



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO (UFERSA)
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO (PROGRAD)
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS (CMPF)
BACHARELADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

HELVES CLEVERTON GUERRA COSTA

**MAPEAMENTO DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE**

PAU DOS FERROS – RN
2020

HELVES CLEVERTON GUERRA COSTA

**MAPEAMENTO DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Ambiental e Sanitária.
Orientador: Prof. Dr. Wesley de Oliveira
Santos.

PAU DOS FERROS – RN
2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C837m COSTA, HELVES CLEVERTON GUERRA.
MAPEAMENTO DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO
RIO GRANDE DO NORTE / HELVES CLEVERTON GUERRA COSTA.
- 2020.

75 f. : il.

Orientador: Wesley de Oliveira
Santos.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de
Engenharia Ambiental
e Sanitária, 2020.

1. Geoestatística. 2. Krigagem. 3. Desagregações
de chuvas. 4. Precipitações. I. Santos, Wesley de
Oliveira, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas

da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

HELVES CLEVERTON GUERRA COSTA

**MAPEAMENTO DE CHUVAS INTENSAS PARA O ESTADO DO RIO
GRANDE DO NORTE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus de Pau dos Ferros para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental e Sanitária.

DATA DE APROVAÇÃO: 10/12/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos. – UFERSA
Presidente

Prof.^a Dr.^a Kytéria Sabina Lopes de Figueredo – UFERSA
1^a Examinadora

Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha – UFERSA
2^o Examinador

*A meus pais, Maria Erineuda e José
Cledima. dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Wesley de Oliveira dos Santos pela confiança e por toda a ajuda e conselhos que viabilizou este trabalho.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido pela oportunidade de cursar uma graduação.

Aos amigos que contribuíram direta ou indiretamente com este trabalho, em especial a Jean Alves, Alana Ticiane e Álvaro Mateus, cuja ajuda e boa vontade foram bastante significativas.

RESUMO

O presente estudo objetivou a criação de mapas de chuvas intensas para o estado do Rio Grande do Norte, considerando diferentes durações (15, 30 e 60 minutos) e períodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos). Foram utilizadas séries históricas de 167 postos pluviométricos distribuídos pelo território estadual, com período de análise de 1964 a 2019. As estimativas de precipitações intensas foram realizadas pelo método probabilístico de Gumbel, com verificação de aderência da distribuição teórica pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A modelagem da correlação espacial ocorreu com o ajuste dos modelos de variograma exponencial e esférico, nos quais, selecionou-se o modelo de variograma de melhor ajuste, com a determinação do erro médio percentual absoluto. O modelo com menores erros médios foi adotado para o processo de interpolação por krigagem ordinária. Os resultados indicaram bom ajuste da distribuição de Gumbel. O modelo de variograma exponencial foi considerado de melhor ajuste em todos os casos analisados. Os mapas gerados indicaram os maiores valores de intensidades pluviométricas na região do litoral oriental húmido. Já os valores de baixa intensidades pluviométricas foram verificados nas regiões do litoral setentrional e do agreste potiguar.

Palavras-chave: Geoestatística, Krigagem, Desagregações de chuvas, Precipitações.

ABSTRACT

The current study objectified the creation of intense rain maps in the state of Rio Grande do Norte, considering different durations (15,30 and 60 minutes) and return periods (2,5,10,20,50,100 and 500 years. Historical series of 167 pluviometric posts distributed trough the state territory were utilized, with analysis period from 1964 to 2019. The estimative of intense precipitation were made by Gumbel's probabilistic method, with verification on distribution analysis adherence by Kolmogorov-Smirnov test. The shaping of spacial correlation happened with the adjustment of exponential and spherical variogram models, in which, the variogram model with better adjustment was selected, with the determination of mild error absolute percentage. The model with fewer mild errors was adopted in the interpolation of ordinary kriging process. The results showed great Gumbel's distribution adjustment. The exponential variogram model was the one considered with better adjustments in all analyzed cases. The generated maps indicated greater value of pluviometric intensity in the humid eastern sea cast region. Low intensity pluviometric values were seen in the setentrional coast and the agreste potiguar regions.

Keywords: Geostatistics, Krigagem, Disaggregations of rainfall, Precipitation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos postos pluviométricos no Rio Grande do Norte.....	31
Tabela 2 - Estatística descritiva para duração de 15 minutos e TR = 2 anos	37
Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de variograma exponencial (C0, C1 e A) e esférico, grau de dependência espacial (GD), viés estatístico (BIAS) e erro médio percentual absoluto (EMPA), ajustados para as durações e períodos de retorno avaliados.....	38
Tabela 4 - Valores mínimos e máximos de intensidade pluviométrica estimados pelo modelo exponencial, obtidos pela krigagem ordinária para as durações e TR analisados.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráficos da função variograma e correlograma.....	21
Figura 2 - Exemplo de variograma padrão	23
Figura 3 - Gráficos dos modelos esférico, exponencia e gaussiano	24
Figura 4 - Janela para cálculo de variograma utilizando com referência o (a) ponto 1 e o (b) ponto 2	25
Figura 5- Mapa do Rio Grande do Norte.....	28
Figura 6 - Distribuição dos postos pluviométricos no Rio Grande do Norte	30
Figura 7 - Resumo da Metodologia	35
Figura 8 - Frequências observadas e estimadas pela distribuição de Gumbel para o município de Pau dos Ferros/RN.....	36
Figura 9 - Mapa de chuva intensa para o Rio Grande do Norte, com série histórica de dados de 1964 a 2019, considerando a duração de 15 minutos, associado ao período de retorno de 5 anos.....	42
Figura 10 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 2 anos.....	52
Figura 11 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 5 anos.....	52
Figura 12 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 10 anos.....	52
Figura 13 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 20 anos.....	52
Figura 14 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 50 anos.....	53
Figura 15 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 100 anos.....	53
Figura 16 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 500 anos.....	53
Figura 17 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 2 anos.....	54
Figura 18 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 5 anos.....	54

Figura 19 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 10 anos.....	54
Figura 20 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 20 anos.....	55
Figura 21 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 50 anos.....	55
Figura 22 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 100 anos.....	55
Figura 23 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 500 anos.....	56
Figura 24 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 2 anos.....	56
Figura 25 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 5 anos.....	56
Figura 26 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 10 anos.....	57
Figura 27 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 20 anos.....	57
Figura 28 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 50 anos.....	58
Figura 29 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 100 anos.....	58
Figura 30 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 500 anos.....	58
Figura 31 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 15 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos	59
Figura 32 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 30 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos	61
Figura 33 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 60 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos	63

Figura 34 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 2 anos.....	65
Figura 35 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 5 anos.....	65
Figura 36 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 10 anos.....	66
Figura 37 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 20 anos.....	66
Figura 38 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 50 anos.....	67
Figura 39 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 100 anos.....	67
Figura 40 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 500 anos.....	68
Figura 41 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 2 anos.....	68
Figura 42 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 5 anos.....	69
Figura 43 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 10 anos.....	69
Figura 44 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 20 anos.....	70
Figura 45 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 50 anos.....	70
Figura 46 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 100 anos.....	71
Figura 47 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 500 anos.....	71
Figura 48 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 2 anos.....	72
Figura 49 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 5 anos.....	72
Figura 50 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 10 anos.....	73

Figura 51 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 20 anos.....	73
Figura 52 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 50 anos.....	74
Figura 53 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 100 anos.....	74
Figura 54 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 500 anos.....	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. MODELAGEM DE VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS	16
3.1.1. Estatísticas espacial e Definição da função variograma	17
3.1.2. Parâmetros do Variograma.....	21
3.1.3. Cálculo de variogramas experimentais	24
3.2. ESTIMATIVA GEOESTATÍSTICAS	26
4. METODOLOGIA.....	28
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	28
4.2.DETERMINAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PELO MÉTODO PROBABILÍSTICO DE GUMBEL	29
4.3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	32
4.4. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
6. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS	45
APÊNDICE A – Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados de precipitação máxima diária anual para o Rio Grande do Norte.	48
APÊNDICE B – Histogramas de frequência e boxplots usados para análise exploratória dos dados	52
APÊNDICE C – Variogramas ajustados pelo modelo exponencial.....	59
APÊNDICE D – Intensidades máximas médias para o estado do rio grande do norte	65

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre precipitações pluviométricas é importante sob diversos aspectos. Além de estar relacionado com o abastecimento de um dos principais recursos para a manutenção da vida, tem grande impacto, positivo ou não, sobre diversas atividades sociais. Sabe-se que estes eventos são potencialmente perigosos em regiões com infraestrutura precária, com capacidade de ocasionar prejuízos consideráveis e colocar em risco a vida e a saúde humana. Por outro lado, as precipitações são necessárias para o desenvolvimento de diversas atividades econômicas, como a agricultura, construção civil, geração de energia, pecuária, entre outras. Desta forma, informações sobre o regime pluviométrico é interessante para maximizar os aspectos positivos, principalmente no que se refere ao abastecimento dos centros urbanos e sustentar as atividades econômicas, como também, antecipar e mitigar os aspectos negativos em áreas sensíveis.

O estudo das precipitações também desempenha papel importante no dimensionamento e adequação de serviços públicos ou privados, no ambiente urbano ou rural. Em geral, as pesquisas objetivam identificar eventos extremos, como períodos de seca ou chuvas intensas, determinando para a área de estudo as probabilidades relacionadas às durações e as frequências de recorrência destes fenômenos. Estudos dessa natureza são necessários, dentre outros motivos, por serem requisitadas no desenvolvimento de obras hidráulicas, como sistemas de drenagem no espaço urbano ou rural, bueiros, vertedores e galerias pluviais (NETO *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2002).

Outra característica importante das chuvas que pode ser de interesse público, se refere a sua distribuição e variabilidade no espaço. A compreensão da dinâmica espaço-temporal das chuvas é fundamental no dimensionamento de obras hidráulicas e de projeto de conservação do solo, assim como, para o planejamento do uso e ocupação deste compartimento (MELLO; VIOLA, 2013). Uma possibilidade para atender esse interesse consiste na elaboração de superfícies que modelam o fenômeno pluviométrico para a região em estudo, resultando em mapas de precipitação. Para este fim, é recorrente o uso da geoestatística (SILVA *et al.*, 2002; SANTOS, 2015; MELLO; VIOLA, 2013; MEDEIROS; LUCIO; SILVA, 2017; BORTOLUZZI *et al.*, 2019; NETO *et al.*, 2020). A geoestatística surgiu da necessidade de mapeamento de minérios em jazidas, mas passou a ser empregada em diversas outras áreas de pesquisas além da mineração (MEDEIROS; LUCIO; SILVA, 2017). Baseia-se na modelagem da correlação espacial da variável em análise e no emprego de interpoladores para a geração de

superfícies contínuas que evidencia a variabilidade e intensidade do fenômeno na área de estudo, a partir de amostras suficientes (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Tratando-se da modelagem de precipitações, nem sempre é simples a elaboração de mapas de intensidade máxima pluviométrica. É comum nestes estudos, a dificuldade ocasionada pela ausência de pontos de medição e sua má distribuição na área em análise. Nesses casos, uma alternativa para geração de superfícies que aproximem o fenômeno consiste no emprego de estimadores geoestatísticos, dentre os quais se destaca a técnica de krigagem (MEDEIROS; LUCIO; SILVA, 2017). A técnica de krigagem objetiva a estimativa de uma determinada variável em análise, localizada em ponto específico da região de estudo, utilizando os valores assumidos nas proximidades, sob a hipótese de interdependência espacial (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Neto et al. (2020) afirma a importância do mapeamento das grandezas climáticas. A elaboração destes mapas faz parte do esforço de melhorias de aspectos metodológicos e por estarem, também, relacionadas com aplicações práticas, como o planejamento do meio físico, manejo de bacias hidrográficas e projetos de obras hidráulicas. Por apresentar vantagens sobre os métodos clássicos de interpolação, as estimativas geoestatística são amplamente empregadas em estudos de distribuição espacial de precipitações (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Mapear chuvas intensas no estado do Rio Grande do Norte com durações de 15, 30 e 60 minutos, associadas com os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, utilizando a distribuição probabilística de Gumbel e desagregação de chuvas, para estimativa de intensidades pluviométricas, e krigagem ordinária, para interpolação geoestatística.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar a distribuição probabilística de Gumbel e desagregação de chuvas para estimativa de intensidade pluviométrica para o Rio Grande do Norte, utilizando série histórica de dados de 1964 a 2019;
- Empregar os modelos de variograma esférico e exponencial aos dados desagregados, pelo método dos mínimos quadrados ponderados;
- Realizar a seleção do modelo de variograma de melhor ajuste pela determinação do erro médio percentual absoluto;
- Mapear as chuvas intensas utilizando o método de krigagem ordinária.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MODELAGEM DE VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS

Antes de abordarmos o processo de modelagem de variogramas experimentais, é necessário introduzir o conceito de variável regionalizada. Uma variável regionalizada é obtida pela realização de função aleatória $Z(X)$, dependente de um vetor posição X de duas ou três dimensões, expressa pela soma de três termos: $\mu(X)$ a componente estrutural, representada por uma função determinística e indica a tendência do fenômeno; $\varepsilon'(X)$ a componente aleatória, ou termo estocástico correlacionado espacialmente; e ε'' que é o ruído imprevisível ou erro residual, que não é quantificável. Podemos visualizar a forma geral de uma variável regionalizada na Equação 1.

$$Z(X) = \mu(X) + \varepsilon'(X) + \varepsilon'' \quad (1)$$

A modelagem de variograma experimentais, ou modelo de correlação espacial, é uma etapa essencial em estudos geoestatísticos. Esta fase permite a realização de previsões sobre o comportamento espacial da variável regionalizada, a partir da amostragem suficiente de pontos distribuídos pela região de análise, ou seja, possibilita o entendimento de como a variável assume diferentes valores no espaço (MONTEIRO, 2004). Para a estimativa dos valores assumidos em pontos não amostrados, deve-se considerar que estas estimativas estão relacionadas, de alguma forma, com os valores assumidos em pontos próximos, sendo a influência mútua de um par amostrado inversamente proporcional à distância (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Dessa forma, utilizando-se de estatística de dois pontos, é viável inferir sobre a continuidade espacial de uma variável regionalizada na posse de valores amostrais. A modelagem da correlação especial com base nos valores amostrais, precede o ajuste de um modelo teórico que permite estimar a correlação espacial para diferentes distâncias no espaço amostral (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Convém deixar claro as definições que será adotada nos próximos tópicos. Funções e variáveis aleatórias serão identificadas por caracteres maiúsculos, como $Z(X)$ e $Z(X + h)$, por exemplo. Valores amostrais serão identificados por caracteres minúsculos, como $z(x_i)$, por exemplo. Vetores serão identificados pelas letras X e h para funções e variáveis aleatórias, e x_i ,

em minúsculo com índice, para valores amostrados ou observados, em que x_i identifica o vetor cuja coordenadas são (x_i, y_i) .

3.1.1. Estatísticas espacial e Definição da função variograma

A realização da krigagem ordinária supões diferente graus de estacionaridade do fenômeno em estudo. Especificamente, é adotada a hipótese de estacionaridade de 1ª e 2ª ordem.

A estacionaridade de 1ª ordem considera que a média do fenômeno seja constante na região de estudo, ou seja, o fenômeno não apresenta tendências. A consequência direta dessa hipótese é que podemos considerar a média aritmética das amostras como a média do fenômeno, conforme a Equação 2 (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

$$m = E[Z(X)] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) \quad (2)$$

Em que $Z(X)$ é a função aleatória constituída pelo conjunto de variáveis aleatórias correlacionadas entre si, E é a esperança estatística, $z(x_i)$ é o valor assumido pela variável regionalizada na posição x_i .

Devido à ausência de tendências, a diferença observada entre os pares de valores assumidos em X e $X + h$, separados pelo vetor distância h , é nula, conforme Equação 3.

$$E[Z(X) - Z(X + h)] = 0 \quad (3)$$

Que implica no resultado exposto na Equação 4:

$$E[Z(X)] = E[Z(X + h)] = m(X) = m \quad (4)$$

Em que $m(X)$ é a componente determinística da variável regionalizada e m é a média das amostras.

Ressalta-se que quando a estacionaridade de 1ª ordem não pode ser satisfeita, o que inviabiliza a krigagem ordinária, métodos alternativos podem ser adotados, como a krigagem universal, por exemplo (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Com a adoção da hipótese de estacionaridade de 2ª ordem, admite-se que a covariância entre dois pares de pontos $Z(X)$ e $Z(X + h)$, depende exclusivamente do módulo do vetor distância entre os pontos $|h|$, não importando sua direção. Conforme visto anteriormente, a independência de uma função em relação a direção é denominada em geoestatística de isotropia. Da hipótese de estacionaridade de 2ª ordem, obtém-se:

$$C(h) = COV[Z(X), Z(X + h)] = E\{[Z(X + h) - m] \cdot [Z(X) - m]\} \quad (5)$$

Cuja Equação 6 é equivalente.

$$C(h) = E[Z(X) \cdot Z(X + h)] - m^2 \quad (6)$$

Uma ressalva importante é que, diferentemente da estatística, em que se considera a covariância uma medida de relação entre duas variáveis distintas, na geoestatística considera-se a covariância como medida de relação entre valores de uma mesma variável, separadas por um vetor distância h (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Devido a estacionaridade de 2ª ordem, a variância da função aleatória também é afetada. Ou seja, a estacionaridade da covariância implica na estacionaridade da variância (MONTEIRO, 2004). A variância da função aleatória ($Var[Z(X)]$) em associada à média é calculada por:

$$Var[Z(X)] = E[Z(X) - m]^2 = E[Z^2(X) - 2mE[Z(X)] + m^2] \quad (7)$$

Que pode ser desenvolvida em:

$$Var[Z(X)] = E[Z(X) - m]^2 = E[Z^2(X)] - 2m^2 + m^2 \quad (8)$$

Simplificando a Equação 8, obtém-se:

$$Var[Z(X)] = E[Z^2(X)] - m^2 \quad (9)$$

Que, conforme análise da Equação 5, considerando $h = 0$, pode ser expressa, conforme equação 10.

$$Var[Z(X)] = C(0) \quad (10)$$

A conclusão possível da Equação 10 é que a determinação da covariância é suficiente para caracterizar a variável regionalizada, mais especificamente, a $C(h)$ permite caracterizar o termo estocástico ε da Equação 1 (MONTEIRO, 2004).

Visto que a covariância é suficiente para caracterizar uma variável regionalizada, resta saber como se calcula a covariância. Para isto, utiliza-se a função variograma $2\gamma(h)$, definida conforme Equação 11.

$$2\gamma(h) = E[Z(X) - Z(X + h)]^2 \quad (11)$$

Segundo Yamato e Landim (2013), a função variograma é definida como o incremento dos pontos separados por uma distância h . Geometricamente, a função variograma pode ser interpretada como o momento de inércia entre pares de pontos de coordenadas $(Z(X + h), Z(X))$ e sua projeção na reta bissetriz, que resulta na ordenada em $(Z(X + h))$, um diagrama de dispersão. Desta construção surge que quanto maior o momento de inércia, maior a variância entre os pontos analisados.

Desenvolvendo a equação 11, obtêm-se a Equação 12.

$$2\gamma(h) = E[Z(X) - 2Z(X).Z(X + h) + Z(X + h)]^2 \quad (12)$$

Que também pode ser expressar por:

$$2\gamma(h) = E[Z(X)] - 2E[Z(X).Z(X + h)] + E[Z^2(X + h)] \quad (13)$$

Das equações 9 e 10, obtém-se

$$E[Z^2(x)] = C(0) + m^2 \quad (14)$$

E da equação 6, obtém-se

$$E[Z(x).Z(X + h)] = C(h) + m^2 \quad (15)$$

Substituindo as Equações 14 e 15 em 13, e fazendo as devidas simplificações, chega-se a seguinte expressão:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (16)$$

Onde $\gamma(h)$ é denominado de variograma.

Dividindo ambos os membros da Equação 16 por $C(0)$, chega-se a seguinte expressão:

$$\frac{C(h)}{C(0)} = \frac{C(0)}{C(0)} - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad (17)$$

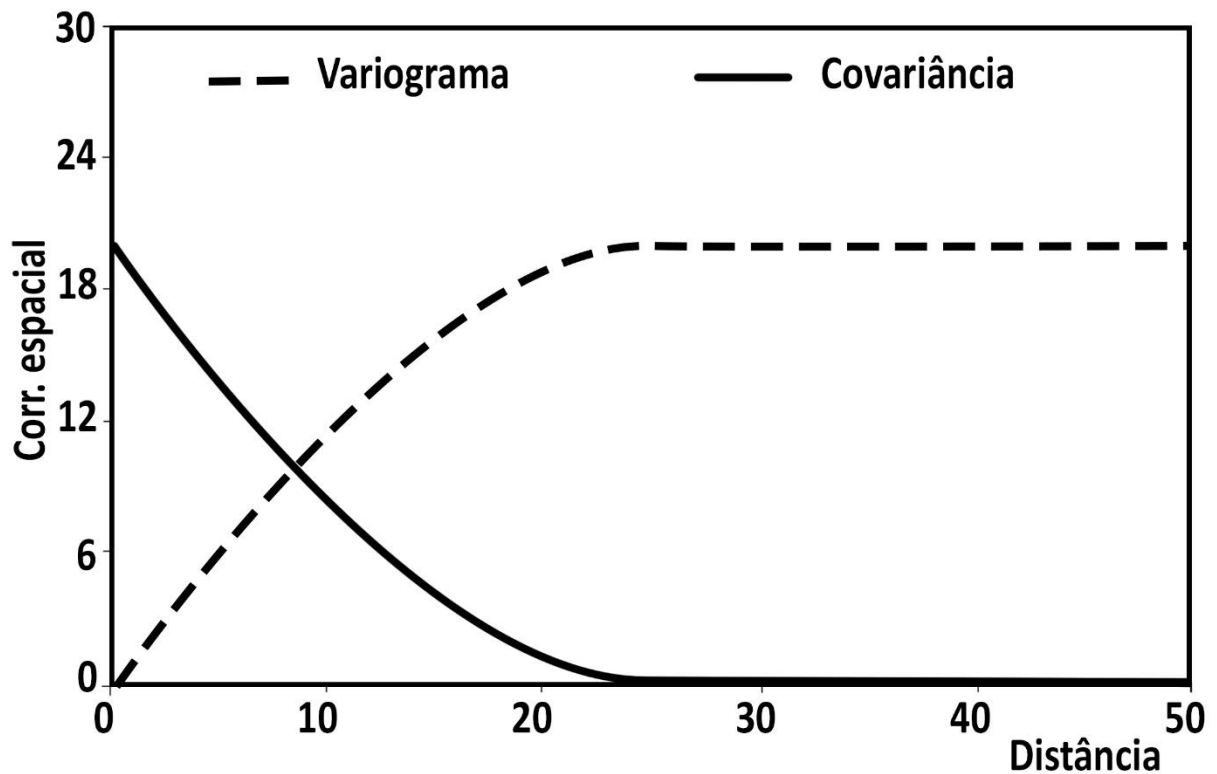
Simplificando e renomeando o primeiro membro da equação 17, obtém-se

$$\rho(h) = 1 - \frac{\gamma(h)}{C(0)} \quad (18)$$

Em que $\rho(h)$ é denominado de correlograma.

A relação entre o variograma e a correlograma, como se observa na Equação 16 e 18 está representada graficamente na Figura 1. Como observa-se, à medida que a distância aumenta, a tendência é que a variância também aumente, e, conseqüentemente, a covariância diminua.

Figura 1 - Gráficos da função variograma e correlograma



Fonte: Adaptado pelo autor de Yamato e Landim (2013, p. 36).

3.1.2. Parâmetros do Variograma

Antes de abordar os parâmetros que caracterizam um variograma, é necessário fazermos a distinção entre os tipos de comportamento dessa técnica geoestatística. O critério utilizado para diferenciação dos tipos de variograma é a presença ou ausência do patamar.

Conforme visto anteriormente, a modelagem do variograma consiste na determinação de um modelo para correlação espacial do fenômeno. A correlação espacial, por sua vez, é definida pela distância entre os pares de pontos em que a variável regionalizada assume diferentes valores (valores amostrados). Dessa forma, com aumento da distância é de se esperar que os valores assumidos pela variável regionalizada se tornem cada vez mais diferentes e, conseqüentemente, a variância relativa aos pares de pontos aumente. Esse regime de aumento da variância pode se dar indefinidamente ou estabilizar em torno de um valor máximo, denominado de patamar, configurando os dois tipos de variogramas (com e sem patamar) (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

A determinação do tipo de variograma é dependente de características implícitas do fenômeno em estudo e do processo de amostragem. Variogramas sem patamar ocorrem geralmente quando a amostragem é insuficiente, estando indisponível informação suficiente para modelar adequadamente o modelo de correlação espacial, ou o fenômeno apresenta tendências, que ocasiona um aumento da variância com a distância (OLEA, 1999).

Diante das características dos tipos de variogramas e considerando as hipóteses adotadas sobre o fenômeno espacial em estudo, o presente estudo objetiva modelar variogramas com patamar, e portanto, se limitará a abordar esse tipo.

A modelagem dos variogramas com patamar é realizada com a determinação de seus parâmetros, a saber (CAMARGO, 1997):

Alcance (a): distância a qual o variograma atinge variância máxima, indicando até onde as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente.

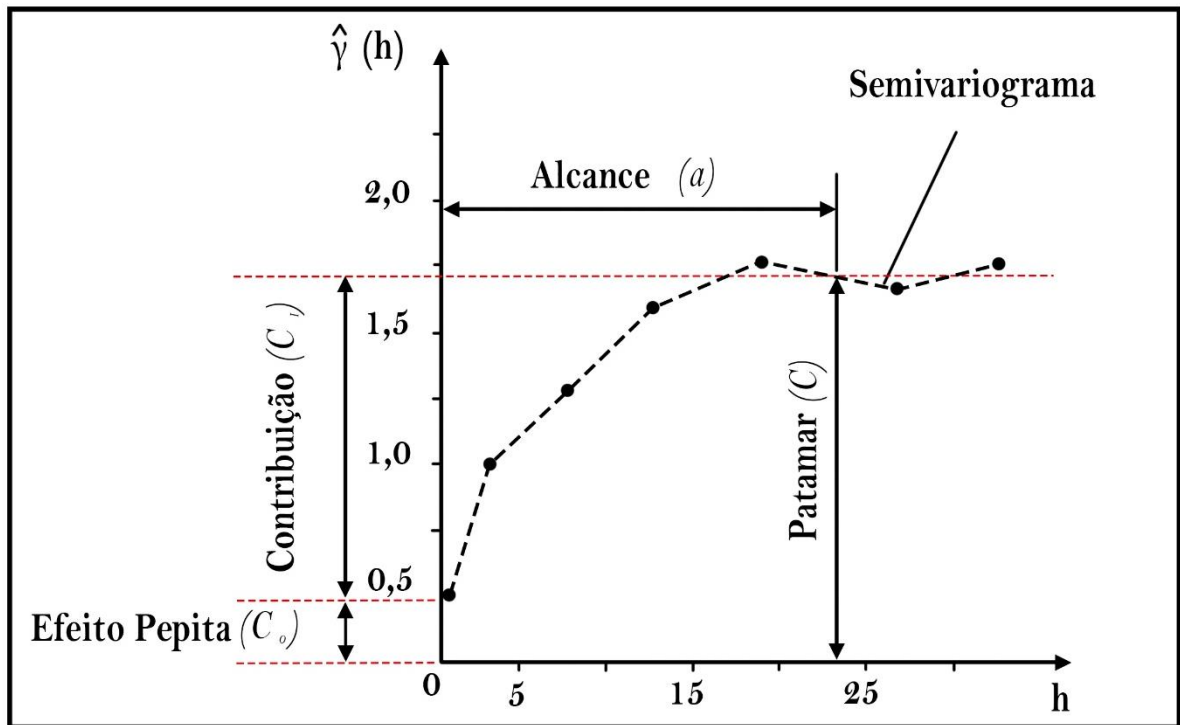
Patamar (C): valor máximo para o variograma, associado ao alcance. Após o patamar considera-se que as amostras não mais apresentam correlação espacial, haja visto que a variância se torna independente da distância.

Efeito pepita (C_0): descontinuidade do variograma próximo a origem. É resultado da variabilidade do fenômeno ou da escala de amostragem. Com relação a amostragem, ocorre para distâncias menores que a menor distância entre as amostras.

Contribuição (C_1): associado às distâncias que ocorrem a variância espacial, é obtido pela diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0).

A Figura 2 ilustra um exemplo de variograma com patamar e destaca os parâmetros que o caracteriza.

Figura 2 - Exemplo de variograma padrão

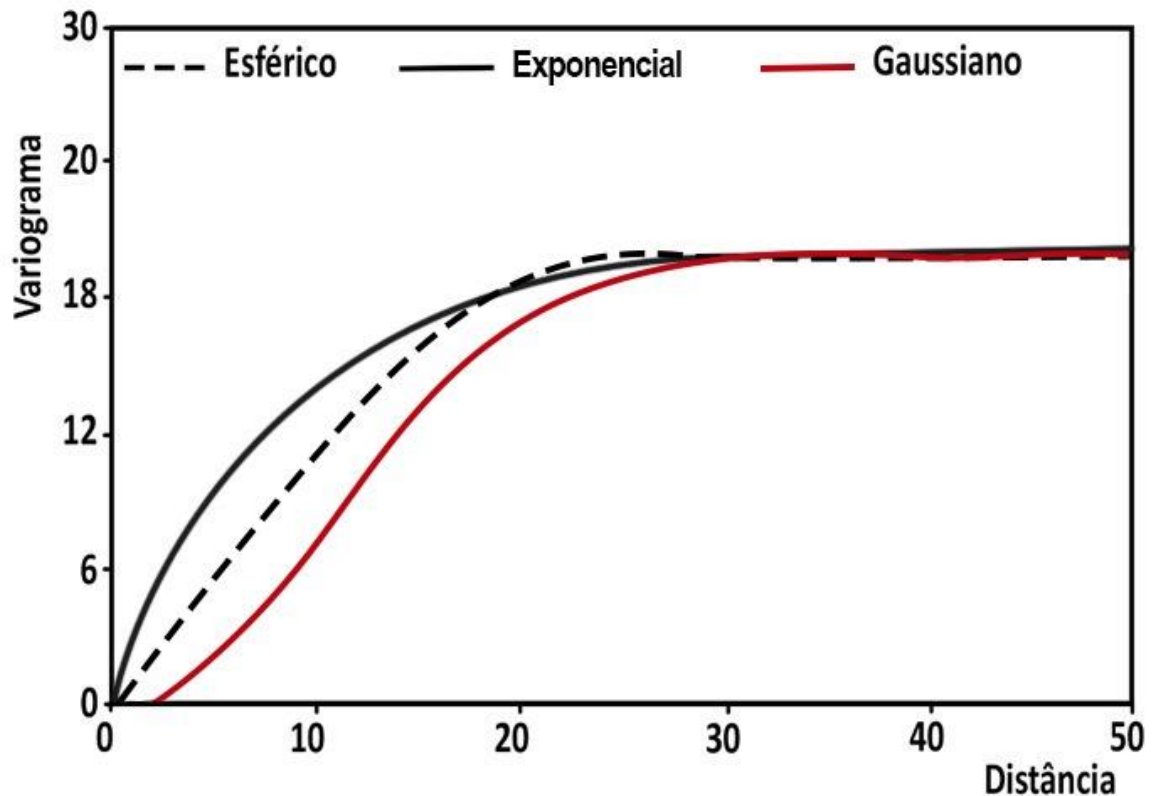


Fonte: Adaptado pelo autor de Camargo (1997, p. 13).

Existem uma grande variabilidade de modelos teóricos que ajustam variogramas com patamar a uma função específica, que poderá ser utilizada na interpolação para obtenção valores assumidos em pontos não amostrados. Embora existam diversos modelos, alguns poucos são suficientes para descrever a grande maioria dos fenômenos espaciais com sucesso. Dentre os mais usados destacam-se o modelo esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, pentaesférico, e efeito furo (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Neste trabalho serão utilizados para fins de comparação e seleção do melhor ajuste os modelos esférico e exponencial, cujas equações de definição estão destacadas na metodologia. A Figura 3 ilustra o comportamento gráfico ideal destes modelos, assim como do modelo gaussiano que não será adotado neste estudo.

Figura 3 - Gráficos dos modelos esférico, exponencia e gaussiano



Fonte: Adaptado pelo autor de Yamato e Landim (2013), p. 42.

3.1.3. Cálculo de variogramas experimentais

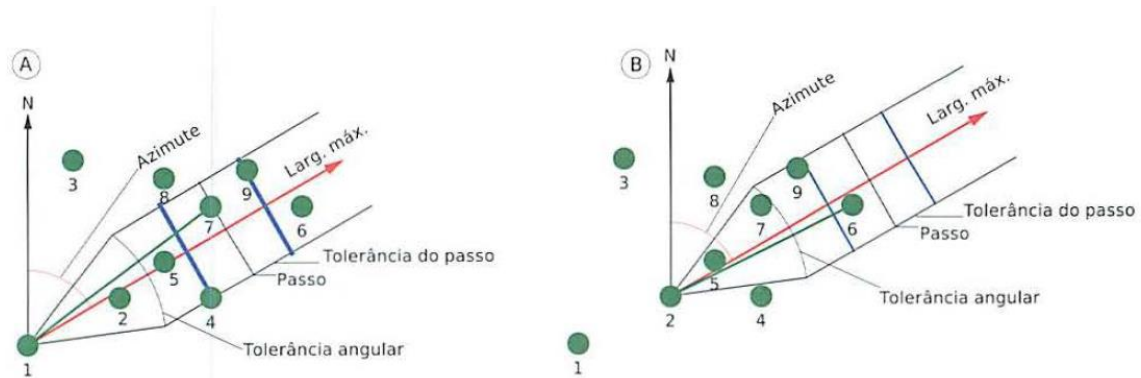
O cálculo de variogramas experimentais depende do tipo de distribuição espacial dos pontos amostrais, que ocorrem com distribuição regular ou irregular das amostras na região de estudo. A distribuição regular ocorre quando a amostragem é realizada sobre uma rede regular, com as amostras coletadas nos pontos de intersecção dos eixos. A ocorrência de distribuições irregulares normalmente é realizada quando a amostragem apresenta distribuição espacial dependentes de fatores externos, como obstáculos físicos (pontos de difícil acesso ou inacessíveis), ou outros aspectos da logística.

Para aplicações como o mapeamento de chuvas, a localização dos pontos de amostras é determinada pelas localizações geográficas das estações pluviométricas, que dificilmente respeitaria uma grade regular de distribuição espacial, sendo essas aplicações, portanto, enquadradas no caso de distribuição irregular de amostras.

Ao contrário do caso de distribuição regular das amostras, que para fins de cálculo são necessárias as definições apenas das distâncias entre pontos amostrados e direções, o cálculo de variogramas em caso de distribuição espacial irregular de amostras necessita de parâmetros

adicionais. Considerando um ponto em específico, define-se uma janela caracterizada por pela direção, tolerância angular, largura máxima, tamanho do passo (distância) e tolerância do passo (Figura 4) (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Figura 4 - Janela para cálculo de variograma utilizando com referência o (a) ponto 1 e o (b) ponto 2



Fonte: Yamato e Landim (2013), p. 36.

Foi considera na Equação 1 para o cálculo do variograma os pontos que se encontrarem dentro da janela. Feito isso para um ponto em específico, alterna-se o ponto considerado para construção da janela por outro, até que todo os pontos amostrados sejam considerados (Figura 5 B). Após a realização dos cálculos com todos os pontos com os parâmetros previamente escolhidos, deve-se variar o passo adotado para cada direção, para obter-se variogramas diferentes. A distância máxima que se pode adotar para o passo é denominada de campo geométrico e é calculado como a metade da distância em uma determinada direção (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978). Já a direção normalmente é calculada a cada 45° considerando o sentido horário, respeitando as convenções direcionais adotadas em geoestatística, em que 0° é localizado no Norte e 180° localizado no Sul (MONTEIRO, 2004). Devido a simetria apresentado, é necessário apenas considerar os valores de 0°a 180°.

Ao se variar os parâmetros, deve-se considerar o efeito sobre os variograma resultante. De forma geral, maiores números de pares representam variogramas estatisticamente mais significativos. No caso de variogramas, calculados em direções diferentes, apresentarem comportamentos diferentes, indica que o fenômeno em estudo é anisotrópico, ou seja, que não depende exclusivamente das distâncias, mas também da direção (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

3.2. ESTIMATIVA GEOESTATÍSTICAS

As estimativas geoestatísticas objetivam modelar o fenômeno espacial em estudo, determinando sua distribuição e variabilidade espacial. Em situações em que é possível modelar a correlação espacial através da determinação de um variograma, as estimativas realizadas apresentam vantagens sobre os demais métodos de interpolação, pois consideram os parâmetros ajustados do variograma (efeito pepita e amplitude) nas estimativas e torna viável a identificação da existência de anisotropia. Nesses casos é recorrente o emprego do processo geoestatístico denominado de krigagem (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

Não se pretende nesta seção detalhar os algoritmos matemáticos da krigagem, mas sim sua aplicação prática na interpolação para obtenção de mapas de eventos hidrológicos.

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a krigagem pode ser definida como o “processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica” (YAMAMOTO, LANDIM, 2013, p. 55). As principais diferenças entre as estimativas realizadas por meio da krigagem em comparação aos métodos tradicionais de estimativas, como a média ponderada, por exemplo, são a minimização da variância dos valores estimados e a não tendenciosidade das estimativas.

Segundo Monteiro (2004), as etapas incluídas em estudos que utilizam a técnica da krigagem são (a) análise exploratória dos dados, (b) análise estrutural (modelagem da estrutura de correlação espacial), e (c) interpolação estatística da superfície, procedimento que será adotado neste estudo.

No caso de existência de relação espacial, a interpolação será do tipo exibida na Equação 19.

$$Z^* = \sum P_i Z_i, \quad (19)$$

em que Z^* é o valor interpolado, P_i são os pesos e Z_i são valores amostrados considerados conhecidos.

Os diferentes métodos de interpolação diferenciam-se, portanto, na maneira em que se selecionam os valores Z_i conhecidos, e os pesos P_i atribuídos a estes na realização dos cálculos. Pode-se dividir os diferentes métodos de interpolação em dois modelos, o determinístico e o estocástico. Os modelos determinísticos levam em consideração para fins de cálculos critérios geométricos, como as distâncias. Este modelo não fornece meios para estimativa de incerteza,

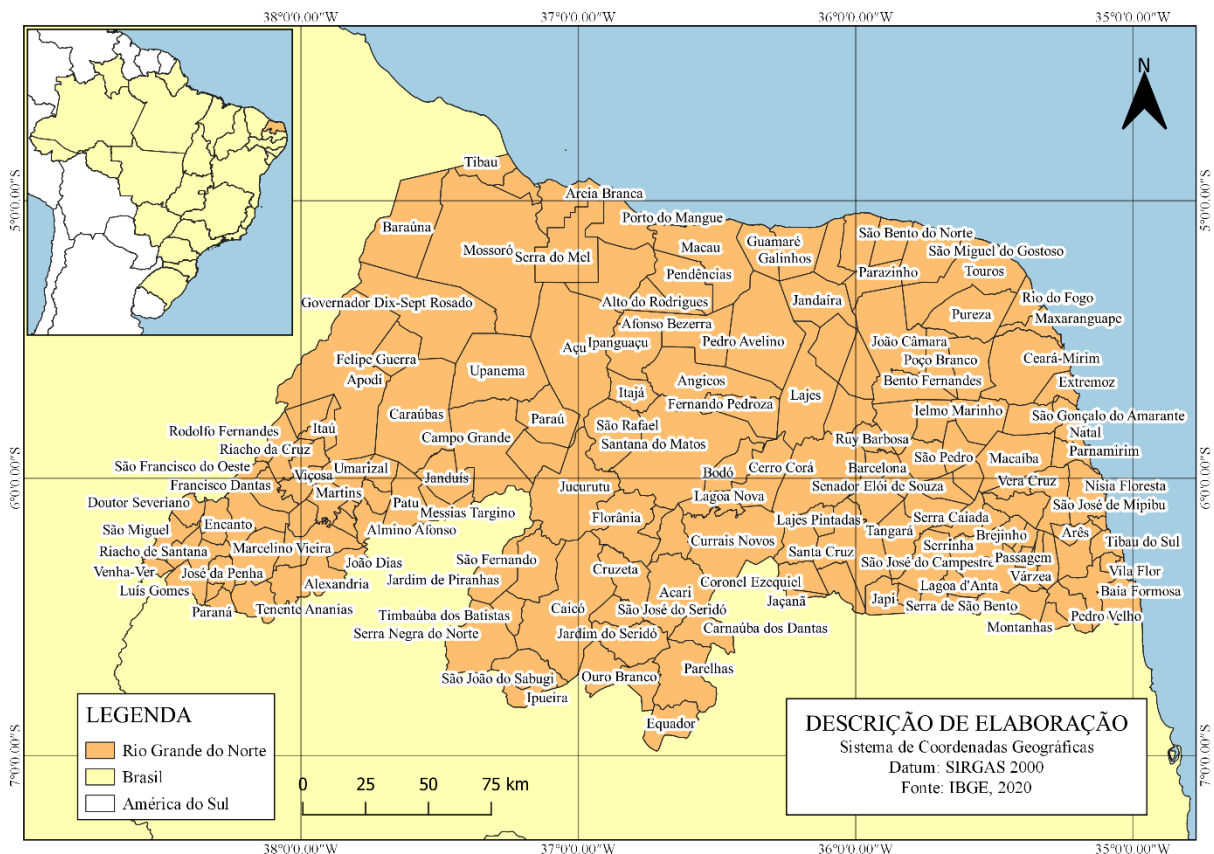
que se torna uma desvantagem frente aos modelos estocásticos. Os modelos estocásticos consideram os valores amostrados como resultado de processos aleatórios. Nesta categoria se enquadram os modelos geoestatísticos (YAMAMOTO, LANDIM, 2013).

4. METODOLOGIA

4.1. ÁREA DE ESTUDO

O estado do Rio Grande do Norte está localizado entre os paralelos $4^{\circ}49'53''$ e $6^{\circ}58'57''$ de latitude sul, e entre os meridianos $34^{\circ}58'06''$ e $38^{\circ}34'54''$ de longitude oeste. Possui área territorial de 52.809,602 km², ocupando a 22ª posição no comparativo entre os estados brasileiros nesse quesito. Compreende 167 municípios, 4 mesorregiões e 19 microrregiões (Figura 5). No censo de 2010, apresentou população de 3.168.027 pessoas, sendo estimada em 3.534.165 habitantes para o ano de 2020 (IBGE, 2020).

Figura 5- Mapa do Rio Grande do Norte



Fonte: Autor (2020).

Se tratando da dinâmica de chuvas no estado do Rio Grande do Norte, Diniz e Pereira (2015 *apud* MOLION; BERNARDO, 2002), classifica os mecanismos que produzem chuvas no nordeste do Brasil em mecanismos de grande escala, mesoescala e microescala. O autor afirma que o único mecanismo de grande escala atuante no Rio Grande do Norte é a Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT), responsável pela grande parte das precipitações do primeiro semestre do ano. Sobre o ZCIT o autor afirma: “Pode-se dizer que na ZCIT ocorre a confluência das Massas Equatoriais do Atlântico Norte e Sul, adentrando no Rio Grande do Norte uma massa de ar unificada denominada Massa Equatorial Atlântica” (DINIZ; PEREIRA, 2015, p. 497).

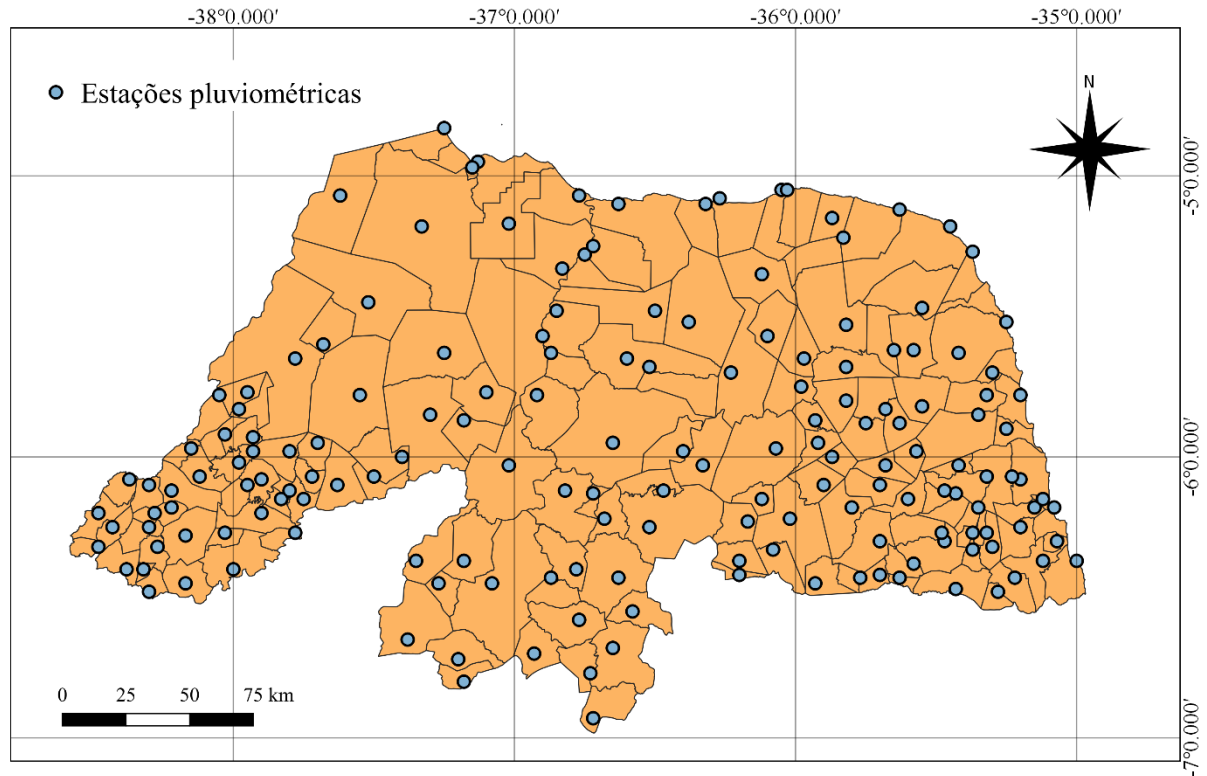
Para os sistemas atmosféricos de mesoescala se destacam as Perturbações Ondulatórias no Campo dos Alísios (POA), complexos convectivos, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e as brisas marinhas e terrestres. As POA são fenômenos provenientes do Leste que se direcionam ao litoral oriental do nordeste brasileiro ocasionando chuvas na região. Basicamente, são ondas provenientes da África ou do Atlântico que atingem a costa nordeste brasileira. Os complexos convectivos são formados devido a condições de temperatura, relevo, pressão, entre outros, que favorecem a formação de chuvas em determinadas localidades. São fenômenos considerados menos significativos, já que não contribuem com aumentos de precipitações em nenhuma área específica do estado. Os VCAN são formados no Atlântico e direcionados ao interior do Rio Grande do Norte. Podem provocar chuvas em toda a extensão do estado. As brisas marítimas são fenômenos que carregam umidade do oceano para o interior do estado. Já as brisas terrestres, são originadas no Rio Grande do Norte pelo vento vindas sul, sudeste ou sudoeste que afastam as nuvens em direção ao Atlântico (DINIZ; PEREIRA, 2015).

Considerando a microescala, as circulações orográficas atuam sobre a distribuição de chuvas pelo território do estado. Este fenômeno é controlado por características geográficas, como o relevo e a altitude.

4.2. DETERMINAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS PELO MÉTODO PROBABILÍSTICO DE GUMBEL

Para elaboração deste trabalho foram utilizados dados históricos de 167 postos pluviométricos da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), referentes ao período de 1964 a 2019 (Figura 6). Utilizou-se o método probabilístico de Gumbel, também chamado de distribuição assintótica dos extremos do tipo I de Fisher-Tippett, para estimativa das precipitações máximas, calculado em planilhas eletrônicas do Excel 2019.

Figura 6 - Distribuição dos postos pluviométricos no Rio Grande do Norte



Fonte: EMPARN, 2012.

De acordo com Melo e Silva (2013), uma das diferentes formas de se representar a Função Densidade de Probabilidade (FDP) da distribuição de Gumbel $f(x)$ é dada conforme Equação 20.

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\mu) - e^{-\alpha(x-\mu)}]} \quad (20)$$

em que $P(X)$ é a função cumulativa de probabilidade, α e β são os parâmetros da equação e X é a variável aleatória em mm.

Integrando a FDP (Equação 20) obtém-se a Equação 21, que representa a Função Cumulativa de Probabilidade (FCP).

$$P(X \leq x) = 1 - e^{[-e^{-\alpha(x-\mu)}]} \quad (21)$$

Considerando a definição de período de retorno TR , conforme Equação 22.

$$TR = \frac{1}{1 - P(X)} \quad (22)$$

Substituindo a Equação 22 na Equação 21, e isolando a variável aleatória X , resulta na expressão de estimativa para a precipitação máxima, conforme equação 23, que foram associadas com os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{-\ln[-\ln(1 - \frac{1}{TR})]}{\alpha} + \mu \quad (23)$$

Em que $P_{m\acute{a}x}$ é a precipitação máxima provável em mm e $\ln$ é o logaritmo neperiano.

Os parâmetros α e μ da Equação 21 e 23 podem ser determinados utilizando-se o método dos momentos, conforme as Equações 24 e 25.

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (24)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,451.S \quad (25)$$

Em que $\bar{X}$ e S são a média e o desvio padrão dos valores amostrados, respectivamente.

Determinados os $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes períodos de retorno, foi realizado o processo de desagregação das precipitações máximas, adotando-se para este procedimento, os coeficientes propostos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1986) exposto na Tabela 1, conforme realizado por Campos *et al.* (2014) e Santos *et al.* (2015). Os valores de precipitações máximas diárias anuais obtidos foram desagregados para intensidade, expressa em mm.h⁻¹ para análise exploratória e krigagem.

Tabela 1 – Coeficientes de desagregação de precipitações máximas

Relação entre alturas pluviométricas	Fator de desagregação
1 dia/24 horas	1,14
12 horas/24 horas	0,85
10 horas/24 horas	0,82
8 horas/24 horas	0,78
6 horas/24 horas	0,72

1 hora/24 horas	0,42
30 min/1 hora	0,74
25 min/30 min	0,91
20 min/30 min	0,81
15 min/30 min	0,70
10 min/30 min	0,54
5 min/30 min	0,34

Fonte: CETESB (1986)

Para verificação de aderência da distribuição teórica aos dados amostrais, foi realizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, calculado pelo método dos momentos, ao nível de 5% de significância. A Equação 27 exibe a fórmula do teste.

$$D_{m\acute{a}x} = M\acute{A}X|F'(X) - F(X)| \quad (27)$$

Em que $D_{m\acute{a}x}$ representa a diferença máxima absoluta entre a distribuição teórica de um modelo e a distribuição empírica, $F'(X)$ é a distribuição teórica e $F(X)$ é a distribuição empírica.

4.3. ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

A análise exploratória dos dados foi realizada com o emprego de estatística descritiva, em que se calculou para as diferentes durações e períodos de retorno os valores de mínimo, máximo, 1º quartil, 3º quartil, média, mediana, soma, variância, desvio padrão, assimetria e curtose. A identificação dos prováveis valores discrepantes (*outliers*) se deu com a determinação de boxplots, utilizando o software R versão 3.6.0 (2019). Para confirmação de discrepância dos prováveis outliers, realizou-se a análise espacial dos dados com a plotagem em mapas dos valores de precipitações máximas assumidos nos postos pluviométricos. Também buscou-se identificar valores anormais à distribuição normal dos dados, com o recurso de histogramas de frequências (NETO *et al.*, 2020).

4.4. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A análise geoestatística iniciou-se com o ajuste dos modelos de variograma experimentais. Os variogramas servem, em geoestatística, para evidenciar a relação espacial

(distribuição e variabilidade) apresentada pela variável em análise. Consiste na modelagem do fenômeno em estudo que apresente interdependência espacial entre os valores assumidos pela variável em pontos desconhecidos com os valores conhecidos em pontos vizinhos amostrados. Seu ajuste consiste em etapa essencial nesse tipo de estudo e baseia-se na determinação dos parâmetros dos modelos (efeito pepita, alcance e contribuição). Em busca do modelo que melhor se ajusta as condições da área de estudo, foram avaliados os modelos exponencial e esférico, descritos respectivamente pela Equações 28 e 29 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013):

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{\left(-\frac{h}{a}\right)} \right] \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ para } h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C, \text{ para } h \geq a \end{aligned} \quad (29)$$

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância, C_0 é o efeito pepita, C é denominada variância espacial, a é o alcance e h é a distância entre os pares de pontos.

Conforme realizado por Neto *et al.* (2020) e Santos (2015), calculou-se o grau de dependência espacial (GD) dos modelos de variograma, expresso na Equação 30.

$$GD = \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) 100 \quad (30)$$

A classificação do GD foi adotada por Cambardella *et al.* (1994), segundo a qual GD menores que 25% são considerados de fraca dependência espacial, entre 25 e 75% são considerados de moderada dependência espacial e maiores que 75% são considerados de forte dependência espacial.

Para seleção do modelo de variograma, foi adotado o Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA) (NETO *et al.*, 2020). O EMPA, expresso em porcentagem, foi calculado conforme Equação 31.

$$EMPA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Obs_i - Est_i}{Obs_i} \right| 100 \quad (31)$$

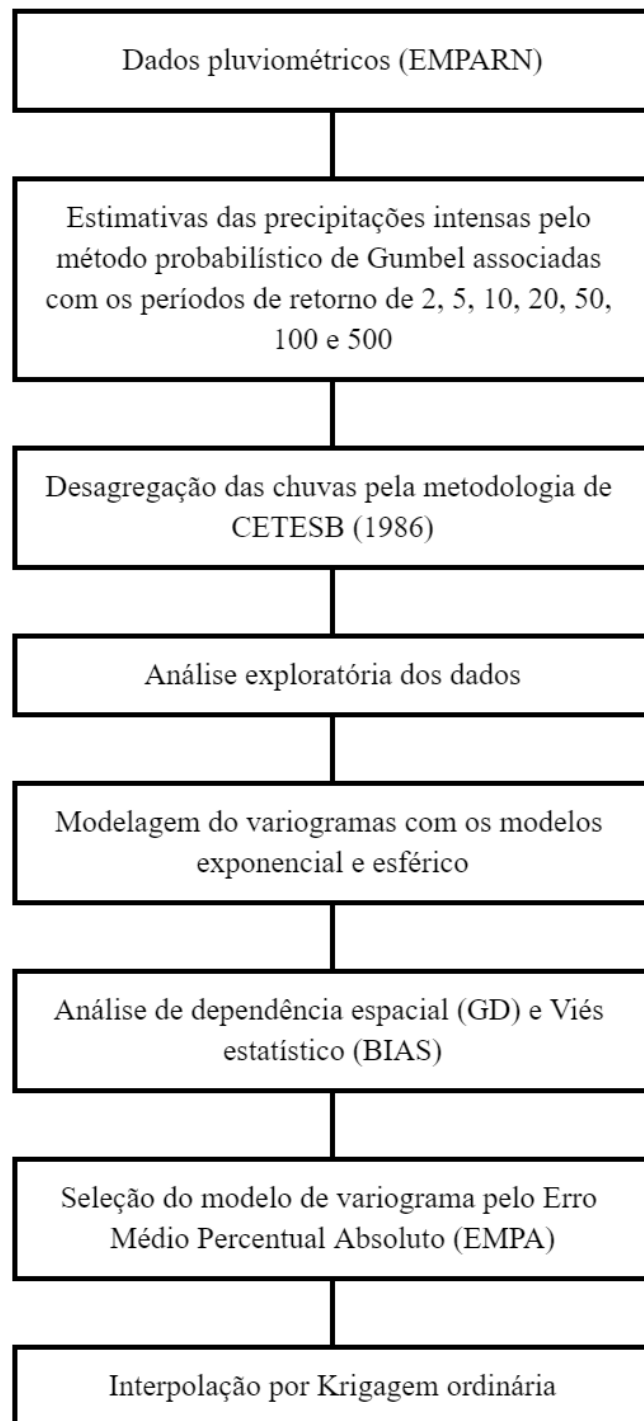
A fim de se verificar o erro sistemático do interpolador, foi calculado o viés estatístico (BIAS) como indicativo de estimativas superestimadas ou subestimadas. O BIAS corresponde à média dos valores estimados (Est_i) em relação aos valores observados (Obs_i), indicando o percentual de viés da variável (NETO *et al.*, 2020). A Equação 32 expressa o BIAS.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - Est_i)}{\sum_{i=1}^n (Obs_i)} 100 \quad (32)$$

Conhecidos os valores de chuvas intensas e na posse das coordenadas geográficas das estações pluviométricas e a distribuição e variabilidade espacial, expresso pelo ajuste do modelo de variograma selecionado, foi realizada a estimativa de valores de chuvas intensas em pontos não amostrados pelo interpolador geoestatístico de krigagem ordinária (MONTEIRO, 2004)

A Figura 7 exhibe as etapas da metodologia adotada na realização desse estudo.

Figura 7 – Etapas da Metodologia



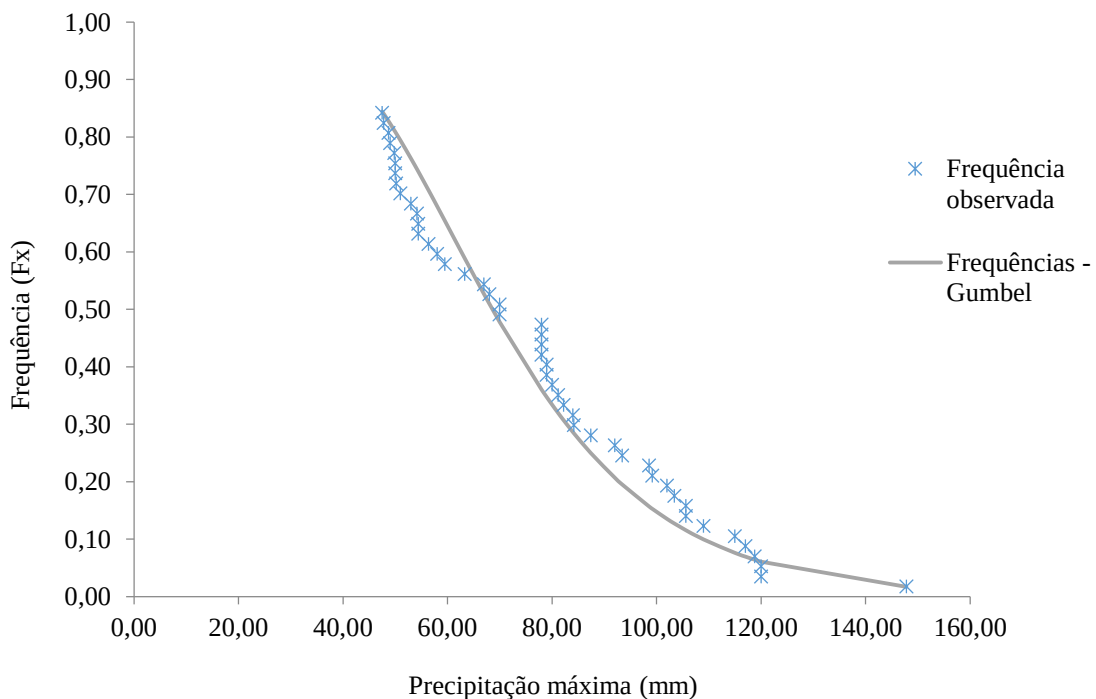
Fonte: Autor (2020)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A verificação de aderência estatística pelo teste de Kolmogorov-Smirnov para os valores de precipitações máximas diárias anuais, obtidos pela distribuição de Gumbel, foi considerada adequada, com o nível de significância de 5% para todos os 167 postos pluviométricos analisados, evidenciando a aplicabilidade da distribuição de Gumbel em estudos sobre precipitações para o Estado do Rio Grande do Norte, conforme se visualiza na Tabela 5, no Apêndice A. Resultados semelhantes de verificação de adequação da distribuição de Gumbel em estudos sobre precipitações foram obtidos por Santos (2015) e Medeiros, Lucio e Silva (2017), ao analisarem séries históricas para o Estado do Rio Grande do Norte, Neto *et al.* (2020), para o Estado do Tocantins, e Silva *et al.* (2002) para o Estado da Bahia.

Na Figura 8 é possível verificar a qualidade do ajuste da distribuição de Gumbel às frequências observadas para o município de Pau dos Ferros/RN. Resultados semelhantes foram obtidos para os demais postos pluviométricos.

Figura 8 - Frequências observadas e estimadas pela distribuição de Gumbel para o município de Pau dos Ferros/RN



Fonte: Autor (2020)

Com os dados obtidos pela distribuição estatística, foi realizada a análise exploratória dos dados para identificação e remoção dos valores discrepantes (outliers). Utilizando o software R, versão 4.0.3, foram geradas tabelas com parâmetros da estatística descritiva para todas as durações e períodos de retorno, conforme verifica-se na Tabela 2, referente a duração de 15 minutos e período de retorno de 2 anos. Os histogramas de frequências e boxplots gerados para essa avaliação constam no Apêndice B. Os valores de precipitações máximas desagregadas, submetidos a análise exploratória, foram plotados na área de estudo com auxílio do software QGIS 3.10.6 para análise espacial dos dados. Os valores indicados como outliers pela histogramas de frequência e pelos boxplots, foram comparados com os valores assumidos pelos postos vizinhos próximos. Valores que foram considerados discrepantes com a estrutura de dependência espacial observada foram removidos.

Tabela 2 - Estatística descritiva para duração de 15 minutos e TR = 2 anos

Nº de observações	167,000000
Valores ausentes (NAs)	0,0000
Mínimo	21,3509
Máximo	100,2432
1º Quartil	55,6195
3º Quartil	71,2075
Média	63,4485
Mediana	61,4343
Soma	10595,8964
Variância	158,4332
Desvio padrão	12,5870
Assimetria	0,2965
Curtose	0,4604

Fonte: Autor (2020)

Os valores dos parâmetros dos modelos de variograma exponencial e esféricos para as durações de 15, 30 e 60 minutos e tempo de recorrência de 2, 5, 10, 20, 50 100 e 500 anos, juntamente, com os valores de dependência espacial (GD), Erro Médio Percentual Absoluto (EMPA) e viés estatístico (BIAS), estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros dos modelos de variograma exponencial e esférico (C_0 , C_1 e A), grau de dependência espacial (GD), viés estatístico (BIAS) e erro médio percentual absoluto (EMPA), ajustados para as durações e períodos de retorno avaliados

Duração (min)	Modelo	GD (%)	C_0	C_1	A (km)	BIAS (%)	EMPA (%)
TR = 2 anos							
15	Exponencial	64,05	53,37	95,07	60,40	-0,11	9,35
	Esférico	57,70	55,33	75,46	94,32	-0,13	9,63
30	Exponencial	58,76	37,80	53,84	67,56	-0,06	10,06
	Esférico	50,63	37,14	38,08	70,28	-0,05	9,96
60	Exponencial	67,45	13,42	27,82	61,00	-0,09	9,27
	Esférico	61,33	13,44	21,32	81,27	-0,11	9,38
TR = 5 anos							
15	Exponencial	43,87	113,48	145,17	42,06	-0,20	9,44
	Esférico	50,51	120,02	122,47	78,78	-0,14	9,83
30	Exponencial	57,36	59,89	80,55	46,22	-0,14	9,86
	Esférico	51,80	62,75	67,43	82,50	-0,05	9,53
60	Exponencial	56,22	26,34	33,82	41,96	-0,07	9,45
	Esférico	50,58	27,88	28,54	78,70	-0,20	9,84
TR = 10 anos							
15	Exponencial	59,39	153,67	224,76	38,27	-0,24	9,27
	Esférico	53,49	166,33	191,27	75,76	-0,10	9,67
30	Exponencial	56,18	84,34	108,15	41,17	-0,14	9,55
	Esférico	50,64	89,32	91,63	77,89	-0,09	9,95
60	Exponencial	56,48	36,10	46,85	36,95	-0,21	9,28
	Esférico	50,70	38,82	39,92	73,63	-0,06	9,74
TR = 20 anos							
15	Exponencial	58,85	204,88	292,98	35,30	-0,20	9,19
	Esférico	52,71	224,28	250,03	72,76	-0,12	9,76
30	Exponencial	56,16	114,63	146,81	37,53	-0,14	9,49
	Esférico	50,57	122,48	125,28	73,72	-0,11	9,98
60	Exponencial	58,91	47,65	68,32	35,41	-0,09	9,20
	Esférico	52,80	52,08	58,27	72,52	-0,08	9,77
TR = 50 anos							
15	Exponencial	54,47	292,37	349,75	31,34	-0,13	9,39
	Esférico	48,17	320,94	298,32	68,20	36,98	35,76
30	Exponencial	57,86	149,30	204,97	33,60	-0,21	9,31
	Esférico	51,68	163,65	175,06	70,20	-0,13	9,85
60	Exponencial	58,52	66,05	93,20	32,83	-0,23	9,17
	Esférico	52,11	73,08	79,52	69,88	-0,11	9,79
TR = 100 anos							
15	Exponencial	58,23	353,45	492,80	31,56	-0,20	9,22
	Esférico	51,62	393,69	420,14	68,63	-0,14	9,88
30	Exponencial	58,03	180,77	249,99	31,61	-0,12	9,23
	Esférico	51,46	201,04	213,15	68,59	-0,25	9,88

60	Exponencial	58,34	82,09	114,97	31,53	-0,11	9,29
	Esférico	51,74	91,45	98,03	68,47	-0,15	9,85
TR = 500 anos							
15	Exponencial	61,24	497,31	785,66	19,78	-0,04	9,18
	Esférico	49,58	640,49	629,93	55,55	-0,27	10,35
30	Exponencial	54,40	301,58	359,83	31,89	-0,19	9,64
	Esférico	48,19	329,74	306,74	68,42	-0,12	10,25
60	Exponencial	58,13	126,39	175,48	29,52	-0,17	9,25
	Esférico	51,16	142,40	149,17	66,06	-0,17	9,97

Fonte: Autor (2020).

* Modelo considerado de melhor ajuste.

Como se pode observar na Tabela 3 o modelo exponencial foi o que apresentou menores erros médio percentual absoluto em todos os casos analisados, sendo esse modelo selecionado para geração de mapas de chuvas intensas. Conforme observa-se na Tabela 3, com exceção dos valores estimado para a duração de 15 minutos e TR de 50 anos para o modelo esférico, que se apresentou excessivamente grande, indicando provável erro de interpolação para este caso, os valores de GD, BIAS e EMPA apresentam-se relativamente próximos, independentemente da duração e TR avaliados. Segundo Neto *et al.* (2020), que verificou situação semelhante em seu estudo, esse aspecto pode ser explicado pela necessidade de adoção da metodologia de desagregação de chuvas, pelo fato do banco de dados disponível para o Estado do Rio Grande do Norte contemplarem somente postos pluviométricos. Esta metodologia utiliza valores de precipitação diárias máximas anuais para obtenção de chuvas intensas associados a um determinado período de retorno pela aplicação de uma distribuição de probabilidades. A partir desses valores, calcula-se as precipitações intensas para menores durações com mesmo período de retorno multiplicando-se os valores obtidos por coeficientes de desagregação preestabelecidos para a área de estudo, determinados em estudos que, no geral, utilizem dados pluviográficos. Segundo Neto *et al.* (2020), esse procedimento explica a proximidade nos valores de GD, BIAS e EMPA.

Uma ressalva importante é que os coeficientes de desagregação utilizados no presente estudo foram obtidos no trabalho desenvolvido pela CETESB no ano de 1986, para o estado de São Paulo. Como comentado, o ideal é a utilização de coeficientes determinados para a região de estudo, porém, pela ausência de estudos que estimem estes coeficientes para o estado do Rio Grande do Norte, foi necessário a emprego dos coeficientes propostos pela CETESB, já consolidados na literatura.

Com relação a classificação proposta por Cambardella *et al.* (1994) para o GD, observa-se na Tabela 3, que para as situações analisadas, o grau de dependência espacial foi considerado “moderado”. Os BIAS observados, apresentaram valores e inferiores em módulo a 0,3% para todos os casos analisados, que indica erro sistemático do interpolador com tendência pequena.

Os variogramas ajustados pelo modelo exponencial constam no Apêndice C. O parâmetro alcance (A) exibido na Tabela 3, evidencia a existência de estrutura de dependência espacial, em que a variância entre dois pontos tende a aumentar com a distância relativa até alcançar um nível máximo, denominado patamar, associado com o alcance.

No Apêndice D são apresentados os mapas de chuvas intensas, gerados com o modelo de variograma exponencial, considerando as durações de 15, 30 e 60 minutos, associados aos períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, obtidos por krigagem ordinária. A Tabela 4 apresenta os valores mínimos e máximos verificados nos mapas para cada caso analisado.

Tabela 4 - Valores mínimos e máximos de intensidade pluviométrica estimados pelo modelo exponencial, obtidos pela krigagem ordinária para as durações e TR analisados

Períodos de retorno (anos)		Durações (min)		
		15	30	60
TR = 2	Valor mínimo	49,20	35,66	23,37
	Valor máximo	82,31	61,37	42,30
TR = 5	Valor mínimo	72,62	52,18	35,03
	Valor máximo	115,03	85,91	55,55
TR = 10	Valor mínimo	85,49	61,90	41,89
	Valor máximo	144,33	102,03	66,94
TR = 20	Valor mínimo	98,72	70,55	47,31
	Valor máximo	167,09	118,21	80,26
TR = 50	Valor mínimo	115,43	82,29	55,83
	Valor máximo	185,77	139,58	93,98
TR = 100	Valor mínimo	126,59	90,81	60,93
	Valor máximo	216,54	154,58	104,16

TR = 500	Valor mínimo	147,05	109,31	73,28
	Valor máximo	265,24	187,54	127,78

Fonte: Autor (2020).

Como observa-se na Tabela 4, os valores de chuvas intensas de curta duração (15 minutos) foram as que se apresentaram as mais altas intensidades para o estado. Analisando especificamente a duração de precipitação de 15 minutos, os maiores valores foram verificados para os períodos de retorno mais elevados (TR = 100 e TR = 500 anos), com 126,54 e 265,24 mm.h⁻¹, respectivamente.

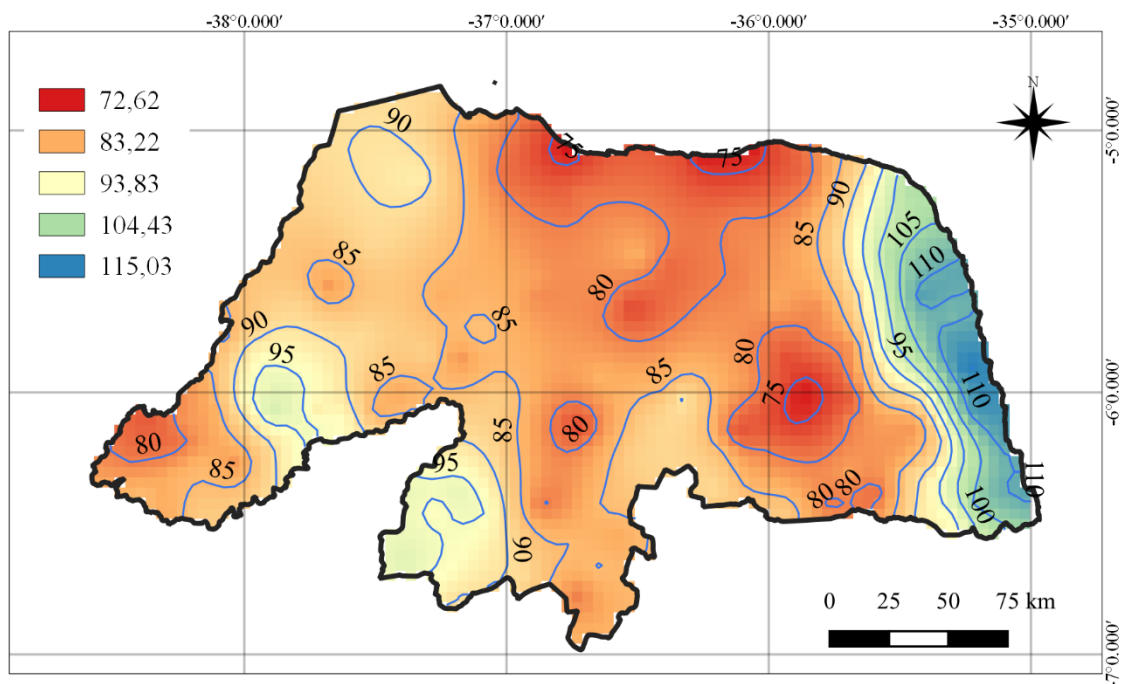
Resultados semelhantes foram verificados por Santos (2015) ao analisar a série histórica de 1964 a 2013 de precipitações máximas anuais para o estado do Rio Grande do Norte, onde verificou-se que as maiores precipitações estão associadas aos maiores períodos de retorno e menor duração. Apesar desta verificação, a magnitude do valor verificado por Santos (2015) referentes ao período de retorno de 500 anos, apresentou elevados em comparação aos valores obtidos neste trabalho, onde o autor obteve o valor máximo de 511 mm.h⁻¹. A razão provável para essa diferença pode ser motivada pela diferente metodologia adotada por Santos (2015) e o caráter subjetivo de avaliação de outliers na análise exploratória, em especial ao que se refere a etapa de análise espacial da variável em análise.

Comparando os valores verificados para o Estado do Rio Grande do Norte (duração de 15 minutos e TR iguais a 10, 50 e 100 anos), com os valores obtidos por Neto *et al.* (2020) para o Estado do Tocantins, para os mesmos períodos de retorno e duração de 10 minutos, o Rio Grande do Norte apresenta intensidades significativamente menores, com as faixas de valores de 85,49 a 144,33, 115,43 a 185,77 e 126,59 a 216,54 mm.h⁻¹, contra intensidade de 117 a 207, 146 a 299 e 157 a 338 mm.h⁻¹ para o Tocantins, considerando os respectivos TR.

Considerando a duração intermediária de 30 minutos, avaliando-se o período de retorno de 100 anos, verifica-se para o Rio Grande do Norte intensidades situadas entre 90,81 e 154,58 mm.h⁻¹, valores estes, inferiores aos verificados para o Tocantins, com intensidade entre 139 e 337 mm.h⁻¹ (NETO *et al.*, 2020), e comparáveis aos verificados para o estado de Minas Gerais, com intensidades de 91,7 a 162,4 mm.h⁻¹, estado situados nas regiões norte e sudeste, respectivamente (MELO; VIOLA, 2013). Com relação a maior duração avaliada (60 minutos), novamente, os resultados foram semelhantes aos verificados por Santos (2015), diferenciando-se apenas a magnitude do valor (60 a 240 mm.h⁻¹).

Com relação a distribuição espacial de chuvas intensas, analisando os mapas presentes no Apêndice D, é possível identificar que para todos os casos analisados a região litorânea oriental foi a que apresentou maiores valores de intensidades pluviométrica. A Figura 9 exemplifica a distribuição espacial de intensidades, considerando duração de 15 minutos e período de retorno de 5 anos. Ao analisar as unidades da paisagem do Rio Grande do Norte, Amorim, Junior e Poster (2018) identifica a referida região como litoral oriental húmido. Os autores corroboram ao afirmar que a região se destaca das proximidades pelas condições climáticas, em especial, pelo volume de precipitação. Segundo Machado *et al.*, (2009), as chuvas são influenciadas pelo fenômeno de brisa marítimas, intensificadas pelas Ondas de Leste causadas pelo anticiclone localizado no Atlântico Sul. Já Diniz e Pereira (2015) destacam a influência das brisas terrestres para o aumento das precipitações no litoral oriental, assim como, pela maritimidade e posição frontal a direção de migração de sistemas causadores de chuvas.

Figura 9 - Mapa de chuva intensa para o Rio Grande do Norte, com série histórica de dados de 1964 a 2019, considerando a duração de 15 minutos, associado ao período de retorno de 5 anos



Fonte: Autor (2020)

Em contrapartida, nos mapas de chuvas intensas que o litoral norte potiguar apresentou valores de intensidade significativamente reduzidos se comparado com o litoral oriental, e até com outras regiões do estado. Amorim, Junior e Poster (2018) classifica a paisagem dessa

região como Litoral setentrional (seco). Segundo o autor, a região se destaca pelo baixo volume de precipitações, com destaque para o município de Mossoró, com volume médio de precipitações anuais abaixo de 700 mm. As causas para esse regime de precipitações estão relacionadas com a circulação atmosférica regional e global, que ocasiona movimentos descentes de ar, aumentando a pressão em níveis específicos da atmosfera, que desfavorecem a criação de nuvens. Diniz e Pereira (2015) afirmam que brisas terrestres provenientes do sul, sudeste e sudoeste são responsáveis pelo afastamento das nuvens em direção ao Atlântico, tornando o litoral setentrional o trecho mais seco da costa brasileira.

Outra região com destaque para baixas intensidades de chuva, verificadas na Figura 9 e nos mapas interpolados no Apêndice D, é a região de transição do litoral oriental húmido para o interior a oeste do estado. Essa região, identificada como agreste, caracteriza-se em termos climáticos pela diminuição gradativa das precipitações, que refletem sobre o porte da vegetação local, passando a apresentar predominância arbustiva e o cherofilismo (AMORIM; JUNIOR; POSTER, 2018).

É interessante observar na Figura 9 e nos demais mapas de chuvas intensas, presentes no Apêndice D, a variação de intensidades pluviométricas existentes entre regiões próximas no sudoeste potiguar. Amorim, Junior e Poster (2018) classifica as paisagens das respectivas regiões como compartimentos elevados e depressões sertanejas. A paisagem dos compartimentos elevados é controlada pela característica de relevo elevado que destoam da depressão a sua volta. Nela se encontram os aglomerados serranos de Portalegre, Martins, São Miguel e Luiz Gomes. Tratando-se de clima, as paisagens serranas se destacam no sudoeste potiguar pela melhor distribuição de precipitação e temperatura amena. Segundo Diniz e Pereira (2015), as circulações orográficas estão associados com esse quadro, em que os autores afirmam que “a orografia tem papel preponderante nas taxas médias de precipitação” no estado, que corroboram com as afirmações de Amorim, Junior e Poster (2018).

6. CONCLUSÕES

A distribuição probabilística de Gumbel foi considerada adequada para estimativas de precipitações intensas para o estado do Rio grande do Norte, conforme teste de aderência de Kolmogorov-Sminorv. Com a modelagem da estrutura de correlação espacial verificou-se que o modelo de variograma exponencial foi considerado superior ao modelo esférico, como indicado pelo EMPA. O GD foi classificado como moderado para todas os casos analisados. O Bias indicou a tendência de pequena subestimativa do interpolador, com valores inferiores a 0,3%.

As maiores intensidade de chuvas foram verificadas para a menor duração (15 minutos), como é esperado em previsões sobre precipitações. Considerando a duração intermediária de 30 minutos, o Rio Grande do Norte apresentou menores valores de intensidade se comparado com o Tocantins, porém, obteve valores próximos ao verificados para o estado de Minas Gerais.

A distribuição espacial das intensidades indicou variabilidade significativa para as diferentes regiões do estado. O litoral oriental foi o que apresentou maiores intensidades em todos os casos analisados. Já o litoral setentrional (seco) juntamente do agreste e as depressões sertanejas, foram verificadas como as regiões de menores intensidades pluviométricas.

Esperasse que o presente trabalho seja de utilidade para a gestão pública do Rio Grande do Norte no que se referente as tomadas de decisões baseadas no conhecimento de intensidade e distribuição espacial das chuvas, assim como, para o dimensionamento de obras hidráulicas e aplicação em setores econômica que necessitam conhecer sobre o regime de precipitações para o melhor desenvolvimento de suas atividades.

Como sugestão para futuros trabalhos cita-se estudos sobre identificação de áreas vulneráveis ao fenômeno de erosividade do solo pela ação das chuvas e áreas de estresse hídrico.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. DE F.; JUNIOR, R. N.; POSTER, J. F. F. Paisagens do Rio Grande do Norte: uma introdução às diversidades regionais e marcas das ações geográficas no espaço potiguar. **Confins**, n. 34, p. 1–16, 2018.
- BORTOLUZZI, D. D.; PRADO, G.; HARA, A. T.; SOUZA, A. C. S. Precipitação mensal provável no noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 2, p. 3314–3326, 28 maio 2019.
- CAMARGO, E. C. G. **Desenvolvimento, implementação e testes de procedimentos geostatísticos (krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (Spring)**. 1997. 124 f. Dissertação (mestrado) - Curso de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 1997.
- CAMBARDELLA, C.; MOORMAN, T.; PARKIN, T.; KARLEN, D.; NOVAK, J.; TURCO, R.; KONOPKA, A. Fieldscale variability of soil properties in central iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501- 1511, 1994.
- CAMPOS, A. R.; SANTOS, G. G.; SILVA, J. B. L.; IRENE FILHO; J.; LOURA; D.S. Equações de intensidade-duração-frequência de chuvas para o estado do Piauí. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 3, p. 488-498, 2014.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, Drenagem Urbana. Manual De Projeto. 1 Ed. São Paulo. DAEE/CETESB, 1986, 466P.
- DINIZ, M. T. M.; PEREIRA, V. H. C. Climatologia do estado do Rio Grande do Norte, Brasil: sistemas atmosféricos atuantes e mapeamento de tipos de clima. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 35, n. 3, 2015.
- EMPARN - Setor de Meteorologia da EMPARN: 20 anos de serviços prestados à sociedade norterio-grandense, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística, 2017. Cidades, dados infográficos do estado do Rio Grande do Norte. Disponível:

<[HTTPS://CIDADES.IBGE.GOV.BR/BRASIL/RN/PANORAMA](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/panorama)> Acesso: 16 set. 2020.

JOURNEL, A. G.; HULBREGTS, J. C. H. **Mining geostatistics**. New York: Academic Press, 1978. 600p.

MACHADO, L. A. T.; FERREIRA, N. J.; LAURENT, H.; DIEDHIOU, A. Distúrbios ondulatórios de leste. IN: CAVALCANTI, I. F. A. (ORG.) **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. **Paris school of mines publication**, p. 211, 1971.

MATHERON, G. 1970. La théorie des variables regionalisées, et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de fontainebleau. **École nationale supérieure des minas de Paris**, fascicule 5.

MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S.; DRUCK, S. Análise espacial de dados geográficos. **Brasília: EMBRAPA**, 2004.

MEDEIROS, F. J.; LUCIO, P. S.; SILVA, H. J. F. Análise de métodos de krigagem na estimativa da precipitação no estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p. 1668–1676, 2017.

MELLO, C. R.; SILVA, A. Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. **Lavras: UFLA**, p. 455, 2013.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v. 37, p. 37-44, 2013.

NETO, V. L. S.; VIOLO, M. R.; MELLO, C. R.; ALVES, M. V. G.; SILVA, D. D.; PEREIRA, S. B. Heavy rainfall mapping for Tocantins State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 1–11, 2020.

OLEA, R. A. **Geostatistics for engineers and earth scientists**. Kluwer Academic Publishers, p. 303, 1999.

JÚNIOR, J. P. S. Nova delimitação do Semi-árido brasileiro. **Biblioteca digital da Câmara dos Deputados**. Centro de Documentação e Informação. Brasília, DF, 2007.

SANTOS, W. O. **Máximas intensidades e índices de erosividade de chuvas para o Rio Grande do Norte**. 2015. 125 F. Tese (Doutorado) - Curso de Manejo de Solo e Água, Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

SILVA, D. D.; GOMES FILHO, R. R.; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; NOVAES, L. F. Chuvas intensas no estado da Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 362–367, 2002.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. BARBOSA. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina De Textos, 2013. 215 p.

APÊNDICE A – Resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov para os dados de precipitação máxima diária anual para o Rio Grande do Norte.

Tabela 5 - Quantificação do $D_{\text{máx}}$ calculados e $D_{\text{máx}}$. tabulados para o teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância

Cidade	$D_{\text{máx}}$ cal.	$D_{\text{máx}}$ tab. (5 %)	Cidade	$D_{\text{máx}}$ cal.	$D_{\text{máx}}$ tab. (5 %)	Cidade	$D_{\text{máx}}$ cal.	$D_{\text{máx}}$ tab. (5 %)
Acari*	0,077	0,182	Jandaíra*	0,099	0,183	Rafael Godeiro*	0,086	0,185
Afonso Bezerra*	0,110	0,196	Janduis*	0,078	0,182	Riacho da Cruz*	0,059	0,182
Água Nova*	0,069	0,182	Japi*	0,071	0,185	Riacho de Santana*	0,046	0,187
Alexandria*	0,048	0,183	Jardim de Angicos*	0,112	0,182	Riachuelo*	0,068	0,196
Almino Afonso*	0,070	0,196	Jardim de Piranhas*	0,045	0,185	Rio do Fogo*	0,054	0,196
Alto do Rodrigues*	0,134	0,182	Jardim do Seridó*	0,090	0,182	Rodolfo Fernandes*	0,059	0,182
Angicos*	0,055	0,182	João Câmara*	0,074	0,182	Ruy Barbosa*	0,069	0,182
Antônio Martins*	0,062	0,190	João Dias*	0,053	0,192	Santa Cruz*	0,052	0,182
Apodi*	0,051	0,182	José da Penha*	0,082	0,183	Santa Maria*	0,086	0,182
Areia Branca*	0,083	0,182	Jucurutu*	0,075	0,182	Santana do Matos*	0,094	0,182
Ares*	0,100	0,190	Jundiá*	0,119	0,189	Santana do Seridó*	0,080	0,182
Assú*	0,086	0,182	Lagoa D'anta*	0,130	0,196	Santo Antônio*	0,053	0,182

Baia Formosa*	0,083	0,182	Lagoa de Pedras*	0,074	0,182	Santo Bento do Trairí*	0,089	0,183
Baraúna*	0,095	0,182	Lagoa de Velhos*	0,120	0,190	São Bento do Norte*	0,080	0,182
Barcelona*	0,097	0,182	Lagoa Nova*	0,041	0,183	São Fernando*	0,105	0,182
Bento Fernandes*	0,093	0,182	Lagoa Salgada*	0,102	0,192	São Francisco do Oeste*	0,128	0,182
Boa Saúde*	0,108	0,182	Lajes*	0,068	0,182	São Gonçalo do Amarante*	0,056	0,182
Bodó*	0,053	0,182	Lajes Pintadas*	0,063	0,187	São João do Sabugi*	0,071	0,182
Bom Jesus*	0,126	0,182	Lucrecia*	0,098	0,183	São José de Mipibu*	0,116	0,185
Brejinho*	0,130	0,196	Luís Gomes*	0,092	0,183	São José do Campestre*	0,116	0,196
Caiçara do Norte*	0,080	0,192	Macaíba*	0,055	0,182	São José do Seridó*	0,089	0,182
Caiçara do Rio dos Ventos*	0,094	0,182	Macau*	0,045	0,189	São Miguel*	0,087	0,183
Caicó*	0,108	0,182	Major Sales*	0,091	0,183	São Miguel do Gostoso*	0,107	0,196
Campo Grande*	0,049	0,182	Marcelino Vieira*	0,058	0,185	São Paulo do Potengi*	0,063	0,182
Campo Redondo*	0,063	0,183	Martins*	0,088	0,182	São Pedro*	0,090	0,182
Canguaretama*	0,079	0,182	Maxaranguape*	0,078	0,182	São Rafael*	0,111	0,182
Caraúbas*	0,066	0,182	Messias Targino*	0,066	0,182	São Tomé*	0,066	0,187
Carnaúba dos Dantas*	0,069	0,182	Montanhas*	0,056	0,182	São Vicente*	0,084	0,182

Carnaubais*	0,075	0,182	Monte Alegre*	0,091	0,182	Senador Elói de Souza*	0,090	0,192
Ceará Mirim*	0,071	0,182	Monte das Gameleiras*	0,090	0,183	Senador Georgino Avelino*	0,076	0,183
Cerro Corá*	0,064	0,182	Mossoró*	0,067	0,182	Serra Caiada*	0,086	0,190
Coronel Ezequiel*	0,046	0,182	Natal*	0,078	0,182	Serra de São Bento*	0,073	0,192
Coronel João Pessoa*	0,080	0,182	Nísia Floresta*	0,102	0,183	Serra do Mel*	0,094	0,182
Cruzeta*	0,054	0,182	Nova Cruz*	0,109	0,182	Serra Negra do Norte*	0,102	0,189
Currais Novos*	0,042	0,187	Olho D'água dos Borges*	0,099	0,182	Serrinha*	0,078	0,182
Doutor Severiano*	0,068	0,182	Ouro Branco*	0,099	0,182	Serrinha dos Pintos*	0,058	0,182
Encanto*	0,076	0,182	Paraná*	0,044	0,183	Severiano Melo*	0,106	0,182
Equador*	0,048	0,185	Paraú*	0,066	0,182	Sítio Novo*	0,130	0,182
Espírito Santo*	0,109	0,182	Parazinho*	0,071	0,182	Tabuleiro Grande*	0,070	0,185
Extremoz*	0,081	0,182	Parelhas*	0,076	0,182	Taipu*	0,092	0,183
Felipe Guerra*	0,094	0,185	Parnamirim*	0,083	0,182	Tangará*	0,053	0,182
Fernando Pedrosa*	0,126	0,182	Passa e Fica*	0,064	0,182	Tenente Ananias*	0,073	0,182
Florânia*	0,055	0,182	Passagem*	0,071	0,196	Tenente Laurentino Cruz*	0,071	0,190
Francisco Dantas*	0,113	0,182	Patu*	0,073	0,182	Tibau*	0,084	0,182

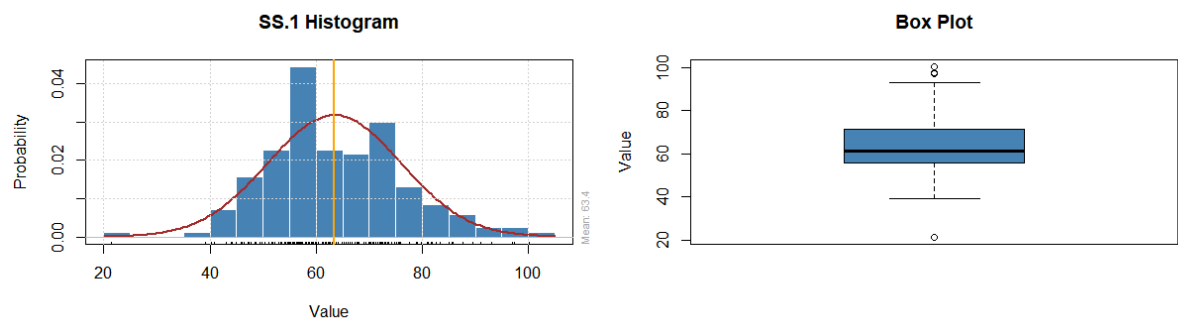
Frutuoso Gomes*	0,081	0,183	Pau dos Ferros*	0,114	0,182	Tibau do Sul*	0,080	0,196
Galinhos*	0,061	0,196	Pedra Grande*	0,175	0,182	Timbaúba dos Batista8	0,086	0,182
Goianinha*	0,079	0,182	Pedra Preta*	0,067	0,182	Touros*	0,079	0,192
Governador Dix-Sept Rosado*	0,072	0,183	Pedro Avelino*	0,072	0,182	Triunfo Potiguar*	0,066	0,192
Grossos*	0,074	0,182	Pedro Velho*	0,081	0,192	Umarizal*	0,095	0,183
Guamaré*	0,113	0,192	Pendências*	0,062	0,182	Upanema*	0,083	0,182
Ielmo Marinho*	0,089	0,182	Pilões*	0,095	0,182	Varzea*	0,068	0,187
Ipanguaçu*	0,082	0,182	Poço Branco*	0,115	0,196	Venha-Ver*	0,055	0,182
Ipueira*	0,046	0,189	Portalegre*	0,062	0,182	Vera Cruz*	0,084	0,182
Itajá*	0,134	0,182	Porto do Mangue*	0,075	0,185	Viçosa*	0,101	0,182
Itaú*	0,049	0,183	Pureza*	0,063	0,183	Vila Flor*	0,073	0,196
Jaçanã*	0,068	0,182	Rafael Fernandes*	0,093	0,182			

Fonte: Autor (2020).

* Posto pluviométrico que apresentaram efeito não significativo ao nível de 5% de significância.

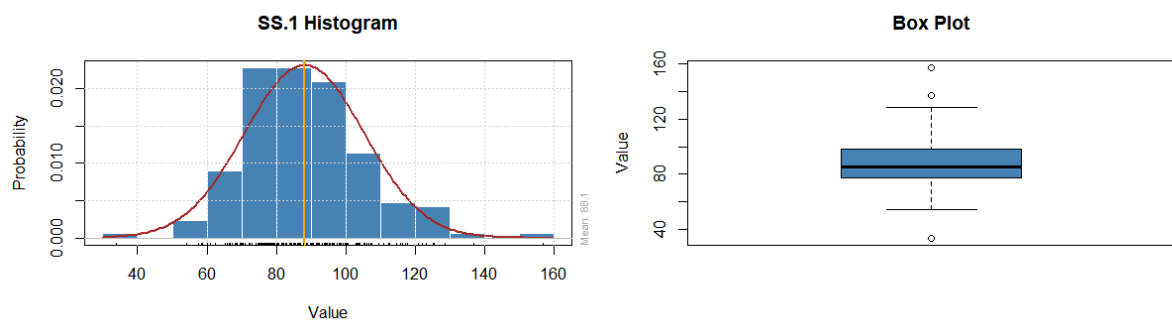
APÊNDICE B – Histogramas de frequência e boxplots usados para análise exploratória dos dados

Figura 10 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 2 anos



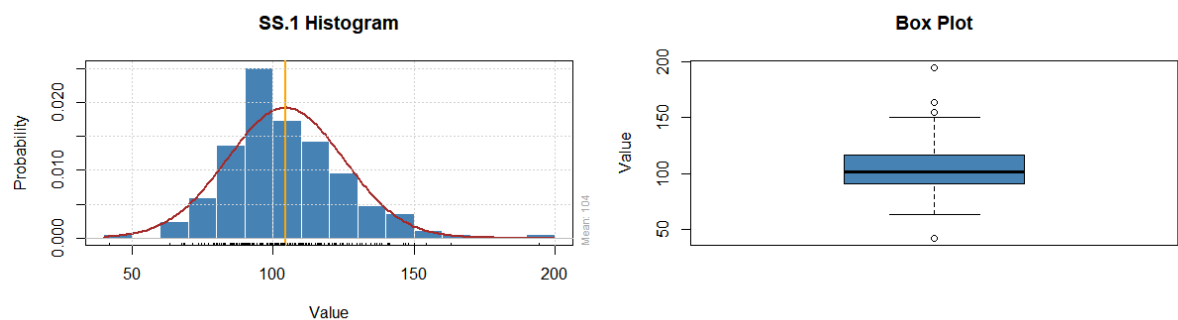
Fonte: Autor (2020).

Figura 11 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 5 anos



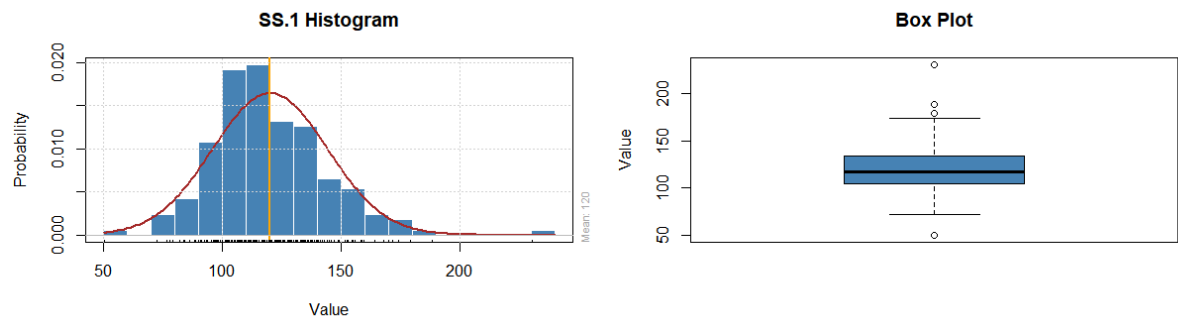
Fonte: Autor (2020).

Figura 12 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 10 anos



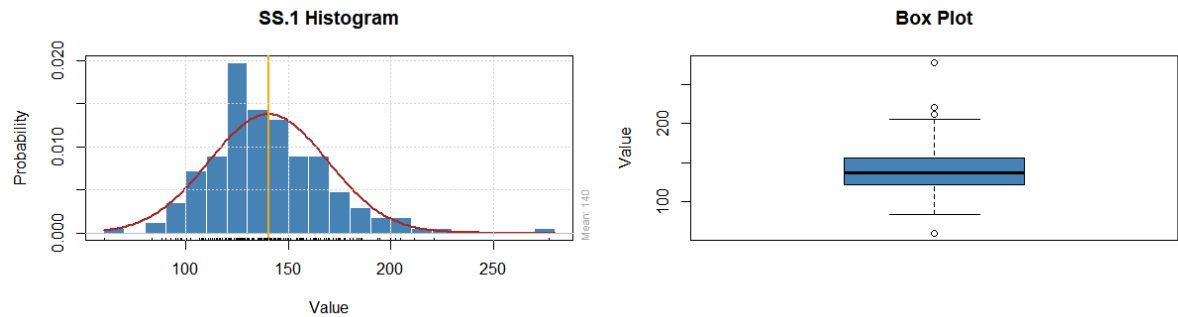
Fonte: Autor (2020).

Figura 13 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 20 anos



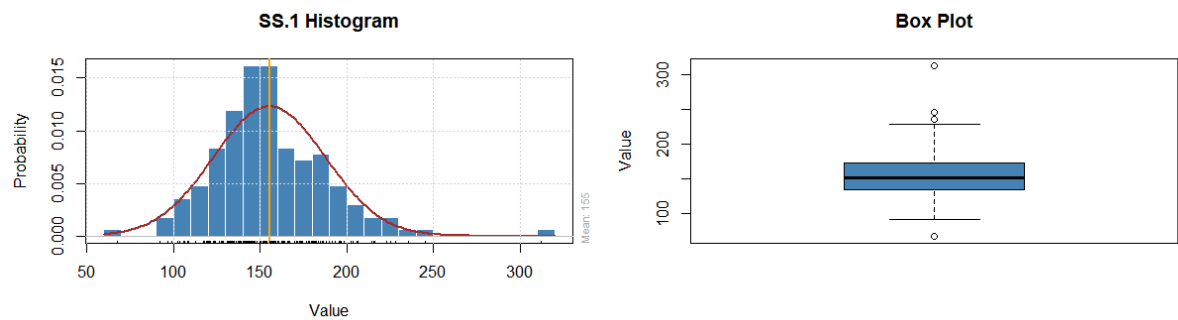
Fonte: Autor (2020).

Figura 14 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 50 anos



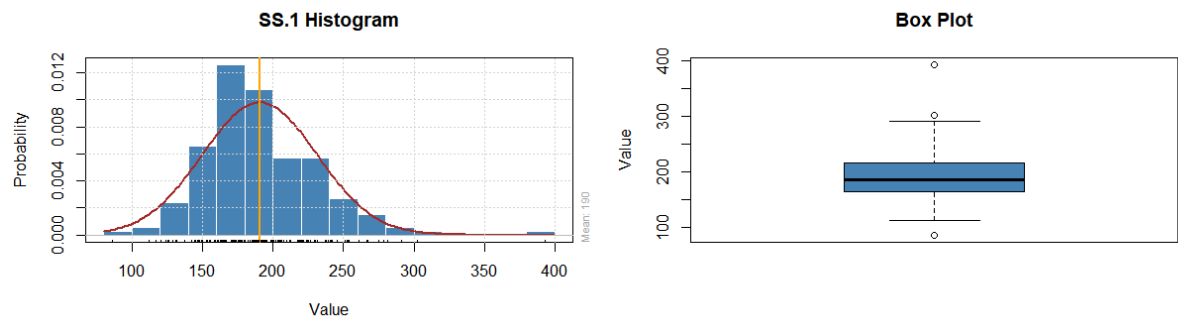
Fonte: Autor (2020).

Figura 15 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 100 anos



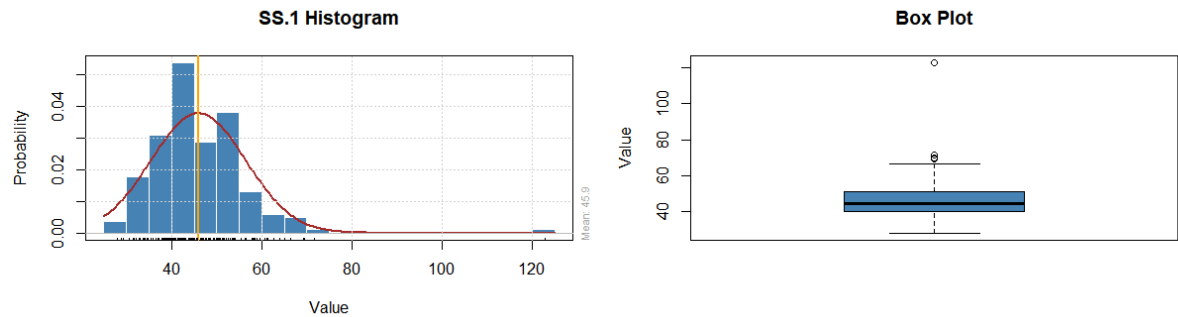
Fonte: Autor (2020).

Figura 16 - Histograma de frequência e box plot para duração de 15 minutos e TR = 500 anos



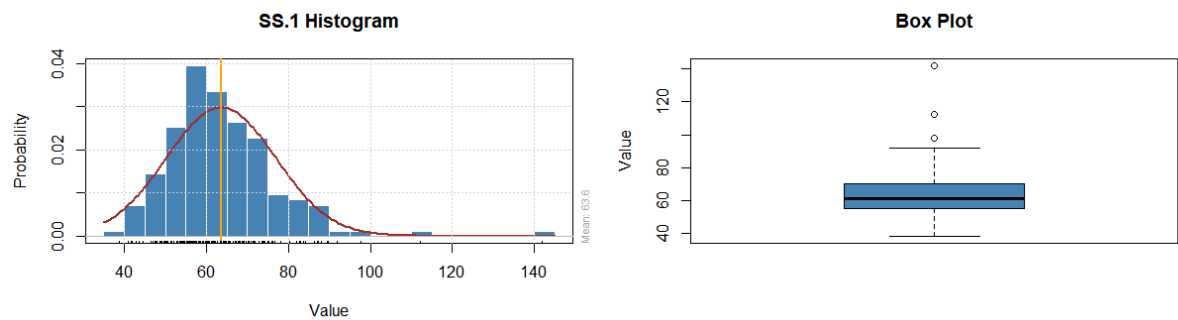
Fonte: Autor (2020).

Figura 17 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 2 anos



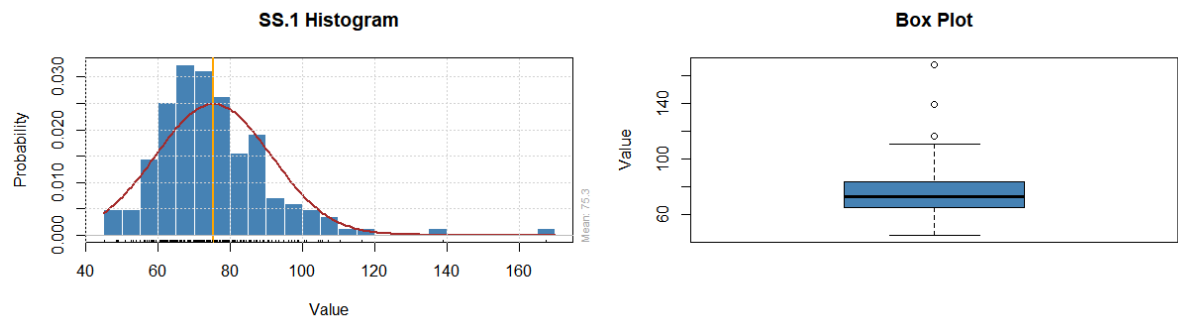
Fonte: Autor (2020).

Figura 18 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 5 anos



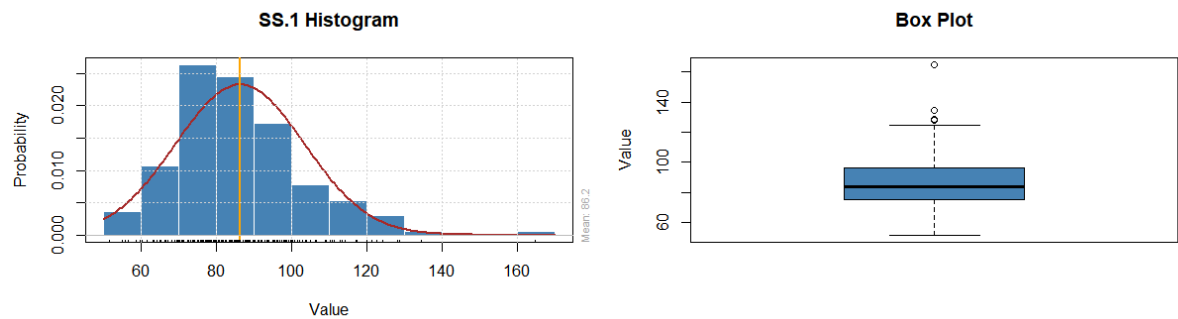
Fonte: Autor (2020).

Figura 19 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 10 anos



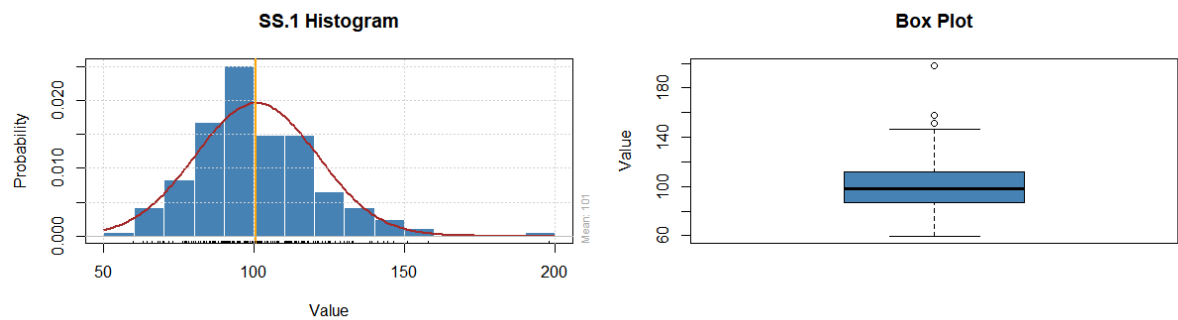
Fonte: Autor (2020).

Figura 20 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 20 anos



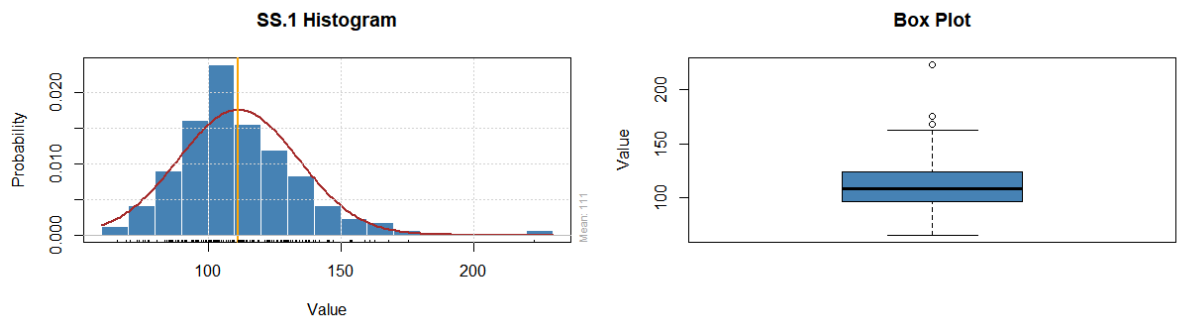
Fonte: Autor (2020).

Figura 21 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 50 anos



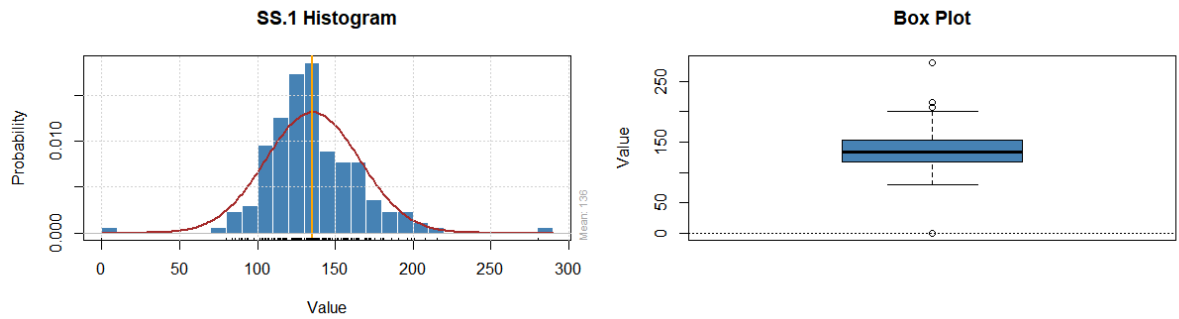
Fonte: Autor (2020).

Figura 22 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 100 anos



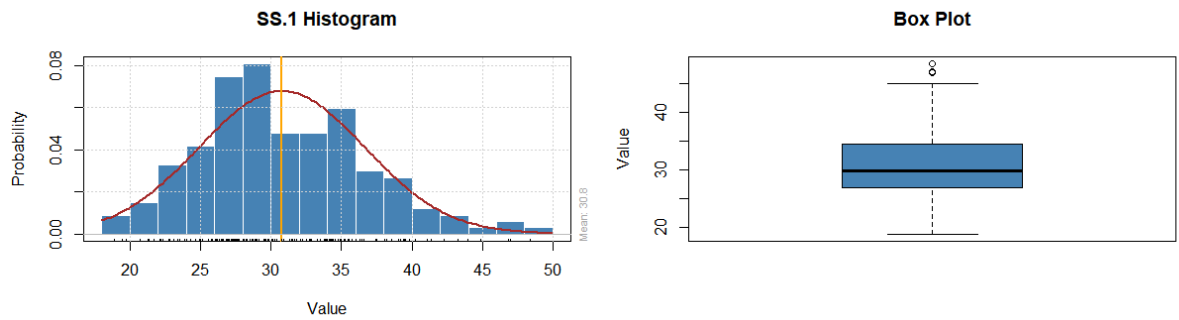
Fonte: Autor (2020).

Figura 23 - Histograma de frequência e box plot para duração de 30 minutos e TR = 500 anos



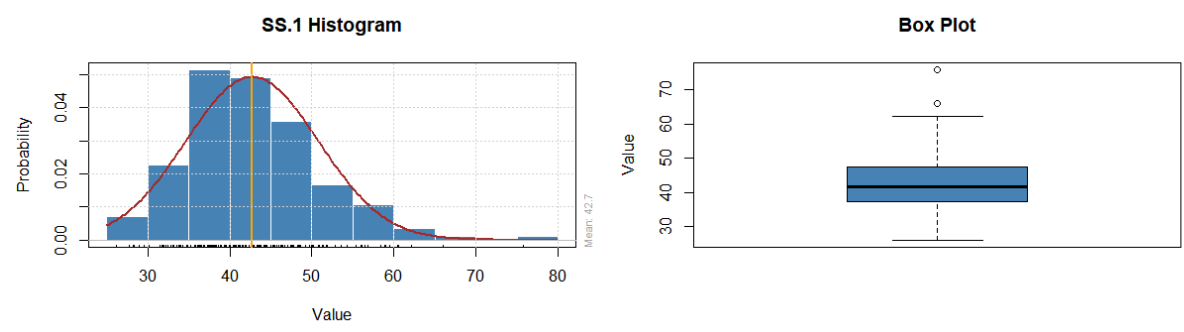
Fonte: Autor (2020).

Figura 24 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 2 anos



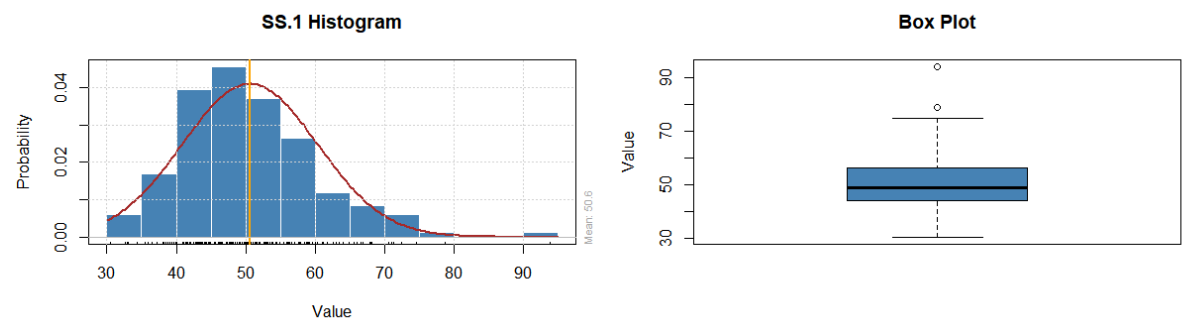
Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 5 anos



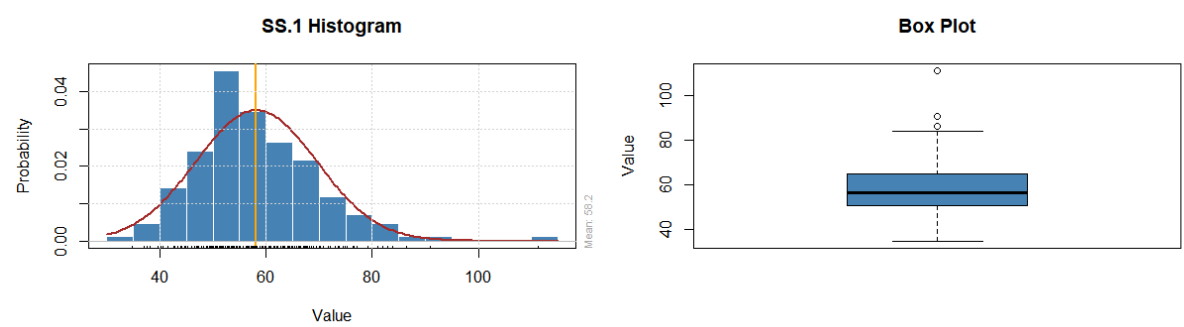
Fonte: Autor (2020).

Figura 26 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 10 anos



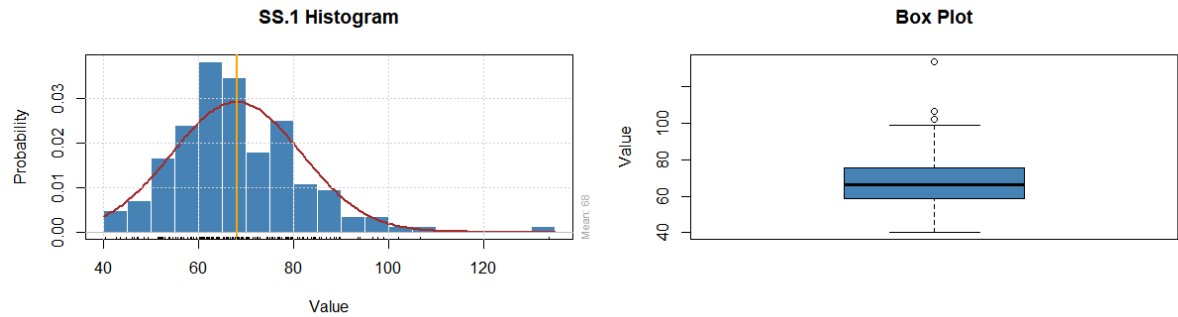
Fonte: Autor (2020).

Figura 27 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 20 anos



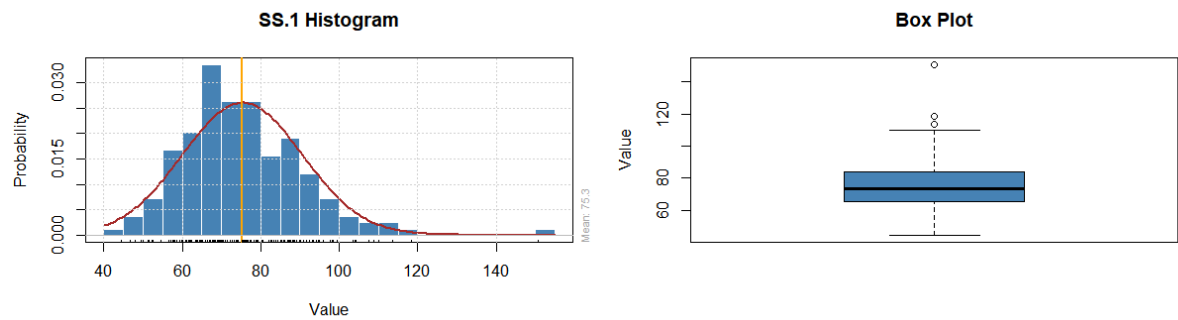
Fonte: Autor (2020).

Figura 28 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 50 anos



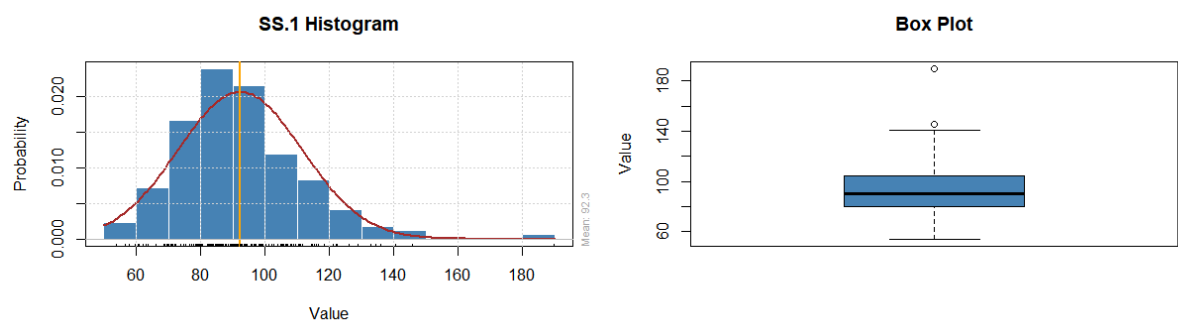
Fonte: Autor (2020).

Figura 29 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 100 anos



Fonte: Autor (2020).

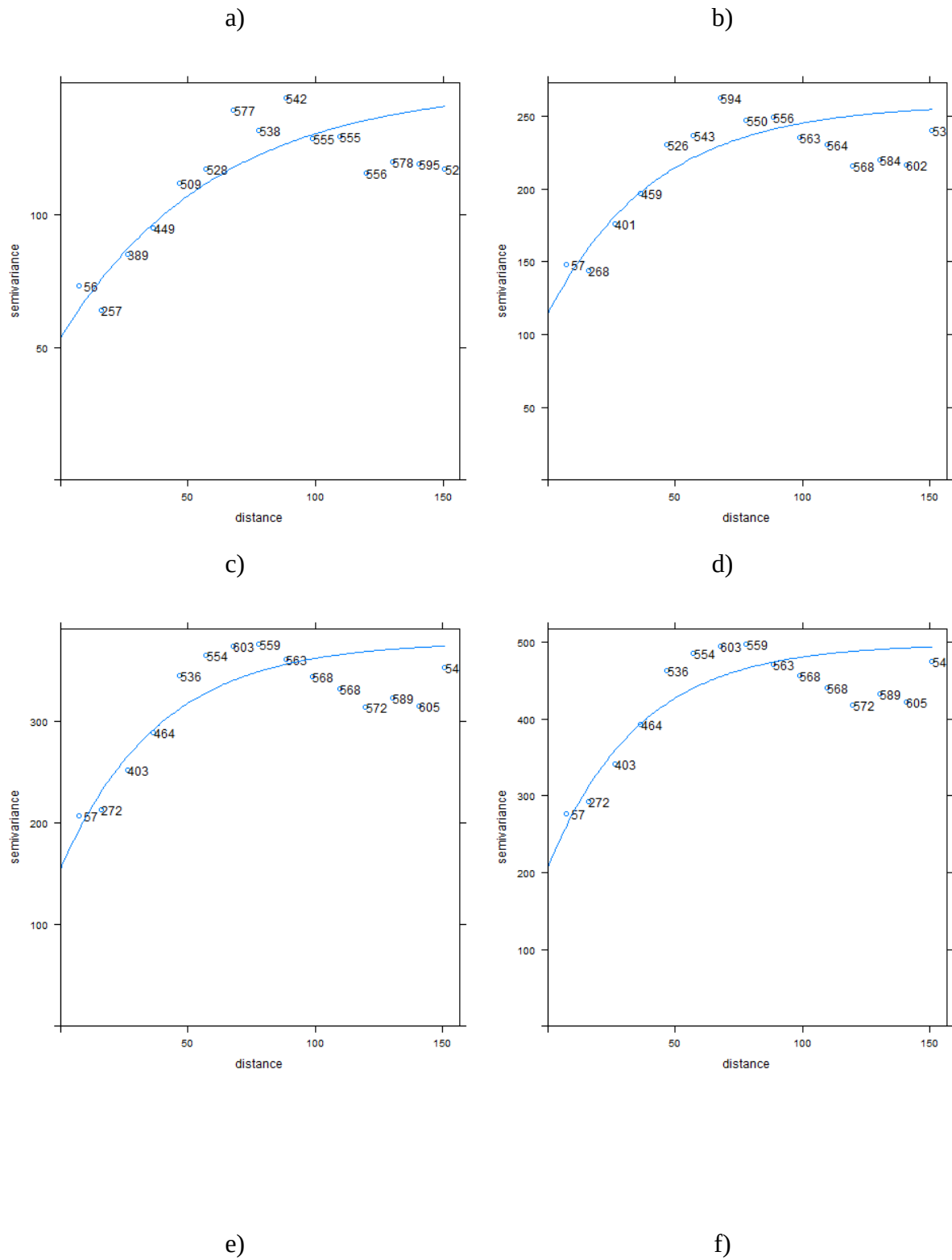
Figura 30 - Histograma de frequência e box plot para duração de 60 minutos e TR = 500 anos

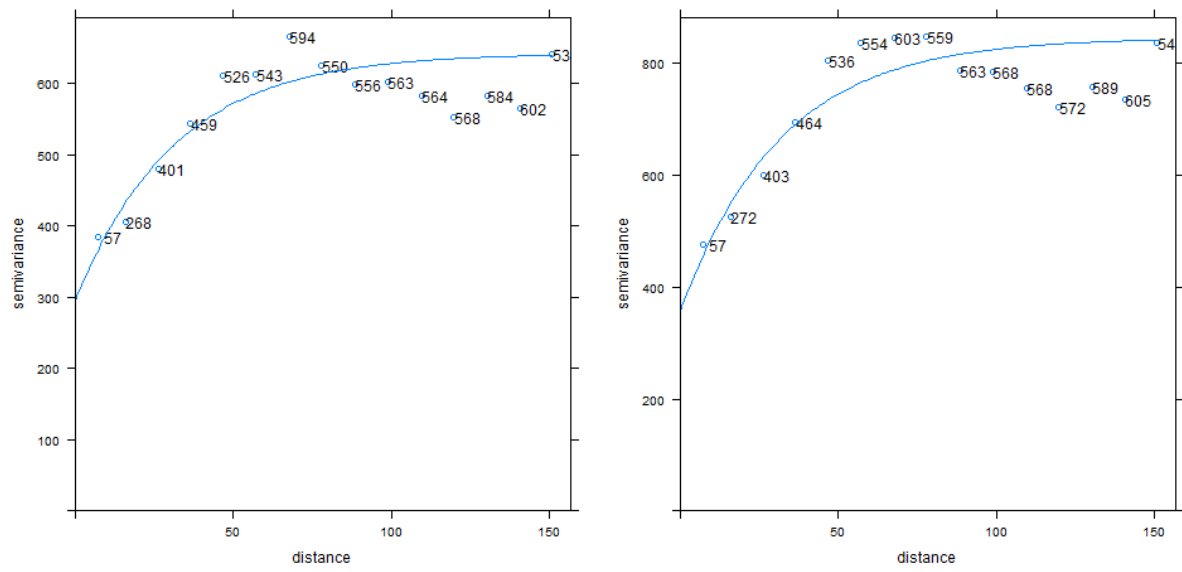


Fonte: Autor (2020).

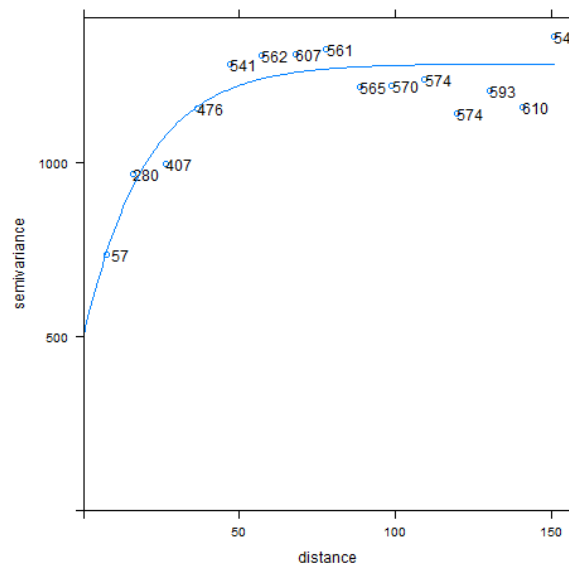
APÊNDICE C – Variogramas ajustados pelo modelo exponencial

Figura 31 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 15 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos



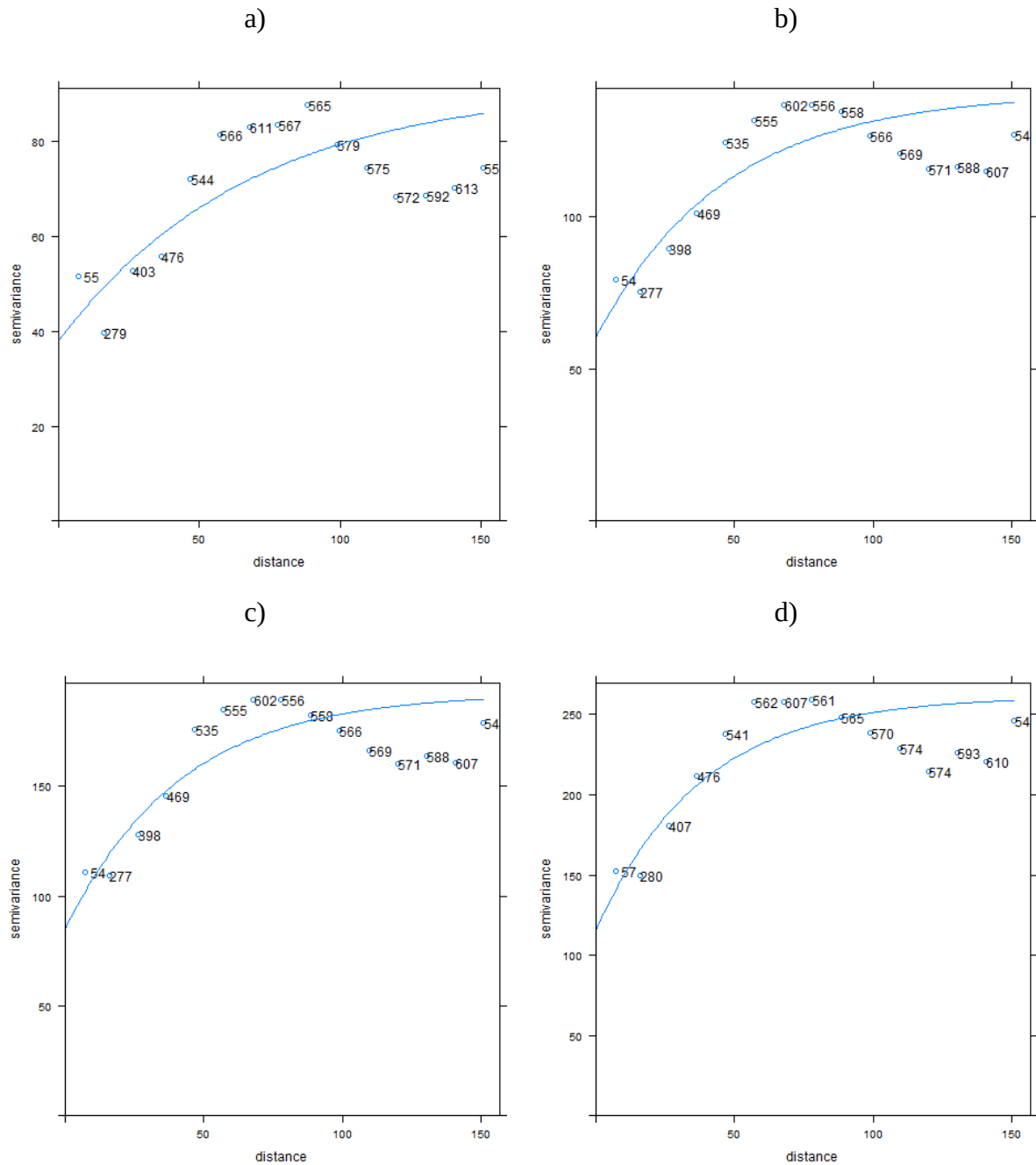


g)

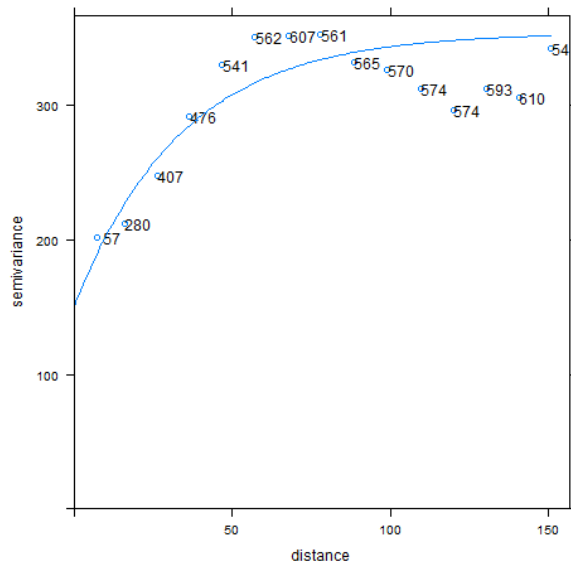


Fonte: Autor (2020).

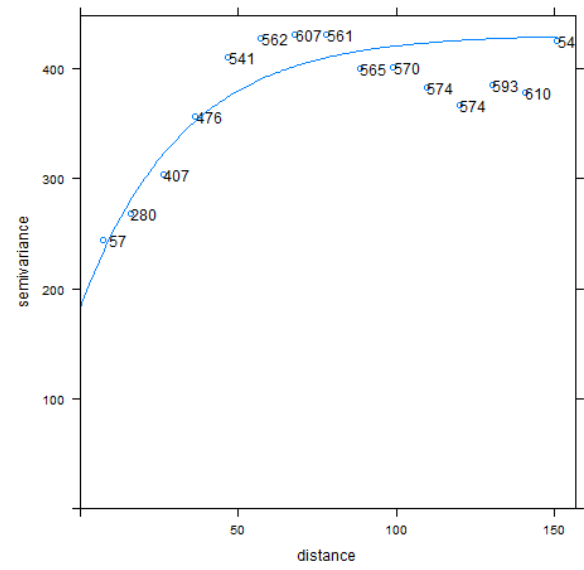
Figura 32 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 30 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos



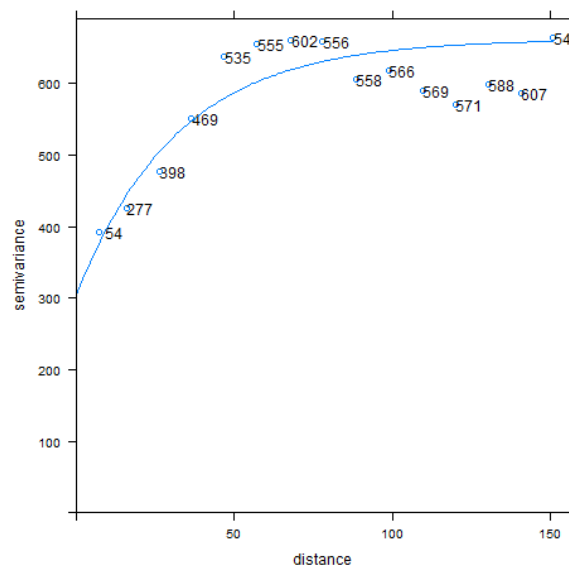
e)



f)

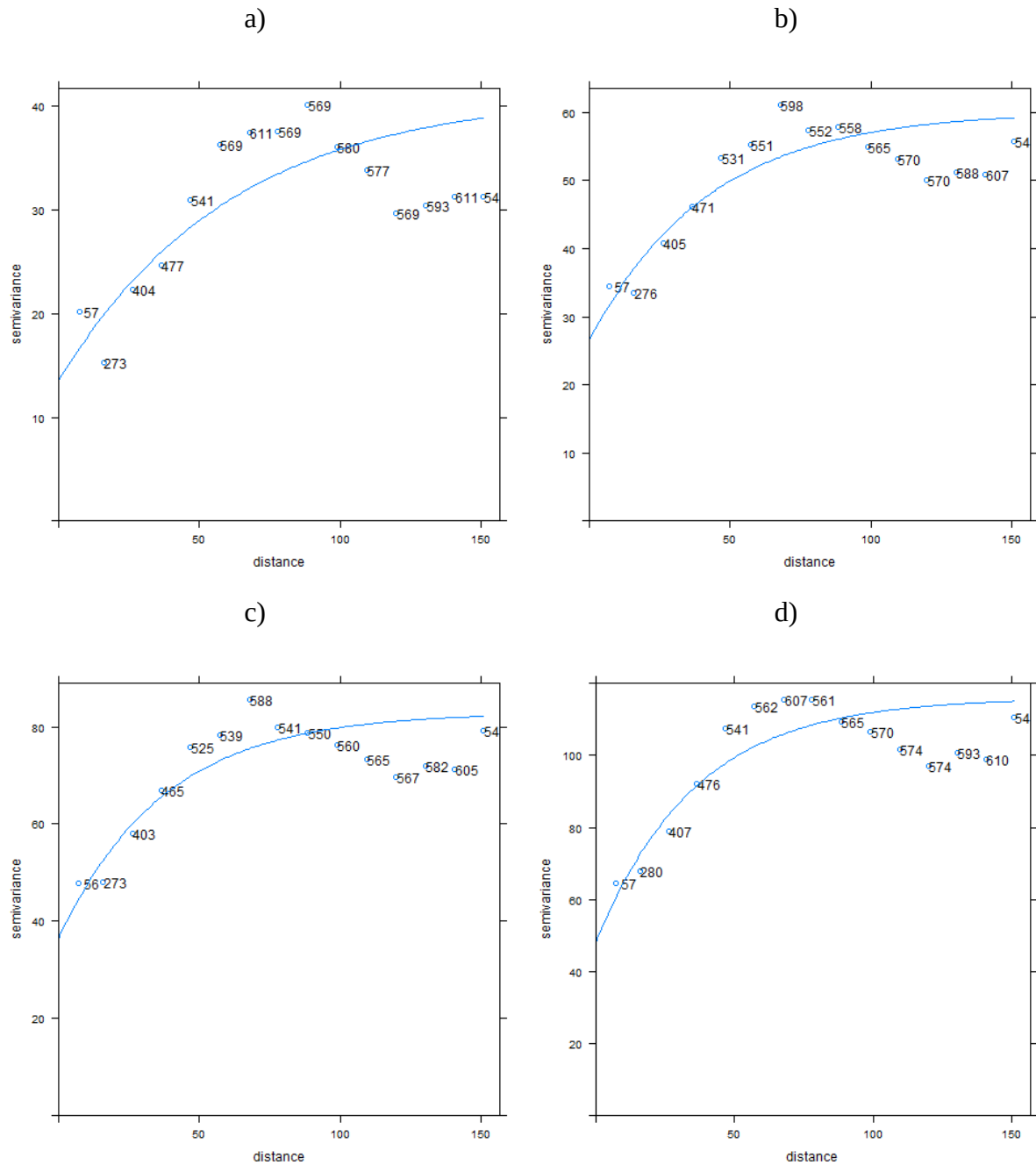


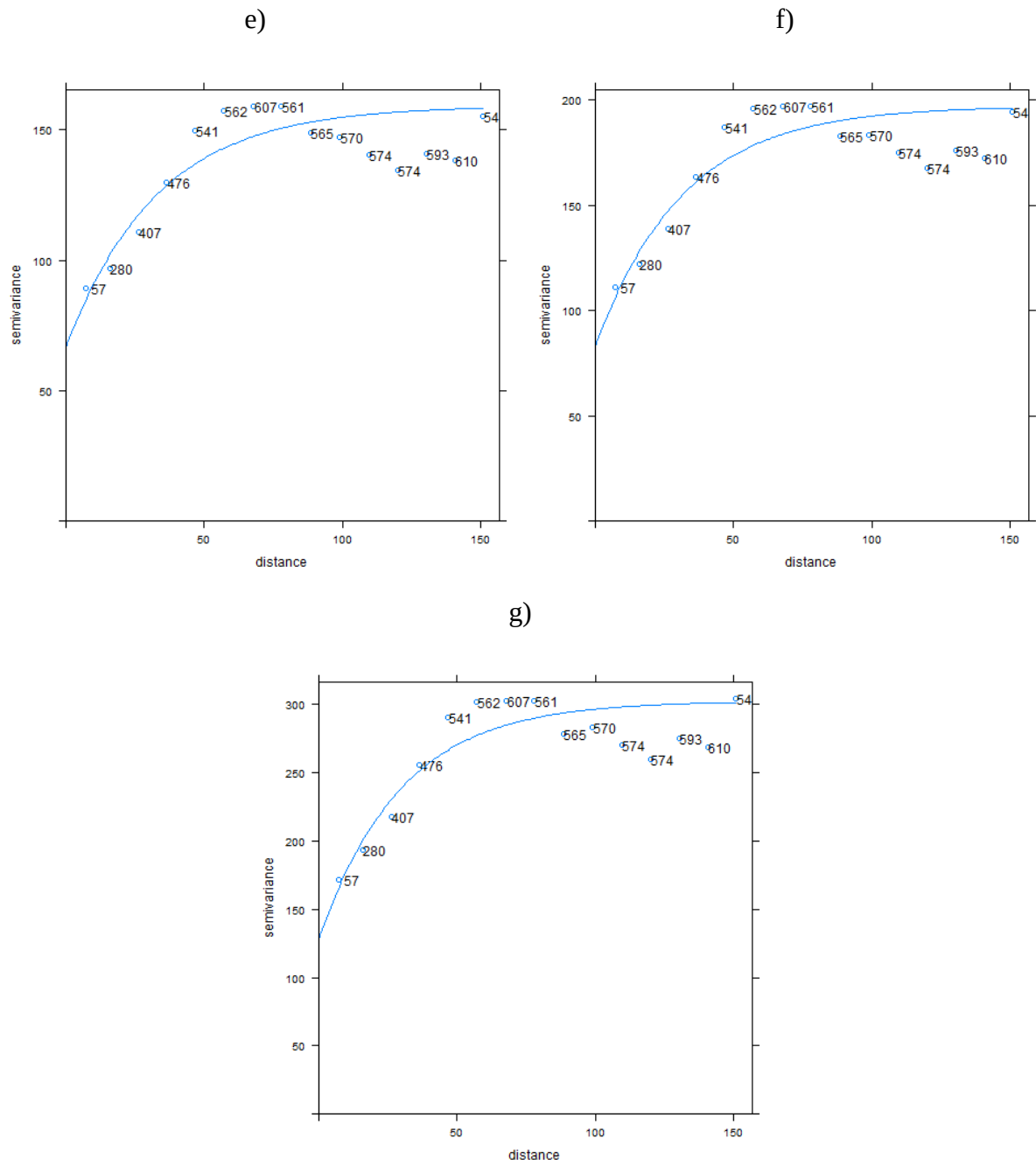
g)



Fonte: Autor (2020).

Figura 33 - Variogramas ajustados pelo modelo exponencial para duração de 60 minutos e: a) TR = 2; b) TR = 5; c) TR = 10; d) TR = 20; e) TR = 50; f) TR = 100; e g) TR = 500 anos

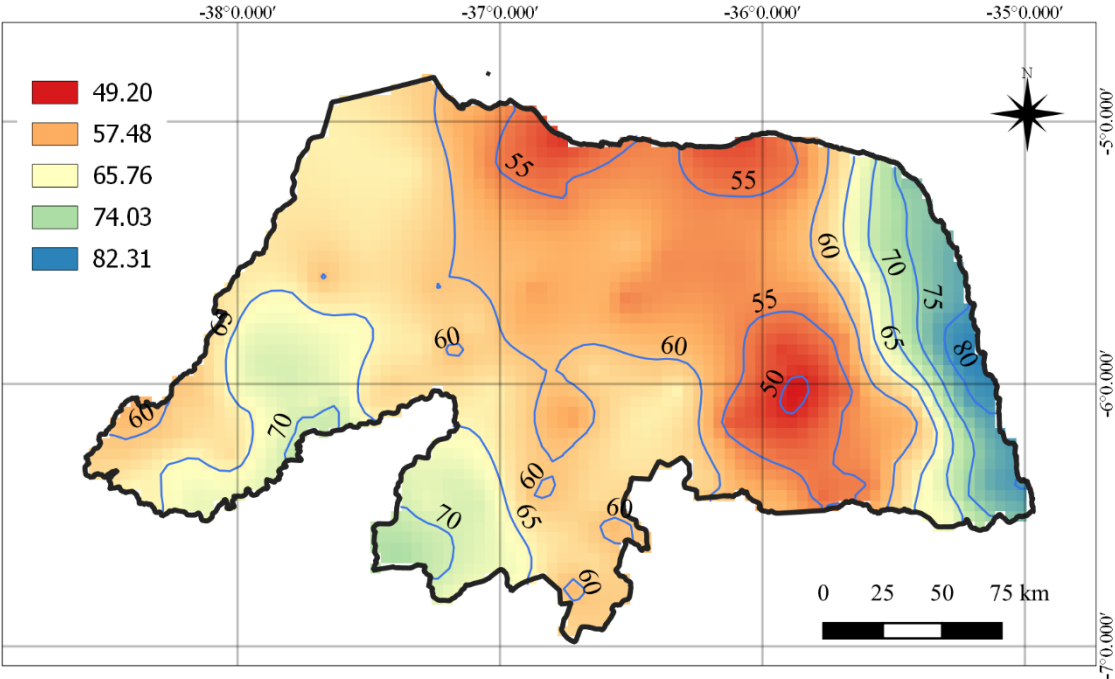




Fonte: Autor (2020).

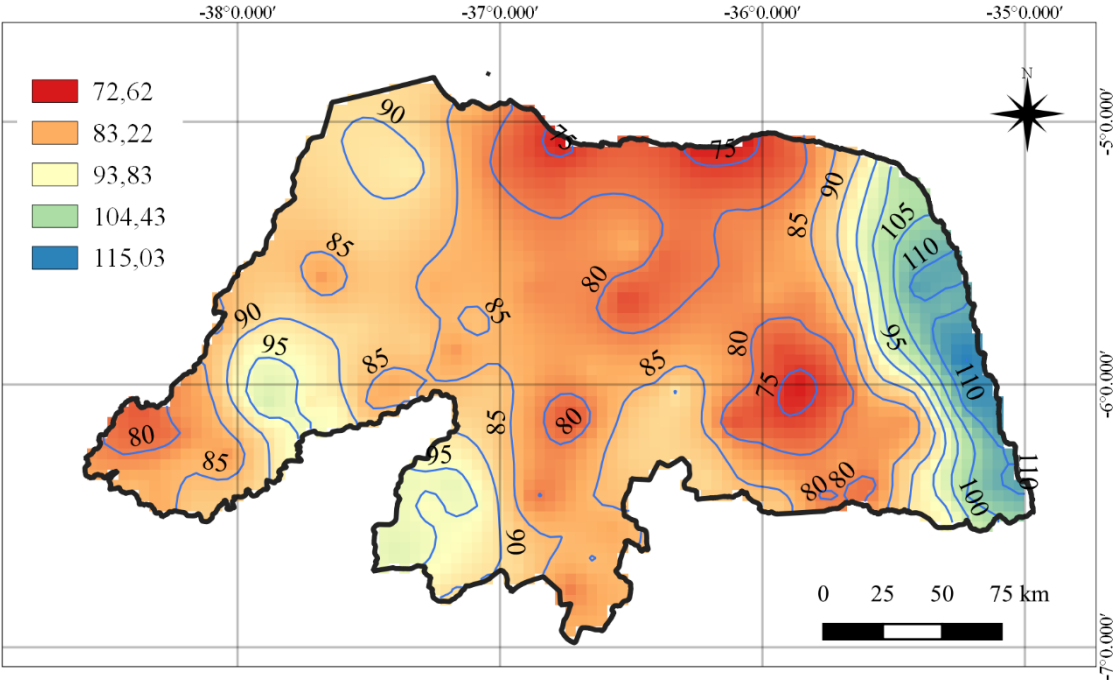
APÊNDICE D – Intensidades máximas médias para o estado do rio grande do norte

Figura 34 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 2 anos



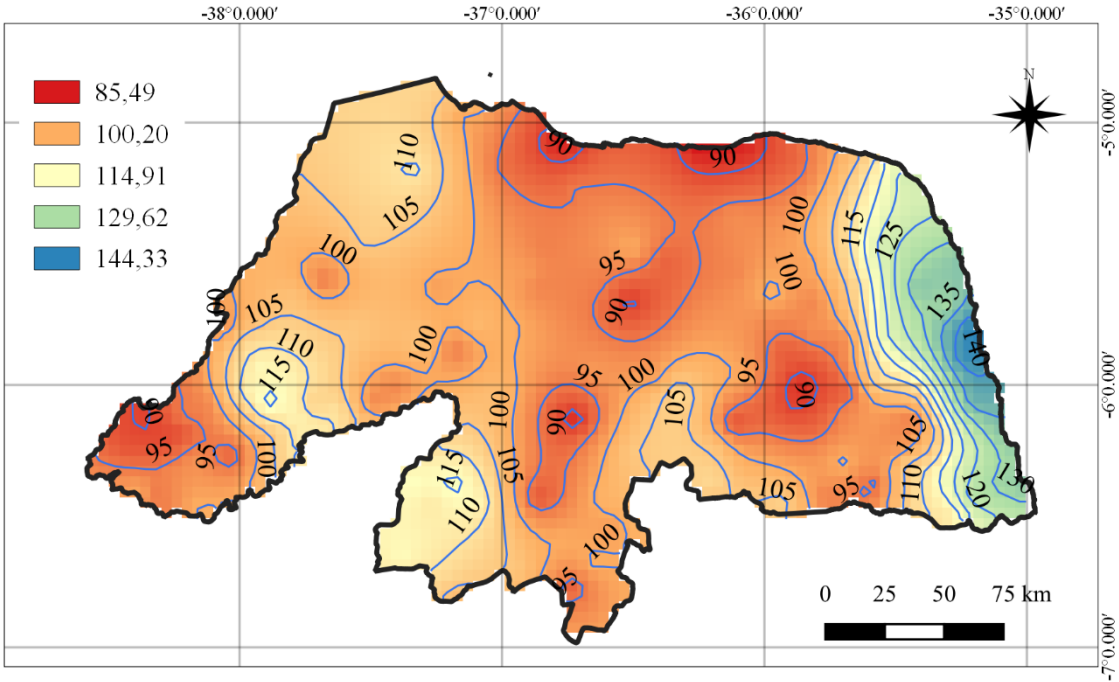
Fonte: Autor (2020).

Figura 35 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 5 anos



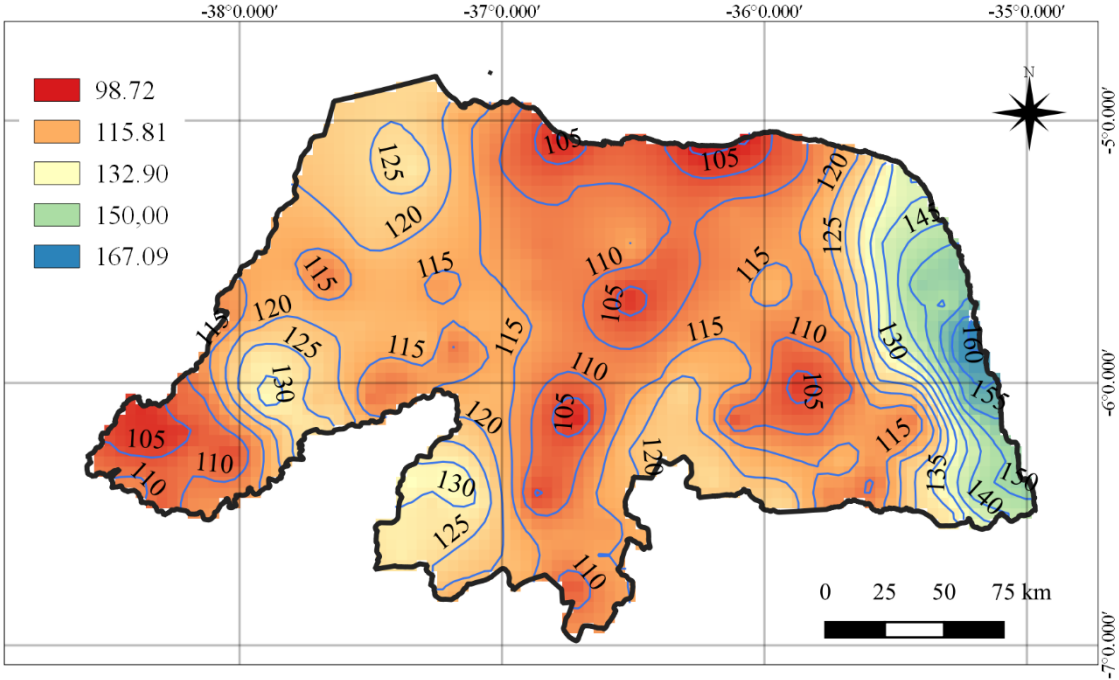
Fonte: Autor (2020).

Figura 36 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 10 anos



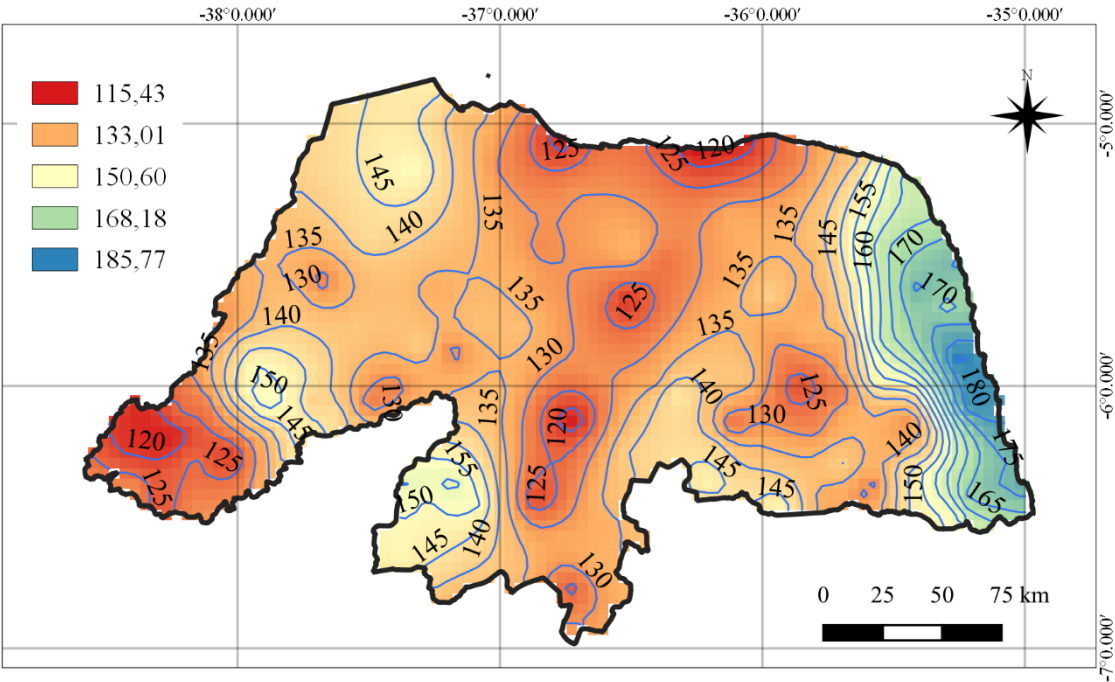
Fonte: Autor (2020).

Figura 37 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 20 anos



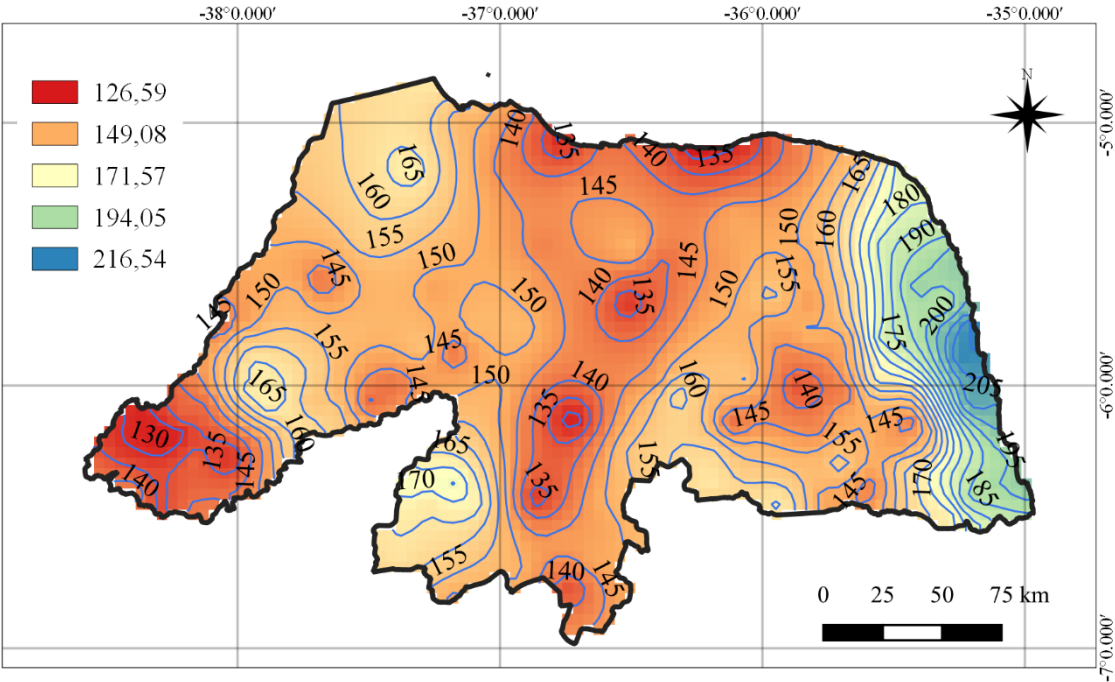
Fonte: Autor (2020).

Figura 38 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 50 anos



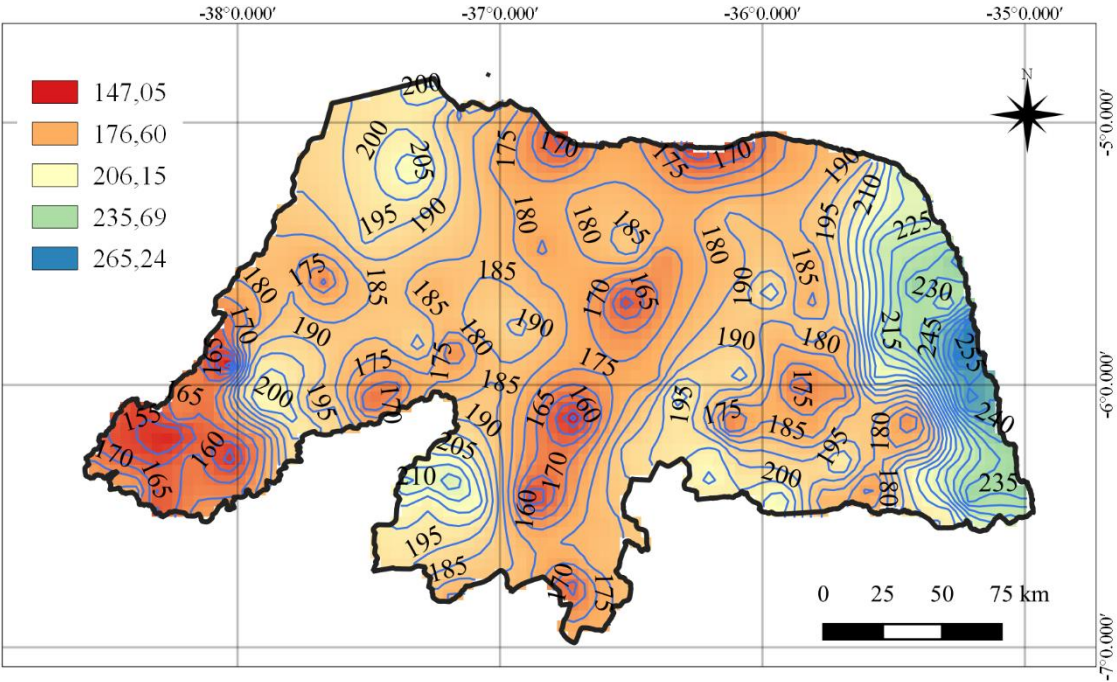
Fonte: Autor (2020).

Figura 39 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 100 anos



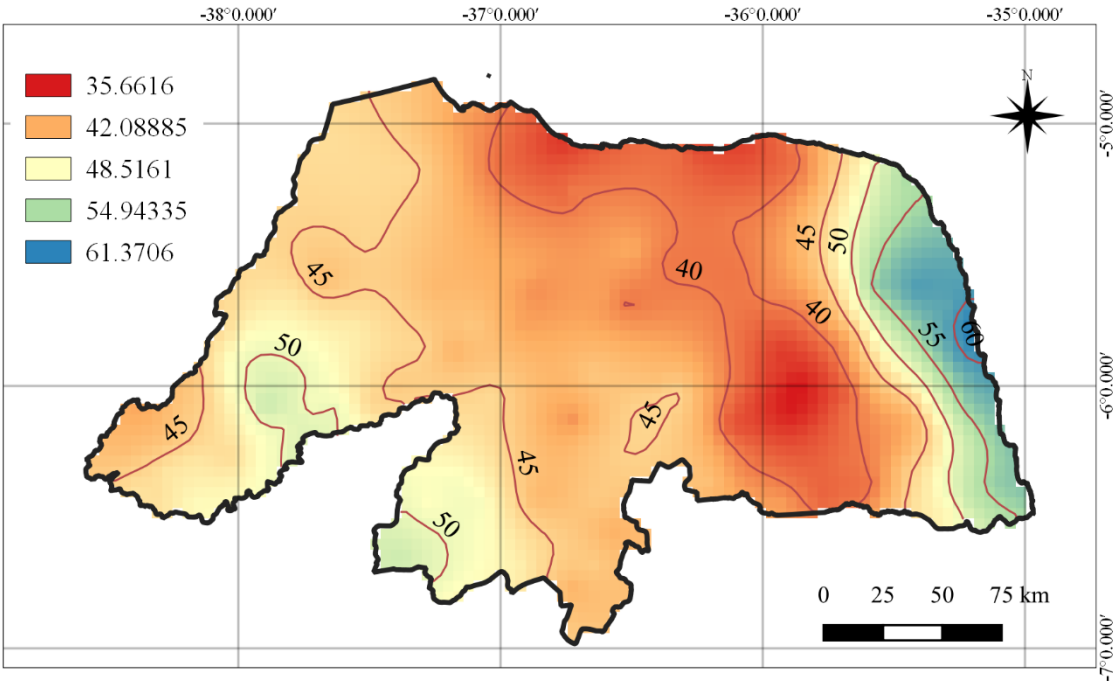
Fonte: Autor (2020).

Figura 40 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 15 minutos e TR = 500 anos



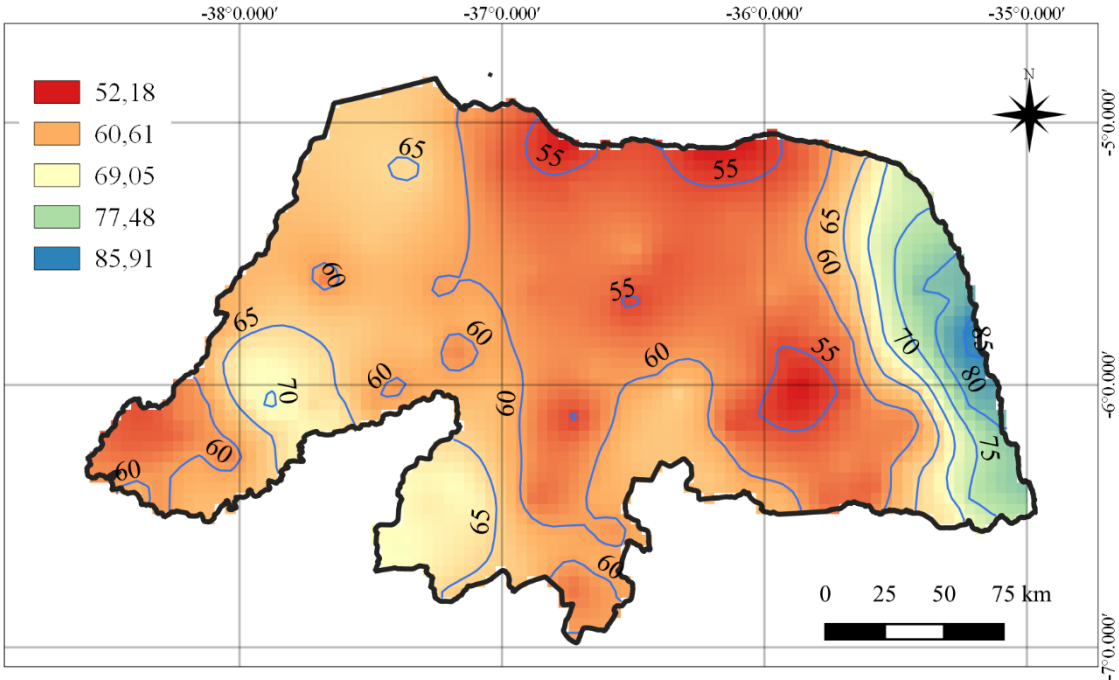
Fonte: Autor (2020).

Figura 41 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 2 anos



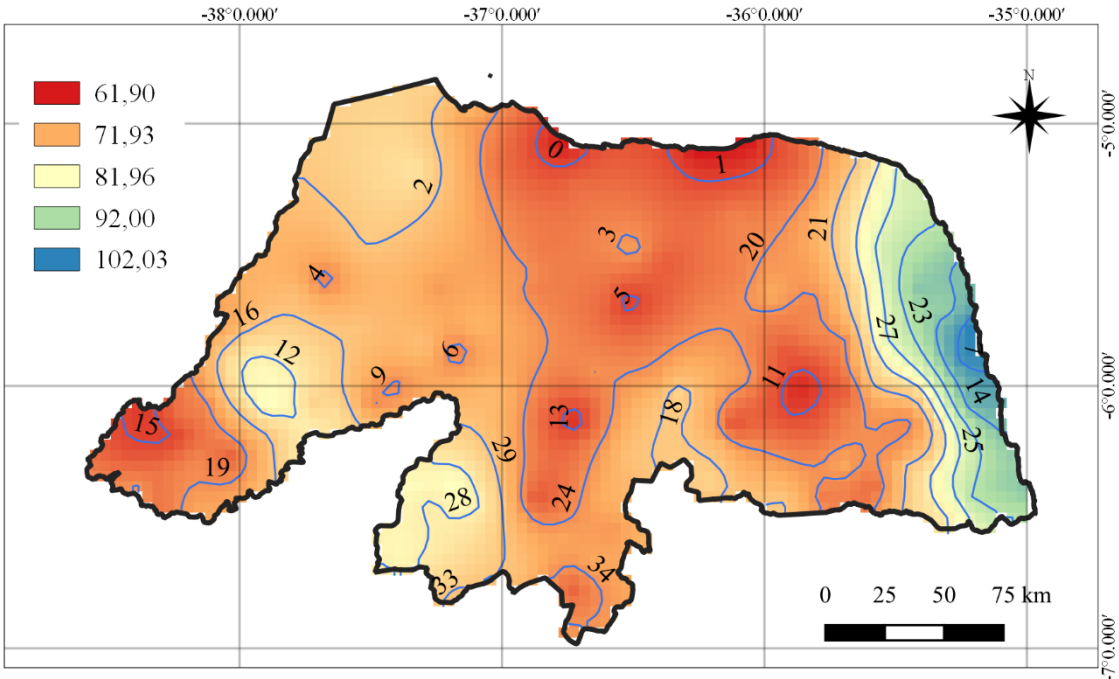
Fonte: Autor (2020).

Figura 42 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 5 anos



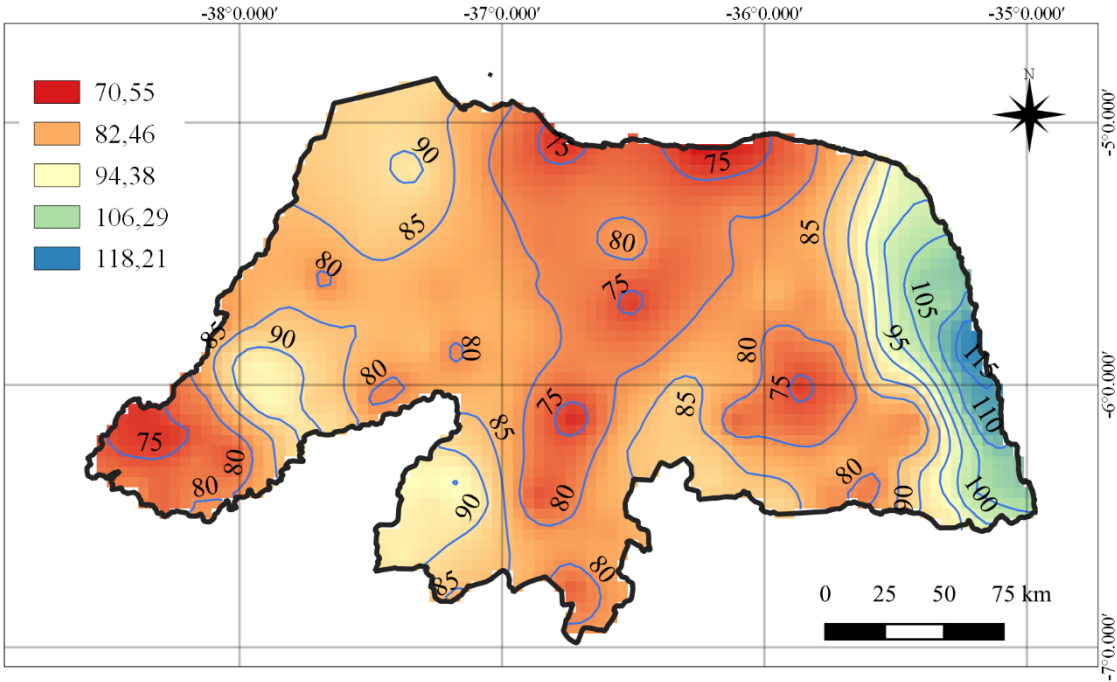
Fonte: Autor (2020).

Figura 43 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 10 anos



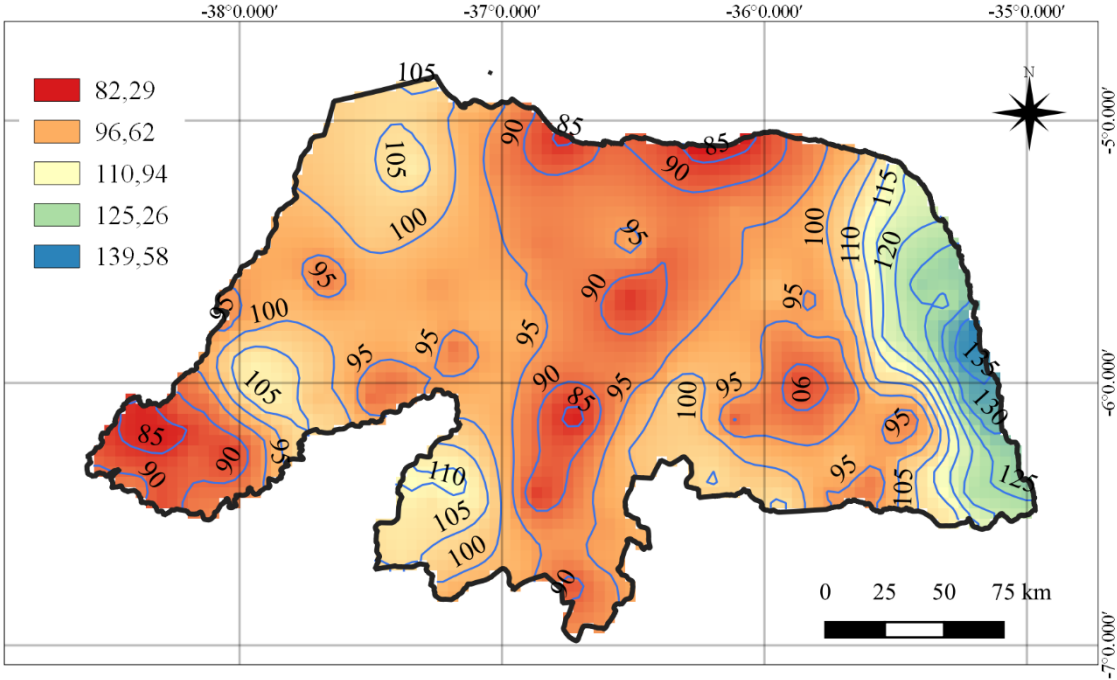
Fonte: Autor (2020).

Figura 44 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 20 anos



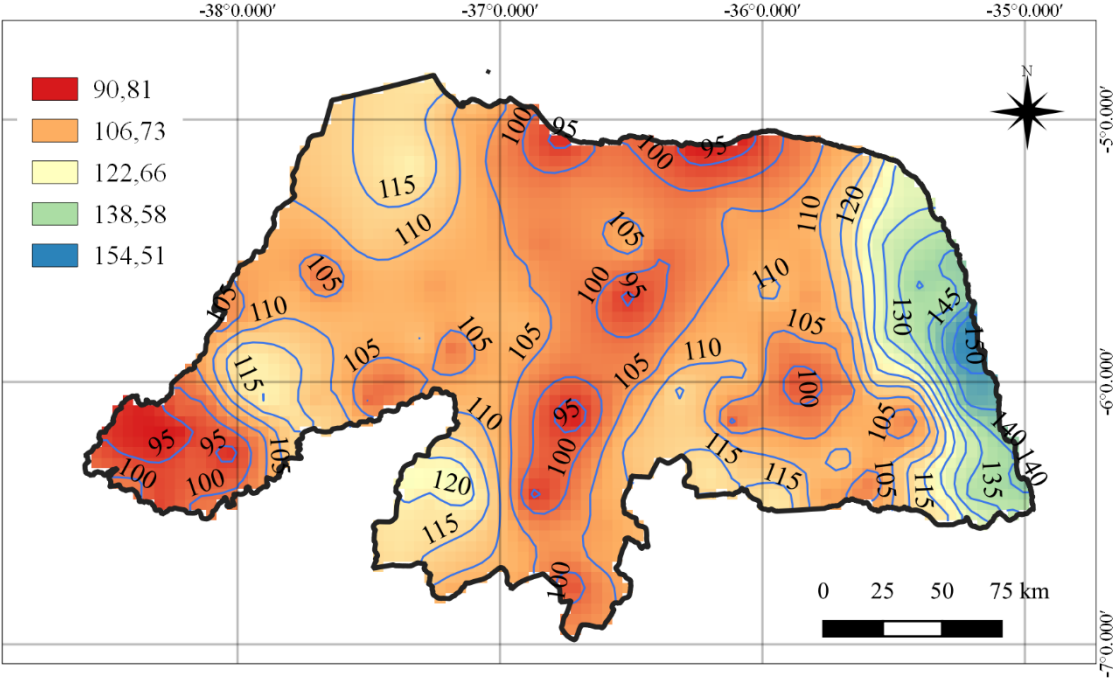
Fonte: Autor (2020).

Figura 45 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 50 anos



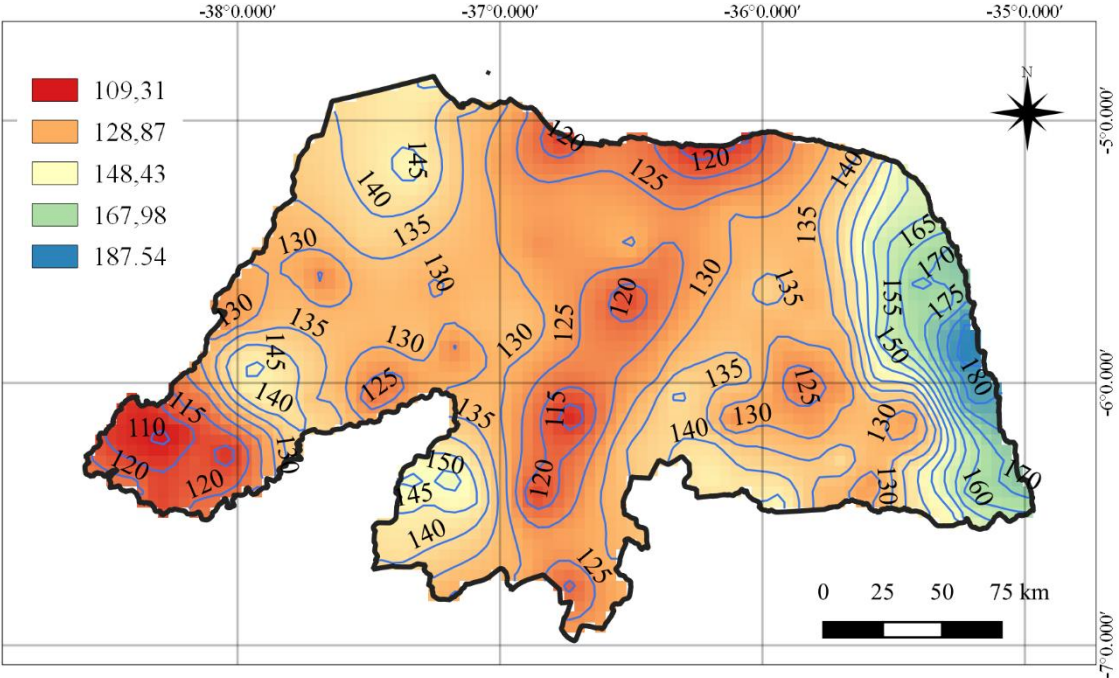
Fonte: Autor (2020).

Figura 46 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 100 anos



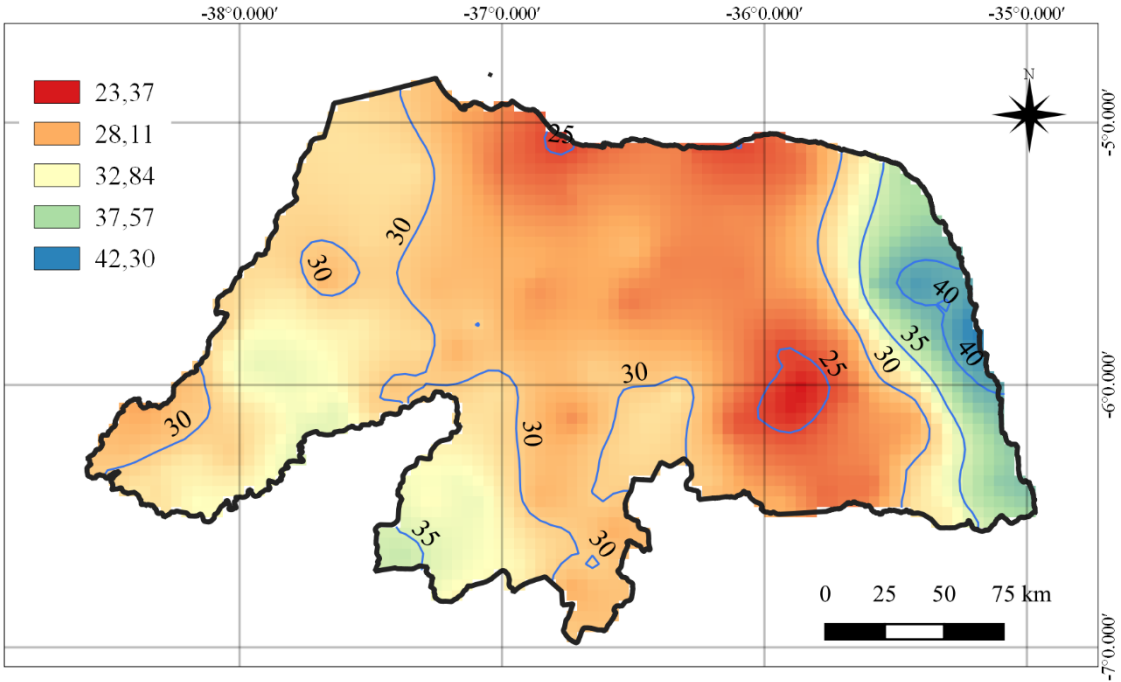
Fonte: Autor (2020).

Figura 47 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 30 minutos e TR = 500 anos



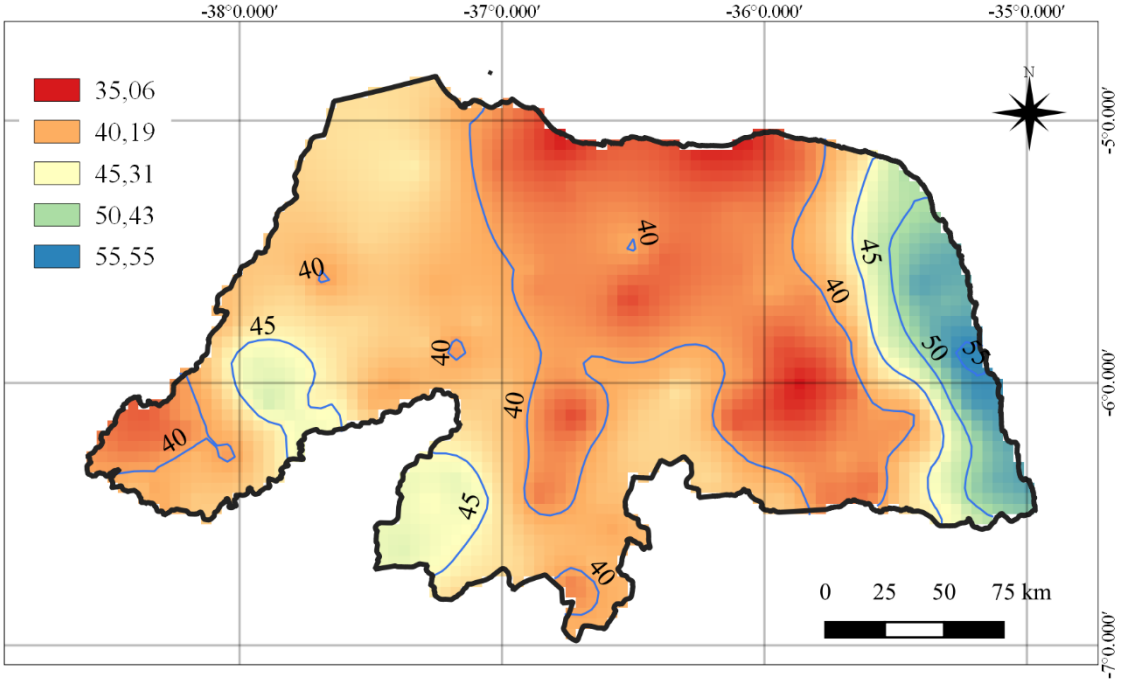
Fonte: Autor (2020).

Figura 48 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 2 anos



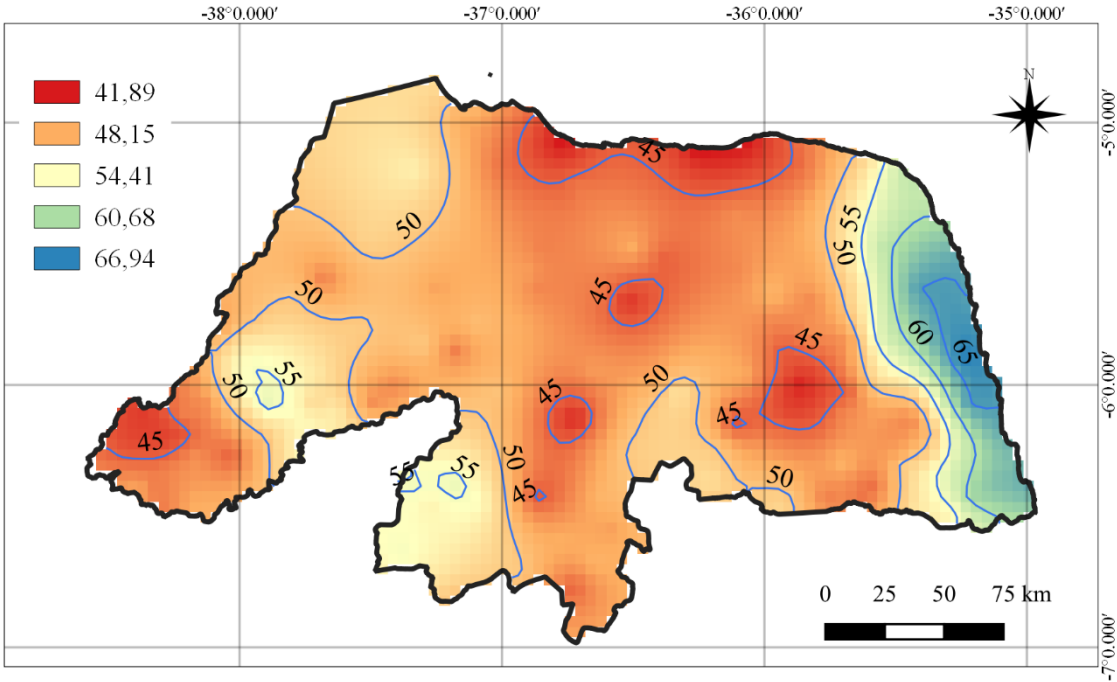
Fonte: Autor (2020).

Figura 49 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 5 anos



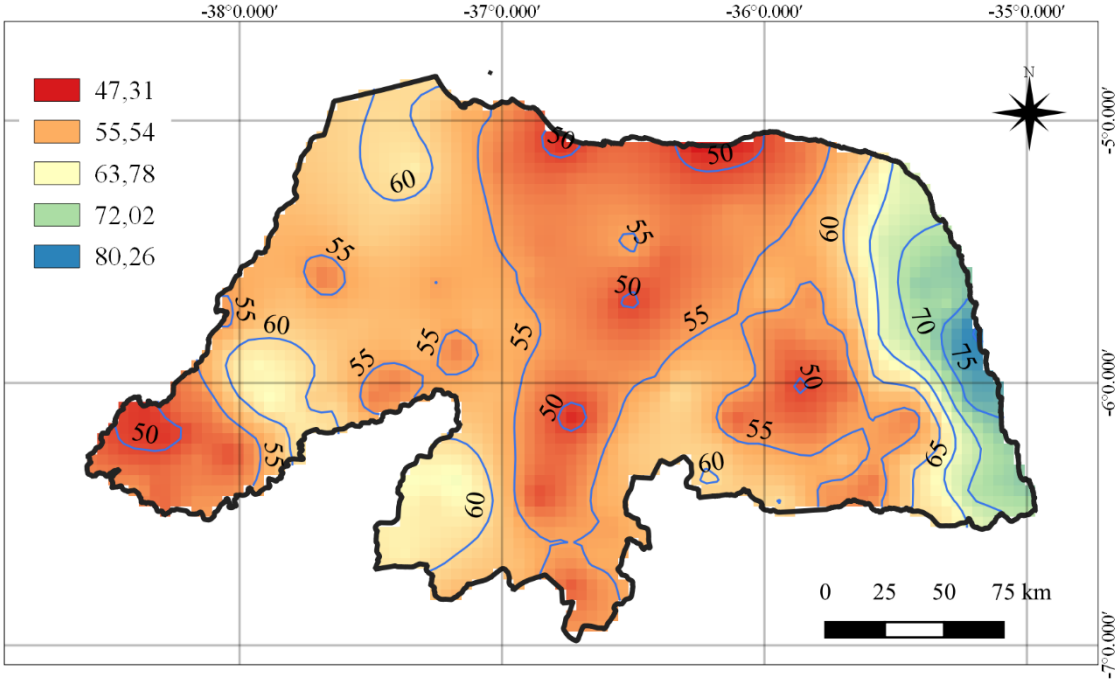
Fonte: Autor (2020).

Figura 50 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 10 anos



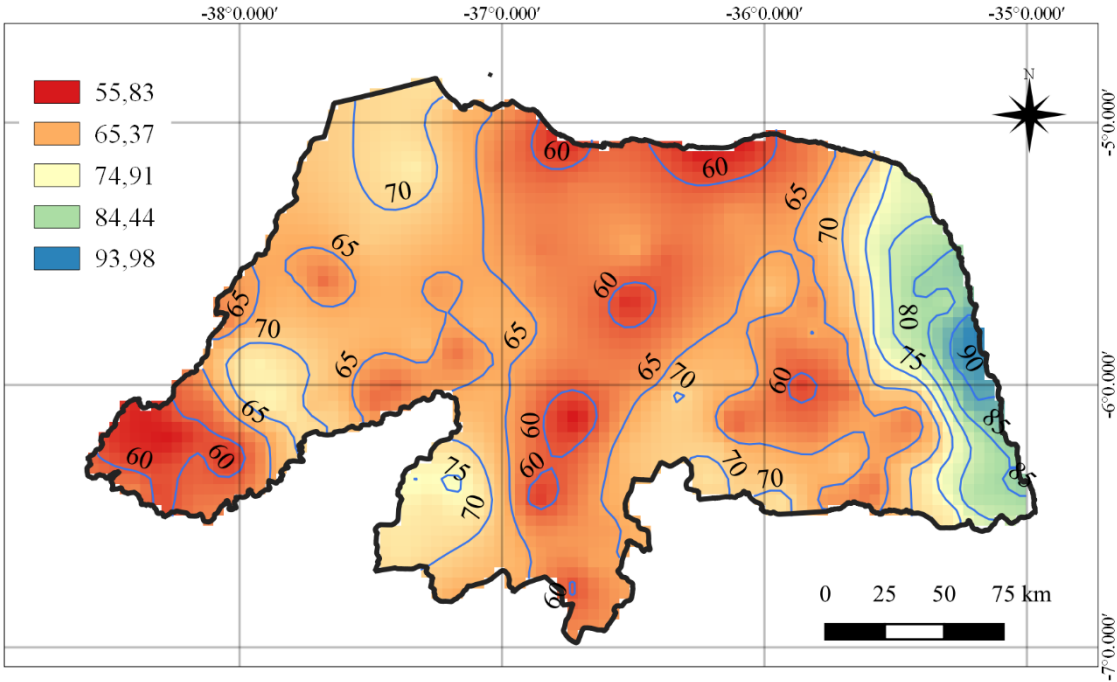
Fonte: Autor (2020).

Figura 51 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 20 anos



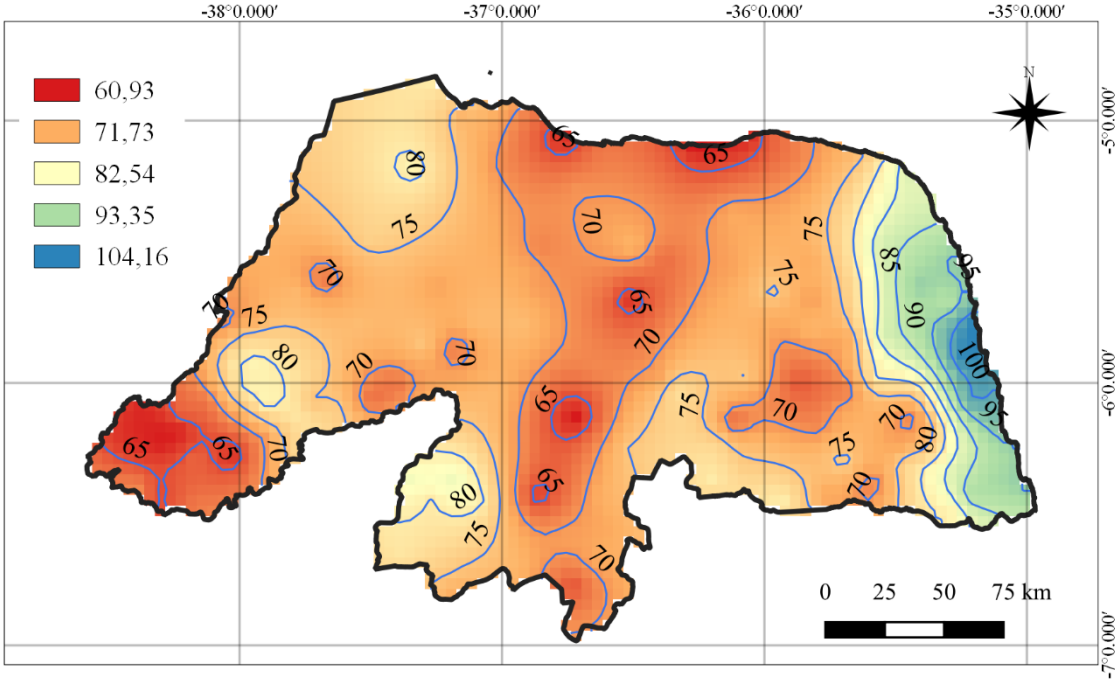
Fonte: Autor (2020).

Figura 52 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 50 anos



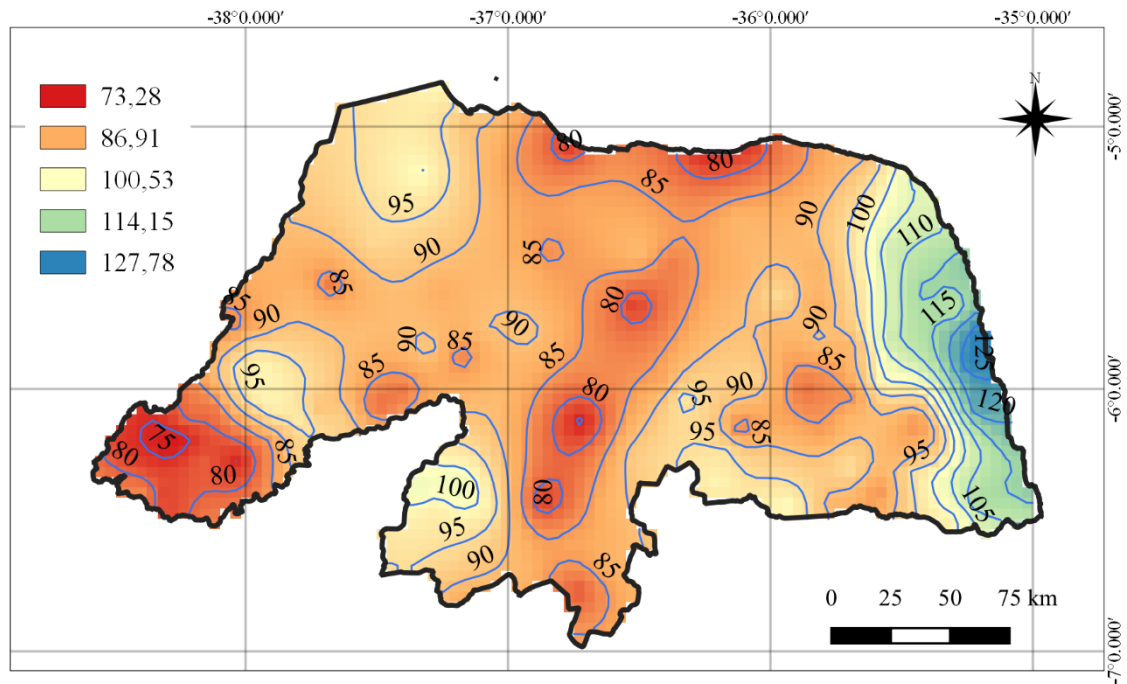
Fonte: Autor (2020).

Figura 53 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 100 anos



Fonte: Autor (2020).

Figura 54 - Intensidade máxima média (mm.h-1) para duração de 60 minutos e TR = 500 anos



Fonte: Autor (2020).