



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Geoestatística aplicada à análise da distribuição de chuvas intensas no estado do Ceará

Gabriela Rodrigues da Costa¹, Tatiane Lima Batista², Aline Moreira Damasceno³, Alan Michell Barros Alexandre⁴.

¹Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús. São Paulo, São Paulo, Brasil. E-mail: gabrielarcostaeng@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0003-3640-3856>. ² Doutoranda em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – POSDEHA pela Universidade Federal do Ceará e Professora Assistente da Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús. BR 216, Km 4, Venâncios, 63700-000, Crateús, Ceará, Brasil. E-mail: tatiane@crateus.ufc.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6598-0319>

³Mestra em Geologia pela Universidade Federal do Ceará, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências. Rua Campus do Pici, Pici, 60440-554, Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: alimoreiradamas@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4417-6123>. ⁴Doutor em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) pela Universidade Federal do Ceará e Professor Adjunto da Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús. BR 216, Km 4, Venâncios, 63700-000, Crateús, Ceará, Brasil. E-mail: alanmichell@crateus.ufc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8193-577X>.

Artigo recebido em 17/04/2024 e aceito em 06/11/2024

RESUMO

O objetivo desse trabalho consistiu em mapear a distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará, considerando as durações de 5, 30 e 240 minutos associadas as recorrências de 10, 50 e 100 anos, utilizando técnicas geoestatísticas. Através desse mapeamento buscou-se identificar áreas mais suscetíveis à ocorrência de chuvas de grandes magnitudes, bem como avaliar a viabilidade da utilização das técnicas geoestatísticas nesse campo de análise. Para tanto, foram calculadas as intensidades por meio das equações Intensidade-Duração-Frequência (IDF) desenvolvidas por Batista (2018) utilizando o método das isozonas e posteriormente, foi conduzido um estudo geoestatístico utilizando o *software* R, com o pacote *gstat* e o *software* QGIS. Foi realizada uma análise exploratória seguida de uma análise variográfica, modelando o semivariograma experimental e ajustando os modelos esféricos, exponencial e gaussiano. O modelo que apresentou o melhor ajuste, pela validação cruzada, foi aplicado ao processo de mapeamento por krigagem ordinária ou krigagem universal. Foi constatado um bom desempenho das técnicas geoestatísticas no mapeamento das chuvas intensas no estado do Ceará, com destaque para o modelo de semivariograma teórico exponencial que se sobressaiu na maioria dos eventos analisados. Verificou-se que as regiões do Cariri, Centro Sul, sul do Vale Jaguaribe e do Sertão Central apresentaram as maiores intensidades nas chuvas intensas de curta duração (5 minutos), enquanto as regiões do litoral, em especial a Grande Fortaleza, Litoral Leste e Litoral Norte se destacam para as chuvas de durações mais longas (240 minutos). Já as regiões do Sertão de Canindé, sul do Maciço de Baturité, norte do Sertão do Central e em especial o Vale do Curu/Litoral Oeste, apresentaram as menores intensidades nas análises realizadas.

Palavras-chave: krigagem, mapeamento, semivariograma, linguagem R.

Geostatistics applied to the analysis of the distribution of intense rainfall in the state of Ceará.

ABSTRACT

The objective of this work was to map the spatial distribution of heavy rainfall in the state of Ceará, considering durations of 5, 30 and 240 minutes associated with recurrences of 10, 50 and 100 years, using geostatistical techniques. Through this mapping, we sought to identify areas more susceptible to the occurrence of heavy rainfall, as well as to evaluate the feasibility of using geostatistical techniques in this field of analysis. To this end, the intensities were calculated using the Intensity-Duration-Frequency (IDF) equations developed by Batista (2018) using the isozone method and subsequently, a geostatistical study was conducted using the R software, with the *gstat* package and the QGIS software. An exploratory analysis followed by a variographic analysis was performed, modeling the experimental semivariogram and adjusting the spherical, exponential and Gaussian models. The model that presented the best fit, by

cross-validation, was applied to the mapping process by ordinary kriging or universal kriging. A good performance of the geostatistical techniques was observed in the mapping of heavy rainfall in the state of Ceará, with emphasis on the theoretical exponential semivariogram model that stood out in most of the events analyzed. It was found that the regions of Cariri, Centro Sul, south of Vale Jaguaribe and Sertão Central presented the highest intensities in short-duration heavy rainfall (5 minutes), while the coastal regions, especially Greater Fortaleza, Litoral Leste and Litoral Norte, stand out for rainfall of longer duration (240 minutes). On the other hand, the regions of Sertão de Canindé, south of Maciço de Baturité, north of Sertão do Central and especially Vale do Curu/Litoral Oeste, presented the lowest intensities in the analyses performed.

Keywords: kriging, mapping, semivariogram, R language.

Introdução

As precipitações intensas podem gerar impactos como inundações, deslizamento de encostas, danos materiais e perda de vidas humanas (Palácio et al. 2021, Luna et al, 2023). Portanto, a compreensão e caracterização de eventos de precipitações intensas são de grande importância no gerenciamento de recursos hídricos (Batista et al., 2018), planejamento e gestão de riscos em áreas urbanas (Wanderley et al., 2021), projetos de estruturas de controle de erosão (Back, 2020), dentre outros.

Na hidrologia, as chuvas intensas podem ser entendidas como precipitações de elevada magnitude que geralmente ocorrem em um curto período de tempo (Basso et al., 2019). Desse modo, na caracterização desses eventos são utilizadas as equações de Intensidade – Duração – Frequência (IDF) que estabelecem a intensidade das chuvas para um período de recorrência, duração e local específico (Back et al., 2020; Lima Neto et al., 2021).

No entanto, para a determinação das equações IDF é necessária uma grande base de dados pluviográficos que, geralmente, não estão disponíveis em razão da inexistência de um monitoramento contínuo, ou de informações insuficientes (Fechine Sobrinho et al., 2014, Moreira et al., 2024.). Alternativamente, métodos que desagregam dados pluviométricos diários em chuvas de menores durações são utilizados para minimizar a escassez de informações (Batista, 2018; Moreira et al., 2024). Além disso, outra alternativa consiste na utilização de técnicas com base em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a interpolação espacial de dados de precipitação (Mello e Viola, 2013).

Nesse contexto, é comum a espacialização tanto dos parâmetros que compõem as equações IDF (Braga et al., 2018; Mello et al., 2003) como a criação de mapas interpolados com as grandezas de precipitações (Xavier et al., 2020; Aparecido et al., 2022), sejam as precipitações prováveis (Ávila et

al., 2009), ou estimativas de chuvas intensas para uma determinada região ou estado (Mello e Viola, 2013; Silva Neto et al., 2020).

Dentre os métodos mais utilizados para tais estudos estão a interpolação pelo inverso do quadrado da distância (Mello et al., 2003; Aparecido et al. 2022), curvatura mínima (Carvalho e Assad, 2005) e o interpolador geostatístico da krigagem que se destaca dos demais por levar em consideração a variabilidade espacial entre os dados interpolados (Landim, 2006).

O semiárido brasileiro é caracterizado pela vulnerabilidade à escassez hídrica e pela ocorrência de longos períodos de secas (Gonçalves et al. 2023). O estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil possui aproximadamente 93% do seu território localizado na região de clima semiárido (IPECE, 2022) com regime de precipitação bastante irregular e chuvas mal distribuídas (Rocha et al., 2021; Mendes et al. 2021). Devido à alta variabilidade, a região é acometida por eventos tanto de secas e estiagens como também com a ocorrência de eventos extremos de precipitação, ocasionando enxurradas, inundações e alagamentos (Lima e Lira, 2021, Palácio et al., 2021, Luna et al, 2023).

Além da variabilidade pluviométrica ao longo do ano, o Nordeste também sofre com as variações entre os anos, e que estão fortemente associadas aos fenômenos El Niño (Lima e Lira, 2021). Tanto o El Niño como a La Niña, quando associados com a ZCIT tem seus efeitos particularmente notáveis no setor Norte do Nordeste brasileiro, cujas anomalias negativas de precipitação estão associadas a episódios de El Niño e anomalias positivas de precipitação estão associadas a episódios de La Niña (Cavalcanti et al., 2009).

Nesse contexto, destaca-se a importância do desenvolvimento de pesquisas que subsidiem o entendimento da distribuição espaço-temporal das

chuvas, visando o planejamento estratégico do uso do solo e auxiliando em obras hidráulicas, como reservatórios, essenciais na gestão hídrica do semiárido. Além disso, tais estudos são fundamentais para o planejamento e execução de obras de microdrenagens, indispensáveis para o adequado manejo das águas pluviais, de forma a prevenir e minimizar impactos associados a eventos extremos.

Em trabalhos realizados para os estados do Tocantins (Silva Neto et al., 2020) e Minas Gerais (Mello e Viola, 2013) os autores construíram mapas de chuvas intensas por meio da interpolação por krigagem, que permitiram conhecer de forma ampla a distribuição espacial e o comportamento das chuvas intensas nessas regiões, reconhecendo áreas críticas para a ocorrência das chuvas e subsidiando estudos relacionados à erosão.

No Ceará, alguns estudos envolvendo o uso de equações de chuvas intensas com dados pluviométricos diários foram desenvolvidos, com destaque para o de Fachine Sobrinho et al. (2014),

que desenvolveu equações para a região do Cariri e Batista (2018) que desenvolveu equações IDF utilizando o método das isozonas para os 184 municípios do estado a partir de dados de pluviômetros.

Este estudo buscou, portanto, aplicar técnicas geoestatísticas para análise da distribuição espacial das chuvas intensas no estado do Ceará, que possui clima semiárido, buscando explorar a ocorrência de áreas críticas em relação às chuvas intensas no estado e analisando a viabilidade da utilização das técnicas geoestatísticas nesse tipo de análise.

Assim, este estudo contribui para a apresentação de uma perspectiva ampla sobre as chuvas intensas no estado do Ceará à medida que utiliza um interpolador que leva em consideração a dependência espacial, permitindo obter dados sobre como o fenômeno das chuvas intensas estão relacionadas no estado e contribui com a avaliação da aplicabilidade dessas técnicas para esse tipo de estudo.

Material e métodos

Área de estudo - O Ceará está localizado no Nordeste brasileiro entre as latitudes 2° 47'00" e 7°51'30" ao sul e longitudes 37°15'11" e 41°26'10" ao oeste (IPECE, 2022). Ocupa uma área de 148 894,4 km² (IBGE, 2021) equivalente a

9,58% da região Nordeste e 1,75% da área do Brasil (IPECE, 2022). Atualmente, o estado é composto por 184 municípios e 14 regiões de planejamento apresentadas na Figura 1.

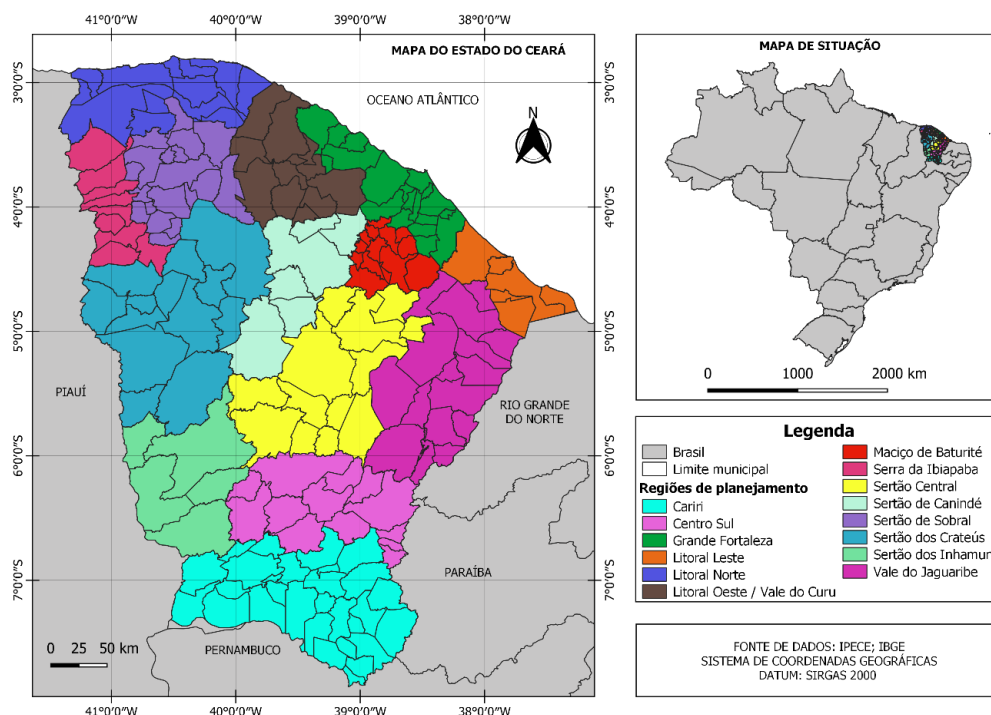


Figura 1. Localização do estado do Ceará e a subdivisão de suas regiões de planejamento

O estado do Ceará possui aproximadamente 93% de seu território inserido na região do semiárido nordestino, essa região é caracterizada pela escassez pluviométrica em um determinado período do ano, com temperaturas sempre elevadas e alta taxas de evaporação/evapotranspiração (Brandão e Freitas, 2014; Gonçalves et al. 2023).

Além da vulnerabilidade decorrente da escassez pluviométrica, o estado do Ceará é suscetível ao problema ambiental da desertificação (Silva et al., 2021).

Em relação as chuvas, observa-se um período chuvoso entre os meses de fevereiro a maio, com chuvas da pré-estação entre os meses de dezembro e janeiro e com pouca ou nenhuma

precipitação nos outros meses do ano (INMET, 2022).

Em relação as chuvas, observa-se um período chuvoso entre os meses de fevereiro a maio, com chuvas da pré-estação entre os meses de dezembro e janeiro e com pouca ou nenhuma precipitação nos outros meses do ano (Batista, 2018).

Essa sazonalidade do regime hídrico está associada ao fato dos sistemas que produzem chuvas no Ceará atuarem por poucos meses promovendo estiagens prologadas que podem variar de sete a dez meses (Brandão e Freitas, 2014).

A Tabela 1 apresenta as médias das precipitações máximas para cada região do estado do Ceará.

Tabela 1. Média das precipitações diárias máximas para as regiões do Ceará entre os anos de 1973 a 2016, considerando os postos com maior intervalo de observação de cada município

Região	Qtd. de municípios	$\bar{x}$ (mm)	σ (mm)	C_v (%)
Grande Fortaleza	19	88	10,9	12
Litoral Leste	6	86	12,6	15
Litoral Norte	13	85	9,0	11
Centro Sul	13	83	8,2	10
Cariri	29	83	10,0	12
Serra da Ibiapaba	9	80	10,7	13
Sertão de Sobral	18	77	7,6	10
Vale do Jaguaribe	15	76	7,1	9
Sertão Central	13	75	6,6	9
Sertão dos Inhamuns	5	74	6,3	9
Sertão dos Crateús	13	73	4,7	6
Maciço de Baturité	13	73	7,5	10
Litoral Oeste/Vale do Curu	12	67	6,4	10
Sertão de Canindé	6	65	6,0	9

Notas: $\bar{x}$ é a média, σ é o desvio padrão e C_v é o coeficiente de variação

Destaca-se na Tabela 1 que as menores médias das precipitações diárias máximas ocorrem para as regiões dos Sertões de Canindé (65 mm) e para o Litoral Oeste/Vale do Curu (67 mm). Já as máximas ocorrem para as regiões litorâneas da Grande Fortaleza (88 mm), Litoral Leste (86 mm), Litoral Norte (85 mm) e para as regiões do Cariri (83 mm) e Centro Sul (83 mm).

Delineamento de pesquisa - Todas as análises estatísticas e geoestatísticas feitas nesse

estudo foram realizadas utilizando linguagem R versão 4.1.2 por meio do ambiente de desenvolvimento *RStudio*. Como complemento, foi utilizado para a plotagem de mapas o *software* QGIS 3.22.1.

A Figura 2 apresenta o delineamento da pesquisa. As etapas seguintes estão detalhadas na sequência.

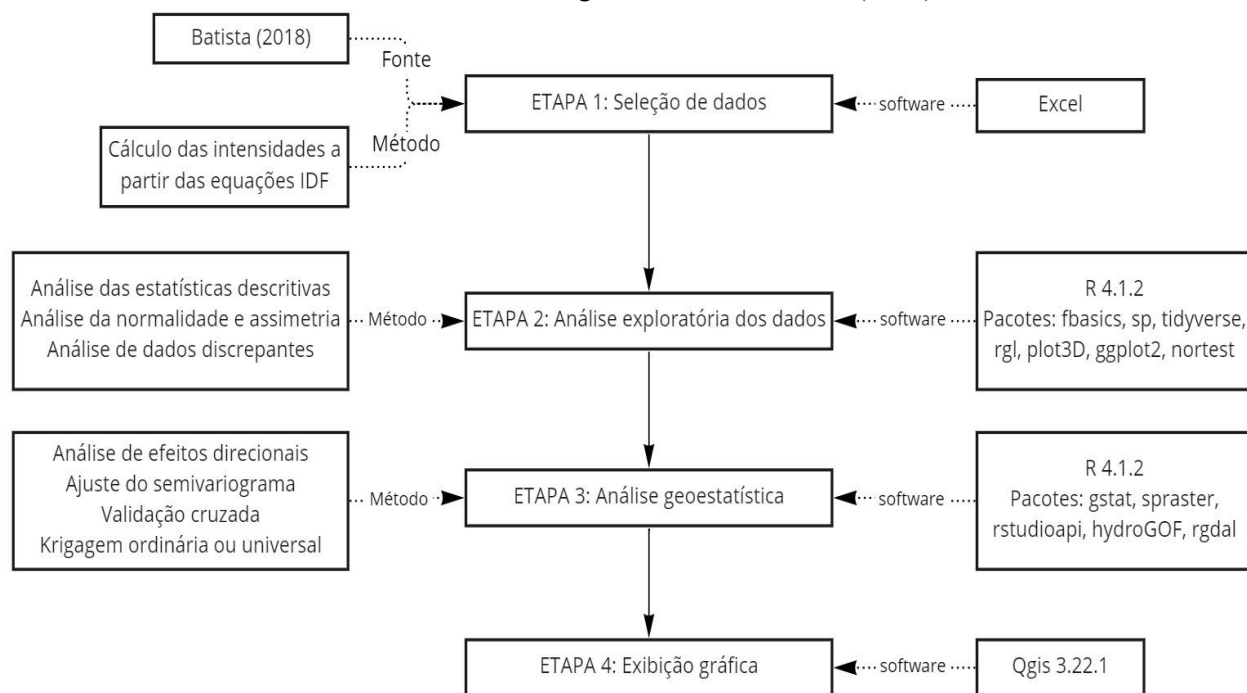


Figura 2. Delineamento da análise geoestatística

Seleção de dados - Neste estudo, foram utilizadas as equações IDF para os municípios do estado do Ceará desenvolvidas no estudo de Batista

(2018) para calcular as intensidades das chuvas. Na Figura 3 é apresentada a localização dos postos pluviométricos.

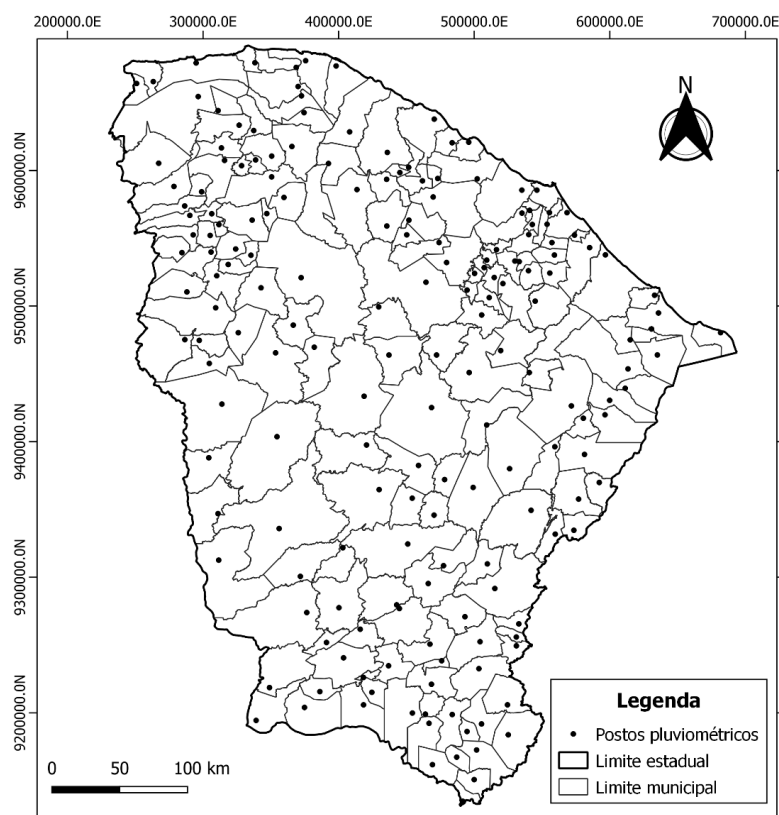


Figura 3. Distribuição espacial dos postos pluviométricos com maiores períodos de observação selecionados para o estudo no Estado do Ceará

Os 184 postos pluviométricos selecionados por Batista (2018) apresentavam, no mínimo, 25 anos de observação. O maior intervalo de observação foi obtido para o município de Caucaia com dados de 1973 a 2016, e o menor intervalo para Varjota com dados de 1988 a 2012. Para a obtenção desses dados, foram considerados respectivamente os postos 38 e 150 da Fundação Cearense de Meteorologia e Chuvas Artificiais (FUNCEME). No trabalho citado, foi utilizada uma amostragem do tipo aleatória estratificada, em que a região de estudo foi subdividida em células, no caso, os municípios, e dentro da célula um ponto foi escolhido, ou seja, o posto pluviométrico com maior quantidade de anos de observação.

Dentre os postos selecionados, 46% apresentavam acima de 40 anos de observação e apenas 18% apresentavam menos de 30 anos. Informações adicionais sobre o método e os dados utilizados na elaboração das equações estão detalhados no estudo de Batista (2018).

A partir das equações IDF para os municípios do estado do Ceará foram calculadas as intensidades para as durações de 5, 30 e 240 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos. Foram escolhidos esses valores de tempo de retorno e duração para as análises por estarem dentro dos limites de validação das equações IDF e por serem usuais para obras de microdrenagem e macrodrenagem (Collischonn e Dornelles, 2013).

Análise exploratória dos dados - Após a obtenção das intensidades, foi realizada uma análise exploratória dos dados, calculando as estatísticas descritivas, verificando a existência de valores discrepantes e a normalidade dos dados, que poderiam interferir na construção do semivariograma.

Para essa análise foram utilizados os pacotes *fbasics*, *sp*, *tidyverse*, *rgl*, *plot3D*, *ggplot2*, *ggthemes* e *nortest*.

Diagrama box plot - De acordo com Naghettini e Pinto (2007) os diagramas box plot permitem uma visão geral do valor central, da dispersão, assimetria, caudas e eventuais pontos discrepantes de uma amostra.

Esse diagrama consiste em uma forma retangular definida pelo primeiro e pelo terceiro quartil, com o valor central representado pela mediana. A partir do lado superior do retângulo é traçada uma linha até um ponto que não exceda $Q_3 + 1,5 * AIQ$, sendo AIQ a amplitude interquartil ($Q_3 - Q_1$), Q_3 o terceiro quartil e Q_1 o

primeiro quartil. De modo análogo, é traçada uma linha a partir do lado inferior do retângulo até o limite de $Q_3 - 1,5 * AIQ$. Os valores que excederem esse limite são considerados possíveis *outliers* (dados discrepantes).

Para a construção do diagrama *box plot* foi utilizado o pacote *ggplot2* com as funções *geom_boxplot* e uma série de funções complemento para aprimorar a exibição gráfica, assim como o pacote *ggthemes*.

Tais diagramas permitiram a identificação de possíveis *outliers* que comprometeriam a análise variográfica.

Histograma e o teste de normalidade de Lilliefors - O histograma permite verificar o comportamento da amostra de dados, ter uma noção da assimetria, e a variação de valores quanto ao valor central, permitindo ter uma noção da normalidade dos dados. Naghettini e Pinto (2007) comentam que o histograma, no entanto, é sensível ao número de classes (nc), e recomendam que esse número pode ser adotado como assim $nc = \sqrt{n}$, sendo N o número de dados. Para este estudo, nc calculado foi de 14.

Na análise no R, foram utilizados os pacotes *ggplot2* com a função *geom_histogram*.

A verificação da assimetria foi realizada com a função *skewness* do pacote *moments* e para verificar a normalidade do conjunto de dados, foi realizado o teste de Lilliefors. Nesse teste, os dados originais passam por uma padronização conforme a Equação 1.

$$z_i = \frac{X_i - \bar{x}}{\sigma} \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

Em que, z_i é o dado padronizado, X_i é o dado original, $\bar{x}$ é a média, σ é o desvio padrão da amostra.

Foram testadas duas hipóteses:

H_0 : Os dados seguem a distribuição normal;

H_1 : Os dados não seguem a distribuição normal.

Com a estatística de teste dada pela Equação 2.

$$D_n = \max |F_0(x_i) - F_N(x_i)| \quad (2)$$

Em que, $F_0(x_i)$ é a distribuição de probabilidade acumulada observada padronizada e $F_N(x_i)$ é a distribuição acumulada teórica (distribuição de z).

Logo, a decisão de não rejeitar a hipótese nula a um determinado nível de significância ocorre quando a estatística de teste é igual ou

inferior ao valor do ponto crítico. Neste trabalho, o teste foi realizado com a função *lillie.test* do pacote *nortest* com um nível de significância de 5%.

Análise geoestatística- Após a análise exploratória seguiu-se para a análise geoestatística, iniciando com a avaliação da presença de tendência e anisotropia no conjunto de dados, a construção do semivariograma experimental, ajuste do semivariograma teórico, validação cruzada e, por fim, a krigagem e exibição gráfica.

A análise variográfica foi realizada com os pacotes *gstat*, *sp*, *raster* *rstudiosapi*, *hydroGOF* e *rgdal*.

Efeitos direcionais - O primeiro passo na análise geoestatística consistiu na detecção de tendência no conjunto de dados. Para isso, foram analisados o mapa variográfico e o semivariograma experimental, conforme Oliver e Webster (2014).

No caso em que foi identificada a presença de tendência nos dados, o atributo intensidade de chuva foi modelado usando um polinômio de primeira ordem em função de suas coordenadas (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, e x e y as suas coordenadas, $z \sim x + y$), gerando assim um semivariograma de resíduos (Pebesma, 2004) que posteriormente seria utilizado na realização da krigagem universal.

O segundo efeito direcional considerado foi a anisotropia, para tal, foram construídos mapas variográficos com a função *variogram* e o argumento *map* do pacote *gstat*. O mapa foi construído para uma detecção prévia da ocorrência de uma direção preferencial dos dados. Caso o fenômeno fosse considerado isotrópico o próximo passo seria a construção do semivariograma experimental omnidirecional.

Já se o fenômeno fosse considerado anisotrópico, foram modelados os semivariogramas direcionais para as direções de (0°, 45°, 90° e 135°). Foram analisadas as direções de máxima continuidade e seu ângulo perpendicular. Para a construção dos semivariogramas direcionais foram consideradas as mesmas condições de *cutoff* e *width* do semivariograma experimental e considerando uma tolerância angular de 22,5°.

Em seguida, foi ajustado o modelo teórico para as direções de anisotropia consideradas, buscando a detecção do tipo de anisotropia presente: geométrica, zonal ou mista. De acordo com o manual do pacote *gstat* (Pebesma, 2014), é fornecido apoio para as modelagens de anisotropia geométrica e zonal, dessa forma, ao realizar a

análise de anisotropia, se ela fosse considerada mista não seria realizado o processo de modelagem.

Modelagem do semivariograma experimental - Após a análise exploratória dos dados e as correções necessárias foi calculado o semivariograma experimental, cuja função semivariograma é definida na Equação 3 (Webster e Oliver, 2007):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Em que: $\gamma(h)$ é a semivariância estimada de todos os pares de pontos, separados por uma distância h , $m(h)$ é o número de pares de pontos separados por uma distância h , $Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i e $Z(x_i + h)$ é o valor no ponto $x_i + h$. Para tal, foi utilizado o pacote *gstat* com a função *variogram*.

Dada a amostragem irregular, foram testadas diferentes distâncias para o *width*, que é a largura dos intervalos de distância subsequentes nos quais os pares de pontos de dados são agrupados para estimativas da semivariância. O limite máximo, ou *cutoff*, foi considerado em aproximadamente metade da máxima distância entre pares de pontos. Para essas determinações, foi levada em consideração a mínima distância entre pontos amostrais, a máxima distância entre pontos amostrais e o número de pares de pontos utilizados na modelagem dos semivariogramas.

Ajuste do semivariograma teórico - Após a modelagem do semivariograma experimental, foram ajustados os modelos esférico, exponencial e gaussiano. As Equações 4, 5 e 6 representam, respectivamente, os modelos matemáticos esférico, exponencial e gaussiano (Yamamoto e Landim, 2013):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 \leq h < a \\ C_0 + C, & h \geq a \end{cases} \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right) \quad (5)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (6)$$

Em que, $C_0 + C$ é o patamar (*sill*), a é o alcance (*range*), C_0 é o efeito pepita (*nugget effect*),

C é a contribuição e h é a distância entre os pares de pontos.

No RStudio, foi utilizada a função *fit.variogram* do pacote *gstat* que permite um ajuste automático. Segundo Pebesma (2004) essa função usa o método de ajuste dos Ordinary Least-Squares (OLS, Mínimos Quadrados Ordinários).

Foram fornecidos os parâmetros iniciais de efeito pepita, contribuição e alcance. Esses valores iniciais foram estimados a partir de um ajuste inicial da função *fit.variogram* para os modelos.

Validação cruzada - A validação cruzada é uma técnica que possibilita escolher possíveis modelos de semivariogramas (Oliver e Webster, 2014). Landim (2006) explica que nessa análise após a obtenção do modelo semivariográfico, cada um dos valores originais é removidos do domínio espacial, e utilizando os demais vizinhos, um novo valor é simulado para este ponto.

A validação cruzada para os modelos de semivariograma teórico foi realizada utilizando a função *krige.cv* do pacote *gstat*. Os parâmetros para essa função são: o atributo modelado e o modelo do semivariograma teórico.

Como critério de escolha do melhor modelo, foi avaliado o Erro Quadrático Médio (RMSE), o viés estatístico (BIAS), e o Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA).

O Erro Quadrático Médio (RMSE) fornece o desvio padrão do erro de previsão do modelo (Zambrano-Bigiarini, 2020). Como resultado, é apresentado um valor nas mesmas unidades dos valores simulados e observados, conforme Equação 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (7)$$

Em que: $RMSE$ é o Erro Quadrático Médio, S_i é o valor simulado para intensidade de chuva pelo modelo considerado, O_i é o valor observado de intensidade de chuva e n é o número de postos pluviométricos analisados. Assim, um valor menor de RMSE indica um melhor desempenho do modelo.

Tal parâmetro foi utilizado por Xavier et al. (2020) em estudos sobre precipitação para o estado da Paraíba.

No R, foi utilizado o pacote *hydroGOF* e a função *rmse*.

Viés estatístico (BIAS) - O viés estatístico percentual (BIAS) avalia a tendência média dos valores simulados serem maiores ou menores do que os valores observados e pode ser obtido conforme Equação 8 (Zambrano-Bigiarini, 2020).

$$BIAS = \frac{100 * \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

Em que: $BIAS$ é o viés estatístico percentual, O_i é o valor observado das intensidades de chuva, S_i é o valor estimado obtido por krigagem de acordo com o modelo de semivariograma ajustado e n é o número de postos pluviométricos analisados.

O valor ideal de Bias é 0, com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo. Os valores positivos de indicam um viés de superestimação, enquanto valores negativos indicam viés de subestimação do modelo.

Tal parâmetro foi utilizado por Silva Neto et al. (2020) para estudos sobre chuvas intensas no Tocantins.

No R, foi utilizado o pacote *hydroGOF* e a função *pbias*.

O Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA) possibilita a identificação da dimensão médio do erro, expresso como uma porcentagem do valor observado e pode ser calculado como a média de todos os erros absolutos percentuais, conforme Equação 9.

$$EMPA = \frac{100 * 1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - S_i}{O_i} \right| \quad (9)$$

Em que: $EMPA$ é o erro médio percentual absoluto em %, y_i é o valor observado das intensidades de chuva, $\hat{y}_i$ é o valor estimado obtido por krigagem de acordo com o modelo de semivariograma ajustado, e n é o número de observações. Cálculo similar foi utilizado no estudo de Silva Neto et al. (2020).

Grau de Dependência Espacial (GD) - Foi avaliado também o grau de dependência espacial (GD), calculado de acordo com a Equação 10 de Mello e Viola (2013), adaptação de Cambardella et al. (1994).

$$GD = \left(\frac{C}{C + C_0} \right) * 100 \quad (10)$$

Em que: C é a contribuição ou variância estruturada (variância explicada pela componente espacial), C_0 o efeito pepita (representa a variação aleatória do fenômeno estudado), e $C_0 + C$ o patamar (variação total do fenômeno avaliado). Nessa análise, $\leq 25\%$ indica fraca dependência espacial, entre 25 e 75% moderada dependência espacial e $> 75\%$ forte dependência espacial.

Esse índice expressa a variância estruturada como uma porcentagem da semivariância total, permitindo uma comparação do tamanho relativo da variância estruturada nos dados analisados.

Tal índice foi utilizado em estudos como o de Silva Neto et al. (2020), Xavier et al. (2020), Ávila et al. (2009) dentre outros.

Interpolação por krigagem ordinária ou krigagem universal - Após a escolha do melhor modelo pela validação cruzada, foi realizado processo de interpolação de dados por krigagem por meio da função *krige* do pacote *gstat*.

Uma representação formal da estimativa da krigagem ordinária pode ser dada pela Equação 11 (Oliver e Webster, 2014):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (11)$$

Em que, $Z(x_0)$ corresponde ao valor estimado na localização x_0 , onde existem N dados amostrados $Z(x_i)$, $i = 1, \dots, N$ na vizinhança de x_0

e λ_i corresponde aos pesos adicionados na estimativa de forma a minimizar a previsão de erro.

Quando os dados não apresentavam tendência foi utilizada a krigagem ordinária (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, $z \sim 1$), já quando havia a presença de tendência foi realizada a interpolação por krigagem universal (no R com o pacote *gstat*, seja z as intensidades em mm/h em estudo, e x e y as suas coordenadas, $z \sim x+y$) (Oliveira et al., 2022).

O processo de interpolação por krigagem resultou em mapas que foram convertidos para o formato *raster* e manipulados no QGIS 3.22.1.

Resultados e discussão

Resultados da análise exploratória dos dados - A análise exploratória dos dados teve por objetivo compreender o comportamento das variáveis analisadas, em especial em relação a presença de assimetria e dados discrepantes.

Em uma análise inicial das estatísticas descritivas dos dados, foi possível notar em alguns casos que existia assimetria positiva acima de 0,60 (para o caso de TR de 100 anos e duração de 240 minutos). Além disso, pelo diagrama *box plot* da Figura 4 é possível identificar alguns dados atípicos.

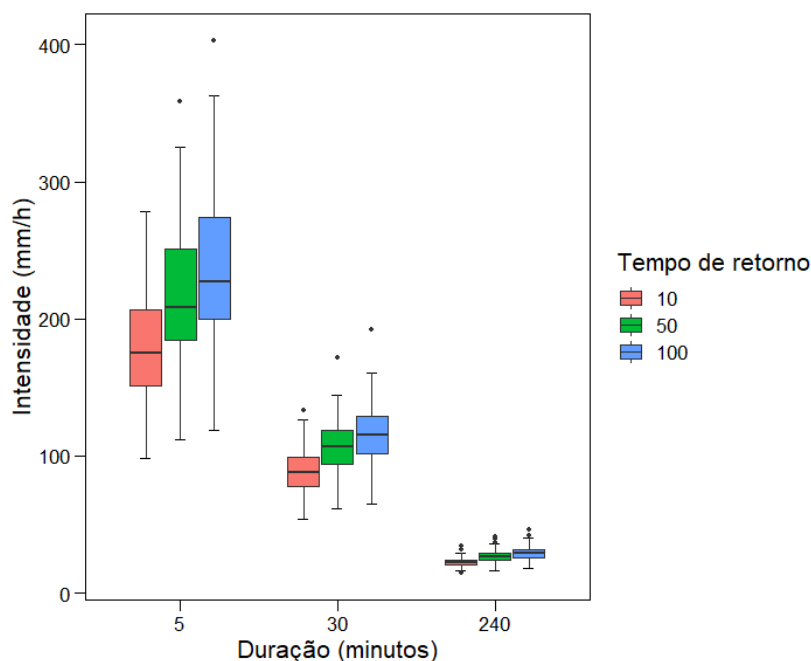


Figura 4. Diagramas box plot com as intensidades (mm/h) para os TR de 10, 50 e 100 anos e duração de 5, 30 e 240 minutos

Para os eventos de chuva com duração de 5 minutos, o TR de 10 anos não apresentou dados discrepantes. Já para o TR de 50 e 100 anos, as intensidades obtidas para o município de Brejo Santo foram consideradas discrepantes, sendo elas 358,5 mm/h e 402,7 mm/h, respectivamente.

Em eventos de chuva com duração de 30 minutos, o município de Brejo Santo apresentou intensidades atípicas para os três tempos de retorno analisados, sendo eles: 133 mm/h (10 anos), 171,3 mm/h (50 anos) e 192,4 mm/h (100 anos).

Para a duração de 240 minutos foram apresentados três dados atípicos para cada tempo de retorno. TR de 10 anos: Brejo Santo (34,3 mm/h), Bela Cruz (32, 0 mm/h) e Itapajé (14,6 mm/h); TR de 50 anos: Brejo Santo (41,2 mm/h), Bela Cruz (39,2 mm/h) e Paraipaba (37,1 mm/h);

TR de 100 anos: Brejo Santo (46, 3 mm/h), Bela Cruz (41,7 mm/h) e Paraipaba (42,3 mm/h).

Além desses identificados, em uma segunda análise do diagrama *box plot*, para a duração de 240 minutos e TR de 50 e 100 anos, o município de Eusébio também apresentou intensidades que poderiam se caracterizar como discrepante (36,2 mm/h e 40 mm/h, respectivamente).

Dessa forma, tendo em vista Oliver e Webster (2014) que citam que a presença de *outliers* e de assimetria positiva distorce o cálculo do variograma, todos os dados discrepantes foram removidos a fim de que o estudo variográfico não fosse comprometido.

Na Tabela 3 são apresentadas as principais estatísticas sobre o conjunto de dados, já com os dados atípicos removidos.

Tabela 2. Estatísticas descritivas das variáveis analisadas

t (min)	n°	Min.	Máx.	Q_1	Q_3	Mediana	$\bar{x}$	σ	C_a	C_v (%)	D_n
TR = 10 anos											
5	184	97,90	278,40	151,20	206,30	174,80	179,60	36,32	0,32	20,22	0,07
30	183	53,90	126,60	78,17	99,05	88,20	88,78	13,18	0,07	14,85	0,05
240	181	16,10	29,20	20,20	23,80	22,20	22,15	2,77	0,18	12,49	0,05
TR = 50 anos											
5	183	111,50	325,30	184,10	249,50	208,30	215,30	42,50	0,27	19,74	0,07
30	183	61,40	144,70	93,65	118,75	106,70	106,79	15,97	0,05	14,95	0,05
240	180	16,60	35,10	23,80	28,70	26,55	26,51	3,42	0,03	12,89	0,04
TR = 100 anos											
5	183	118,30	362,70	199,30	273,40	226,50	234,50	47,02	0,32	20,05	0,08
30	183	65,10	160,90	101,50	128,10	115,20	116,40	18,06	0,14	15,51	0,06
240	180	17,10	39,10	25,85	31,32	28,85	28,88	3,93	0,14	13,61	0,04

Notas: t = duração da chuva em minutos, Q_1 = primeiro quartil, Q_3 = terceiro quartil, $\bar{x}$ = média, σ = desvio padrão, C_a = coeficiente de assimetria e C_v = coeficiente de variação em %, D_n = estatística de teste de Lilliefors.

Nota-se que o desvio padrão cresce com o aumento da intensidade da chuva, por exemplo, as intensidades para o tempo de duração de 5 minutos e um TR de 100 anos são as mais elevadas e apresentam o maior desvio padrão de 47,02 mm/h. Já as intensidades para um TR de 10 anos e uma duração de 240 minutos apresentam um desvio padrão de apenas 2,77 mm/h.

Com relação ao coeficiente de assimetria, a retirada dos dados discrepantes minimizou esse coeficiente, e todos estão abaixo de 0,50, considerada uma condição de assimetria que não precisa de transformação de dados de acordo com Oliver e Webster (2014).

O ponto crítico do teste de Lilliefors a uma significância de 5% é de 0,0653, assim para os dados que apresentaram um valor superior a esse, a hipótese nula foi rejeitada e foi considerado que os dados não apresentavam normalidade. Nota-se que as intensidades correspondentes a duração de 5 minutos para os três tempos de retornos analisados apresentou um comportamento não normal pelo teste de Lilliefors.

Com relação a normalidade dos dados, Landim (2006) comenta que a estimativa por krigagem não exige que os dados tenham uma distribuição normal, mas a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos deve ser

considerada. Cressie (1991) complementa que a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas alongadas.

Os histogramas de frequência apresentados na Figura 5, elaborados com o propósito de avaliar visualmente a normalidade dos dados, indicam que os dados apresentam boa assimetria, e que não existe a presença de caudas alongadas, que poderiam aumentar as variâncias ou distorcer o semivariograma (Oliver e Webster, 2014).

Desse modo, analisando os valores obtidos para o teste de normalidade, coeficiente de

assimetria e a forma do histograma de frequência calculado, é possível admitir que mesmo em alguns casos, os dados não passando no teste de normalidade de Lilliefors, a distribuição dos dados foi considerada suficientemente simétrica para o estudo geoestatístico.

Lundgren et al. (2017) trabalharam com dados que não apresentavam normalidade e com forte assimetria positiva sem realizar transformações e obtiveram estimativas confiáveis para a construção de mapas pluviométricos do estado do Sergipe.

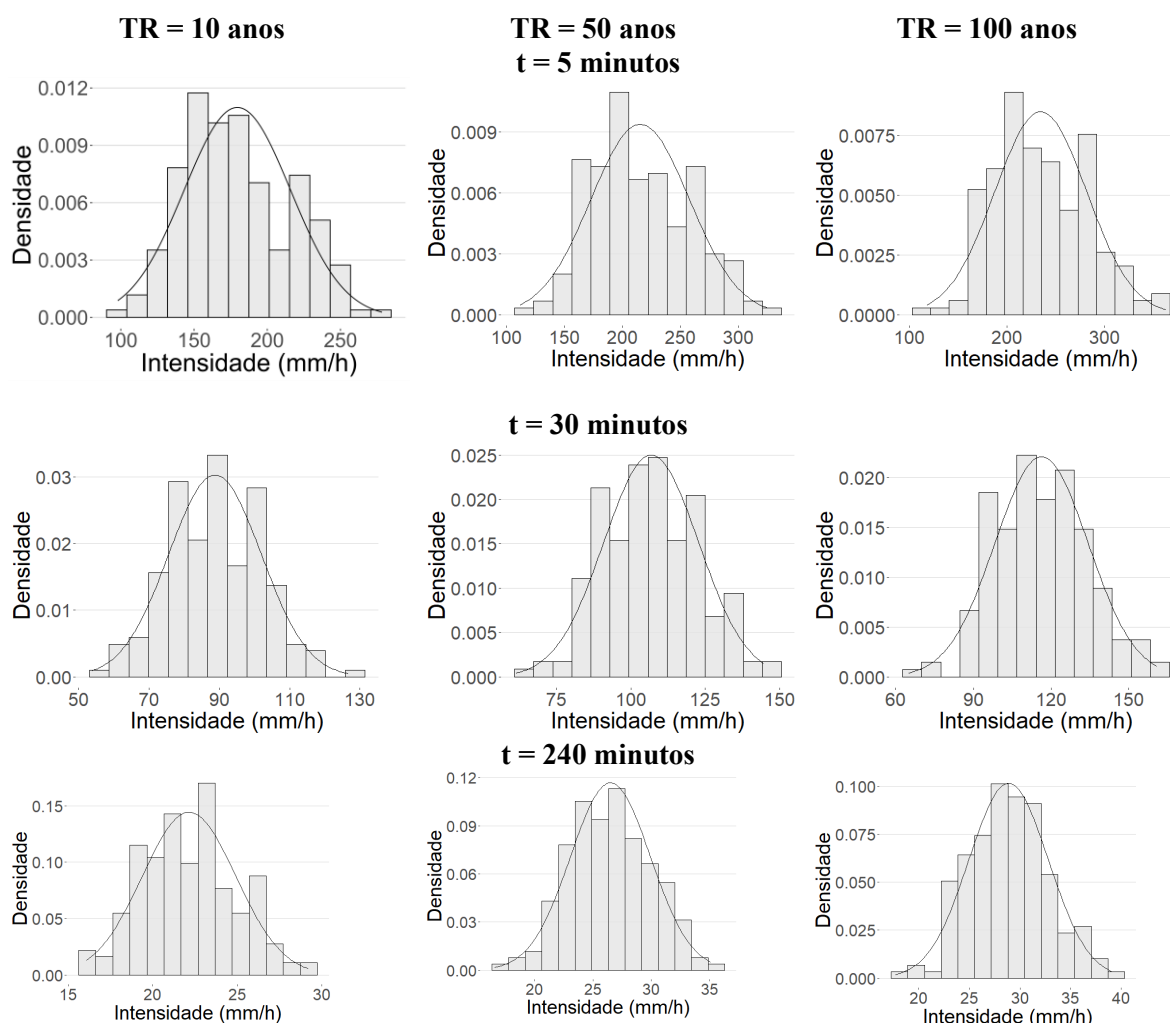


Figura 5. Histograma de frequência para avaliação gráfica da normalidade dos dados de intensidade de chuvas

Resultados da análise geoestatística - A análise dos semivariogramas experimentais e dos gráficos de tendência em relação a latitude e a longitude mostraram que os dados referentes as durações de 5 e 30 minutos para todos os tempos

Para a análise da anisotropia foram modelados os mapas variográficos e os

de retorno analisados apresentaram tendência, sendo mais evidente à medida que o TR aumentava e a duração diminuía. Desse modo, para esses dados foi construído um semivariograma de resíduos.

semivariogramas direcionais. Pelos mapas variográficos não ficou evidente a direção

preferencial dos dados. Com a modelagem dos semivariogramas direcionais foi perceptível que os dados mudam conforme a direção. Em seguida, com o ajuste dos modelos teóricos, foi perceptível uma variação tanto no patamar como no alcance, se caracterizando como uma possível anisotropia mista.

Contundo, em decorrência da complexidade da modelagem e da indisponibilidade de solução fornecida pelo software, que fornece soluções para anisotropia zonal e geométrica (Pebesma, 2014) e a deficiência de artigos que tratavam da correção mista utilizando o R, a modelagem da anisotropia não foi realizada.

De acordo com Webster et al., (2016), muitas vezes, os efeitos direcionais são desconsiderados por pesquisadores devido à dificuldade em abordá-los. Em alguns estudos, como o de Betzek et al. (2019), o efeito da anisotropia foi desconsiderado e mesmo assim encontraram-se bons resultados no ajuste de

parâmetros semivariográficos através do MoM. Dessa forma, a consideração da anisotropia foi uma limitação desse estudo, sendo modelados semivariogramas experimentais omnidirecionais.

Para o cálculo dos semivariogramas experimentais omnidirecionais foi considerada uma distância máxima de 350 km, e um *width* de 25 km. Como os dados não apresentam uma distribuição regular, a definição do valor de 25 km para o cálculo ocorreu após sucessivas análises considerando diferentes intervalos de distância. Buscou-se uma distância que proporcionasse um bom ajuste do modelo teórico, mas que o número de pares fosse representativo do ponto de vista estatístico, de acordo com Yamamoto e Landim (2013).

A Figura 6 a seguir, apresenta os modelos teóricos esférico, exponencial e gaussiano ajustados aos semivariogramas experimentais modelados para as durações de 5, 30 e 240 minutos associados aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos.

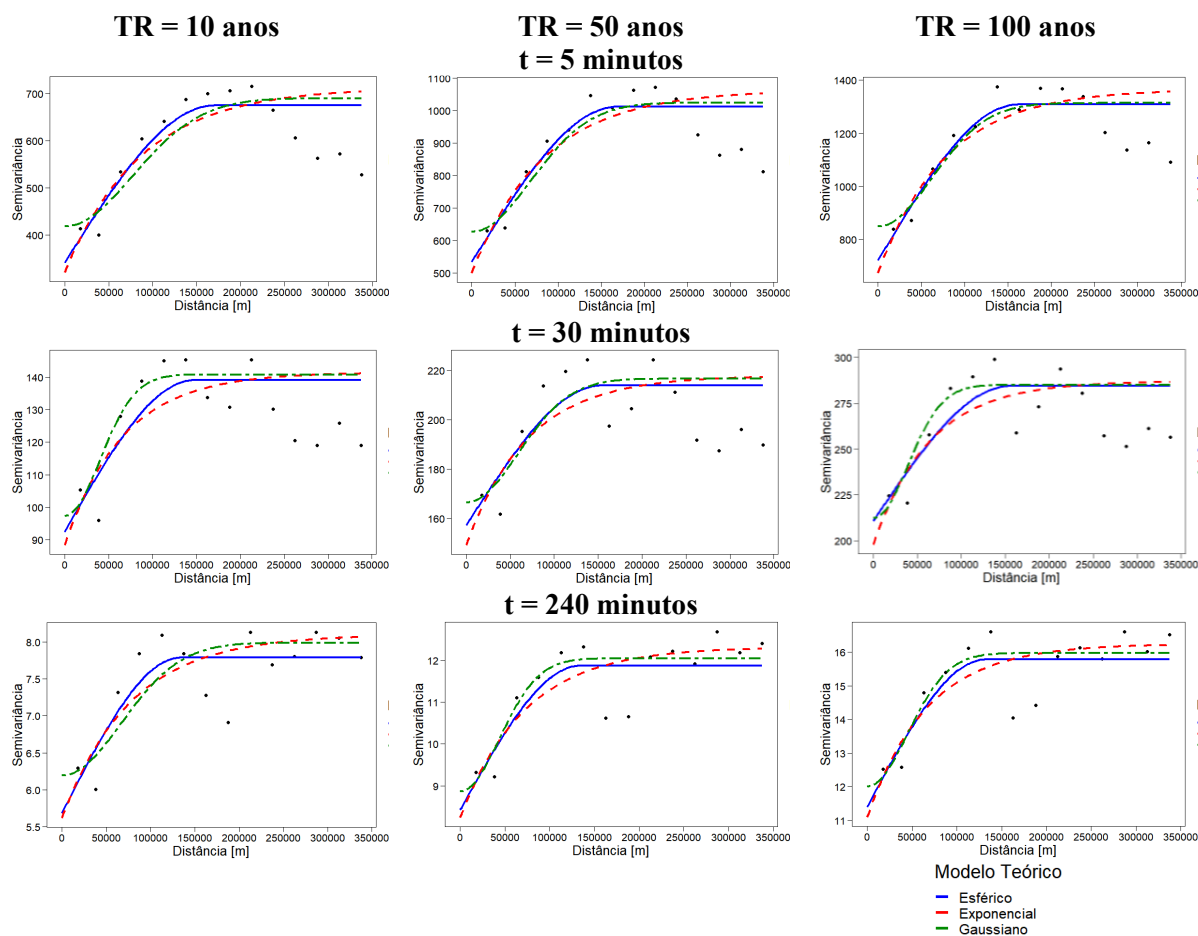


Figura 6. Ajustes dos semivariogramas teóricos ao semivariograma experimental

Analisando os semivariogramas, é possível observar que as chuvas relacionadas as durações de 5, 30 e 240 e TR de 10, 50 e 100 anos apresentaram-se estruturadas espacialmente, com uma semivariância de comportamento capaz de ser modelado, com boa aderência dos modelos teóricos ajustados e com destaque para o modelo exponencial que apresentou os melhores ajustes em 6 análises (67% dos casos).

Mello e Viola (2013), realizando o mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais, encontraram uma superioridade no ajuste do modelo exponencial. De maneira semelhante, Medeiros et al. (2024) observaram um melhor ajuste do modelo exponencial ao mapear a

variabilidade das chuvas na Bacia do Rio São Francisco. Resultados consistentes também foram encontrados por Aparecido et al. (2022), que verificaram a melhor adequação do modelo exponencial ao realizar o mapeamento de precipitações na região sudeste do Brasil.

Observa-se que a duração de 5 minutos para todos os tempos de retorno analisados, apresentou um melhor ajuste, com um patamar elevado, garantindo boa dependência espacial, mas com efeito pepita também elevado.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros dos modelos de semivariogramas e os resultados da validação cruzada.

Tabela 3. Parâmetros dos modelos de semivariograma (C_0 (efeito pepita), C (contribuição), a (alcance)), t é a duração da chuva em minutos, análise do viés estatístico (BIAS), Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA), Erro Quadrático Médio (RMSE) e Grau de dependência espacial (GD)

t	Modelo	C_0	C	$a(km)$	BIAS (%)	GD(%)	EMPA(%)	RMSE
TR = 10 anos								
5	Esférico	341,62	333,47	169,85	0,00	49,40	8,70	19,82
	Exponencial*	321,04	391,94	87,18	0,00	54,97	8,67	19,74
	Gaussiano	418,74	271,74	109,26	0,00	39,36	8,98	20,41
30	Esférico	92,41	46,69	147,23	0,00	33,57	8,45	9,56
	Exponencial	88,40	53,08	66,55	0,00	37,51	8,50	9,57
	Gaussiano*	97,32	43,52	56,54	0,00	30,90	8,39	9,49
240	Esférico*	5,68	2,11	133,95	0,00	27,04	8,25	2,29
	Exponencial	5,62	2,48	77,59	0,00	30,61	8,35	2,31
	Gaussiano	6,19	1,80	94,72	0,00	22,47	8,44	2,34
TR = 50 anos								
5	Esférico	534,58	476,42	168,13	0,00	47,12	9,55	25,79
	Exponencial*	500,93	561,09	84,02	0,00	52,83	9,46	25,61
	Gaussiano	627,54	396,28	96,87	0,00	38,71	9,75	26,11
30	Esférico	156,24	56,57	153,16	0,00	26,46	9,69	12,79
	Exponencial*	149,27	68,58	70,50	0,00	31,48	9,65	12,74
	Gaussiano	166,49	50,10	82,93	0,00	23,13	9,73	12,85
240	Esférico*	8,42	3,45	133,96	0,00	29,06	9,36	3,02
	Exponencial	8,25	4,07	72,48	0,00	33,07	9,39	3,03
	Gaussiano	8,87	3,18	61,69	0,00	26,40	9,39	3,03
TR = 100 anos								
5	Esférico	721,25	586,70	161,06	0,00	44,86	10,41	30,66
	Exponencial*	675,12	690,13	78,38	0,00	50,55	10,31	30,45
	Gaussiano	849,44	464,04	88,37	0,00	35,33	10,57	30,93
30	Esférico	210,75	73,71	155,12	0,00	25,91	10,50	15,14
	Exponencial*	197,96	89,18	64,23	0,00	31,06	10,44	15,07
	Gaussiano	212,32	72,75	55,34	0,00	25,52	10,44	15,09
240	Esférico	11,40	4,38	131,60	0,00	27,73	10,18	3,61
	Exponencial*	11,10	5,14	66,74	0,00	31,66	10,17	3,61
	Gaussiano	12,01	3,96	63,38	0,00	24,82	10,21	3,62

(*) é o modelo considerado de melhor ajuste

Verificando o grau de dependência espacial (GD), ou seja, a relação entre a variância estruturada e o patamar, a duração de 5 minutos associada aos três tempos de retorno analisados apresentaram a melhor estruturação espacial.

Percebe-se também que os maiores GD, considerando os três modelos, sempre estão associados ao modelo exponencial, e o menores associados ao modelo gaussiano. Para todos os modelos considerados de melhor ajuste, o grau de dependência espacial variou entre 27,04% (modelo esférico, para um evento com duração de 240 minutos e TR de 10 anos) e 54,97% (modelo exponencial para um evento com duração de 5 minutos e TR de 10 anos), entendido como “moderado”.

Esse resultado está em consonância com Silva Neto et al. (2020) que também encontraram um grau de dependência espacial “moderado” analisando chuvas intensas com durações de 10, 30, 720 e 1440 minutos associadas aos TR de 10, 50 e 100 anos no Tocantins. Mello e Viola (2013) analisando as chuvas intensas com durações de 30, 360, 720 e 1440 minutos associadas aos TR de 10, 50 e 100 anos, também encontraram um GD classificado como “moderado”.

No estudo de Mello e Viola (2013), os autores comentam que os maiores graus de dependência espacial estão associados a eventos de chuva com maior duração em decorrência da origem em sistemas atmosféricos que afetam grandes áreas, como as Frente Frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul, geradoras de chuvas frontais. Os dois fenômenos formadores de chuvas geram maior dependência e menor variabilidade dos valores, enquanto chuvas com menores durações são mais localizadas, oriundas de chuvas convectivas, com menor continuidade espacial e maior variabilidades dos dados entre as estações.

Em regiões Equatoriais, o caso do estado do Ceará, as chuvas são geralmente convectivas, ou seja, de grandes intensidades e de pequena duração, restrita a áreas pequenas (Tucci, 2004), existindo a atuação principalmente da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Assim, é esperado que o GD e os alcances obtidos para o estado do Ceará sejam menores.

É observado também a presença de um efeito pepita elevado, isso significa que existe

variabilidade entre os valores separados por distâncias menores que a usada no intervalo de amostragem (distância entre as estações pluviométricas). No mapa da Figura 3, é perceptível uma maior dispersão entre as estações pluviométricas analisadas nas regiões do Sertão dos Crateús, Sertão do Inhamuns e Sertão Central. Essa maior dispersão está associada a ampla extensão territorial dos municípios componentes dessa região.

É possível que os elevados efeitos pepita associados a menor variabilidade das chuvas com durações de 240 minutos tenha ocasionado os menores graus de dependência espacial observados para essas durações.

Considerando o mesmo tempo de retorno percebe-se pouca variação no EMPA, apenas nas casas decimais. Para o RMSE, percebe-se que ele acompanha a escala dos dados. Para todas as análises o BIAS sempre foi zero, apresentando resultado melhor que o de Silva Neto et al. (2020) que encontrou BIAS entre 0,95% e 1,63%.

Analisando o alcance dos modelos de melhor ajuste, os maiores estão em torno de 133,95 km (chuva de 240 minutos associada ao TR de 10 anos considerando o modelo esférico) e 133,96 km (chuva de 240 minutos associada ao TR de 50 anos considerando o modelo esférico). Enquanto o menor alcance foi de 56,54 km (chuva de 30 minutos associada ao TR de 10 anos considerando o modelo gaussiano). Os demais variaram entre 64 e 87 km.

Analisando todos os modelos percebe-se que os modelos gaussiano e exponencial, em todos os casos, estiveram associados a menores alcances.

De acordo com Mello e Viola (2013) o alcance do semivariograma está associado à existência de dependência e autocorrelação espacial. Assim, para a realização da interpolação por krigagem somente amostras dentro do raio estabelecido pelo alcance são consideradas.

Nas Figuras 7, 8 e 9 apresentam-se os mapas de chuvas intensas, obtidos por krigagem ordinária ou krigagem universal, para o Estado do Ceará. Tais mapas encontram-se no datum SIRGAS 2000 com sistema de projeção Universal Transversa Mercator (UTM) e fuso 24S. As intensidades estão apresentadas em mm/h.

t = 5 minutos

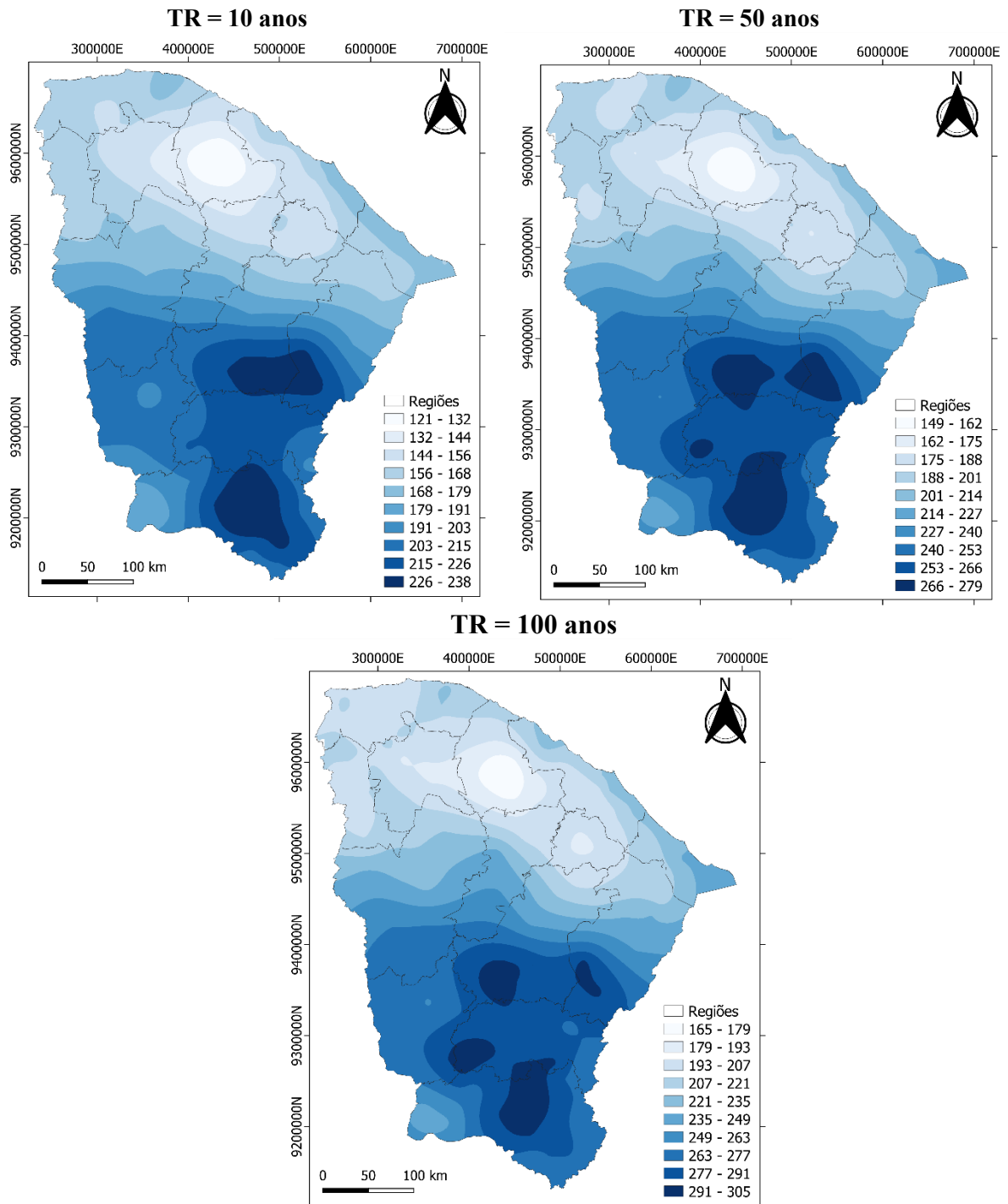


Figura 7. Mapas de distribuição espacial de chuvas intensas no Estado do Ceará considerando o tempo de 5 minutos

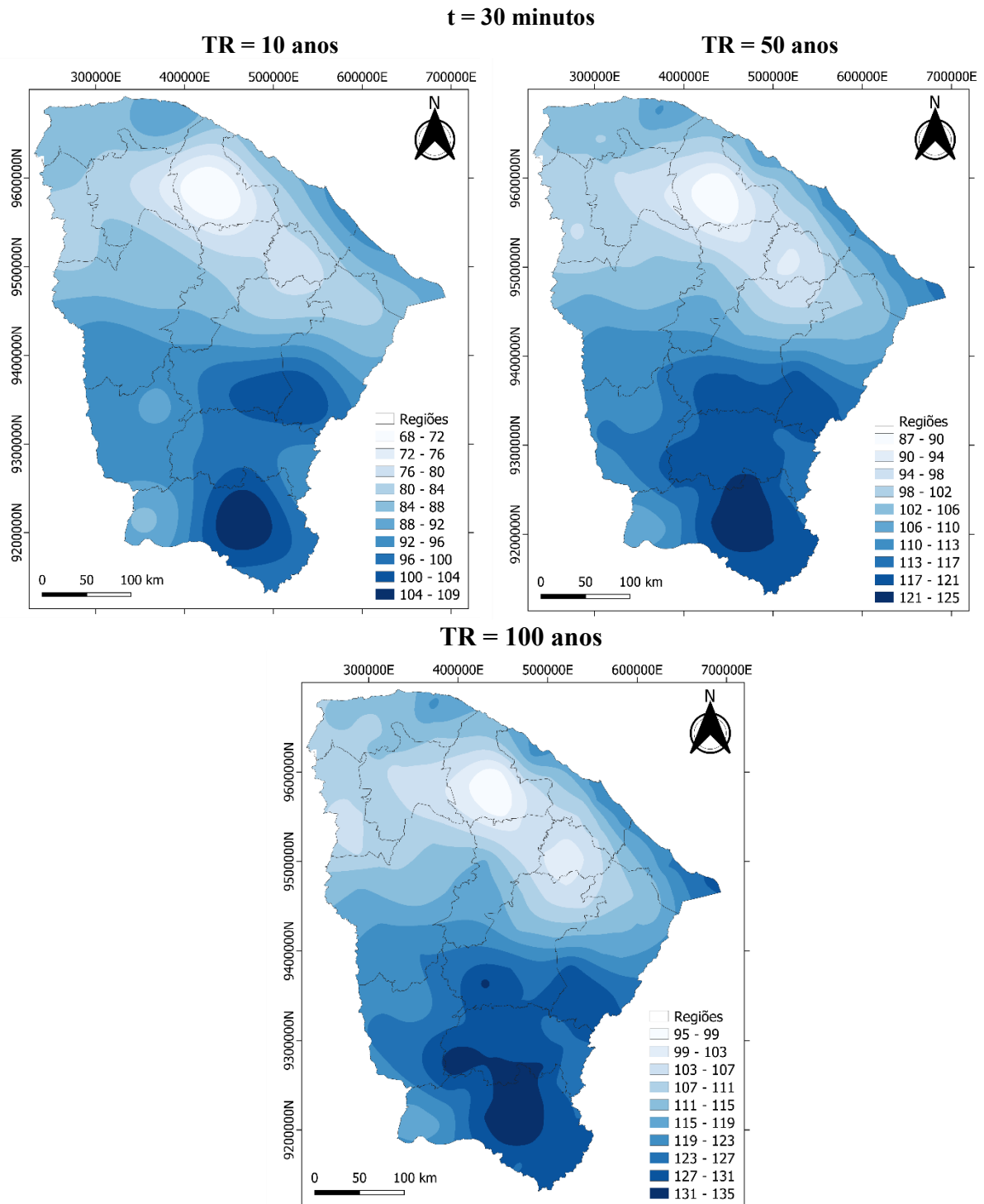


Figura 8 . Mapas de distribuição espacial de chuvas intensas no Estado do Ceará considerando o tempo de 30 minutos

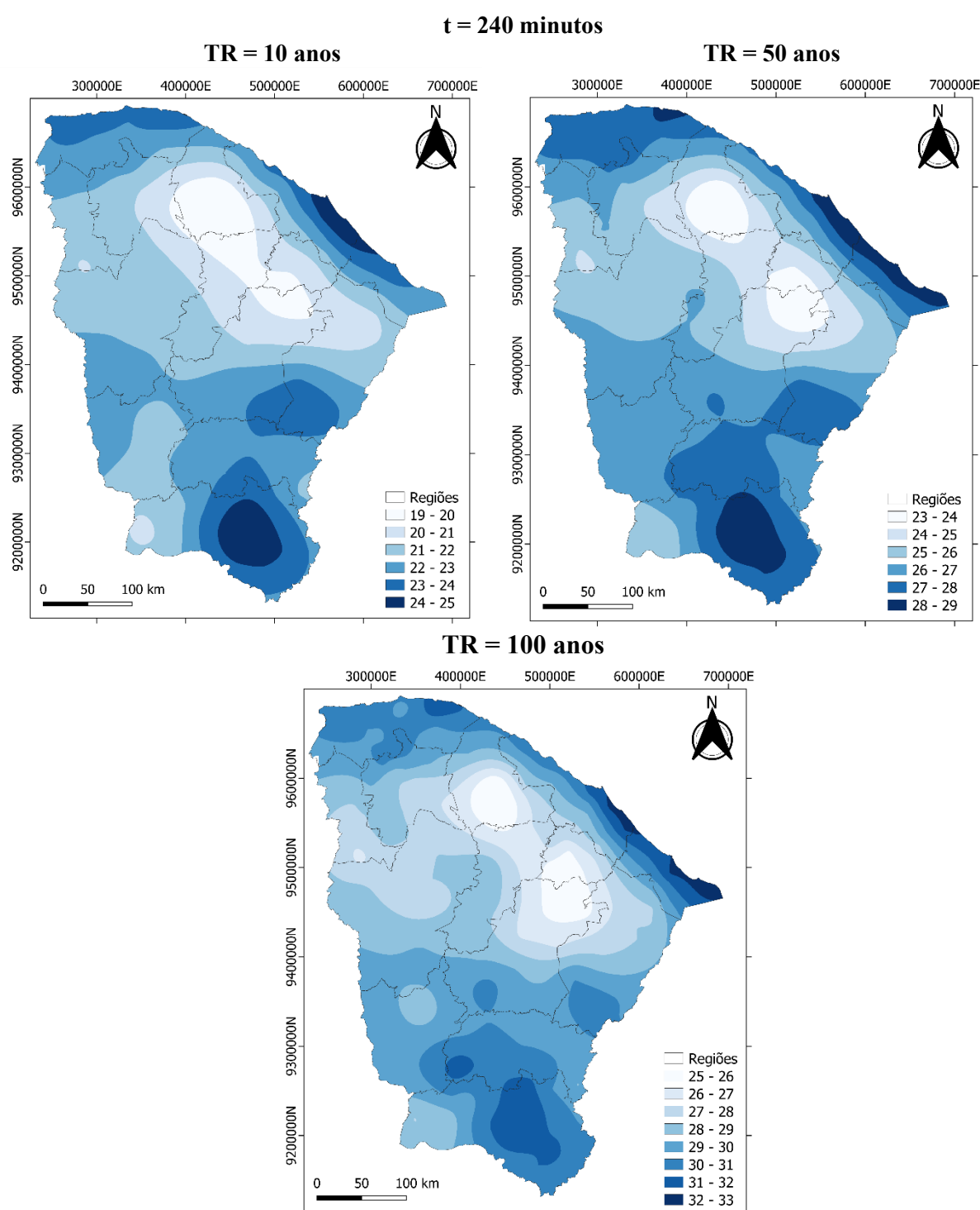


Figura 9. Mapas de distribuição espacial de chuvas intensas no Estado do Ceará considerando tempo de 240 minutos

Os mapas para as durações de 5 e 30 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50 e 100 anos, apresentados respectivamente nas Figuras 7 e 8, foram obtidos por krigagem

universal por apresentarem tendência (Oliver e Webster, 2014), e os mapas para a duração de 240 minutos associadas aos tempos de retorno de 10, 50

e 100, apresentados na Figura 9 anos foram obtidos por krigagem ordinária.

No que se refere a distribuição espacial das chuvas intensas de curta duração (5 minutos), é possível identificar que as regiões com maior magnitude estão concentradas no sul, sudeste e leste do estado, na região central do Cariri, Centro Sul, sul das regiões do Vale do Jaguaribe e do Sertão Central, sendo observadas intensidades que variam entre 226 mm/h (TR = 10 anos) e 304 mm/h (TR = 100 anos). Já as regiões de mínimas magnitudes estão situadas ao norte do estado, na região central do Vale do Curu, com intensidades variando entre 121 mm/h (TR = 10 anos) e 179 mm/h (TR = 100 anos).

Para a duração considerada intermediária nos eventos analisados (30 minutos), observam-se elevadas intensidades principalmente na região sudeste do estado, com destaque para a região central do Cariri e pequena porção sul da região Centro Sul, onde as intensidades máximas variam entre 104 mm/h (TR = 10 anos) e 135 mm/h (TR = 100 anos). Enquanto as mínimas magnitudes são novamente evidentes da região do Vale do Curu, apresentando intensidades entre 68 mm/h (TR = 100 anos) e 99 mm/h (TR = 100 anos).

Para as chuvas intensas consideradas de longa duração nesse estudo (240 minutos), é possível identificar que mínimas magnitudes estão localizadas na região central do Vale do Curu, e em partes do Sertão de Canindé, sul do Maciço de Baturité e norte do Sertão Central, com intensidades variando entre 19 mm/h (TR = 10 anos) e 26 mm/h (TR = 100 anos). Já as máximas magnitude estão localizadas principalmente na região litorânea do Litoral Leste, Grande Fortaleza, em pequena porção do Litoral Norte e na região do Cariri, nesse último correndo apenas para as recorrências de 10 e 50 anos. Nestas, as maiores intensidades variam entre 24 mm/h (TR = 10 anos) e 33 mm/h (100 anos).

As intensidades dos eventos de curta duração, frequentemente empregados como chuvas de projeto em estudos de microdrenagem para pequenas áreas e drenagens urbanas, evidenciam a vulnerabilidades das regiões críticas destacadas na Figura 7 no contexto do estado. De forma consistente, estudos conduzidos no Município de Juazeiro do Norte, situado na região do Cariri, destacam a alta susceptibilidade a alagamentos e inundações (Palácio et al. 2021). Ainda, estudos detalhados de Luna et al. (2023) reforçam a elevada vulnerabilidade da região a eventos extremos de

curta duração. De acordo com os autores, esses eventos ocorrem predominantemente durante a quadra chuvosa principal, que abrange os meses de fevereiro, março e abril, mas também se manifestam de forma significativa entre os meses de dezembro a janeiro. A intensidade e a concentração, conferem a esses eventos alto potencial para causar graves danos.

Analisando a relação espaço-temporal, percebe-se que à medida que a duração da chuva aumenta, as intensidades dos municípios do Litoral se destacam como as maiores intensidades do estado, o que não acontece para pequenas durações. Isso pode revelar uma característica da região de registrar chuvas com durações mais longas.

Especificamente para a chuva com tempo de retorno de 100 anos e duração de 30 minutos, o estado do Ceará apresenta uma variação de intensidade entre 95 e 135 mm/h, enquanto que para o estado de Minas Gerais, de acordo com Mello e Viola (2013) a intensidade varia entre 91,7 e 162,4 mm/h, e para o estado do Tocantins, Silva Neto et al. (2020) encontrou uma variação entre 139 e 337 mm/h. Desse modo, é possível perceber as baixas intensidades das chuvas de 30 minutos de duração no estado do Ceará quando comparado a estados da região Sudeste e Norte.

Ao confrontar os mapas obtidos com os dados de precipitação da Tabela 1, nota-se que as regiões do Vale do Curu e Sertão de Canindé apresentam as menores médias de precipitações diárias máximas. Mas a região dos Sertão de Canindé, destaca-se apenas com mínimas intensidades apenas para as chuvas com duração de 240 minutos. Também, as regiões da Grande Fortaleza e Litorais Leste e Norte, que apresentam as maiores médias, ganham destaque com máximas intensidades apenas para os eventos de 240 minutos. Esse comportamento sugere, que, além dos valores de precipitações máximas diárias, outros fatores influenciam a distribuição das intensidades.

Um dos fatores destacados são os coeficientes de desagregação das isozonas de Torrico (1974). Tal influência fica nítida em regiões de transição das isozonas, como as regiões do Sertão de Crateús, Vale do Jaguaribe, Sertão de Canindé e Sertão Central.

As regiões do Vale do Curu e Sertão de Canindé, que apresentam as menores médias das precipitações diárias máximas, também se destacam com menores intensidades nas regiões de isozonas C e D, caracterizada por baixos

coeficientes de desagregação. Enquanto as regiões da Grande Fortaleza, Litoral Leste e Litoral Norte, que apresentam as maiores médias das precipitações diárias máximas, se destacam nas intensidades para chuvas de longa duração (240 minutos) e todos os períodos de retorno. Tais regiões também estão situadas nas isozonas C e D.

Já a região do Cariri e Centro Sul, que se destacam pelas elevadas intensidades, também apresentam consideráveis médias nas precipitações diárias máximas e estão localizadas nas isozonas G, e o norte da região Centro Sul na isozonas H, com coeficientes de desagregação muito elevados.

Considerações finais

Foi possível modelar os semivariogramas experimentais e ajustar os modelos esférico, exponencial e gaussiano, com destaque para o melhor ajuste do modelo exponencial que se sobressaiu em 67% dos eventos estudados. Além disso, a estrutura da dependência espacial (GD) foi considerada como “moderado”.

Pelo mapeamento realizado observou-se que as chuvas de curta duração (5 minutos), caracterizadas pela elevada intensidade ocorrem com maior severidade nas regiões do Cariri, Centro Sul, e sul do Vale do Jaguaribe e do Sertão Central. Já para os eventos com durações mais longas (240 minutos), as máximas magnitudes ocorrem nas regiões litorâneas do Litoral Leste, Grande Fortaleza e também na região do cariri para as recorrências de 10 e 50 anos, revelando as características dessas regiões de possuírem chuvas mais longas. Além disso, foi possível observar a interferência do método das isozonas nos resultados apresentados, o que poderia ser estudado de forma mais aprofundada em estudo futuros.

Destacam-se como limitações desse estudo a análise e modelagem da anisotropia. Com relação a análise, a principal dificuldade foi associada com a experiência do pesquisador na análise dos mapas variográficos para encontrar os ângulos, e na identificação dos tipos de anisotropia, para realizar a correta modelagem. Com relação a modelagem, destaca-se a deficiência de estudos e a complexidade exigida.

Nesse contexto, surge como oportunidade de pesquisa que esse estudo seja replicado considerando a anisotropia e verificando sua interferência no resultado. Dentre as inúmeras aplicações da geostatística, seria oportuno também verificar a influência do relevo cearense

nos fenômenos de precipitação, utilizando a altitude como variável secundária da cokrigagem, já que o estado apresenta planaltos como a Chapada do Araripe, Chapada do Apodi, Planalto da Ibiapaba e Maciço de Baturité.

Referências

- Aparecido, L. E. de O., Moraes, J. R. da S. C. de, Lima, R. F. de, Torsoni, G. B. (2022). Spatial interpolation techniques to map rainfall in southeast Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-77863710015>. Acesso: 15 nov. 2024.
- Ávila, L. F., Mello, C. D., Viola, M. R. (2009). Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700013>. Acesso: 22 abr. 2022.
- Back, A. J. (2020). Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.25202019003>. Acesso: 25 abr. 2022.
- Back, A. J., Cadorin, S. B., Galatto, S. L. (2020). Extreme rainfall and IDF equations for Alagoas State, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, 15. Disponível: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2544>. Acesso: 20 mar. 2022.
- Basso, R. E., Allasia, D. G., Tassi, R. (2019). Vazão de projeto na microdrenagem em locais sem dados de precipitação: estudo para o Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, 19. Disponível: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300335>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Batista, T. L. (2018). Geração de equações IDF dos municípios cearenses pelo método de desagregação por isozona implementado em um programa computacional. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, Brasil
- Batista, T. L., Alves, F. de M., Tavares, P. R. L. (2018). Utilização de dados pluviométricos para o desenvolvimento de equações IDF da região metropolitana de Fortaleza-CE, Brasil. *Revista DAE*, 66. Disponível: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2018.018>. Acesso: 15 fev. 2022.
- Betzek, N. M. et al. (2019). Computational routines for the automatic selection of the best

- parameters used by interpolation methods to create thematic maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.004>. Acesso: 16 fev. 2022
- Braga, R. N. de S., Hora, M. de A. G. M. da, Lyra, G. B., Nascentes, A. L. (2018). Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do Rio de Janeiro. *Revista Ambiente e Água*, 13. Disponível: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2076>. Acesso: 16 fev. 2022.
- Brandão, R. L., Freitas, L. C. B. (2014). Geodiversidade do estado do Ceará: programa geologia do Brasil, levantamento da geodiversidade. Fortaleza, Brasil: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Disponível: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/16726>. Acesso: 15 fev. 2022.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Kerlen, D. L., Turco, R. F., Konopka, A. E. (1994). Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 47. Disponível: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>. Acesso: 29 mar. 2022.
- Carvalho, J. R. P., Assad, E. D. (2005). Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. *Engenharia Agrícola*, 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162005000200011>. Acesso: 22 mar. 2022.
- Cavalcanti, I. F. de A., Ferreira, N. J., Dias, M. A. F. da S., Silva, M. G. A. J. da (2009). Tempo e clima no Brasil. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos.
- Collischonn, W., Dornelles, F. (2013). Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. Porto Alegre, Brasil: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH).
- Cressie, N. (1991). *Statistics for spatial data*. New York, EUA: John Wiley & Sons.
- Fechine Sobrinho, V., Rodrigues, J. O., Mendonça, L. A. R., de Andrade, E. M., Tavares, P. R. L. (2014). Desenvolvimento de equações intensidade-duração-frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>. Acesso: 16 mar. 2022
- Gonçalves, S. T. N., Vasconcelos Júnior, F. das C., Silveira, C. da S., Costa, J. M. F. da, Marcos Júnior, A. D. (2023). Avaliação de índices de seca no monitoramento hidrológico de reservatórios estratégicos do Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 38, e38230018. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810018>. Acesso: 16 nov. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). Cidades e estados. Rio de Janeiro. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>. Acesso: 08 mar. 2022.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). Normais climatológicas. Brasília. Disponível: https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1961-1990/precipitacao_acumulada_mensal_anual. Acesso: 12 jan. 2022.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2022). Ceará em mapas. Fortaleza. Disponível: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12.htm>. Acesso: 15 jan. 2022.
- Landim, P. M. B. (2006). Sobre geoestatística e mapas. *Terra Didática*, 2. Disponível: <https://doi.org/10.20396/td.v2i1.8637463>. Acesso: 26 mar. 2022.
- Lima, M. A. da S., Lira, M. A. T. A. (2021). Variabilidade climática e os desastres naturais no estado do Ceará (1991–2019). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-77863630035>. Acesso: 13 mar. 2022.
- Lima Neto, V. de S., Tavares, P. R. L., Batista, T. L. (2021). Ajuste e validação de equações IDF a partir de dados pluviométricos para cidades do estado de Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0102-7786360031>. Acesso: 14 mar. 2022.
- Luna, V. F., Duarte, C. C., Silva, J. M. O., Anjos, L. S. dos, Nóbrega, R. S. (2023). Chuvas em Juazeiro do Norte, Ceará: análise dos extremos e suas repercussões. *Revista de Geografia*, 40. Disponível: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2023.255255>. Acesso: 15 nov. 2024.
- Lundgren, W. J. C., Souza, I. F. de, & Lundgren, G. A. (2017). Kriging in the construction of pluviometric map of the state of Sergipe. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170002>

- Medeiros, E. S. de, Oliveira, W. dos S., Silva, P. V. da, Souza, A. de, Bicalho, C. C., Mauad, M., Souza, S. A. de. (2024). Mapping rainfall variability in the São Francisco River Basin: Insights for water resource management. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 39. <https://doi.org/10.1590/0102-77863910050>
- Mello, C. R., Lima, J. M., Silva, A. M., Mello, J. M., & Oliveira, M. S. (2003). Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500017>
- Mello, C. R., & Viola, M. R. (2013). Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100004>
- Mendes, L. S. A. dos S., Silva Neto, T. A. da, Sousa, J. S. F. de O., Silva Neto, C. A. da, Cavalcante, I. N., Vasconcelos Braga, E. de A. S., & Salgueiro, A. R. G. N. L. (2021). Diagnóstico da oferta hídrica do município de Russas (CE): Uma análise descritiva como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1612-1625>
- Moreira, J. G. do V., Almeida, M. P. de, Silva, S. S. da, Montefusco, C. de L. A., Duarte, S. N., & Mendonça, F. C. (2024). Heavy rainfall events in the state of Acre, western Amazonia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n6e275802>
- Naghetini, M., & Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. CPRM.
- Oliveira, A. L. G., Lima, J. P., Brasco, T. L., & Amaral, L. R. (2022). The importance of modeling the effects of trend and anisotropy on soil fertility maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106877>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Palácio, O. D., Oliveira, C. W., Meireles, A. C. M., & Souza Junior, T. G. de. (2021). Análise da susceptibilidade a alagamento em Juazeiro do Norte, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2204-2219>
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers & Geosciences*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>
- Pebesma, E. J. (2014). *Gstat user's manual* (2nd ed.). Utrecht University. <http://www.gstat.org/gstat.pdf>
- Rocha, T. B. C., Vasconcelos Júnior, F. das C., Silveira, C. da S., Martins, E. S. P. R., Gonçalves, S. T. N., Silva, E. M. da, Alves, J. M. B., & Sakamoto, M. S. (2021). Indicadores de veranicos e de distribuição de chuva no Ceará e os impactos na agricultura de sequeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630041>
- Silva, E. M. da, Carvalho, H. C. M., Silva, L. L. da, & Barbosa, W. A. (2021). Registros de queimadas em vegetação (incêndios) e a climatologia da chuvas no estado do Ceará: Estudo de caso no período de 2015 a 2019. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630040>
- Silva Neto, V. L., Viola, M. R., Mello, C. R., Alves, M. V. G., Silva, D. D., & Pereira, S. B. (2020). Mapeamento de chuvas intensas para o estado do Tocantins. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351017>
- Torrico, J. J. T. (1974). *Práticas hidrológicas*. TRANSCON.
- Tucci, C. E. M. (2004). *Modelos hidrológicos*. UFRGS/ABRH.
- Wanderley, L. S. de A., Nóbrega, R. S., Duarte, C. C., Moreira, A. B., & Anjos, R. S. (2021). Tipos de tempo associados a eventos diários de chuva intensa na cidade de Recife – PE, Brasil. *Sociedade & Natureza*, 33. <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/60520>
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2nd ed.). John Wiley & Sons Ltd.
- Webster, R., Oliver, M. A., & Lark, R. M. (2016). Editorial: Statistics in the journal. *European Journal of Soil Science*, 67. <https://doi.org/10.1111/ejss.12331>
- Xavier, S. F. A., Jale, J. da S., Stosic, T., Santos, C. A. C. dos, & Singh, V. P. (2020). Precipitation trends analysis by Mann-Kendall test: A case study of Paraíba, Brazil. *Revista Brasileira de*

- Meteorologia*, 35. Yambrano–Bigiarini, M. (2020). *HydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series* (R package version 0.4-0). <https://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf>
- Yamamoto, J. K., & Landim, P. M. B. (2013). *Geoestatística: Conceitos e aplicações*. Oficina de Textos.