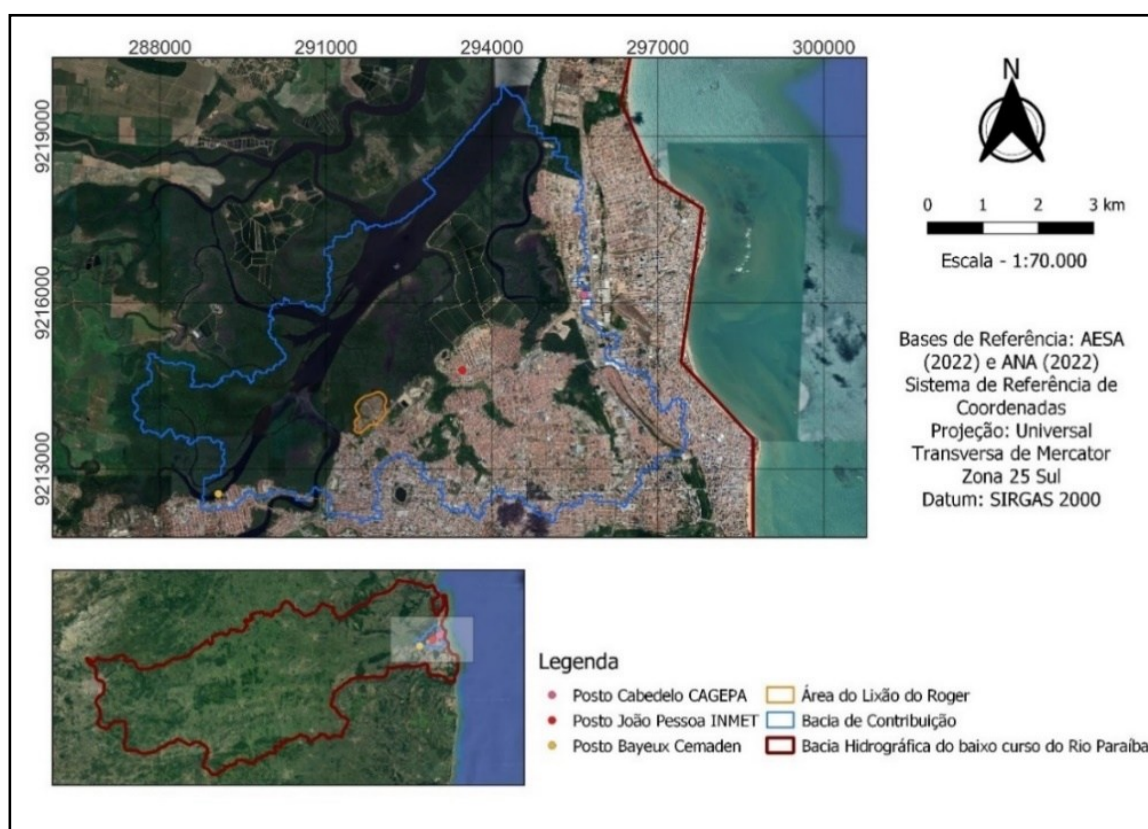


Figura 2 – Localização na bacia de contribuição dos Postos Pluviométricos utilizados na caracterização da precipitação.

Fonte: Autores (2024).

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). Por esta razão, foi utilizada uma série histórica de 18 anos, no período de janeiro de 2002 a dezembro de 2019, tendo em vista que o referido período foi o que apresentou menores falhas e maior homogeneidade de dados entre os três postos. Para análise de consistência dos dados, utilizou-se o método de dupla massa para comparar os valores acumulados anuais de cada posto com os valores acumulados de um posto de referência vizinho.

O método probabilístico utilizado foi a distribuição de Gumbel e as precipitações máximas foram calculadas para os tempos de recorrência 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:

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

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

$$y_i = a(X_i - X_f) \quad (2)$$

Onde 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 , são dados por:

$$a = \frac{S_n}{S_x} \quad (3)$$

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

Onde \bar{X} é a média das precipitações máximas registradas, S_x é o desvio padrão das precipitações máximas registradas. Os parâmetros \bar{Y}_n e S_n são valores associados a variável reduzida e tabelados em função do número de dados, disponibilizados em Vilela (1975), conforme mostrado na Tabela 1.

Após 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. Em seguida foi plotado um gráfico variável reduzida versus precipitações máximas registradas. Através desse gráfico foi estimada uma equação de regressão linear. A mesma foi utilizada posteriormente para o cálculo das precipitações máximas associadas aos períodos de retorno. Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis reduzidas correspondentes para diversos períodos de retornos.

Tabela 1 – Valores esperados da média (\bar{Y}_n) e desvio-padrão (S_n) da variável reduzida (y) em função do número de dados (n).

n	\bar{Y}_n	S_n	n	\bar{Y}_n	S_n
10	0,49	0,95	80	0,56	1,19
20	0,52	1,06	90	0,56	1,20
30	0,54	1,11	100	0,56	1,21
40	0,54	1,14	150	0,56	1,23
50	0,55	1,16	200	0,57	1,24
60	0,55	1,17	∞	0,57	1,28
70	0,55	1,19	-	-	-

Fonte: Vilela (1975)

Tabela 2 – Variável reduzida e período de retorno.

Variável Reduzida (y)	Período de Retorno (T_r)
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
5,296	200
5,808	300
6,214	500
6,907	1000

Fonte: Vilela (1975).

Para estimar as vazões geradas pela chuva associadas aos tempos de recorrência, foi utilizado o software HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System). A área de contribuição foi calculada utilizando a base cartográfica da Agência Executiva de Gestão das Águas (AESAs) da Paraíba e dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

Para construção do hietograma foi utilizado o método dos blocos alternados. Na determinação da precipitação efetiva foi empregado o método da Curve Number (CN), desenvolvido pelo Natural Resources Conservation Service (NRCS).

O valor de CN responde pela maior parte das características das bacias hidrográficas produtoras de escoamento, tais como tipo de solo, uso da terra, condição hidrológica e condição antecedente de umidade. (MISHRA & SINGH, 2004). Para estimar a precipitação efetiva, aplicou-se a Equação 5:

$$Pe = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (5)$$

Para $P > Ia$ e 0 nos demais casos

Onde Pe é a chuva efetiva em mm, P é precipitação total em mm, Ia é a abstração inicial em mm e S é o máximo potencial de retenção do solo em mm.

Para Ia adotou-se o valor de $0,2S$, conforme recomendado pelo NRCS. Assim, a equação 5 pode ser reescrita na forma da Equação 6:

$$Pe = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (6)$$

Onde S é obtido pela equação 7:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

O parâmetro CN está relacionado ao tipo de solo, ao tipo de cobertura vegetal e às condições de umidade antecedentes. Nesse estudo considerou-se a condição antecedente de umidade média para um solo tipo B com cobertura vegetal tipo: urbano, área vegetada e mata ciliar. Na estimativa do CN , foram utilizadas imagens aéreas do município, combinadas com imagens do Google Earth. Destaca-se, que o valor do número CN foi estimado a partir dos valores da tabela determinada pelo NRCS, conforme o tipo de solo da área de estudo. Para obter o hidrograma da cheia a partir do hietograma da chuva, aplicou-se o método do Hidrograma Unitário Adimensional do NRCS, seguindo a proposta de Ebrahimian et al., (2012). O método tem como parâmetro o tempo de retardo (Tlag). O valor de Tlag é obtido pela equação 8:

$$Tlag = 0,6 * Tc \quad (8)$$

Onde Tc é o tempo de concentração em minutos e o Tlag é o tempo de retardo em minutos.

O tempo de concentração pode ser estimado pela equação 9:

$$Tc = 3,98 \frac{L^{0,77}}{D^{0,385}} \quad (9)$$

Onde Tc é o tempo de concentração em minuto, L o comprimento do rio em km e D é a declividade em %.

As vazões máximas obtidas na modelagem hidrológica para uma precipitação nos tempos de recorrência de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos, assim como os elementos hidráulicos (rede de drenagem, seções transversais e limites da calha) foram inseridas como dados de entrada no modelo HEC-RAS.

Diante da limitação de dados na escala horária, adotou-se o regime de escoamento permanente. Assim, o valor obtido refere-se à área inundada na cheia máxima provocada pelo evento de chuva simulado no estudo.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi selecionado por meio de imagens do Google Earth, georreferenciada e datadas de 12 de dezembro de 2018. Para o escoamento na calha do rio, adotou-se $n = 0,08$ como valor inicial e, para escoamento na planície de inundação, em ambas as margens, tomou-se $n = 0,12$.

Com a ferramenta RAS mapper do HEC-RAS e HEC-HMS foi possível elaborar o conjunto de dados requeridos para a simulação hidráulica. A delimitação da calha principal foi realizada para distinguir o canal principal das planícies de inundação, definindo, dessa forma, o leito menor de cada curso d'água.

Foi utilizado como guia para a delimitação deste elemento o modelo sombreado do terreno obtido a partir do MDE. Desse modo, foi possível identificar visualmente os detalhes topográficos das calhas fluviais de interesse. Foram delimitadas as Linhas de Fluxo de cada curso d'água considerando o fluxo no talvegue do canal e o fluxo sobre o leito maior ao longo das margens, e consistiram em linhas indicando a direção do escoamento nestes locais.

As seções transversais consistiram nos principais elementos para a simulação hidráulica, pois a partir delas foram extraídas as cotas de elevação provenientes do MDE para a geração dos perfis em cada seção do canal, e para computar as informações hidrológicas de entrada para a posterior simulação no software HEC-RAS.

Após o cálculo dos perfis da superfície da água, os resultados foram exportados para o formato shapefile. Os níveis da água em cada seção foram sobrepostos ao Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) para estimar as áreas de inundação. Os dados utilizados na modelagem são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da modelagem hidrológica.

Área (km ²)	38,26
L (km)	8,79
Desnível (%)	0,3
CN	75
Tc (min.)	33,73
S (mm)	84,67

Fonte: Autores (2024).

3. Resultados e discussão

A precipitação anual da série histórica de 18 anos (2002 a 2019) obtida no Posto Cabedelo (CAGEPA) correspondeu em média a aproximadamente 1.698,8 mm e coeficiente de variação de 24,9%. Isso indica que a série de dados de precipitação média anual dos 18 anos apresenta baixa dispersão. A maior precipitação ocorreu no mês de junho, em média 366,3 mm, representando cerca de 21,6% de toda a precipitação média anual. Este mês foi o que apresentou menor coeficiente de variação aproximadamente 42,8%, indicando com isso que o mês de junho é o que apresenta comportamento mais homogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses. Por outro lado, o mês de menor precipitação média é o mês de novembro, aproximadamente 14,5 mm, representando cerca de 0,86% do total da precipitação anual. No que se refere ao coeficiente de variação, o mês de dezembro, seguido pelo mês de novembro foram os que apresentaram maior percentual, aproximadamente 103,6% e 94,8%, respectivamente. Estes resultados apontam que o período de novembro e dezembro é o mais heterogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses.

No Posto Cabedelo Cagepa, a precipitação anual da série histórica de 18 anos (2002 a 2019) correspondeu em média a aproximadamente 1.698,8 mm e coeficiente de variação de 24,9%. Isso indica que a série de dados de precipitação média anual dos 18 anos apresenta baixa dispersão. A maior precipitação ocorreu no mês de junho, em média 366,3 mm, representando cerca de 21,6% de toda a precipitação média anual. Este mês foi o que apresentou menor coeficiente de variação aproximadamente 42,8%, indicando com isso que o mês de junho é o que apresenta comportamento mais homogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses.

Na Figura 3 apresentam-se as oscilações da precipitação anual da série histórica analisada no Posto Cabedelo Cagepa. De modo geral, ocorrem anos acima e abaixo da média sem nenhuma tendência aparente. Outro aspecto importante é a ocorrência de precipitações acima e abaixo do desvio padrão mais a média e do desvio padrão menos a média. Isso sugere condições de precipitações extremas em quantidades maiores e menores do comum observado na região. Este comportamento pode estar associado aos efeitos das mudanças globais que ocasionam alteração do regime de chuva podendo acarretar maiores e menores volumes do que o normal para uma dada região. Utilizando o critério de Almeida e Porto (2021), nota-se que 66,67% dos anos da série histórica apresentaram valores de precipitação anual entre a média \pm desvio padrão, indicando que variabilidade observada pode apresentar algum nível de intervenções antrópicas.

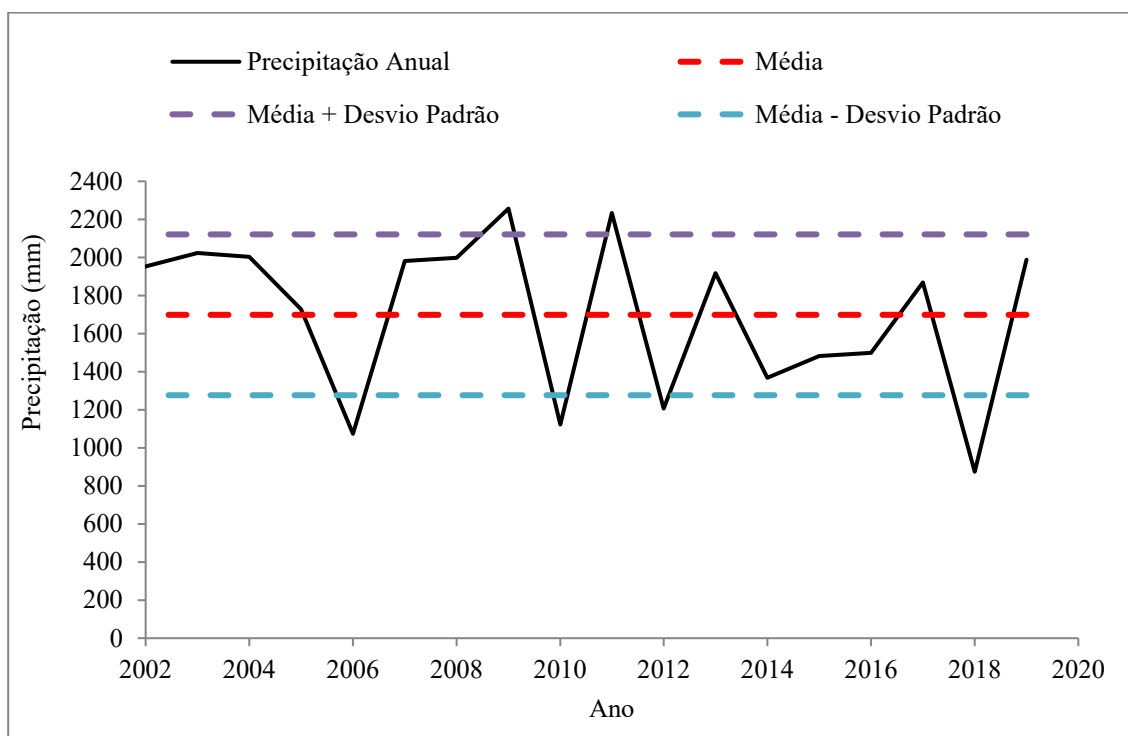


Figura 3 – Oscilação da precipitação ao longo dos anos e análise estatística do Posto Cabedelo Cagepa.
Fonte: Autores (2024).

Por outro lado, a precipitação anual da série histórica de 17 anos (2002 a 2018) obtida no Posto João Pessoa INMET, apresentou em média 1.875,1 mm e coeficiente de variação de 20,7%. Isso indica que a série de dados de precipitação média anual dos 17 anos apresenta baixa dispersão, semelhante ao Posto Cabedelo Cagepa. Observa-se que no Posto João Pessoa INMET a maior precipitação ocorre também no mês de junho, em média 400,3 mm, representando cerca de 21,3% de toda a precipitação média anual. Este mês foi o que apresentou menor coeficiente de variação, aproximadamente 41,7%, indicando com isso que o mês de junho também é o que apresenta comportamento mais homogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses no Posto João Pessoa INMET.

Já o mês de menor precipitação em média no Posto João Pessoa INMET é também o mês de novembro, aproximadamente 18,3 mm, representando cerca de 0,97% do total da precipitação anual. No que se refere ao coeficiente de variação, o mês de novembro foi o que apresentou maior percentual, aproximadamente 88,3%. Este resultado aponta que o mês de novembro é o mais heterogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses.

Na Figura 4 apresentam-se as oscilações da precipitação anual da série histórica analisada no Posto João Pessoa INMET. É possível verificar que de modo geral ocorrem também anos acima e abaixo da média sem nenhuma tendência aparente semelhante ao observado no Posto Cabedelo Cagepa. O mesmo aspecto de ocorrer precipitações acima e abaixo do desvio padrão mais a média e do desvio padrão menos a média também é observado no Posto João Pessoa INMET. Utilizando o critério de Almeida e Porto (2021), nota-se que 77,78% dos anos da série histórica apresentaram valores de precipitação anual entre a média \pm desvio padrão, indicando que variabilidade observada pode apresentar algum nível de intervenções antrópicas.

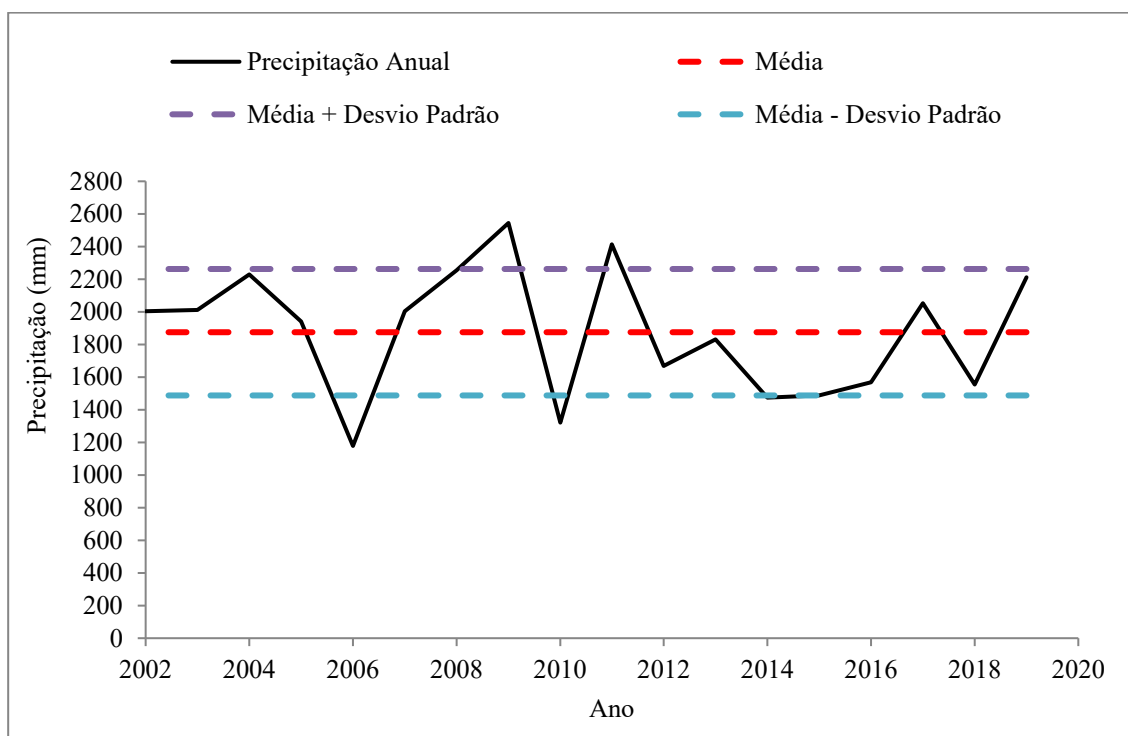


Figura 4 – Oscilação da precipitação ao longo dos anos e análise estatística do Posto João Pessoa INMET.
Fonte: Autores (2024).

No Posto Bayeux Cemaden, a precipitação anual da série histórica de 18 anos (2002 a 2019) apresentou em média 1.839,3 mm e coeficiente de variação de 19,8%. Isso indica que a série de dados de precipitação média anual dos 18 anos apresenta baixa dispersão, semelhante as demais séries dos postos analisados.

Observa-se que no Posto Bayeux Cemaden a maior precipitação média ocorre também no mês de junho, em média 383,3 mm, representando cerca de 20,84% de toda a precipitação média anual. Este mês foi o que apresentou menor coeficiente de variação, aproximadamente 47,4%. Indicando com isso, que o mês de junho também é o que apresenta comportamento mais homogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses, semelhante aos demais postos.

Já o mês de menor precipitação média no Posto Bayeux Cabedelo é também o mês de novembro, aproximadamente 16,7 mm, representando cerca de 0,91% do total da precipitação anual. No que se refere ao coeficiente de variação, o mês de dezembro seguido pelo mês de novembro foram os que apresentaram maior percentual, aproximadamente 99,7% e 99,5% respectivamente. Estes resultados apontam que o período de novembro e dezembro é o mais heterogêneo em relação à dispersão da quantidade precipitada ao longo dos meses, semelhante ao comportamento observado no Posto Cabedelo Cagepa.

Na Figura 5 apresentam-se, as oscilações da precipitação anual da série histórica analisada no Posto Bayeux Cemaden.

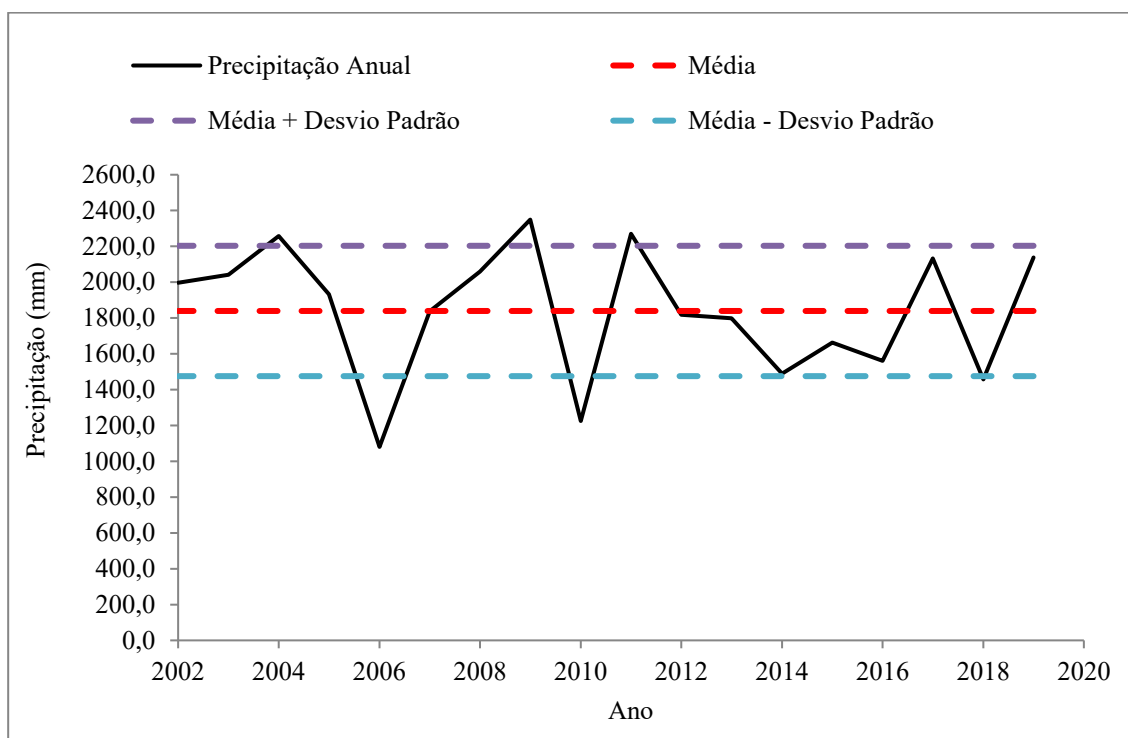


Figura 5 – Oscilação da precipitação ao longo dos anos e análise estatística do Posto Bayeux Cemaden.

Fonte: Autores (2024).

É possível verificar que de modo geral ocorrem também anos acima e abaixo da média sem nenhuma tendência aparente semelhante aos demais postos. O mesmo aspecto de ocorrer precipitações acima e abaixo do desvio padrão mais a média e do desvio padrão menos a média também é observado no Posto Bayeux Cemaden. Utilizando o critério de Almeida e Porto (2021), nota-se que 72,22%, dos anos da série histórica apresentaram valores de precipitação anual entre a média \pm desvio padrão, indicando que variabilidade observada pode apresentar algum nível de intervenções antrópicas.

Ao avaliar os três postos é possível identificar que todos possuem comportamento semelhante entre si a nível mensal, anual e de sensibilidade a mudanças climáticas.

Com base na série histórica de precipitação máxima diária anual, do posto Cabedelo Cagepa, a classe que apresenta maior frequência de ocorrência foi a classe 3, com precipitações entre 114,58 mm e 146,02 mm (Tabela 4). Observa-se, que os valores dessas classes apresentam precipitações maiores que a média das precipitações máximas anuais de 113,5 mm no período avaliado do Posto Cabedelo Cagepa.

Tabela 4 – Distribuição de frequência das precipitações máximas do Posto Cabedelo Cagepa.

Classe	Intervalos da classe	Frequência observada
1	51,70 - 83,14	3
2	83,14 - 114,58	6
3	114,58 - 146,02	7
4	146,02 - 177,46	1
5	177,46 - 208,9	1

Fonte: Autores (2024).

No Posto João Pessoa INMET a série histórica de precipitação máxima diária anual, a classe que apresenta maior frequência de ocorrência são as classes 2 e 3, com precipitações entre 83,83 mm e 116,66 mm da classe 2 e precipitações entre 116,66 mm e 149,49 mm da classe 3 (Tabela 6). Observa-se, que os valores dessas classes apresentam precipitações

menores (classe 2) e maiores (classe4) do que a média das precipitações máximas anuais de 122,3 mm no período avaliado do Posto João Pessoa INMET.

Tabela 5 – Distribuição de frequência das precipitações máximas do Posto João Pessoa INMET.

Classe	Intervalos da classe	Frequência observada
1	51,00 - 83,83	2
2	83,83 - 116,66	6
3	116,66 - 149,49	6
4	149,49- 182,32	3
5	182,32 - 215,15	1

Fonte: Autores (2024).

Já no Posto Bayeux Cemaden a série histórica de precipitação máxima diária anual, a classe que apresenta maior frequência de ocorrência é a classe 2, com precipitações entre 84,90 mm e 118,40 mm (Tabela 6). Observa-se, que os valores dessas classes apresentam precipitações menores do que a média das precipitações máximas anuais de 122,15 mm no período avaliado do Posto Bayex Cemaden.

Tabela 6 – Distribuição de frequência das precipitações máximas do Posto Bayeux Cemaden.

Classe	Intervalos da classe	Frequência observada
1	51,40 - 84,90	3
2	84,90 - 118,40	6
3	118,40 - 151,90	5
4	151,90 - 185,40	3
5	185,40 - 218,9	1

Fonte: Autores (2024).

Alguns trabalhos desenvolvidos na região Nordeste do Brasil como, por exemplo, Oliveira Júnior et al. (2019) e Silva et al. (2023), utilizando a mesma metodologia encontram maiores frequências de chuvas máximas nas classes 3 e 4, com intervalos da ordem de 79,47 mm até 95,98 mm no município de Crato, Ceará e com intervalos de 82,20 mm até 99,10 mm no município de Serra Talhada. Estes valores demonstram quantitativamente o maior aporte de chuvas no litoral em relação as áreas mais continentais da região. Este comportamento reforça a importância de entender os impactos pluviais no espaço urbano das cidades litorâneas, principalmente as capitais onde as intervenções antrópicas podem ser maiores devido o porte das cidades.

Foram calculadas as médias, desvio padrão e os parâmetros da distribuição Gumbel da série de precipitações máximas do Posto Cabedelo Cagepa, conforme apresentado na Tabela 7 e Figura 6.

Tabela 7 – Valores utilizados e calculados para aplicação da distribuição Gumbel para o Posto Cabedelo Cagepa.

Parâmetro	Valor	Fonte de Obtenção
Média	113,52	Calculado
Desvio Padrão	33,91	Calculado
Yn	0,51	Interpolado pela Tabela 2
Sn	1,04	Interpolado pela Tabela 2
Xf	96,73	Calculado pela Equação 4
a	0,03	Calculado pela Equação3

Fonte: Autores (2024).

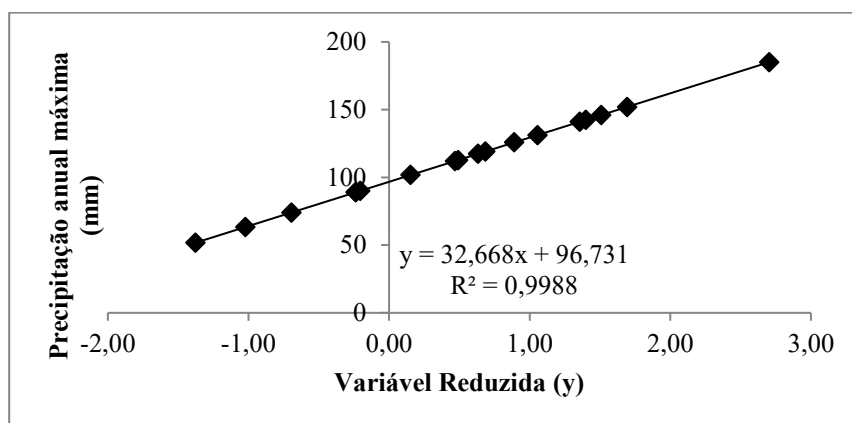


Figura 6 – Gráfico variável reduzida versus precipitação máxima anual registrada do Posto Cabedelo Cagepa.

Fonte: Autores (2024).

Os resultados da determinação das precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retornos obtidos pelas distribuições de Gumbel a partir da equação obtida graficamente na Figura 6 são apresentados na Tabela 8 para o Posto Cabedelo - Cagepa.

Tabela 8 – Precipitações máximas e seus respectivos períodos de retorno para o Posto Cabedelo Cagepa.

Período de Retorno Tr (anos)	Método Gumbel	
	Variável reduzida y	Precipitação Máxima P (mm)
2	0,367	108,72
5	1,5	145,73
10	2,25	170,23
25	3,2	201,27
50	3,9	224,14
100	4,6	247,00

Fonte: Autores (2024).

Foram calculadas as médias, desvio padrão e os parâmetros da distribuição Gumbel da série de precipitações máximas do Posto João Pessoa INMET, conforme apresentado na Tabela 9 e Figura 7.

Tabela 9 – Valores utilizados e calculados para aplicação da distribuição Gumbel para o Posto João Pessoa INMET.

Parâmetro	Valor	Fonte de Obtenção
Média	122,26	Calculado
Desvio Padrão	35,73	Calculado
Yn	0,51	Interpolado pela Tabela 2
Sn	1,04	Interpolado pela Tabela 2
Xf	104,56	Calculado pela Equação 4
a	0,03	Calculado pela Equação 3

Fonte: Autores (2024).

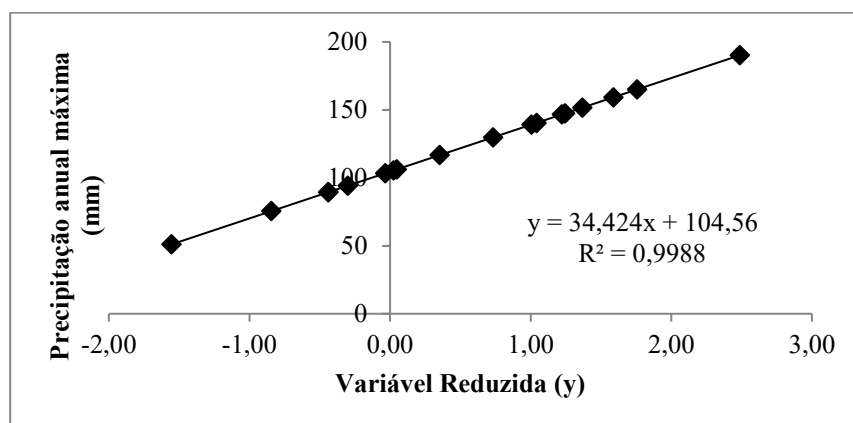


Figura 7 – Gráfico variável reduzida versus precipitação máxima anual registrada do Posto João Pessoa INMET.

Fonte: Autores (2024).

Os resultados da determinação das precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retornos obtidos pelas distribuições de Gumbel a partir da equação obtida graficamente na Figura 7 são apresentados na Tabela 10 para o Posto João Pessoa - INMET.

Tabela 10 – Precipitações máximas e seus respectivos períodos de retorno para o Posto João Pessoa INMET.

Período de Retorno Tr (anos)	Método Gumbel	
	Variável reduzida y	Precipitação Máxima P (mm)
2	0,367	117,19
5	1,5	156,20
10	2,25	182,01
25	3,2	214,72
50	3,9	238,81
100	4,6	262,91

Fonte: Autores (2024).

Foram calculadas as médias, desvio padrão e os parâmetros da distribuição Gumbel da série de precipitações máximas do Posto Bayeux Cemaden, conforme apresentado na Tabela 11 e Figura 8.

Tabela 11 – Valores utilizados e calculados para aplicação da distribuição Gumbel para o Posto Bayeux – Cemaden.

Parâmetro	Valor	Fonte de Obtenção
Média	122,15	Calculado
Desvio Padrão	38,82	Calculado
Yn	0,51	Interpolado pela Tabela 2
Sn	1,04	Interpolado pela Tabela 2
Xf	102,92	Calculado pela Equação 4
a	0,03	Calculado pela Equação 3

Fonte: Autores (2024).

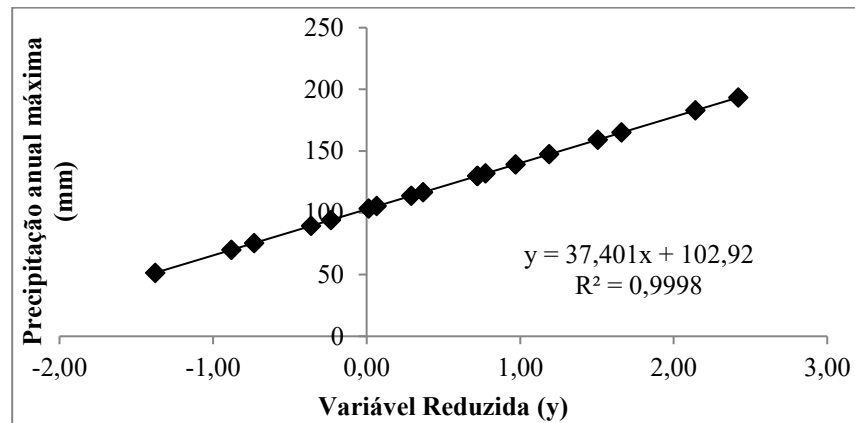


Figura 8 – Gráfico variável reduzida versus precipitação máxima anual registrada do Posto Bayeux -Cemaden
Fonte: Autores (2024).

Os resultados da determinação das precipitações máximas associadas aos diferentes períodos de retornos obtidos pelas distribuições de Gumbel a partir da equação obtida graficamente na Figura 8 são apresentados na Tabela 12 para o Posto Bayeux - Cemaden.

Tabela 12 – Precipitações máximas e seus respectivos períodos de retorno para o Posto Bayeux – Cemaden.

Período de Retorno Tr (anos)	Método Gumbel	
	Variável reduzida Y	Precipitação Máxima P (mm)
2	0,367	116,65
5	1,5	159,02
10	2,25	187,07
25	3,2	222,60
50	3,9	248,78
100	4,6	274,96

Fonte: Autores (2024).

Os resultados das vazões associadas aos tempos de recorrências obtidos com a modelagem hidrológica do Posto Cabedelo Cagepa, Posto João INMET e Posto Bayeux Cemaden são apresentados respectivamente nas Tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 13 – Vazões máximas obtidas para o Posto Cabedelo Cagepa.

Tr (anos)	Precipitação Máxima (mm)	Vazões máximas (m³/s)	Cota Altimétrica de Inundação
2	108,72	171,97	2,13
5	145,73	524,89	4,10
10	170,23	613,14	4,57
25	201,27	724,94	5,14
50	224,14	807,31	5,55
100	247	889,65	5,87

Fonte: Autores (2024).

Tabela 14 – Vazões máximas obtidas para o Posto João Pessoa INMET.

Tr (anos)	Precipitação Máxima (mm)	Vazões máximas (m³/s)	Cota Altimétrica de Inundação
2	117,19	195,78	2,27

5	156,2	311,96	2,94
10	182,01	393,01	3,39
25	214,72	498,85	3,96
50	238,81	578,44	4,39
100	262,91	659,10	4,80

Fonte: Autores (2024).

Tabela 15 – Vazões máximas obtidas para o Posto Bayeux

Tr (anos)	Precipitação Máxima (mm)	Vazões máximas (m ³ /s)	Cota Altimétrica de Inundação
2	116,65	194,24	2,26
5	159,02	320,68	2,99
10	187,07	409,18	3,48
25	222,6	524,75	4,10
50	248,78	611,69	4,56
100	274,96	699,76	5,01

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 9 são apresentadas as áreas inundadas para o tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos obtidos com a série de precipitações do Posto Cabedelo Cagepa. Na Tabela 16 são apresentadas as áreas calculadas para cada mancha de inundação e das áreas passíveis de inundação nos limites do lixão do Roger. Observa-se, que para chuvas com tempo de recorrência a partir de 25 anos podem ocasionar inundações que cheguem aos limites do Lixão do Roger. A mancha de inundação para Tr = 25 anos intercepta a porção nordeste dos limites do Lixão do Roger e para os Tr = 50 e 100 anos as manchas além de interceptar a porção nordeste, intercepta também as porções sudeste, sul e sudoeste. A porção norte foi a única não interceptada pela mancha de inundação, mesmo para Tr= 100 anos.

Tabela 16 – Áreas calculadas das manchas de inundação e áreas passíveis de inundação no Lixão do Roger do Posto Cabedelo Cagepa.

Tr (anos)	Área Inundada (km ²)	Área Inundada (%)	Área passível de inundação do Lixão do Roger (km ²)	Área passível de inundação do Lixão do Roger (%)
2	6,60	17,25	0	0
5	7,50	19,59	0	0
10	7,85	20,53	0	0
25	9,92	25,93	0,04	12,07
50	12,57	32,86	0,07	22,76
100	14,263	37,28	0,09	30,00

Fonte: Autores (2024).

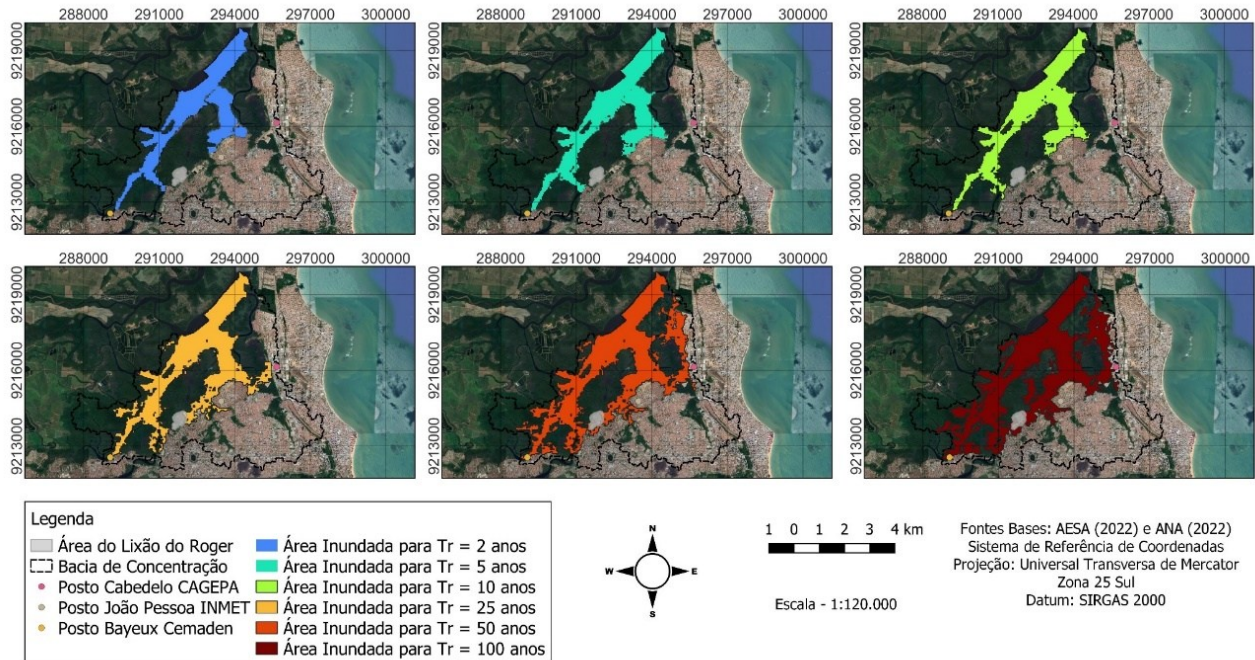


Figura 9 – Mapa de delimitação das áreas inundadas para os diferentes tempos de recorrência baseado nos dados do Posto Cabedelo Cagepa.

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 10 são apresentadas as áreas inundadas para o tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos obtidos com a série de precipitações do Posto João Pessoa INMET. Na Tabela 17 são apresentadas as áreas calculadas para cada mancha de inundação e das áreas passíveis de inundação nos limites do lixão do Roger. Observa-se, que não ocorre a interceptação das manchas de inundação nem mesmo para inundação de $Tr = 100$ anos.

Tabela 17 – Áreas calculadas das manchas de inundação e áreas passíveis de inundação no Lixão do Roger do Posto João Pessoa INMET.

Tr (anos)	Área Inundada (km ²)	Área Inundada (%)	Área possível de inundação do Lixão do Roger (km ²)	Área possível de inundação do Lixão do Roger (%)
2	6,66	17,41	0,00	0,00
5	6,89	18,02	0,00	0,00
10	7,11	18,59	0,00	0,00
25	7,43	19,42	0,00	0,00
50	7,70	20,13	0,00	0,00
100	7,98	20,87	0,00	0,00

Fonte: Autores (2024).

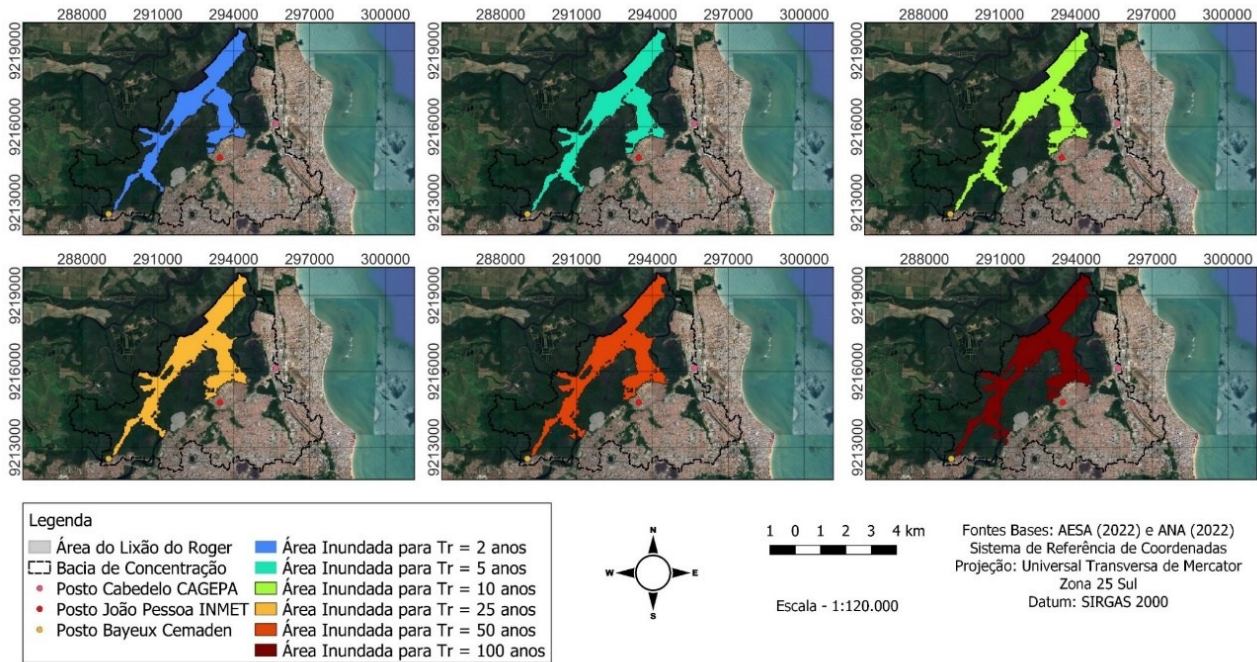


Figura 10 – Mapa de delimitação das áreas inundadas para os diferentes tempos de recorrência baseado nos dados do Posto João Pessoa INMET.

Fonte: Autores (2024).

Por fim, na Figura 11 são apresentadas as áreas inundadas para o tempo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos obtidos com a série de precipitações do Posto Bayeux Cemaden. Na Tabela 18 são apresentadas as áreas calculadas para cada mancha de inundação e das áreas passíveis de inundação nos limites do lixão do Roger. Observa-se que apenas a mancha de inundação do $Tr = 100$ anos intercepta os limites do Lixão do Roger. A mancha de inundação é observada nas porções nordeste, leste e sudeste da área do Lixão Roger.

Tabela 18 – Áreas calculadas das manchas de inundação e áreas passíveis de inundação no Lixão do Roger do Posto Bayeux Cemaden.

Tr (anos)	Área Inundada (km ²)	Área Inundada (%)	Área possível de inundação do Lixão do Roger (km ²)	Área possível de inundação do Lixão do Roger (%)
2	6,64	17,36	0,00	0,00
5	6,94	18,13	0,00	0,00
10	7,16	18,71	0,00	0,00
25	7,50	19,59	0,00	0,00
50	7,84	20,49	0,00	0,00
100	9,27	24,22	0,03	11,72

Fonte: Autores (2024).

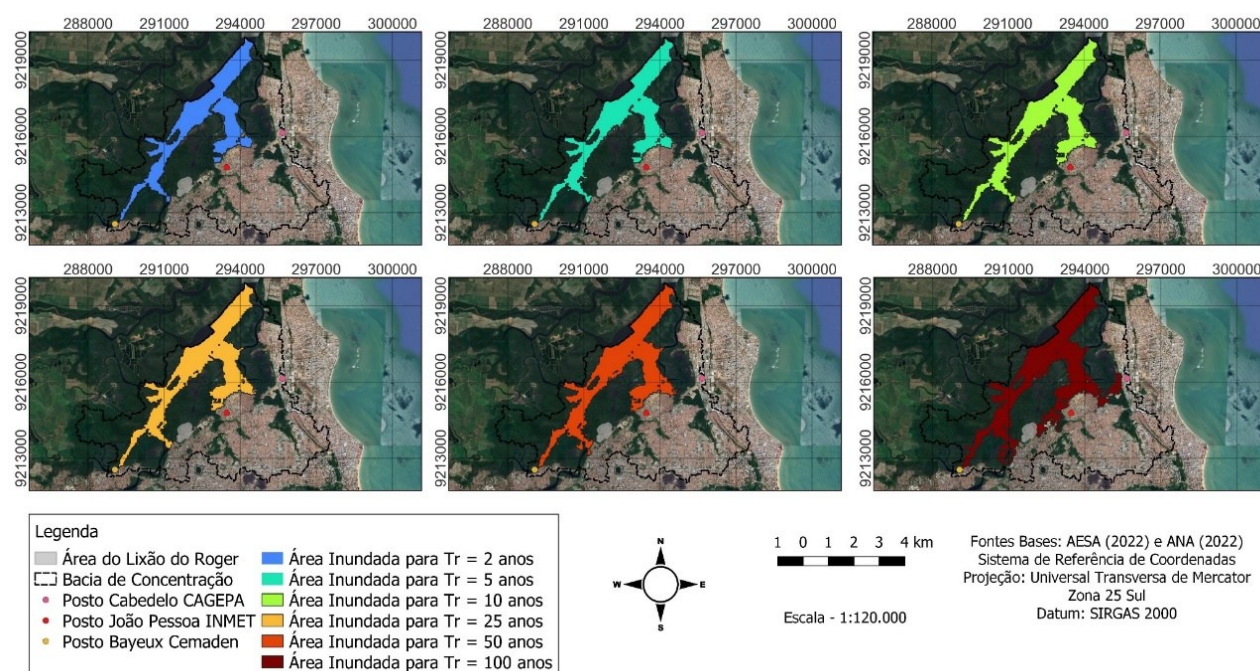


Figura 11 – Mapa de delimitação das áreas inundadas para os diferentes tempos de recorrência baseado nos dados do Posto Bayeux Cemaden.

Fonte: Autores (2024).

Conforme relatado por Monte et al. (2016), a modelagem hidrológica possibilita boa capacidade de representar eventos de cheias no espaço geográfico em análise, sendo este comportamento também observado na análise apresentada no presente estudo.

4. Considerações finais

A metodologia utilizada permitiu simular cenários de inundação ocasionado pela elevação do nível d'água dos rios próximos a região do Lixão do Roger em João Pessoa, possibilitando obter de forma satisfatória a identificação das áreas afetadas pelas inundações e as cotas altimétricas atingidas para diferentes tempos de recorrência das precipitações.

Os postos pluviométricos apresentam comportamentos semelhantes, sendo os maiores volumes precipitados ocorrendo no primeiro semestre com pico de precipitação no período de maio e junho. As precipitações totais anuais a partir das análises estatísticas apresentam ocorrências de valores que podem estar associados aos efeitos das mudanças climáticas.

As precipitações máximas associadas aos tempos de recorrência foram eficazes na modelagem hidrológica e demonstrou que a área do Lixão do Roger pode ser afetada por inundações com tempos de recorrência de 25 a 100 anos. A área do Lixão do Roger pode ser mais afetada pelas precipitações máximas ocorridas nas regiões dos postos Cabedelo Cagepa e Bayeux Cemaden, possivelmente por se encontrarem nas bordas da bacia de concentração estudada e haver influência das regiões hidrológicas vizinhas nos volumes precipitados.

A partir da modelagem hidrológica e da delimitação das áreas de inundação na área do Lixão do Roger verifica-se que a maior cota altimétrica que as manchas de inundação alcançaram foi a cota de aproximadamente 5,87 m (Tr = 100 anos do Posto Cabedelo Cagepa). Portanto, não é recomendável que sejam realizadas construções e execução de infraestruturas elétricas, hidráulicas, telecomunicação, etc. abaixo da cota altimétrica de 6 m devido ao elevado risco dessas áreas serem atingidas por inundações de chuvas máximas seculares.

Cabe salientar que nas regiões interceptadas pelas manchas de inundação é sugerido realizar contenções que possam reduzir ou eliminar o efeito físico de onda de cheia de inundação da bacia de contribuição e assim proteger as áreas das

bordas da área do Lixão do Roger sobretudo na porção nordeste, leste e sudeste que são os limites mais afetados do terreno pelas manchas de inundação no estudo realizado.

Agradecimentos

Os autores agradecem a prefeitura de João Pessoa e ao Programa João Pessoa Sustentável Consórcio Terra & Promon, tendo por objetivo desenvolvimento dos estudos e projetos de recuperação ambiental do Lixão do Roger e a elaboração de projetos para a criação do Parque Socioambiental.

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.
- Almeida, H. A.; Porto, J. C.G. Temporal oscillations in the rain regime in Curimatáu paraibano: variability, extreme or climate change? *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v.11, n.5, p. 262-270, 2021.
- ANA. *Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 27 de outubro de 2023.
- 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.
- 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.
- Ebrahimian, M.; Nuruddin, A.A.; Soom, M.A.B.M.; Sood, A.M. Application of NRCS-curve number method for runoff estimation in a mountainous watershed. *Journal of Environmental Sciences*, v.10, p. 103-114, 2012.
- Lisboa, F. M.; Donagemma, G. K.; Burak, D. L.; Passos, R. R.; Mendonça, E. S. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. *Pesquisa agropecuária brasileiro*. V.51, n.9, p.1184-1193, 2016.
- 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.
- Monte, B. E.O.; Costa, D. D.; Chaves, M. B.; Magalhães, L. de O.; Uvo, C. B. Modelagem Hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 152-167, 2016.
- Naghattini, M.; Pinto, É. J. D. A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM. 2007.
- Oliveira Júnior, A. I.; Martins, E. S.; Costa, C. T. F.; Caldas, H. F. M. Análise da precipitação e determinação de equações de chuvas intensas para o município de Crato-CE situado no semiárido do Brasil. *Revista Geama*, v. 5, n. 3, p. 56-65, 2019.
- Silva, G. R.; Oliveira, D. V. C.; Oliveira Junior, A. I.; Carvalho, I. J. 2023. Análise das precipitações pluviométricas do município de Serra Talhada-PE e determinação da equação de chuvas intensas por meio de distribuição probabilística. *Revista de Geografia*, v. 40, n.1, p.306-333, 2023.
- Villela, S. M.; Mattos, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill. 1975.