

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**BIANCA NESPOLI CORTEZ**

**PRECIPITAÇÕES EXTREMAS EM CONDIÇÕES NÃO ESTACIONÁRIAS PARA  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**BIANCA NESPOLI CORTEZ**

**PRECIPITAÇÕES EXTREMAS EM CONDIÇÕES NÃO ESTACIONÁRIAS PARA  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

C828p  
2020  
Cortez, Bianca Nespoli, 1990-  
Precipitações extremas em condições não estacionárias para cenários de mudanças climáticas no Brasil / Bianca Nespoli Cortez. – Viçosa, MG, 2020.  
90 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Inclui apêndice.

Orientador: Gabrielle Ferreira Pires.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.78-84.

1. Precipitação (Meteorologia) - Modelos matemáticos.
2. Mudanças climáticas. 3. Tendência . I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada. II. Título.

CDD 22 ed. 551.6877

**BIANCA NESPOLI CORTEZ**

**PRECIPITAÇÕES EXTREMAS EM CONDIÇÕES NÃO ESTACIONÁRIAS PARA  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 04 de março de 2020.

Assentimento:

  
Bianca Nespoli Cortez  
Autora

  
\_\_\_\_\_  
Gabrielle Ferreira Pires  
Orientadora

*Aos meus pais Janet e Marco Antônio.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, ao divino Espírito Santo e a virgem Maria por me guiarem nesta caminhada.

À minha mãe Janet e meu pai Marco Antônio por me incentivarem e compartilharem deste sonho. Aos meus familiares, em especial ao João Marcos e Maria Clara por todo apoio e carinho.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial aos professores do programa de pós graduação em Meteorologia Aplicada, pelos conhecimentos transmitidos.

À minha orientadora, Gabrielle Pires, por todo o conhecimento compartilhado, pelo exemplo de perseverança e profissionalismo. Por todas as contribuições, principalmente pela amizade e compreensão durante a realização deste trabalho.

Aos professores Marcos Heil Costa e Demétrius David da Silva pela participação e contribuições na banca de defesa.

Aos amigos conquistados no programa de pós graduação, em especial ao Álvaro pelo suporte e à Bruna Paim pela amizade.

Aos amigos do grupo de pesquisa ClimAp por tornarem o percurso mais prazeroso, em especial ao Humberto pela parceria.

Ao meu companheiro de vida e amigo João Francisco por se fazer presente em cada momento, trazendo paz e apoio para concluir essa etapa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, sou grata a todos que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

*“Imaginação não é apenas a capacidade exclusivamente humana de idealizar o que não existe e, portanto, a fonte de toda a invenção e inovação; em sua capacidade seguramente mais transformadora e reveladora, é o poder que nos permite ter empatia pelas pessoas cujas experiências nunca partilhamos.”*

(J.K Rowling)

## RESUMO

CORTEZ, Bianca Nespoli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2020. **Precipitações extremas em condições não estacionárias para cenários de mudanças climáticas no Brasil.** Orientadora: Gabrielle Ferreira Pires.

Estudo recentes demonstram que eventos extremos têm aumentado em magnitude e/ou frequência. Acredita-se que as atividades antropogênicas podem amplificar a variabilidade natural de eventos extremos de precipitação e afetar o seu comportamento probabilístico ao longo do tempo. No Brasil, estes eventos têm gerado inúmeros desastres como enxurradas, inundações e movimentos de massas que acarretaram em impactos negativos, em especial no ambiente urbano. O processo de adaptação a estes eventos requer soluções técnicas de infraestrutura geológico-geotécnica e de recursos hídricos. A ideia de clima estacionário, que norteia muitas dessas soluções, não é condição satisfeita para algumas séries de dados atuais e, potencialmente, não será satisfeita no futuro. Assim, é necessário compreender melhor o comportamento dos eventos extremos a fim de elaborar soluções técnicas segundo as projeções climáticas futuras. Portanto, o objetivo deste estudo é avaliar a ocorrência de precipitações extremas em condições não estacionárias no Brasil e suas projeções para cenários de mudanças climáticas. Para isso, as análises foram realizadas com resolução espacial de  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  para o Brasil com um banco de dados para o período histórico, composto por dados de precipitação observados de 1980 a 2015, e um banco de dados projetados de 2020 a 2099, dos modelos HADGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3, CCSM4, para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Para determinar a presença de tendências foi aplicado o teste de Mann-Kendall às séries de precipitação máxima dos dois bancos de dados. Posteriormente, as distribuições foram modeladas segundo a teoria dos valores extremos e aplicado o teste de desvio, utilizando três modelos: estacionário ( $GEV_0$ ) e com parâmetros dependentes do tempo ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ). Os testes foram aplicados ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Por fim, foram calculados as lâminas de precipitações extremas para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos em condições não estacionárias para período histórico e para as projeções futuras nos cenários de mudanças climáticas. Os resultados do período histórico indicaram séries não estacionárias em 17,5% da área do Brasil. Em especial, tendências positivas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Espírito Santo



e Rio de Janeiro. Parte do estado de São Paulo e Minas Gerais apresentaram tendências negativas. O teste de desvio indicou, para as séries não estacionárias, melhor aderência das distribuições ao modelo  $GEV_1$  do que ao  $GEV_2$ . A análise das lâminas de precipitação extrema indica que, uma vez definida a existência de tendência na série, empregar o cálculo de forma estacionária tende a subestimar a magnitude dos extremos de precipitação. Além disso, as análises das projeções climáticas futuras indicaram o aumento nas lâminas de precipitação extrema em relação às lâminas calculadas para o período histórico, em pelo menos 90% do território nacional, para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Isso poderá levar, dentre outros impactos, a inundações urbanas mais intensas e mais frequentes, com o aumento dos riscos sociais, ambientais e econômicos. Por fim, é indispensável o controle e a prevenção de impactos de eventos precipitação extrema por meio do dimensionamento adequado dos sistemas de infraestrutura hídrica.

Palavras-chave: Eventos extremos. Mudança Climática. GEV. Tendência.

## ABSTRACT

CORTEZ, Bianca Nespoli, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2020. **Extreme precipitations in non-stationary conditions for climate change scenarios in Brazil.** Advisor: Gabrielle Ferreira Pires.

Recent studies show that extreme events have increased in magnitude and / or frequency. It is believed that anthropogenic activities can amplify the natural variability of extreme precipitation events and affect their probabilistic behavior over time. In Brazil, these events have generated numerous disasters such as floods and landslides that have had negative impacts, especially in the urban environment. The adaptation process to these events requires technical solutions for geological-geotechnical infrastructure and water resources. The idea of stationary climate is a condition that is not met for some current data series and, potentially, will not be met in the future. Thus, it is necessary to better understand the behavior of extreme events in order to develop technical solutions according to future climate projections. Therefore, the objective of this study is to evaluate the occurrence of extreme rainfall in non-stationary conditions in Brazil and its projections for climate change scenarios. The analyzes were performed with spatial resolution of  $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$  for Brazil with a database for the historical period, composed of rainfall data from 1980 to 2015, and a projected database from 2020 to 2099, from the climate models HADGEM2-ES, MIROC5, MRI-CGCM3, CCSM4, for the climate scenarios RCP 4.5 e 8.5. The Mann-Kendall trend test was applied to the maximum precipitation series of the two databases. Subsequently, the distributions were modeled according to the extreme values theory and the deviation test was applied, using three models: stationary ( $GEV_0$ ) and with time-dependent parameters ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ). The tests were applied at the level of significance of 5% ( $\alpha = 0,05$ ). Finally, extreme precipitation lamina were calculated for the return periods of 5, 10, 25, 50 and 100 years in non-stationary conditions for the historical period and for future projections in climate change scenarios. The results of the historical period indicated non-stationary series in 17.5% of the area of Brazil. In particular, positive trends in the states of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Espírito Santo and Rio de Janeiro, while part of the state of São Paulo and Minas Gerais showed negative trends. The deviation test indicated, for non-stationary areas, better adherence of the distributions to the model

GEV<sub>1</sub> than to GEV<sub>2</sub>. The laminas analysis indicates that once the existence of a trend in the series is identified, employing the calculation in a stationary manner tends to underestimate the intensity of the precipitation extremes. In addition, the analysis of future climate projections indicated an increase in the intensity of the laminas as compared to the ones calculated for the historical period, in at least 90% of the national territory, for the scenarios RCP 4.5 and 8.5. This may lead, among other impacts, to more intense and more frequent urban floods, with the increase in social, environmental and economic risks. Finally, it is essential to control and prevent the impacts of extreme precipitation events through the adequate dimensioning of water infrastructure systems.

Keywords: Extreme events. Climate change. GEV. Trend.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1-** Distribuição espacial da média da precipitação máxima diária anual (mm/dia) de 1980 a 2015 para o Brasil, elaborada com dados de Xavier et al.(2016).  
.....21
- Figura 2-** Resultado do teste Mann-Kendall para os dados de precipitações máximas anuais do período histórico de 1980 a 2015: a) média das precipitações máximas anuais em mm/dia; b) distribuição espacial da tendência (mm/dia/ano); c) nível de significância, em que pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). .....35
- Figura 3-** Distribuição espacial dos modelos de análise da função generalizada de valores extremos, obtidos pelo teste do desvio para os dados de precipitação do período histórico de 1980 a 2015. ....36
- Figura 4-** Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059 no cenário RCP 4.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%( $\alpha = 0,05$ ). .....38
- Figura 5-** Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059 no cenário RCP 8.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%( $\alpha = 0,05$ ). .....39
- Figura 6-** Porcentagem da área de estudo de acordo com sinal da tendência e significância estatística para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2020 a 2059.....40
- Figura 7-** Resultado do teste do desvio para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059, para os modelos e *ensemble* no cenário RCP 4.5: (a), (c), (e), (g) e no cenário RCP 8.5: (b), (d), (f), (h). .....41
- Figura 8-** Porcentagem da área de estudo com aderência aos modelos de função generalizada de valores extremos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$  e  $GEV_2$ ), para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059, para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....42
- Figura 9-** Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099 no cenário RCP 4.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%( $\alpha = 0,05$ ). .....44

- Figura 10-** Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099 no cenário RCP 8.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ). .....45
- Figura 11-** Porcentagem da área de estudo de acordo com sinal da tendência e significância estatística para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2060 a 2099.....46
- Figura 12-** Resultado do teste do desvio para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099, para os modelos e *ensemble* no cenário RCP 4.5: (a), (c), (e), (g) e no cenário RCP 8.5: (b), (d), (f), (h). .....48
- Figura 13-** Porcentagem da área de estudo com aderência aos modelos de função generalizada de valores extremos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$  e  $GEV_2$ ), para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099, para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.....49
- Figura 14-** Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia, para o período histórico de 1980 a 2015: a), b), c), d), e), lâminas de precipitação extrema obtidas com modelo estacionário ( $GEV_0$ ); f), g), h), i), j), lâminas de precipitação extrema obtidas considerando onde não há estacionariedade ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$ ,  $GEV_2$ ); k), l), m), n), o) anomalia entre as lâminas não estacionárias e estacionárias. ....51
- Figura 15-** Porcentagem da área de estudo em que há diferença entre as lâminas de precipitação máxima calculadas sob condições de estacionariedade e não estacionariedade. Os valores estão apresentados para o período histórico de 1980 a 2015, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ) e distribuídos segundo o valor da anomalia. ....52
- Figura 16-** Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia: a), b), c), d), e), para o período histórico; f), g), h), i), j), para 2020 a 2059 no cenário RCP 4.5; k), l), m), n), o), para 2020 a 2059 no cenário RCP 8.5. ....54
- Figura 17-** Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor das lâminas de precipitação máxima calculadas para o período histórico (1980 a 2015) e futuro (2020 a 2059) no cenário RCP 4.5 e RCP 8.5, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ). ....55
- Figura 18-** Distribuição espacial da anomalia das lâminas de precipitação máxima, em mm/dia, para os dados de precipitação futuros de 2020 a 2059, associados aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ): a), b), c), d), e), entre os cenários RCP 8.5 e 4.5; f), g), h), i), j), entre o cenário RCP 4.5 e o período histórico (1980 a 2015); k), l), m), n), o), entre o cenário RCP 8.5 e o período histórico (1980 a 2015).....57

**Figura 19** - Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor da anomalia entre as lâminas de precipitação máxima do período futuro (2020 a 2059) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, e do período histórico (1980 a 2015), para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ). .....58

**Figura 20**- Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia: a), b), c), d), e), para o período histórico; f), g), h), i), j), para 2060 a 2099 no cenário RCP 4.5; k), l), m), n), o), para 2060 a 2099 no cenário RCP 8.5. ....60

**Figura 21**- Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor das lâminas de precipitação máxima calculadas para o período histórico (1980 a 2015) e futuro (2060 a 2099) no cenário RCP 4.5 e RCP 8.5, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ). .....61

**Figura 22**- Distribuição espacial da anomalia das lâminas de precipitação máxima, em mm/dia, para os dados de precipitação futuros de 2060 a 2099, associados aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ): a), b), c), d), e), entre os cenários RCP 8.5 e 4.5; f), g), h), i), j), entre o cenário RCP 4.5 e o período histórico (1980 a 2015); k), l), m), n), o), entre o cenário RCP 8.5 e o período histórico (1980 a 2015). .....63

**Figura 23** - Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor da anomalia entre as lâminas de precipitação máxima do período futuro (2060 a 2099) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, e do período histórico (1980 a 2015), para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ). .....64

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1** – Modelos climáticos globais utilizados nas projeções de mudança do clima regionalizadas. ....26

**Tabela 2**- Modelos da Função Generalizada de Valores Extremos estacionários ( $GEV_0$ ) e não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ). ....28

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas.
CCSM4	<i>Community Climate System Model</i> , versão 4.
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais.
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos.
GCM	Modelo de Circulação Geral.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GEV	Generalizada de Valores Extremos
HADGEM2-ES	<i>Hadley Centre Global Environmental Model</i> versão 2.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
IPCC AR5	Intergovernmental Panel on Climate Change Assessment Report#5.
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> .
MIROC5	<i>Model for Interdisciplinary Research on Climate</i> .
MRI-CGCM3	<i>Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Mode</i> , versão 3.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> .
NCCS	<i>NASA Center for Climate Simulation</i> .
RCM	Modelo Climático Regional.
RCP 4.5	Cenário climático que pressupõe que a mudança climática leva a uma forçante radiativa de cerca de $4.5 \text{ W m}^{-2}$ no ano 2100.
RCP 8.5	Cenário climático que pressupõe que a mudança climática leva a uma forçante radiativa de cerca de $4.5 \text{ W m}^{-2}$ no ano 2100.
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> .
RX1day	Índice de máxima precipitação diária.
TSM	Temperatura da Superfície do Mar.
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> .
ZACS	Zona de Convergência do Atlântico Sul.
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$L_{FUT}$	Lâmina de precipitação referente à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação em cenários de mudanças climáticas futuras.
$L_{HIS}$	Lâmina de precipitação referente à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação para o período histórico.
$L^{S,F}$	Lâmina de precipitação referente à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação em cenários de mudanças climáticas para o período futuro simulado.
$L^{S,P}$	Lâmina de precipitação referente à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação em cenários de mudanças climáticas para o período histórico simulado.
$L_5, L_{10}, L_{25}, L_{50}$ e $L_{100}$	Lâmina de precipitação associado ao período de retorno de 5, 10, 25, 50, e 100 anos respectivamente.
$GEV_0$	Função Generalizada de Valores Extremos - Modelo clássico, com todos os parâmetros constantes.
$GEV_1$	Função Generalizada de Valores Extremos – Modelo com o parâmetro de localização em função do tempo.
$GEV_2$	Função Generalizada de Valores Extremos - Modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo.
$\ell_0(GEV_0)$	Logaritmo da máxima verossimilhança do modelo $GEV_0$ .
$\ell_1(GEV_1)$	Logaritmo da máxima verossimilhança do modelo $GEV_1$ .
$\theta$	Vetor parâmetro.
$\beta_{0-3}$	Componentes do vetor parâmetro.
$S$	Fator de escala.
$\mu$	Parâmetro de localização.
$\xi$	Parâmetro de forma.
$\sigma$	Parâmetro de escala.
$\mu_t$	Parâmetro de localização em função do tempo.
$\sigma_t$	Parâmetro de escala em função do tempo.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVOS.....	20
2.1.	Objetivo geral.....	20
2.2.	Objetivos específicos.....	20
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1.	Área de estudo.....	21
3.2.	Dados climáticos para o período histórico.....	23
3.3.	Dados climáticos projetados.....	24
3.4.	Modelagem em séries de precipitações extremas.....	26
3.4.1.	Análise não estacionária.....	27
3.4.2.	Estimativa dos parâmetros.....	29
3.4.3.	Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição de séries de precipitações extremas.....	30
3.4.4.	Cálculo das lâminas de precipitações extremas.....	31
3.5.	Cálculo das incertezas das lâminas de precipitações extremas.....	33
4.	RESULTADOS.....	34
4.1.	Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição de séries de precipitações extremas para o período histórico.....	34
4.2.	Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição em séries de precipitações extremas no futuro.....	36
4.3.	Lâminas de precipitação extrema.....	49
4.3.1.	Diferenças entre estacionariedade e não estacionariedade para o período histórico.....	49
4.3.2.	Precipitação extrema estimada para o período de 2020-2059.....	52
4.3.3.	Precipitação extrema estimada para o período de 2060-2099.....	58
5.	DISCUSSÃO.....	65
6.	CONCLUSÕES.....	76
	REFERÊNCIAS.....	78
	ANEXO A.....	85
	APÊNDICE B.....	87

## 1. INTRODUÇÃO

Estudos observacionais recentes trazem evidências de como os extremos de precipitação mudaram ao longo das últimas décadas, mostrando que, em escala local, continental ou global, estes eventos têm aumentado em intensidade e/ou frequência (ALEXANDER et al., 2006; MCPHILLIPS et al., 2018; WESTRA; ALEXANDER; ZWIERS, 2013; XAVIER et al., 2019).

Alterações em variáveis hidro meteorológicas, como a precipitação, têm sido atribuídas às mudanças climáticas, que nas últimas décadas tornaram-se grande preocupação mundial. A Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em seu artigo 1º, define mudança climática como “uma mudança do clima que é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, que altera a composição da atmosfera mundial e que vai além da variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis”. A UNFCCC faz assim, distinção entre as mudanças climáticas atribuídas às atividades humanas que alteram a composição atmosférica e a variabilidade do clima atribuída a causas naturais (IPCC, 2014)

Embora eventos extremos estejam associados à variabilidade natural do clima, é provável que um clima futuro mais quente implique em eventos extremos de precipitação mais frequentes e intensos (MARENGO, 2014). Em outras palavras, com a elevação da temperatura média global compreende-se que as atividades antropogênicas podem amplificar a variabilidade natural de eventos extremos de precipitação e afetar o comportamento probabilístico dos extremos ao longo do tempo (SARHADI; SOULIS, 2017).

Estudos recentes indicam que existe uma confiança média de que ações antropogênicas contribuem para a intensificação da precipitação extrema em escala global, com grandes variações sazonais e espaciais. Além disso é provável que tenha ocorrido aumentos estatisticamente significativos no número de eventos de precipitação intensa em mais regiões do que reduções (CHOU et al., 2014a; MCPHILLIPS et al., 2018). Diante desse cenário, há a necessidade de compreender melhor o comportamento dos eventos extremos e como essas mudanças podem impactar os sistemas sociais e ecológicos e infraestrutura.

O aumento na frequência e intensidade de eventos extremos pode gerar impactos adversos sobre a produtividade e a produção de culturas agrícolas, com efeitos sobre a segurança alimentar. Além disso, em ambientes urbanos, por exemplo, os impactos podem estar relacionados à mobilidade urbana,

abastecimento de água, suprimento de energia e saúde, sobretudo com doenças de veiculação hídrica.

Estes impactos são gerados por desastres como enxurradas, inundações e movimentos de massas, que por sua vez também estão correlacionados com a urbanização acelerada (MCPHILLIPS et al., 2018). Essa forma de urbanização desencadeia a expansão desordenada dos centros urbanos, a falta de infraestrutura e a ocupação de áreas de risco geológico-geotécnico, que são áreas sujeitas à ocorrência de processos como movimentos de massas, erosão, inundação e colapsos, deixando a população mais vulnerável. Áreas densamente urbanizadas podem ser vulneráveis a desastres gerados por eventos extremos no presente e esta vulnerabilidade no futuro pode aumentar em decorrência das mudanças climáticas (LYRA et al., 2018).

No Brasil inúmeros casos de inundações e movimentos de massa são registrados todos os anos. Episódios recentes ocorridos nos estados de Santa Catarina, em 2008; Rio de Janeiro – Ilha Grande (Angra dos Reis), em 2009; Niterói, em 2010; região serrana, em 2011; e na capital em 2019 – ilustram os danos gerados por deslizamentos no país (IBGE, 2019b). Já neste ano de 2020, vários municípios do estado do Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo sofreram com inundações e deslizamentos provocados por chuvas intensas, que acarretaram em mortes e milhares de pessoas desalojadas.

A população está mais vulnerável e menos adaptável a eventos extremos, especialmente em condições de mudanças climáticas (MARENGO et al., 2011). A adaptação das populações é relevante neste contexto e deve ser tratada em dois sentidos: avaliação dos impactos e vulnerabilidades e desenvolvimento de estratégias e medidas concretas de redução de riscos (IPCC, 2007). Dessa maneira, é necessário criar processos de adaptação ao ambiente, desenvolver técnicas relacionadas à gestão de riscos naturais, fundamentar análises e decisões políticas.

O caminho para promover a gestão de riscos naturais passa por soluções técnicas de infraestrutura geológico-geotécnica e de recursos hídricos. A abordagem mais comum de eventos de precipitação extrema para a engenharia é baseada nos máximos anuais, onde o maior evento de cada ano observado de uma série climática é selecionado e distribuições estatísticas são aplicadas para estimar a probabilidade de ocorrência de eventos de várias magnitudes, comumente

considerando-se séries estacionárias (LANG; OUARDA; BOBÉE, 1999; OUARDA; CHARRON, 2019).

A ideia de clima estacionário, que norteia muitas soluções técnicas, se baseia na dinâmica de sistemas naturais que flutuam dentro de um envelope imutável de variabilidade climática (MILLY et al., 2008). Entretanto, esta condição não é satisfeita para algumas séries de dados atuais e, potencialmente, não será satisfeita no futuro (IPCC, 2012; MILLY et al., 2008). Dessa forma, para que as soluções técnicas sejam efetivas e seguras, devem ser projetadas e operadas considerando cenários de mudanças climáticas futuras, e não baseadas apenas em observações climáticas como são desenvolvidos os projetos atualmente.

Porém, projetar soluções técnicas que considerem os efeitos das mudanças climáticas através de projeções futuras esbarra na problemática de que os dados disponíveis em geral não são gerados em um formato que gestores e engenheiros projetistas possam facilmente utilizar para mitigar e se adaptar às condições futuras (MARKUS et al., 2018). Assim, estudos multidisciplinares que envolvam conhecimentos climáticos e de engenharia podem desempenhar papel importante para auxiliar no desenvolvimento de infraestrutura para a adaptação da população às mudanças climáticas.

Existem alguns poucos estudos que tem identificado a existência de tendências em algumas regiões do Brasil (PORTO DE CARVALHO et al., 2014; SILVA DIAS et al., 2013; XAVIER et al., 2019). Estudos mais específicos que abordam a modelagem de séries precipitação extrema não estacionárias são mais escassos ainda (ASSIS et al., 2018; PEDRON et al., 2017; ZILLI et al., 2017). Além disso, estes estudos são direcionados para as regiões Sul e Sudeste, recentemente mais afetadas por desastres, e inexistem estudos em larga escala para as demais regiões do país.

Dessa forma, faz-se necessário realizar estudos que investiguem condições de estacionariedade de séries de precipitação extrema no Brasil, e avaliem lâminas de chuva comumente utilizadas em projetos que estejam em condições de não estacionariedade para o período histórico, bem como determiná-las para as projeções futuras em cenários de mudanças climáticas.

Assim, este estudo objetiva avaliar a ocorrência de precipitações extremas em condições de não estacionariedade no Brasil e suas projeções para cenários de mudanças climáticas. Espera-se que a avaliação e as informações fornecidas nesta

pesquisa baseiem estudos de impacto, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas em diferentes setores socioeconômicos para o país.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliar a ocorrência de chuvas extremas no Brasil e as suas projeções futuras para cenários de mudanças climáticas.

### **2.2. Objetivos específicos**

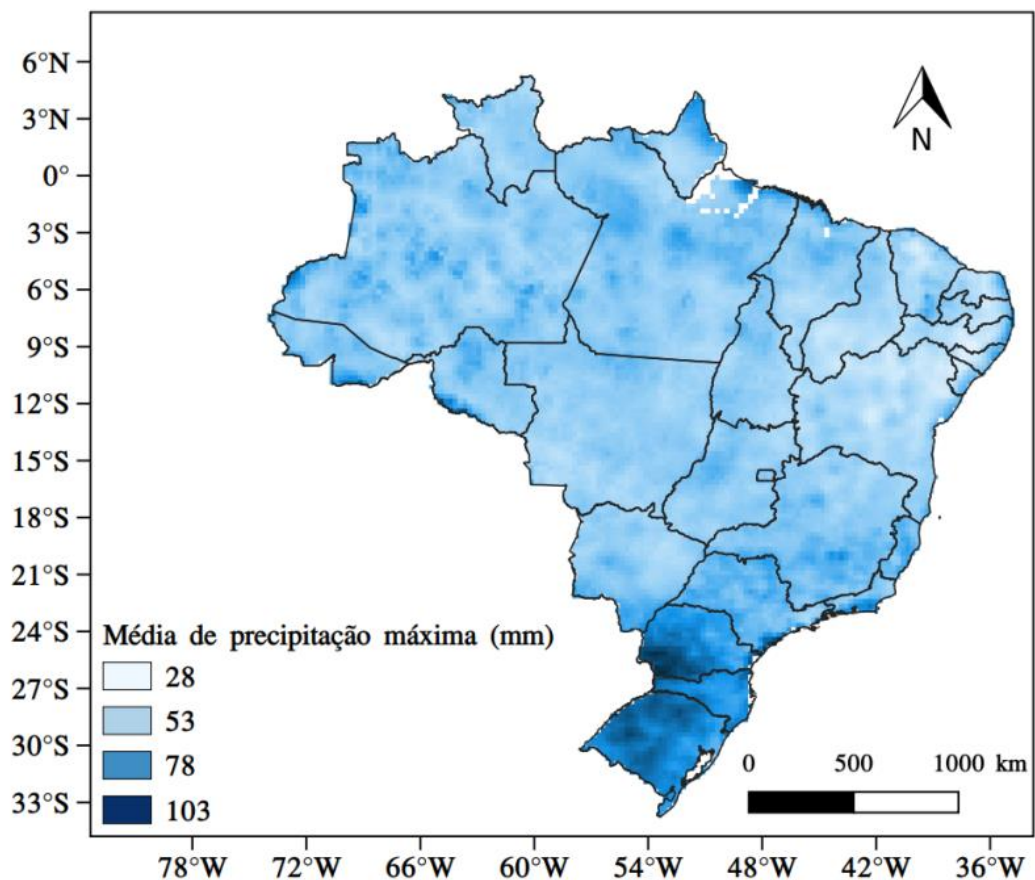
- a) Analisar a estacionariedade das séries de extremos de precipitações observadas e de projeções futuras em cenários de mudanças climáticas no Brasil;
- b) Realizar a modelagem das distribuições de precipitações extremas para o período histórico e projeções futuras em cenários de mudanças climáticas no Brasil;
- c) Calcular as lâminas de precipitações extremas para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos em condições de não estacionariedade para período histórico e para as projeções futuras em cenários de mudanças climáticas no Brasil.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

Para o presente estudo foram analisadas as séries de precipitações extremas diárias anuais para todo o território brasileiro. O Brasil possui aproximadamente 8.510.820,623 km<sup>2</sup> de área, localizado entre as longitudes -75° e -35° e as latitudes +5° e -34°, possui 5.570 municípios, que estão espalhados em cinco regiões políticas: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul (IBGE, 2019a). Com a resolução espacial (0,25° x 0,25°) da média de precipitação máxima diária anual (mm/dia) para a área de estudo observa-se que a maior parte do país apresenta a média desta variável entre 53 e 78 mm/dia. Na região Sul estes valores se intensificam, ultrapassando os 78 mm/dia (Figura 1).

Figura 1- Distribuição espacial da média da precipitação máxima diária anual (mm/dia) de 1980 a 2015 para o Brasil, elaborada com dados de Xavier et al.(2016).



Fonte: Autora

Grande parte das precipitações extremas ocorre devido a sistemas precipitantes de mesoescala, que muitas vezes podem ser incorporados em

sistemas sinóticos que são influenciados por condições de grande escala, que por sua vez são influenciadas também pela variabilidade climática (CAVALCANTI, 2012). A variabilidade interanual do clima sobre a América do Sul, conseqüentemente sobre o Brasil, é controlada pelos fenômenos El Niño e La Niña sobre o Pacífico Equatorial em conjunto com o gradiente meridional de anomalias de TSM (Temperatura da Superfície do Mar) sobre o Atlântico Tropical (MARENGO, 2007).

O fenômeno conhecido como ENOS (El Niño Oscilação Sul) é determinado pela interação entre o Oceano Pacífico e a atmosfera. O processo oceânico ocorre com o gradiente de pressão entre o Pacífico Central e do Oeste (Oscilação Sul) que possui variações associadas ao aquecimento ou esfriamento do Pacífico Equatorial. O fenômeno atmosférico decorre do aquecimento anômalo das águas do Pacífico na costa da América do sul. O El Niño pode ser caracterizado como recorrente, apesar de não possuir um período regular, ocorrendo com intervalo de dois a sete anos, com variação da sua intensidade, além disso, com as mudanças no clima espera-se o aumento da frequência destes eventos (MARENGO, 2007). Este fenômeno influencia de forma consistente a ocorrência de eventos de precipitação extrema no Sul do país (MARENGO, 2007), região que possui maior concentração de médias máximas de precipitação.

A região Sudeste, também é muito afetada por extremos de precipitação, que frequentemente estão relacionados ao desenvolvimento convectivo dentro de sistemas sinóticos, como sistemas frontais e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZACS) (LIMA; SATYAMURTY; FERNÁNDEZ, 2010). Além disso, este fluxo de umidade do Oceano Atlântico sobre o norte da América do Sul atravessa a região da Amazônia em direção ao sudeste, aumentando a umidade no sudeste do Brasil, favorecendo a intensificação da convecção nesta região (CARVALHO; JONES; LIEBMANN, 2002; CAVALCANTI, 2012)

Já na região Nordeste, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é o principal sistema em que o desenvolvimento convectivo pode ocorrer relacionado a extremos de precipitação (CAVALCANTI, 2012). O comportamento anômalo da ZCIT pode produzir extremos de precipitação na região. Este movimento é influenciado pela TSM do Atlântico Sul; quando as águas nesta região estão mais quentes a ZCIT se desloca para o sul e fica sobre o nordeste, favorecendo a ocorrência de precipitações. Efeitos da La Niña combinados com a ZCIT também favorecem a



precipitação intensa nesta região (UVO et al., 1998). A região Norte, principalmente na região amazônica, além de sofrer influência da ZCIT, tem precipitação prioritariamente convectiva com ciclos diurnos que foram analisados em vários estudos (JANOWIAK; KOUSKY; JOYCE, 2005).

Além de sistemas de escalas sinóticas atuantes sobre estas regiões, outros fatores que intensificam a convecção local podem provocar eventos extremos. As chuvas convectivas tendem a ser mais intensas com o aquecimento da superfície, a formação de ilhas de calor provocadas pela urbanização e intensa evapotranspiração de superfícies úmidas e aquecidas.

Todos esses fatores estão sendo intensificados com o aquecimento global, o que pode aumentar a magnitude das chuvas. A emissão de gases causadores do efeito estufa resulta no aumento da temperatura do ar, fazendo com que a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter (sem condensar) aumente. Dessa forma a elevação da temperatura global pode levar a atmosfera a conter mais vapor d'água disponível para a precipitação. Assim, o aumento dos gases de efeito estufa pode contribuir para a ocorrência de eventos extremos.

### **3.2. Dados climáticos para o período histórico**

Os dados climáticos foram obtidos a partir do banco de dados de Xavier et al. (2016), construído através de dados de observações em superfície provenientes da Agência Nacional de Águas (ANA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE). Para formulação deste banco de dados as observações foram ligadas usando um algoritmo de interpolação ponderada pelo inverso do quadrado da distância com uma resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , para todo o território nacional (XAVIER; KING; SCANLON, 2016). Esse conjunto de dados compreende o período de 1980 a 2015, e está acessível de forma gratuita em <http://careyking.com/data-download/>. Optou-se por este conjunto de dados tendo em vista que a sua grade de resolução é compatível com a resolução dos modelos escolhidos para as projeções futuras.

A série histórica foi determinada pela extração da precipitação máxima diária anual ( $\text{mm.dia}^{-1}$ ) para cada pixel da área de estudo do banco de dados histórico no período de 1980 a 2015. Esta metodologia de máxima precipitação diária objetiva o cálculo das lâminas de precipitação extrema associadas aos períodos de recorrência de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Esta análise visa à aplicabilidade desse trabalho no

desenvolvimento de projetos de soluções técnicas de infraestrutura geológico-geotécnica e de recursos hídricos, onde é adotado o valor máximo de precipitação associada ao período de vida útil da estrutura.

### 3.3. Dados climáticos projetados

As análises deste trabalho foram realizadas com dados estimados de precipitação para o período histórico simulado, 1980 a 2006, e para o período futuro de 2020 a 2099 (subdividido em dois intervalos: 2020 a 2059 e 2060 a 2099).

As análises para os dados projetados foram realizadas para os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5. O *Representative Concentration Pathway* (RCP) 4.5 é um cenário cujo a forçante radiativa é de  $4.5 \text{ W m}^{-2}$  no ano 2100 e inclui emissões globais de longo prazo de gases de efeito estufa (THOMSON et al., 2011). Para o RCP 8.5 as emissões e concentrações de gases de efeito estufa aumentam consideravelmente ao longo do tempo, levando a uma forçante radiativa de  $8.5 \text{ W m}^{-2}$  no final do século. Este cenário combina suposições sobre crescimento da população e de aumento da renda relativamente lento com taxas modestas de mudanças tecnológicas e aumento na intensidade de energia, levando em longo prazo a alta demanda de energia e emissões de GEE na ausência de políticas adaptação à mudança climática (RIAHI et al., 2011).

Os dois cenários foram adotados a fim de apresentar resultados que representam a resposta do sistema climático à estabilização dos componentes antropogênicos da forçante radiativa, em um cenário intermediário, e explorar a via de um cenário de alta emissão de gases de efeito estufa. Apesar do RCP 8.5 ser o mais pessimista entre todos os quatro Cenários do IPCC AR5, é também o que melhor representa as emissões do período de 2005-2014 (FUSS et al., 2014).

A avaliação para escolha dos modelos utilizados nas análises foi realizada com base no estudo de Ávila et al. (2020), considerando os modelos que apresentaram melhor resposta para o índice de máxima precipitação diária (RX1day), para a área de estudo. Assim, realizou-se as análises para os dois cenários com dados climáticos de quatro modelos climáticos: o *Hadley Centre Global Environmental Model*, versão 2 (HADGEM2-ES) (COLLINS et al., 2011), o *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC5) (WATANABE et al., 2010), *Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation*

*Model*, versão 3, MRI-CGCM3 (YUKIMOTO et al., 2012) e o *Community Climate System Model*, versão 4 CCSM4 (LAWRENCE et al., 2012).

Os dados dos modelos HADGEM2-ES e MIROC5 foram gerados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e disponibilizados na Plataforma PROJETA (Tabela 1). Os dados dos modelos MRI-CGCM3 e CCSM4 fazem parte do conjunto de dados NEX-GDDP, preparado pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* usando o *NASA Earth Exchange* e distribuído pelo Centro de Simulação Climática da NASA (NCCS) (Tabela 1). Optamos por compor metade do número de modelos escolhidos para o *ensemble* com modelos gerados por *downscaling* estatístico (MRI-CGCM3 e CCSM4) e metade com modelos gerados por *downscaling* dinâmico (MIROC5 e HADGEM2-ES).

O *downscaling* dinâmico consiste na aplicação de um modelo climático regional (RCM) de área limitada e alta resolução, em um modelo global de baixa resolução. A resolução fina e as parametrizações físicas avançadas de um RCM, juntamente com a inclusão de processos dinâmicos críticos ausentes no GCM original, geralmente levam a resultados mais sensíveis aos recursos de mesoescala e sinóticos, como de convecção, contabilizando influências topográficas de montanhas, lagos e costas (MARKUS et al., 2018). O *downscaling* dinâmico, na maioria das vezes, leva a variabilidade e magnitude de precipitação mais precisas, representando melhor os eventos extremos (KAWAZOE; GUTOWSKI, 2013; MARKUS et al., 2018).

Por outro lado, o *downscaling* estatístico desenvolve relações estatísticas entre a variável simulada em larga escala e variáveis climáticas em escalas locais e, em seguida, aplica essas relações ao GCM para aproximar os recursos climáticos locais esperados no futuro. Assim, esta abordagem assume que as atuais relações entre as variáveis de larga escala e as de escala local permanecem constantes sob as mudanças climáticas (MARKUS et al., 2018).

Tabela 1 – Modelos climáticos globais utilizados nas projeções de mudança do clima regionalizadas.

<b>Modelo</b>	<b>Resolução horizontal</b>	<b>Downscaling</b>	<b>Link de acesso</b>	<b>Referências</b>
HADGEM2-ES MIROC5	20 km x 20 km*	Dinâmico	<a href="https://projeta.cptec.inpe.br/">https://projeta.cptec.inpe.br/</a>	(CHOU et al., 2014a, 2014b; LYRA et al., 2018)
MRI-CGCM3 CCSM4	0,25°x 0,25°	Estatístico	<a href="https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/">https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/</a>	(THRASHER et al., 2012)

\* Interpolados para 0,25° x 0,25° (Ávila et al., 2020).

Fonte: Autora

### 3.4. Modelagem em séries de precipitações extremas

A distribuição da função Generalizada de Valores Extremos (GEV) é comumente usada para modelar extremos hidroclimáticos (CHENG et al., 2014; EL ADLOUNI et al., 2007; TRAMBLAY et al., 2013).

A função generalizada de valores extremos fornece uma estrutura robusta para a análise de extremos climáticos associados a períodos de retorno. Esta estrutura de análise permite incorporar parâmetros de distribuição condicionados a covariáveis que representam a variabilidade climática ou o tempo (KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002; OUARDA; CHARRON, 2019). A inclusão dos modelos não estacionários na análise da função generalizada de valores extremos tem sido implementada em diversos estudos, afim de obter estimativas futuras que contemplem as mudanças do clima (AGILAN; UMAMAHESH, 2017b; CHENG et al., 2014; TRAMBLAY et al., 2013; VU; MISHRA, 2019; WESTRA; ALEXANDER; ZWIERS, 2013; ZHOU et al., 2012).

As séries de precipitações extremas diárias foram formadas com base nos máximos anuais durante o período de análise. De acordo com a teoria dos valores extremos, o comportamento destes máximos geralmente pode ser representado por uma das três famílias de distribuição de valores extremos: Gumbel, Fréchet e Weibull (JENKINSON, 1955).

A GEV representa estas três distribuições combinadas, em uma única família paramétrica, composta por três parâmetros: localização ( $\mu$ ), que especifica o centro da distribuição; o parâmetro de escala ( $\sigma$ ), que determina o tamanho dos desvios em torno do parâmetro de localização; e o parâmetro de forma ( $\xi$ ) que

governa o comportamento da cauda da distribuição GEV (Equações 1 e 2) (COLES, 2001).

para  $\xi \neq 0$

Equação 1

$$GEV(x|\mu, \sigma, \xi) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{\frac{-1}{\xi}}\right\}$$

para  $\xi = 0$

Equação 2

$$GEV(x|\mu, \sigma, \xi) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]$$

A teoria dos valores extremos para sequências aleatórias estacionárias representa o modelo padrão de estimativa de extremos de precipitação amplamente utilizado. A formulação adequada da teoria dos valores extremos exige que as séries de dados a partir das quais os parâmetros de distribuição de probabilidade são estimados venham de observações independentes e identicamente distribuídas (iid) (EL ADLOUNI et al., 2007). Para representar este modelo clássico adotou-se  $GEV_0$  ( $\mu, \sigma, \xi$ ), com todos os parâmetros constantes.

#### 3.4.1. Análise não estacionária

A estacionariedade pode ser definida como invariância temporal das propriedades dos extremos. A realidade dos extremos hidro meteorológicos não estacionários precisa ser adequadamente abordada, uma vez que com as mudanças climáticas podem surgir condições de não estacionariedade, de forma que o modelo GEV com parâmetros constantes pode não ser mais válido (LEADBETTER; LINDGREN; ROOTZÉN, 1983).

Para integrar os efeitos da não estacionariedade e refletir a condição de mudança, os parâmetros da GEV devem mudar ao longo do tempo (COLES, 2001). Essa análise vem sendo amplamente estudada, através de funções dependentes do tempo ou de covariáveis intimamente ligadas à variação temporal (CHENG et al., 2014; SARHADI; SOULIS, 2017; VU; MISHRA, 2019).

No presente estudo para contabilizar a não estacionariedade os parâmetros de localização ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) assumem a configuração de uma tendência dependente do tempo, e apenas o parâmetro de forma ( $\xi$ ) permanece constante. Não é recomendado assumir o parâmetro de forma como uma função do tempo, já que a estimativa precisa deste parâmetro é muito difícil (COLES, 2001).

Assim, a função GEV variável no tempo é definida como  $x | \mu_t, \sigma_t, \sim \text{GEV}(\mu_t, \sigma_t, \xi)$ . Assumimos os parâmetros de localização e escala como uma função linear do tempo para contabilizar a não estacionariedade, e dessa forma,  $\mu_t$  e  $\sigma_t$  são dados pelas Equações 3 e 4 respectivamente. A variação linear dos parâmetros com o tempo é adotada por diversos autores (SARHADI; SOULIS, 2017; VU; MISHRA, 2019), visto que, por vezes, este formato confere melhor aderência as distribuições de séries de precipitação extrema.

Equação 3

$$\mu_t = \beta_0 + \beta_1 t$$

Equação 4

$$\sigma_t = \beta_2 + \beta_3 t$$

Os modelos que compõem a análise dos valores extremos adotados para este estudo estão apresentados na Tabela 2. Para cada um dos modelos de função generalizada de valores extremos temos o vetor de parâmetros ( $\theta$ ) a ser estimado (Tabela 2). Três parâmetros para o modelo  $\text{GEV}_0$ ,  $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$ , quatro parâmetros para o modelo  $\text{GEV}_1$ ,  $\theta = (\beta_0, \beta_1, \sigma, \xi)$ , e seis parâmetros para o modelo  $\text{GEV}_2$ ,  $\theta = (\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \sigma, \xi)$ .

O estudo de modelagem de precipitação extrema foi realizado para o período histórico e para o período simulado histórico e futuro. A modelagem para o período futuro contemplou todos os modelos e cenários descritos na secção 3.3.

Tabela 2- Modelos da Função Generalizada de Valores Extremos estacionários ( $\text{GEV}_0$ ) e não estacionários ( $\text{GEV}_1$  e  $\text{GEV}_2$ ).

Modelo	Descrição do Modelo GEV	Função	Parâmetros variáveis com o tempo
$\text{GEV}_0$	Modelo clássico, com todos os parâmetros constantes.	$\text{GEV}(\mu, \sigma, \xi)$	-
$\text{GEV}_1$	Modelo com o parâmetro de localização em função do tempo.	$\text{GEV}(\beta_0 + \beta_1 t, \sigma, \xi)$	$\mu_t$
$\text{GEV}_2$	Modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo	$\text{GEV}(\beta_0 + \beta_1 t, \beta_2 + \beta_3 t, \xi)$	$\mu_t, \sigma_t$

Fonte: Autora

### 3.4.2. Estimativa dos parâmetros

O método da máxima verossimilhança (SMITH, 1985) foi usado para obter as melhores estimativas de todos os parâmetros estatísticos para os modelos da função generalizada de valores extremos estacionários e não estacionários.

Coles (2001) apresentou a descrição do método de estimativa de máxima verossimilhança, em que para uma amostra  $X = (X_1, \dots, X_m)$ , os parâmetros dos modelos GEV podem ser determinados através da maximização da função de probabilidade de verossimilhança (L) (Equações 5, 6 e 7), ou de maneira mais simples, minimizando o logaritmo desta função.

Os parâmetros foram obtidos pela solução de um sistema de equações formado pelas derivadas parciais da função de probabilidade de verossimilhança L em relação a cada parâmetro. Para a solução deste sistema foi necessária a utilização de um método numérico, o algoritmo de Raphson - Newton (EL ADLOUNI et al., 2007) implementados por meio do software livre R (R, 2018) utilizando o pacote *ismev* (Heffernan et al., 2018).

Equação 5

$$L(\mu, \sigma, \xi) = \prod_{i=1}^m f(x_i | \mu, \sigma, \xi)$$

para  $\xi \neq 0$

Equação 6

$$\begin{aligned} \ell(\mu, \sigma, \xi) = & -m \log \sigma - (1 + 1/\xi) \sum_{i=1}^m \log \left[ 1 + \xi \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right) \right] \\ & - \sum_{i=1}^m \left[ 1 + \xi \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \end{aligned}$$

para  $\xi = 0$

Equação 7

$$\ell(\mu, \sigma) = -m \log \sigma - \sum_{i=1}^m \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right) - \sum_{i=1}^m \exp \left[ - \left( \frac{X_i - \mu}{\sigma} \right) \right]$$

Onde,  $X_i$  é a máxima precipitação anual, e  $m$  é o número de anos da série em análise,  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\xi$ , representam os parâmetros de posição, escala e forma respectivamente.

### 3.4.3. Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição de séries de precipitações extremas

A existência de possíveis tendências durante os períodos em análise foi avaliada usando duas abordagens. Primeiro, com o teste não paramétrico de detecção de tendências de Mann – Kendall (MK) (KENDALL, 1956; MANN, 1945), um dos testes mais utilizados para analisar mudanças em séries climáticas. Segundo, com o teste de desvio (COLES, 2001), realizado entre um modelo estacionário ( $GEV_0$ ) e os modelos não estacionários com parâmetros dependentes do tempo ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ). Os testes foram aplicados ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

As duas abordagens adotadas são complementares (TRAMBLAY et al., 2012). O teste MK possibilita identificar a existência e o sinal da tendência e o teste do desvio permite comparar a validade dos modelos GEVs, baseado na diferença do logaritmo da máxima verossimilhança calculado para cada modelo. Sejam  $GEV_0$  e  $GEV_1$  dois modelos tais que  $GEV_0 \subset GEV_1$ . Com base na estatística de desvio (COLES, 2001; EL ADLOUNI et al., 2007) a estatística D do teste do desvio é dado pela Equação 8:

$$D = 2[\ell_1(GEV_1) - \ell_0(GEV_0)]$$

Equação 8

Onde  $\ell_1(GEV_1)$  e  $\ell_0(GEV_0)$  são o logaritmo da máxima verossimilhança dos modelos  $GEV_1$  e  $GEV_0$ , respectivamente. Grandes valores de D indicam que o modelo  $GEV_1$  é mais adequado pois explica melhor a variação de dados que o modelo  $GEV_0$ . Já pequenos valores de D sugerem que o aumento na complexidade do modelo não traz benefícios na capacidade do modelo de representar os dados (COLES, 2001).

Séries que apresentam aderência ao modelo  $GEV_0$  caracterizam séries estacionárias e as que apresentaram aderência aos modelos  $GEV_1$  e  $GEV_2$ , caracterizam séries não estacionárias. Além disso, para as séries não estacionárias foi possível identificar ainda qual dos dois modelos não estacionários representa melhor a série em análise.

O maior valor de D indica qual modelo é mais adequado quando comparado entre eles ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$  ou  $GEV_2$ ). Este método foi adotado para determinar qual modelo de função generalizada de valores extremos será utilizado para o cálculo



das lâminas de precipitação extrema, isto por que os métodos que modelam especificamente a tendência nos parâmetros das distribuições de valor extremo fornecem o maior poder de detecção de tendências estatisticamente significativas (ZHANG; ZWIERS; LI, 2004).

#### 3.4.4. Cálculo das lâminas de precipitações extremas

Este item seguiu metodologia semelhante a trabalhos anteriores que buscaram avaliar a recorrência de precipitação em cenários de mudanças climáticas para outras partes do globo (AGILAN; UMAMAHESH, 2017a; CHENG et al., 2014; SARHADI; SOULIS, 2017; TRAMBLAY et al., 2012). Essa análise foi realizada em duas etapas. Na primeira foram calculados as lâminas referentes à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação para o período histórico ( $L_{HIS}$ ). Posteriormente, foram calculados as lâminas em cenários de mudanças climáticas futuras ( $L_{FUT}$ ). Foram calculadas as lâminas de precipitação associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

As Lâminas de precipitação extrema utilizadas para determinar  $L_{FUT}$  e  $L_{HIS}$  foram computados segundo a teoria dos valores extremos, conforme Equações 9 e 10 (COLES, 2001).

para  $\xi \neq 0$

Equação 9

$$\hat{z}_r = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \{1 - [-\log(1 - r^{-1})]^{-\xi}\}$$

para  $\xi = 0$

Equação 10

$$\hat{z}_r = \mu - \sigma \log[-\log(1 - r^{-1})]$$

Onde,  $\hat{z}_r$  representa o nível de retorno, aqui denominado lâmina de precipitação máxima, associado ao período de retorno ( $r$ ) e  $\mu$ ,  $\sigma$ ,  $\xi$ , representam os parâmetros de posição, escala e forma respectivamente, calculados conforme descrito na seção 3.4.2.

Para o cálculo das lâminas que consideram a não estacionariedade, onde temos a variação dos parâmetros com o tempo, observa-se a existência de uma função generalizada de valores extremos para cada ano da série e, por conseguinte, uma lâmina para cada ano do período em análise. Para obter um valor único para a lâmina futura foi adotado o maior valor estimado da série temporal em análise. Essa

abordagem foi empregada a favor da segurança, considerando que este evento máximo deve ocorrer ao menos uma vez no período de análise, tendo em vista a aplicabilidade do estudo frente ao dimensionamento de obras e análises de risco geológico-geotécnico.

Na primeira etapa foi avaliada a frequência de ocorrência dos eventos de precipitação extrema no banco de dados do período histórico de 1980 a 2015 (XAVIER; KING; SCANLON, 2016). No presente estudo para cada pixel da área de estudo a abordagem seguiu as seguintes etapas:

- i. Cálculo das lâminas de precipitação extrema (Equações 9 e 10) referentes ao período histórico ( $L_{HIS}$ ), com os parâmetros constantes (item 3.4.2) obtidos com modelo estacionário ( $GEV_0$ ).
- ii. Cálculo das lâminas de precipitação extrema (Equações 9 e 10) referentes ao período histórico ( $L_{HIS}$ ), utilizando o modelo GEV mais adequado, para cada pixel, definido pelo teste de desvio, com os parâmetros determinados de acordo com cada modelo GEV, conforme metodologia do item 3.4.2.

Na segunda etapa foi avaliada a frequência de ocorrência dos eventos de precipitação máxima em cenários de mudanças climáticas futuras ( $L_{FUT}$ ), para o período de 2020 a 2059 e 2060 a 2099, nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5. Para o cálculo do ( $L$ ) foram realizados os seguintes passos:

- i. Cálculo das lâminas de precipitação extrema (Equações 9 e 10) referentes ao período histórico simulado pelos modelos ( $L^{S,H}$ ) e período simulado futuro ( $L^{S,F}$ ), utilizando o modelo GEV mais adequado, para cada pixel, definido pelo teste de desvio, com os parâmetros determinados de acordo com cada modelo GEV, conforme metodologia do item 3.4.2 .
- ii. Cálculo do fator ( $S$ ) (MARKUS et al., 2018; TRAMBLAY et al., 2012), com o objetivo de remover o viés dos modelos climáticos das projeções futuras. O fator ( $S$ ) foi calculado dividindo a lâmina do período simulado futuro ( $L^{S,F}$ ) pela lâmina do período histórico simulado ( $L^{S,H}$ ), obtidos no passo (i) desta etapa.
- iii. Por fim, as lâminas referentes à frequência de ocorrência dos eventos extremos de precipitação em cenários de mudanças climáticas futuras ( $L_{FUT}$ ) foram determinados, multiplicando a lâmina histórica ( $L_{HIS}$ ) obtida na primeira

etapa do cálculo, pelo fator de escala (S) obtido no passo (ii) da segunda etapa, conforme Equação 11, apresentada a seguir.

Equação 11

$$L_{FUT} = L_{HIS} \times S$$

### 3.5. Cálculo das incertezas das lâminas de precipitações extremas

A incerteza das mudanças futuras das lâminas associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos da precipitação extrema diária foi calculada através do método estatístico de reamostragem *bootstrap*. Este método é comumente empregado em estudos de impacto das mudanças climáticas, para avaliar a incerteza das mudanças projetadas (KHARIN et al., 2007; KYSELÝ; BERANOVÁ, 2009).

O *bootstrap* é uma técnica de reamostragem que permite estimar as incertezas nos valores resultantes da variabilidade na amostra (KYSELÝ; BERANOVÁ, 2009). Este método consiste em gerar repetidamente amostras do mesmo tamanho a partir da distribuição ajustada. Para cada pixel, que representa uma série de dados, 1000 amostras de autoinicialização foram geradas por amostragem aleatória e utilizadas para encontrar os intervalos de confiança de 95% da amostra.

## 4. RESULTADOS

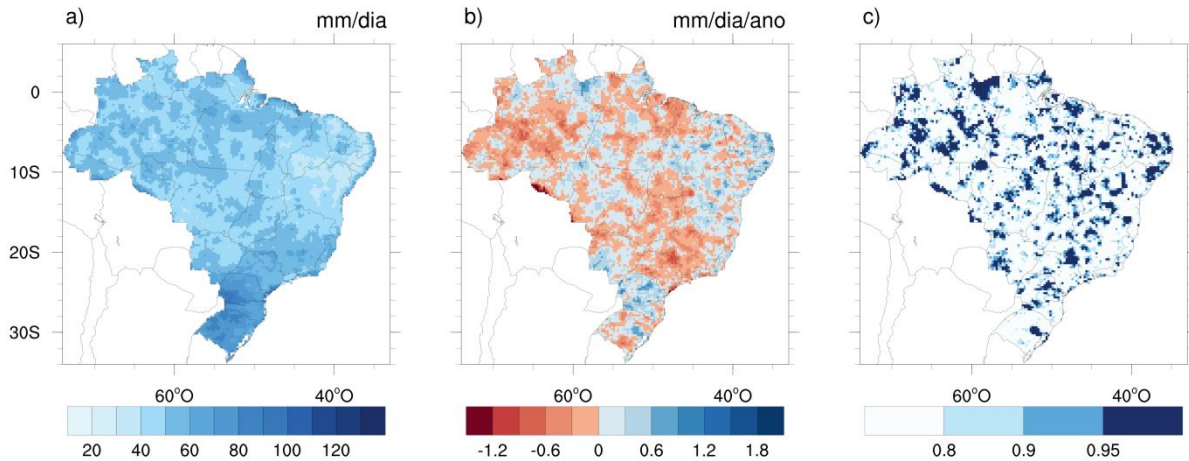
### 4.1. Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição de séries de precipitações extremas para o período histórico.

De acordo com a distribuição espacial das médias históricas para o período de 1980 a 2015 das precipitações extremas anuais (Figura 2-a), observa-se que o sul do país é a região que apresenta os maiores valores de precipitação extrema, com média de cerca de 100 mm/dia. Já o sudeste do país concentra uma região de extremos com a média em torno de 80 mm/dia. Para o nordeste observa-se a média próxima a 40 mm/dia, exceto para o litoral onde os valores das médias dos extremos estão em torno de 80 mm/dia. As regiões do norte e centro-oeste não apresentam homogeneidade na distribuição dos valores médios de extremos de precipitação, variando entre 30 e 90 mm/dia.

Além disso, a região de estudo apresentou aproximadamente 7,5% de área com tendência significativa ( $\alpha = 5\%$ ) positiva e 7,0% de área com tendência significativa negativa. Com a distribuição espacial da magnitude da tendência (mm/dia/ano) obtida pelo teste Mann-Kendall (Figura 2-b), observa-se que as tendências não apresentaram um padrão de distribuição espacial nas principais regiões. A região central da Amazônia, o nordeste do Pará e o noroeste de Minas Gerais, na divisa com São Paulo, são as principais regiões que apresentaram tendências negativas, com valores entre 0 a 1,2 mm/dia/ano. Observa-se ainda que os valores de tendência positiva estão distribuídos na região Sul, no litoral do Nordeste e no norte do Pará. Os valores de tendência positiva estatisticamente significativa para estas áreas variam entre 0 a 1,2 mm/dia/ano. Este resultado significaria um aumento de até 43,2 mm/dia na precipitação máxima diária anual, para o período em análise de 36 anos.

Em geral, a área caracterizada como não estacionária corresponde a 14,5% da região de estudo conforme a distribuição espacial (Figura 2-c) do nível de significância estatística da tendência de precipitação extrema (áreas em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%,  $\alpha = 0,05$ ).

Figura 2- Resultado do teste Mann-Kendall para os dados de precipitações máximas anuais do período histórico de 1980 a 2015: a) média das precipitações máximas anuais em mm/dia; b) distribuição espacial da tendência (mm/dia/ano); c) nível de significância, em que pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

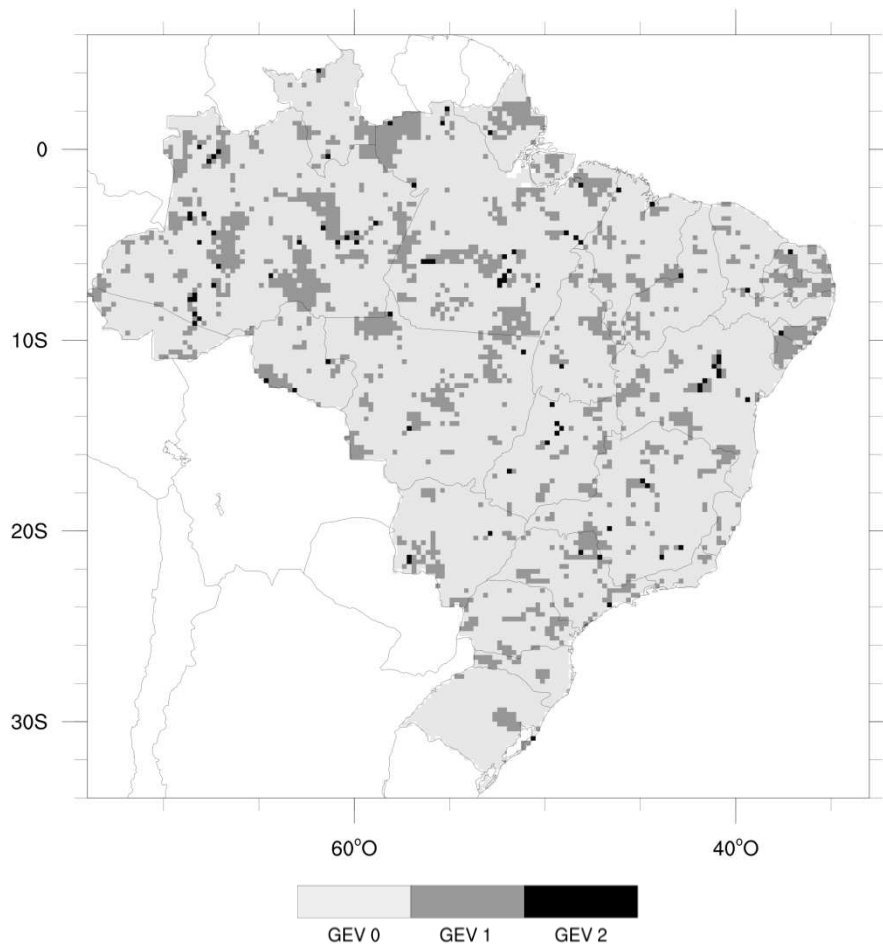


Fonte: Autora.

O teste do desvio foi aplicado para o mesmo banco de dados e período, ao nível de confiança de 95%. O resultado do teste apresentado na Figura 3 representa a validade dos modelos GEVs para cada pixel. Em princípio, 82,5% da área de estudo aderiram ao modelo clássico, com todos os parâmetros constantes ( $GEV_0$ ), 16,7% da área aderiu ao modelo com o parâmetro de localização em função do tempo ( $GEV_1$ ), e apenas 0,8% ao modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo ( $GEV_2$ ). Assim, observou-se que maior percentual da área de estudo aderiu ao modelo estacionário ( $GEV_0$ ) e que os modelos não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ) representaram 17,5% da área de estudo.

Contudo, podemos observar que o resultado da análise da estacionariedade pelo teste de Mann-Kendall, para o período histórico, foi um pouco mais restritivo do que o resultado do teste do desvio, apresentando 3% a menos de área não estacionária. Além disso, a distribuição espacial da tendência estatisticamente significativa obtida pelo teste Mann-Kendall (Figura 2-c) converge com a distribuição espacial dos modelos não estacionários representados pela distribuição  $GEV_1$  e  $GEV_2$  (Figura 3). Por conseguinte, o cálculo das lâminas de precipitação extremas históricas não estacionárias foi realizado conforme a distribuição espacial (Figura 3) dos modelos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$ ,  $GEV_2$ ) obtidas para cada pixel pelo teste de desvio. Para as lâminas históricas estacionárias foi considerado o modelo  $GEV_0$  para a região de estudo.

Figura 3- Distribuição espacial dos modelos de análise da função generalizada de valores extremos, obtidos pelo teste do desvio para os dados de precipitação do período histórico de 1980 a 2015.



Fonte: Autora.

#### 4.2. Análise de estacionariedade e escolha do modelo de distribuição em séries de precipitações extremas no futuro.

O período 2020-2059 apresentou a distribuição espacial da tendência de precipitações máximas similar nos cenários RCP4.5 e 8.5, embora as tendências sejam maiores e mais significativas para o segundo cenário (Figuras 4 e 5). Ademais, observa-se que tanto a média das precipitações máximas quanto sua tendência e significância estatística diferem expressivamente entre os modelos (Figuras 4 e 5), em especial entre os grupos do ensemble estatístico (MRI-CGCM3 e CCSM4) e dinâmico (HADGEM2-ES e MIROC5).

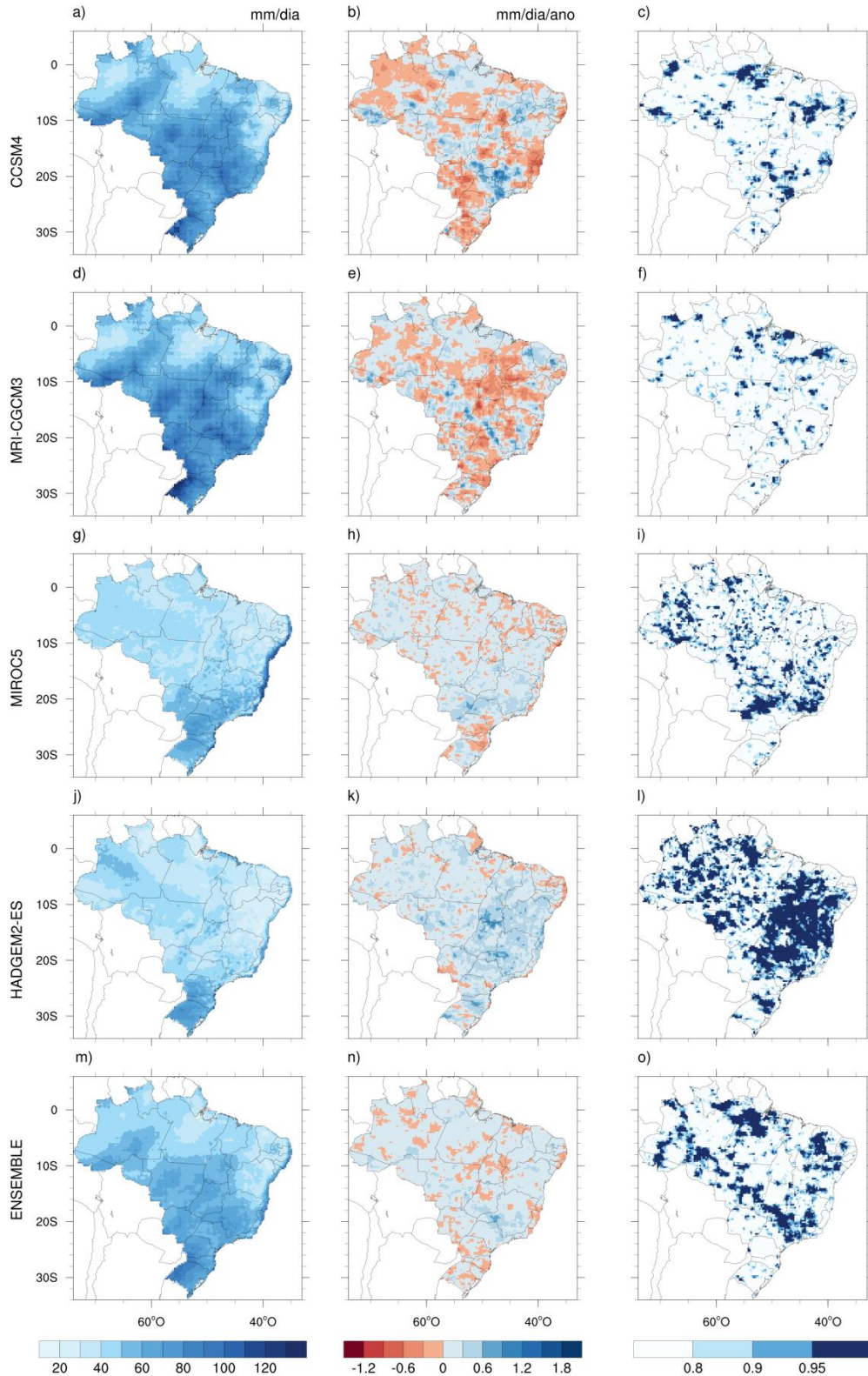
Esta diferença é evidenciada ao observar-se que os modelos gerados por *downscaling* estatístico apresentaram valores maiores de média das precipitações máximas para maior parte da região de estudo (Figuras 4 e 5). Por outro lado,

quanto a significância estatística, o *ensemble* dinâmico apresentou percentuais maiores de área não estacionária do que o *ensemble* estatístico. Observa-se que para os dois cenários o modelo HADGEM2-ES foi o que apresentou o maior percentual de área não estacionária com 32,7% para o RCP 4.5 e 20,0% para o cenário 8.5. O modelo com menor percentual de área não estacionária foi o MRI-CGCM3, com 4,5% no RCP 4.5 e CCSM4 com 5,1% no RCP 8.5 (Figura 6).

Contudo, o percentual de área não estacionária obtida pelo teste Mann-Kendall do *ensemble* foi de 16,9% e 15,5% para o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente (Figura 6). Embora os valores percentuais de área não estacionárias estatisticamente significativas serem próximos a distribuição espacial destas áreas não é similar. O cenário RCP 4.5 apresentou uma concentração maior de pixels com séries não estacionárias nas regiões Norte e Nordeste, principalmente nos estados do Piauí, no norte da Bahia, Pernambuco, Rio Grande do Norte, e no norte do Pará. Além destes estados, observa-se uma faixa de concentração de pixels com séries não estacionárias da região Norte em direção à região Sudeste do Brasil, semelhante à área que incide a ZCAS (Figura 4-o). O cenário RCP 8.5 apresentou uma concentração maior de pixels com séries não estacionárias nas regiões Sul e Sudeste, e nos estados da Amazônia, Pará, Roraima e norte do Mato Grosso (Figura 5-o). A maior parte destas regiões apresentaram tendência positiva, que estão principalmente no intervalo de 0 a 0,6 mm/dia/ano (Figuras 4-n e 5-n), o que para o período de análise de 40 anos, significaria um aumento de até 24 mm/dia.

Dessa forma, poucas áreas apresentaram tendência negativa, 0,1% e 0,3% da região de estudo, para o RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Além disso, estes percentuais estão localizados na região Sul para o RCP 4.5 e na região Nordeste para o RCP 8.5.

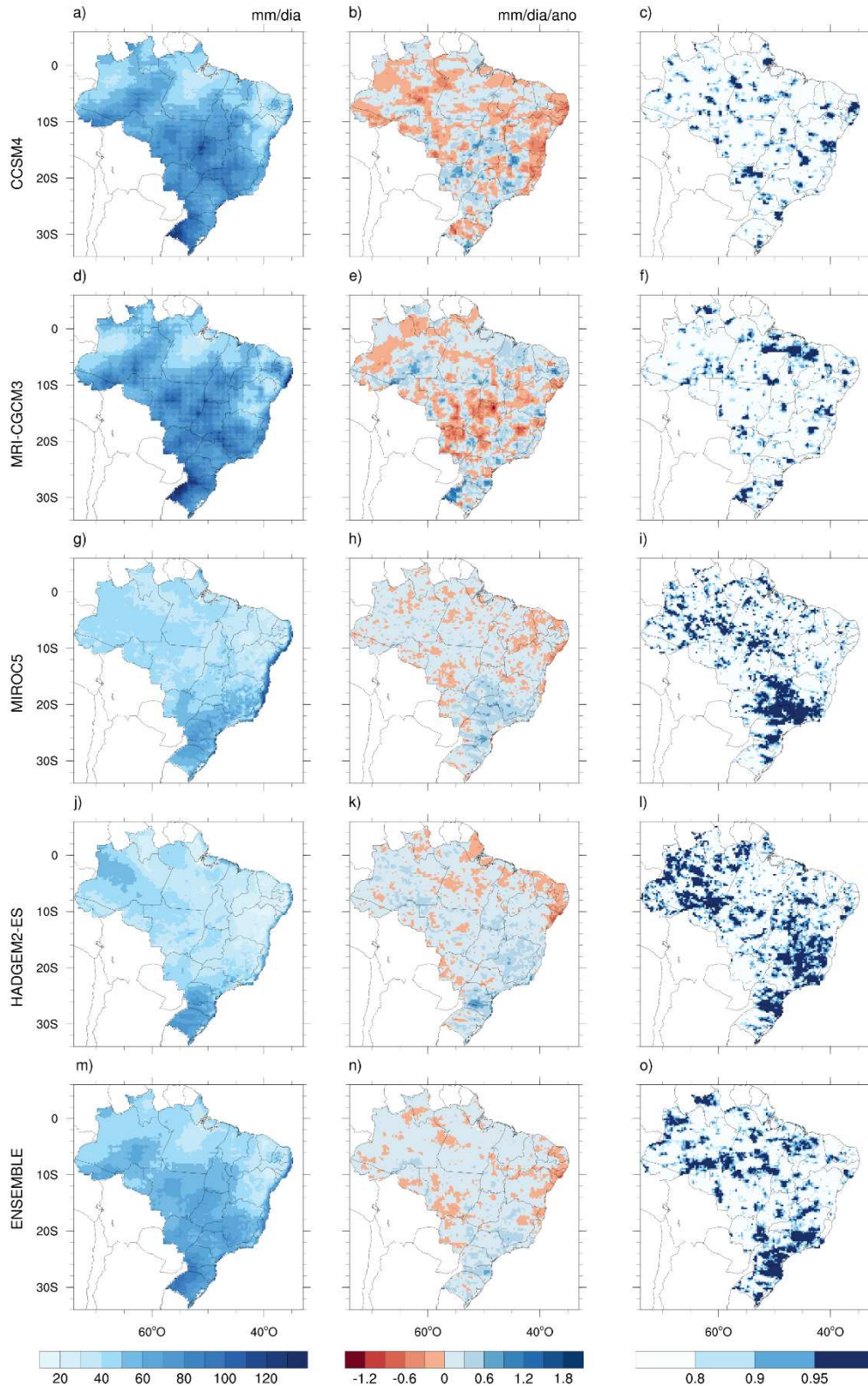
Figura 4- Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059 no cenário RCP 4.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).



Fonte: Autora.

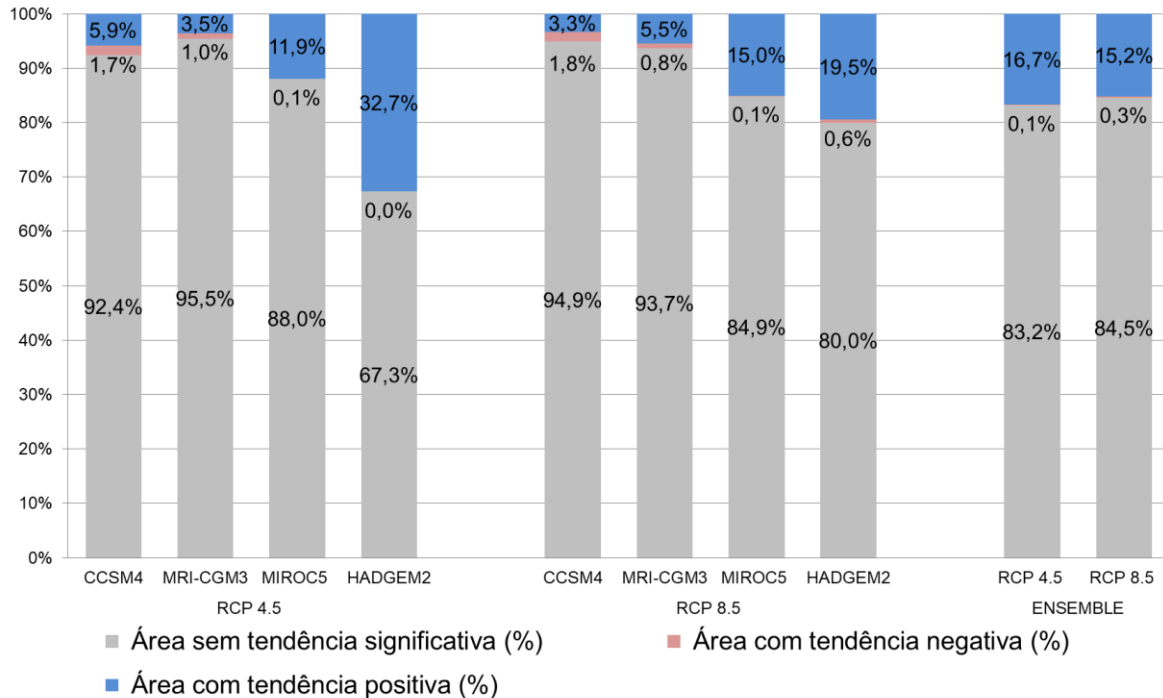


Figura 5- Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059 no cenário RCP 8.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).



Fonte: Autora.

Figura 6- Porcentagem da área de estudo de acordo com sinal da tendência e significância estatística para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2020 a 2059.

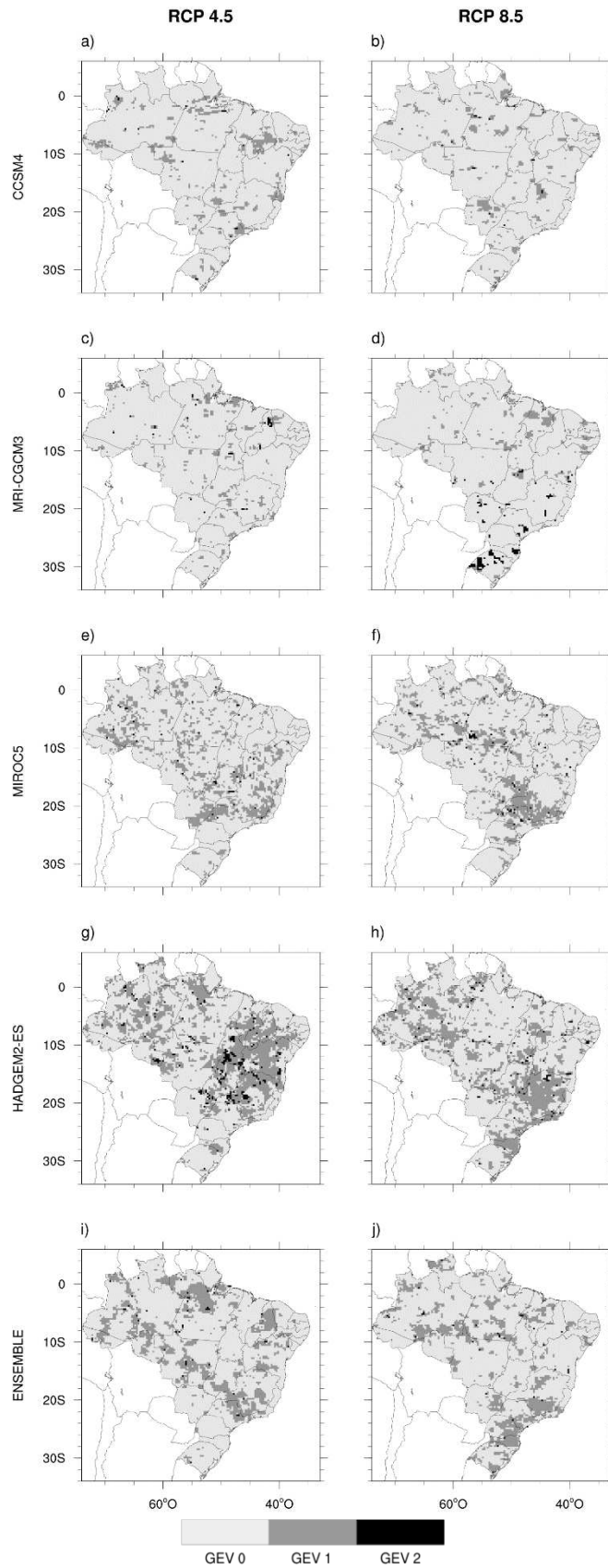


Fonte: Autora.

Ainda, a distribuição espacial da tendência estatisticamente significativa obtidas pelo teste Mann-Kendall (Figuras 4 e 5) converge com a distribuição espacial dos modelos não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ) obtidos através do teste dos desvios, tanto para os modelos climáticos quanto para o *ensemble* (Figura 7). Em resumo, para os dois cenários o modelo estacionário ( $GEV_0$ ) obteve maior percentual de aderência da área de estudo, enquanto os modelos não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ) representaram 21,8% e 19,3% da área de estudo, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente (Figura 8). Além disso, para os modelos não estacionários observa-se melhor aderência ao modelo ( $GEV_1$ ), visto que o RCP.4.5 apresentou aderência em 21,3% da área ao modelo ( $GEV_1$ ), e apenas 0,5% ao modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo ( $GEV_2$ ). Ademais, o cenário RCP 8.5 apresentou 18,9% de área com aderência ao modelo  $GEV_1$  e somente 0,4% ao modelo  $GEV_2$  (Figura 8).

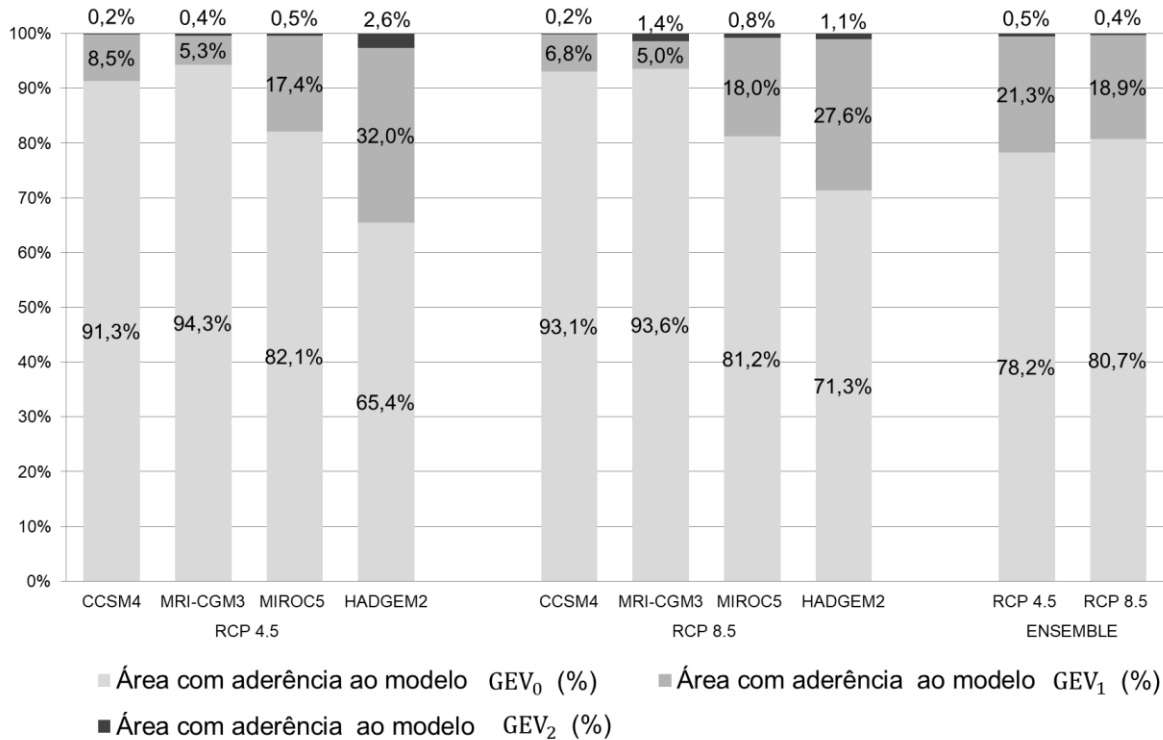
A análise da estacionariedade pelo teste Mann-Kendall para o período 2020 a 2059 apresentou o resultado um pouco mais restritivo quando comparado ao teste do desvio, apresentando 4,9% e 3,8% a menos de área não estacionária para o RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente.

Figura 7 - Resultado do teste do desvio para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059, para os modelos e *ensemble* no cenário RCP 4.5: (a), (c), (e), (g) e no cenário RCP 8.5: (b), (d), (f), (h).



Fonte: Autora.

Figura 8- Porcentagem da área de estudo com aderência aos modelos de função generalizada de valores extremos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$  e  $GEV_2$ ), para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2020 a 2059, para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Autora.

O período 2060-2099 apresentou a distribuição espacial da tendência de precipitações máximas similar nos cenários RCP4.5 e 8.5, embora as tendências sejam maiores e mais significativas para o segundo cenário (Figuras 9 e 10). Além do *ensemble*, este comportamento também foi observado para os modelos do *downscaling* estatístico. No entanto, o sinal da tendência e significância nos modelos do grupo do ensemble dinâmico diferem expressivamente entre os cenários e com os demais modelos, visto que ocorreu uma redução do percentual de área com séries não estacionárias, em especial para o modelo MIROC5, de 10% no RCP 4.5 para 3,1% no RCP 8.5.

Neste período, assim como o primeiro, os modelos gerados por *downscaling* estatístico apresentaram os maiores valores de média das precipitações máximas para maior parte da região de estudo (Figuras 9 e 10).

Em suma, pelo teste Mann-Kendall, este período apresentou um percentual maior de área com séries não estacionárias no cenário RCP 8.5 (11,4%) do que no RCP 4.5 (2,6%). Ademais, além da discrepância dos resultados percentuais entre os cenários, nota-se que a distribuição espacial da significância estatística da tendência

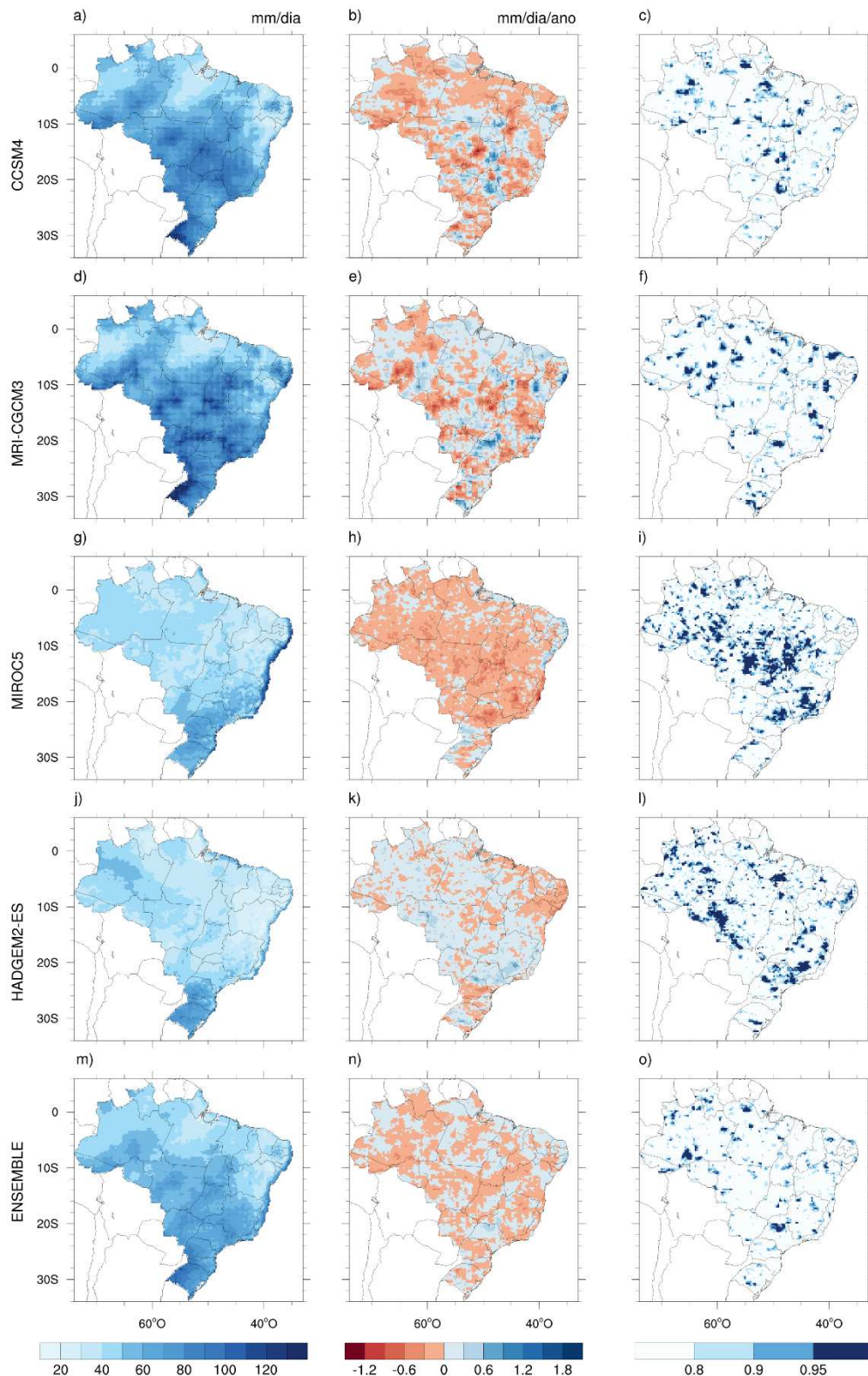
não é similar. O cenário RCP 4.5 apresentou maior concentração de pixels com séries não estacionárias na região dos estados de São Paulo, Amazonas e Pará (Figura 9-o). Sobretudo, observamos tendência crescente na região norte dos estados de São Paulo e Pará, e decrescente no sul da Amazônia (Figura 9-n). No cenário RCP 8.5 (Figura 10-n) as regiões do Nordeste, oeste da Amazônia e a região litorânea e o sul do estado de São Paulo apresentaram mais áreas com significância estatística, em sua maioria indicando valores positivos. O percentual de tendência negativa foi pequeno, apenas 0,6%, distribuído principalmente ao sul do estado de Tocantins e Maranhão.

Dessa forma, o *ensemble* dos cenários apresentaram percentuais maiores de tendência positiva, 1,3% e 10,8% para o RCP 4.5 e 8.5 respectivamente, de até 0,6 mm/dia/ano, o que para o período de análise de 40 anos, significaria um aumento de até 24 mm/dia, assim como no primeiro período analisado.

De maneira geral observamos com a análise do teste de tendências Mann-Kendall, que o primeiro período apresentou percentual de área com séries não estacionárias estatisticamente significativa maior do que o segundo para os dois cenários. Em ambos os períodos e cenários o percentual de área com tendência positiva foi maior do que com tendência negativa.

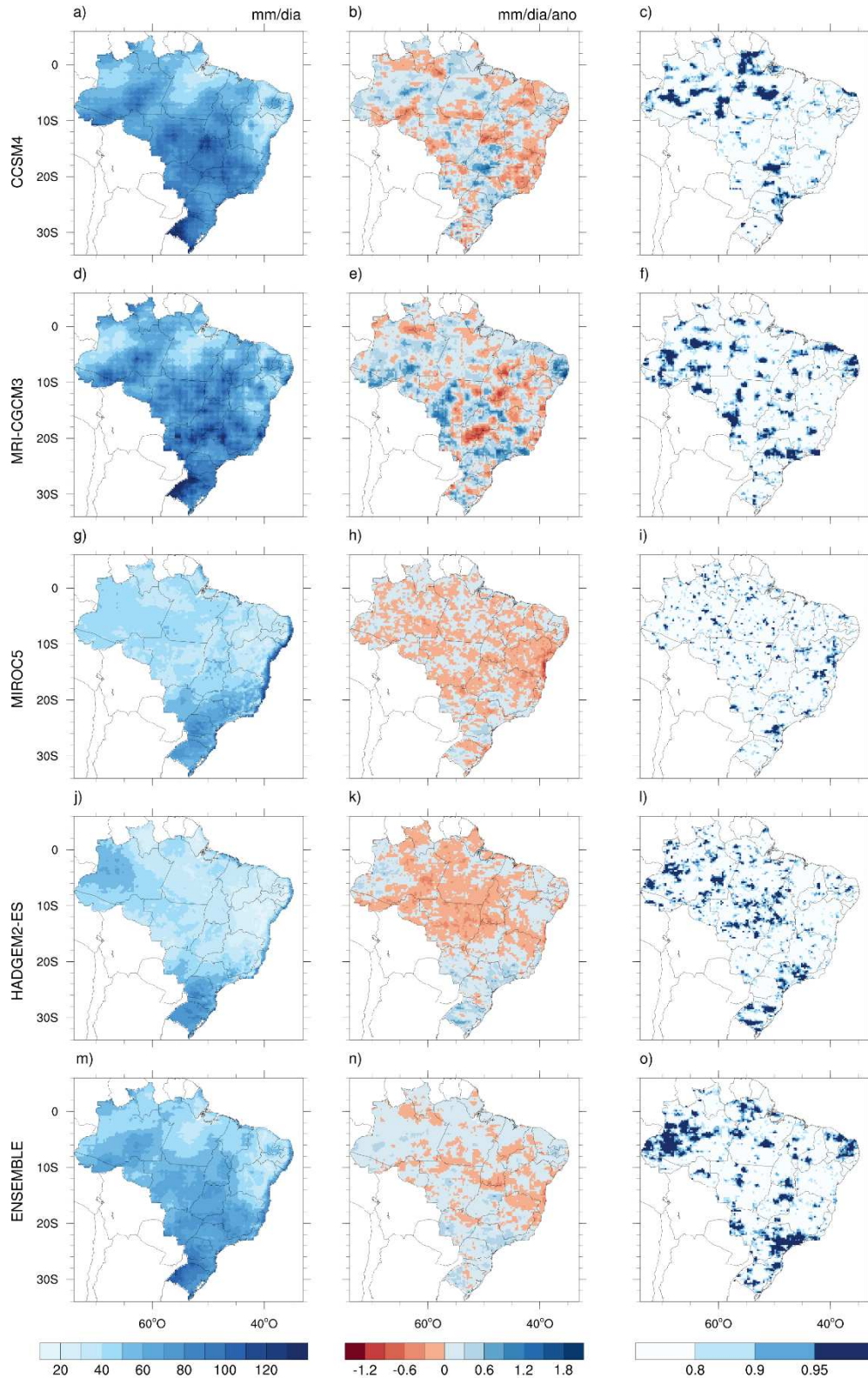


Figura 9- Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099 no cenário RCP 4.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).



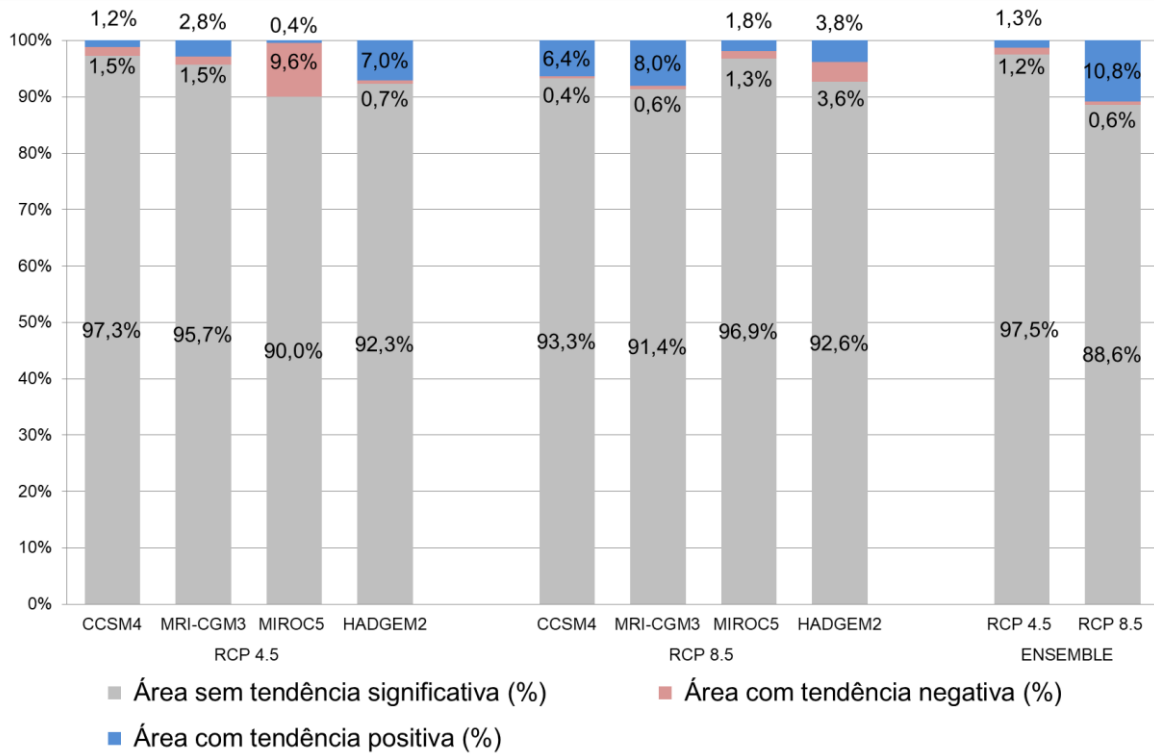
Fonte: Autora.

Figura 10- Resultado do teste Mann-Kendall para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099 no cenário RCP 8.5, para os modelos e *ensemble*: (a), (d), (g), (j), (m) Média das precipitações máximas anuais em mm/dia; (b), (e), (h), (k), (n) Tendência das precipitações máximas (mm/dia/ano); (c), (f), (i), (l), (o) Nível de significância, pixels em azul escuro apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).



Fonte: Autora.

Figura 11- Porcentagem da área de estudo de acordo com sinal da tendência e significância estatística para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2060 a 2099.



Fonte: Autora.

Assim como observado no primeiro período, a distribuição espacial da tendência estatisticamente significativa obtidas pelo teste Mann-Kendall (Figuras 9 e 10) converge com a distribuição espacial dos modelos não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ) obtidos através do teste dos desvios, tanto para os modelos climáticos individuais quanto para o ensemble (Figura 12). Em síntese, no cenário RCP 4.5, 95,4% da área de estudo aderiram ao modelo clássico, com todos os parâmetros constantes ( $GEV_0$ ), 4,4% da área aderiu ao modelo com o parâmetro de localização em função do tempo ( $GEV_1$ ), e 0,2% ao modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo ( $GEV_2$ ). O cenário RCP 8.5 apresentou um percentual menor de área com séries estacionárias do que o primeiro cenário, visto que 86,3% da área de estudo aderiu ao modelo estacionário ( $GEV_0$ ), 13,2% da área aderiu ao modelo  $GEV_1$  e 0,5% ao modelo  $GEV_2$ .

Pode-se observar que para os dois cenários o modelo estacionário ( $GEV_0$ ) obteve maior percentual de aderência da área de estudo. Os modelos não estacionários ( $GEV_1$  e  $GEV_2$ ) representaram 4,6% e 13,7% da área de estudo, para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente.

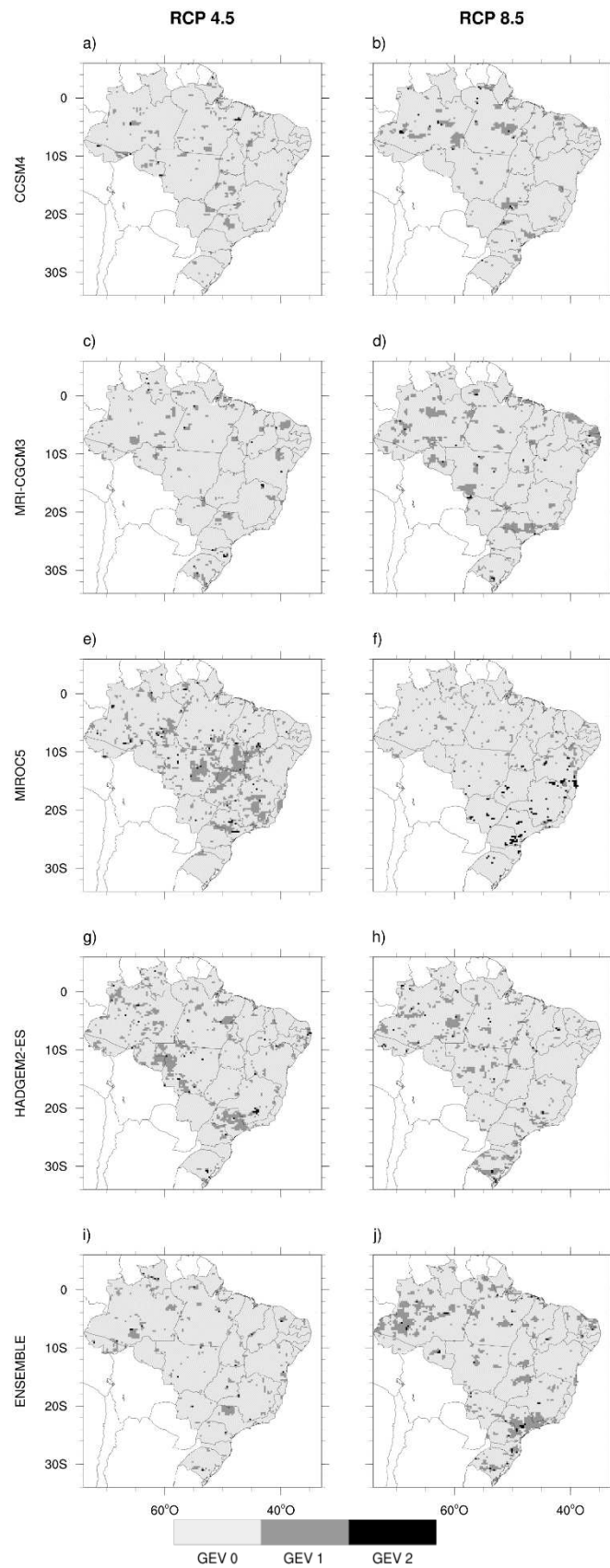


Com isso, a análise da estacionariedade pelo teste Mann-Kendall, para o período 2060-2099, manteve o resultado um pouco mais restritivo, quando comparado ao teste de desvio. O cenário RCP 4.5 no teste Mann-Kendall apresentou um percentual de área não estacionária 2,0% menor do que no teste de desvio. Para o cenário RCP 8.5 esta diferença foi de 2,3%.

Ademais, ao compararmos os resultados dos testes de desvio e Mann-Kendall entre os dois períodos, notamos que o período 2060 a 2099 apresentou percentual de área não estacionária menor do que o período 2020 a 2059, para *ensemble* nos dois cenários.

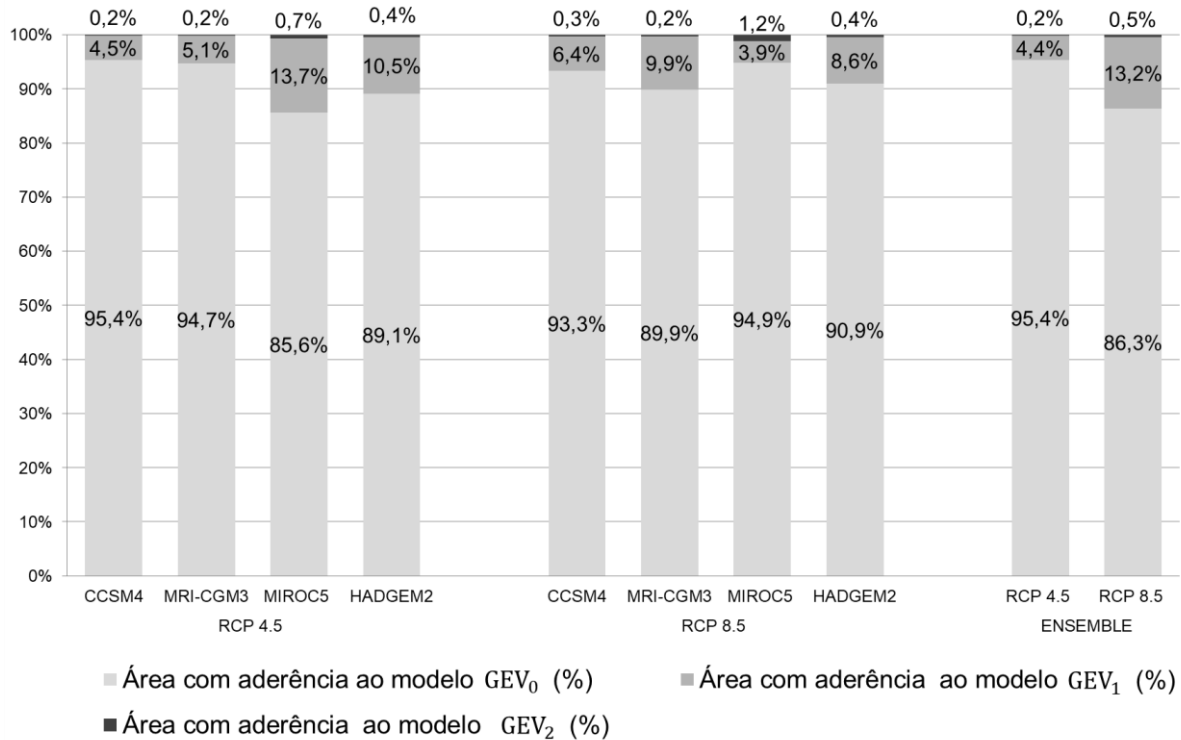
Dessa forma, a distribuição espacial dos modelos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$ ,  $GEV_2$ ), para cada pixel, obtida pelo teste de desvio para o primeiro e segundo período (Figuras 7 e 12) foram utilizadas para determinar o melhor modelo de cálculo das laminais de precipitação extrema futuras.

Figura 12- Resultado do teste do desvio para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099, para os modelos e *ensemble* no cenário RCP 4.5: (a), (c), (e), (g) e no cenário RCP 8.5: (b), (d), (f), (h).



Fonte: Autora.

Figura 13- Porcentagem da área de estudo com aderência aos modelos de função generalizada de valores extremos ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$  e  $GEV_2$ ), para os dados futuros de precipitação máxima anual para 2060 a 2099, para os modelos climáticos e *ensemble*, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.



Fonte: Autora.

### 4.3. Lâminas de precipitação extrema

A partir da análise de estacionariedade apresentada na seção 4.2 e buscando avaliar a magnitude de precipitação extrema em cenários de mudanças climáticas, foram obtidas as lâminas de precipitação extrema associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, tanto para o período histórico quanto para os cenários futuros.

#### 4.3.1. Diferenças entre estacionariedade e não estacionariedade para o período histórico

No período histórico (1980 a 2015), para a lâmina de precipitação associada ao período de retorno de 5 anos ( $L_5$ ), observa-se que as regiões Sul, Sudeste e o litoral do Nordeste apresentam as maiores lâminas de precipitação extrema, entre 80 a 110 mm/dia, enquanto que as demais áreas apresentaram valores entre 50 a 80 mm/dia (Figura 14-a e Figura 14-f). Com o aumento do período de retorno associado ( $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ) observa-se a distribuição espacial da intensificação dos valores de precipitação máxima. Esta intensificação foi observada

de forma mais acentuada nas seguintes regiões: estado do Paraná, Acre, na região central da Amazônia e litoral sul do Rio de Janeiro e de São Paulo. Para estas áreas isto ocorreu a partir do período de retorno de 50 anos (Figura 14-d e Figura 14-i), com lâminas acima de 200 mm/dia.

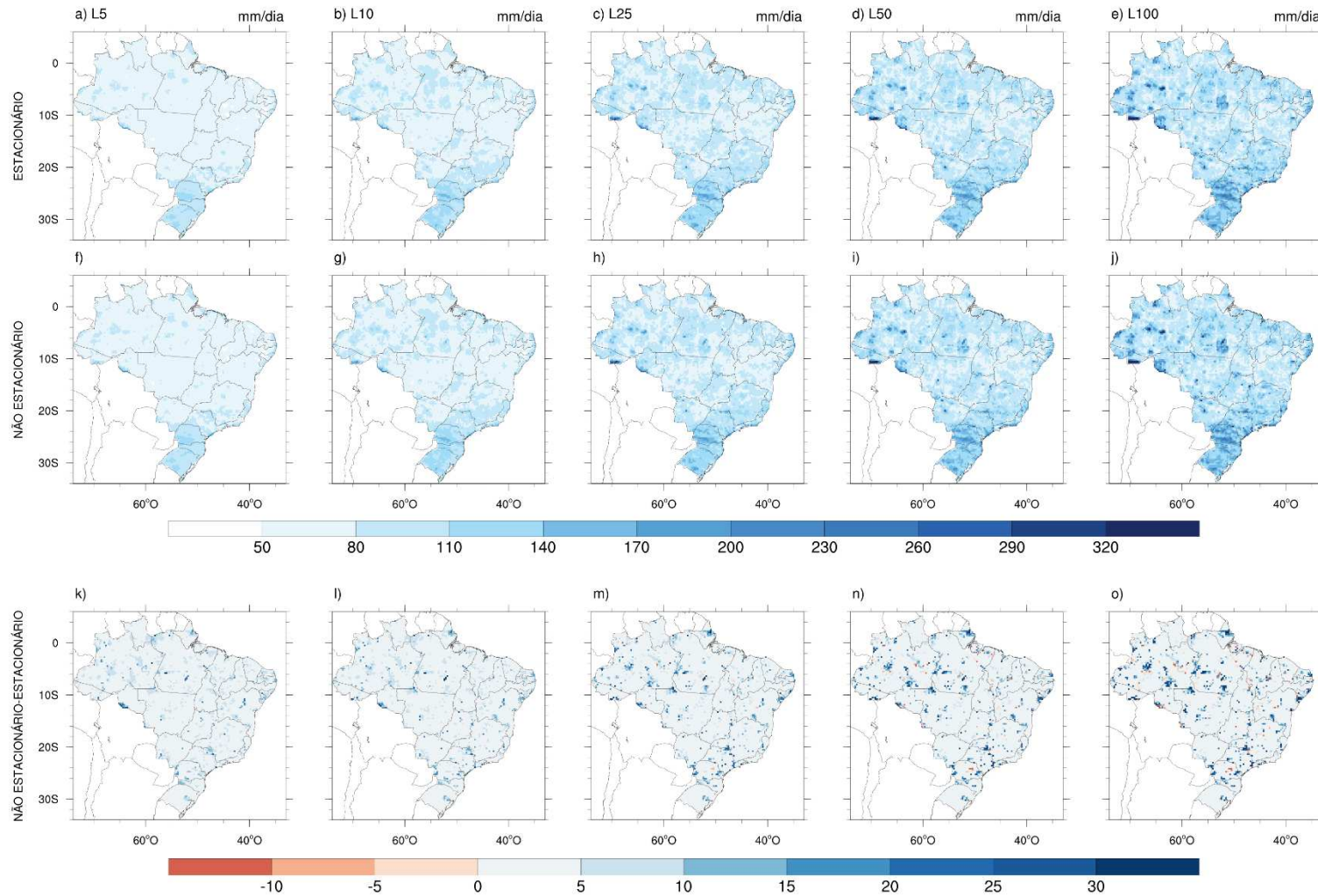
Ainda, a magnitude da diferença entre as lâminas não estacionárias e estacionárias é maior quanto maior o período de retorno associado. A distribuição espacial destes valores está de acordo com as áreas não estacionárias obtidas nos testes de Mann-Kendall (Figura 2) e do desvio (Figura 3).

A anomalia entre as lâminas calculadas considerando a não estacionariedade e as calculadas apenas com o modelo estacionário foi observada em 17,5 % da área de estudo, sendo este o resultado percentual de não estacionariedade encontrado no teste de desvio para o período histórico. A Figura 15 detalha esta diferença de acordo com a lâmina de precipitação máxima de cada período de retorno associado para o período histórico.

Para os períodos de retorno de 5 e 10 anos, os resultados demonstram que a maior parte da área estatisticamente significativa, 10,8 % e 9%, respectivamente, apresentou um aumento na lâmina de 5 a 10 mm/dia. Já para os demais casos, quanto maior o período de retorno, maior a percentagem da área de estudo que apresentou diferenças maiores que 20 mm/dia nas lâminas de precipitação (Figura 15), especialmente no estado do Paraná, Acre, a região central da Amazônia, e o litoral sul do Rio de Janeiro e de São Paulo (Figura 14).

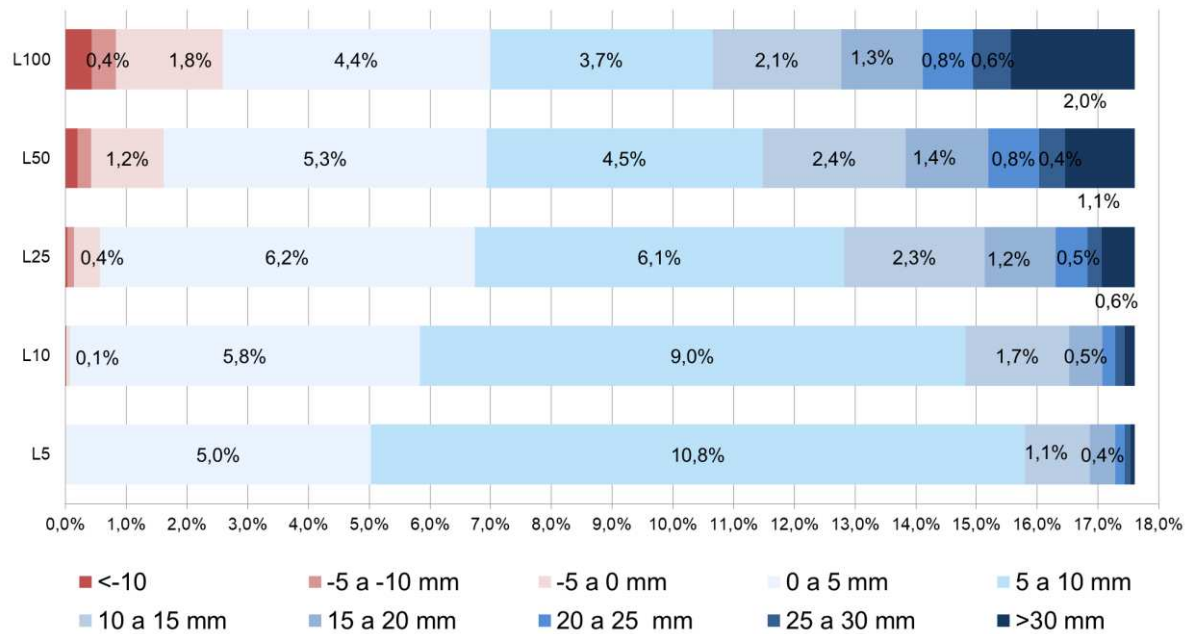
Mais especificamente, observou-se que apenas 0%, 0,1%, 0,6%, 1,6% e 2,6% da área apresentaram redução do valor da lâmina de precipitação máxima, enquanto, 17,5%, 17,4%, 16,9%, 15,9% e 13,1% da área apresentaram aumento, para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos respectivamente. Dessa forma, os resultados para o período histórico indicam que empregar o cálculo das lâminas considerando condições estacionárias, quando esta condição não é válida, tende a subestimar a magnitude dos extremos de precipitação em grande parte do território nacional.

Figura 14- Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia, para o período histórico de 1980 a 2015: a), b), c), d), e), lâminas de precipitação extrema obtidas com modelo estacionário ( $GEV_0$ ); f), g), h), i), j), lâminas de precipitação extrema obtidas considerando onde não há estacionariedade ( $GEV_0$ ,  $GEV_1$ ,  $GEV_2$ ); k), l), m), n), o) anomalia entre as lâminas não estacionárias e estacionárias.



Fonte: Autora.

Figura 15 - Porcentagem da área de estudo em que há diferença entre as lâminas de precipitação máxima calculadas sob condições de estacionariedade e não estacionariedade. Os valores estão apresentados para o período histórico de 1980 a 2015, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos (L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>25</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>100</sub>) e distribuídos segundo o valor da anomalia.



Fonte: Autora.

#### 4.3.2. Precipitação extrema estimada para o período de 2020-2059

Para o período 2020-2059 nota-se, nos cenários de mudanças climáticas, lâminas de precipitação extrema mais intensas do que no período histórico. Para o L<sub>5</sub> por exemplo, as regiões Sul, Sudeste e o litoral do Nordeste, apresentaram lâminas de precipitação extrema entre 110 e 170 mm/dia (Figura 16-f e Figura 16-k). Para este mesmo período de retorno as demais regiões apresentaram, em sua maioria, valores entre 80 a 110 mm/dia. Cabe ressaltar, que estas lâminas de precipitação extrema no período histórico foram encontradas somente a partir do período de retorno de 25 anos (Figura 16-c).

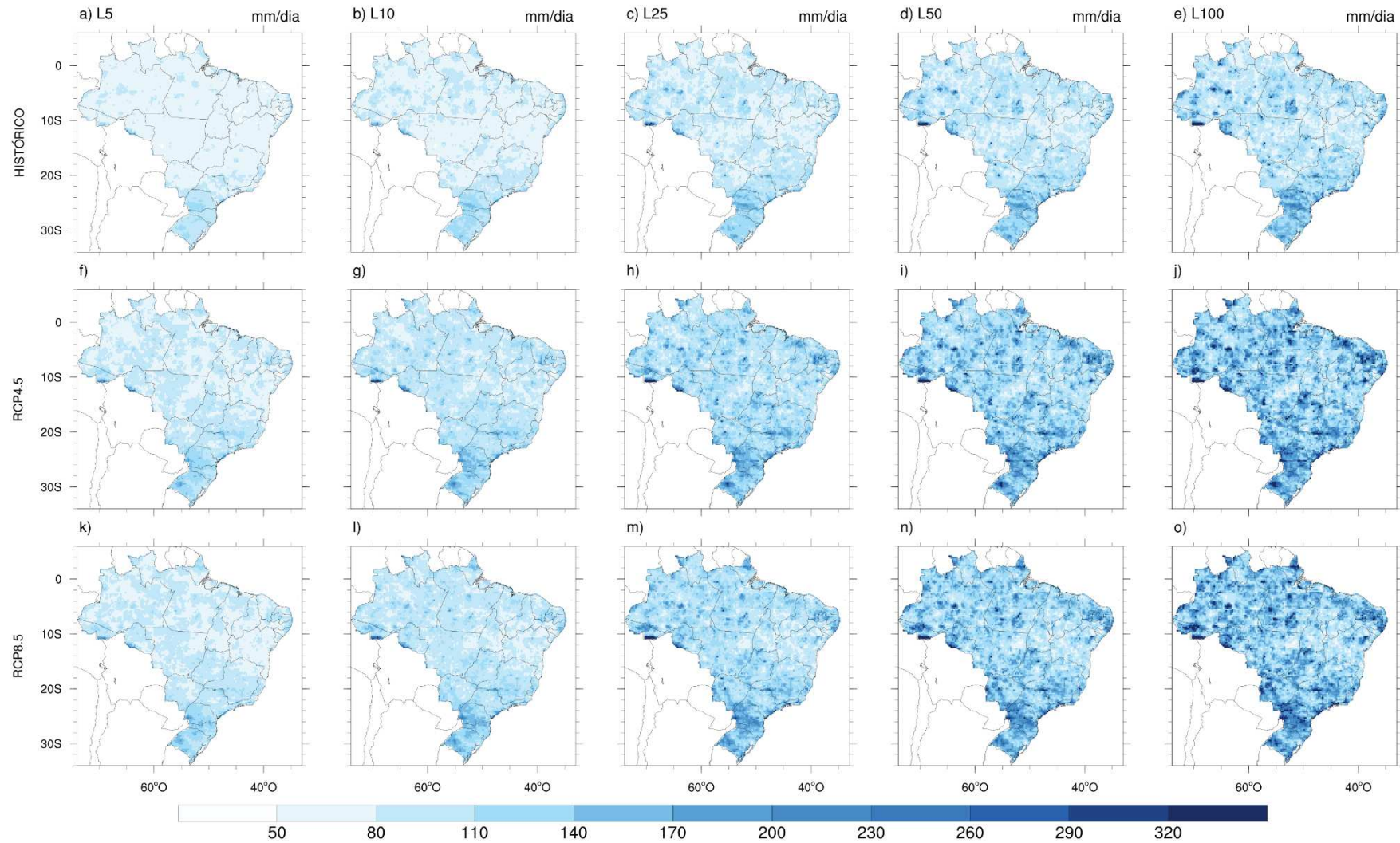
Além disso, para os cenários de mudanças climáticas as regiões dos estados do Paraná, Rio de Janeiro, São Paulo, Acre e a região central da Amazônia, apresentaram já nas lâminas associadas ao retorno de 10 anos (Figura 16-g e Figura 16-l) uma distribuição de magnitude de precipitação similar a obtida somente a partir do período de retorno de 50 anos no período histórico (Figura 16-d).

Ainda, a distribuição de área para cada lâmina de precipitação apresenta valores muito próximos entre os cenários RCP4.5 e 8.5 para todos os períodos de retorno. Entretanto, ao comparar-se os resultados dos cenários com o período

histórico, verifica-se uma grande discrepância nos percentuais de área em todos os intervalos de precipitação máxima analisados. Enquanto o período histórico apresentou percentuais mais elevados de área com lâminas de precipitação menores (na faixa de 50 a 80 mm/dia), os cenários apresentaram percentuais mais elevados de área sob lâminas maiores que 80 mm/dia, independentemente do período de retorno avaliado (Figura 17). Além disso, o período histórico apresentou percentuais de área com lâminas de precipitação extrema, na faixa de 80 a 110 mm/dia, menores para os períodos de retorno de 5 e 10 anos, e maiores para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, do que os cenários (Figura 17). Assim, observa-se que os resultados das lâminas futuras obtidos para o RCP 4.5 e 8.5 indicam um aumento no percentual de áreas com lâminas de maior magnitude.



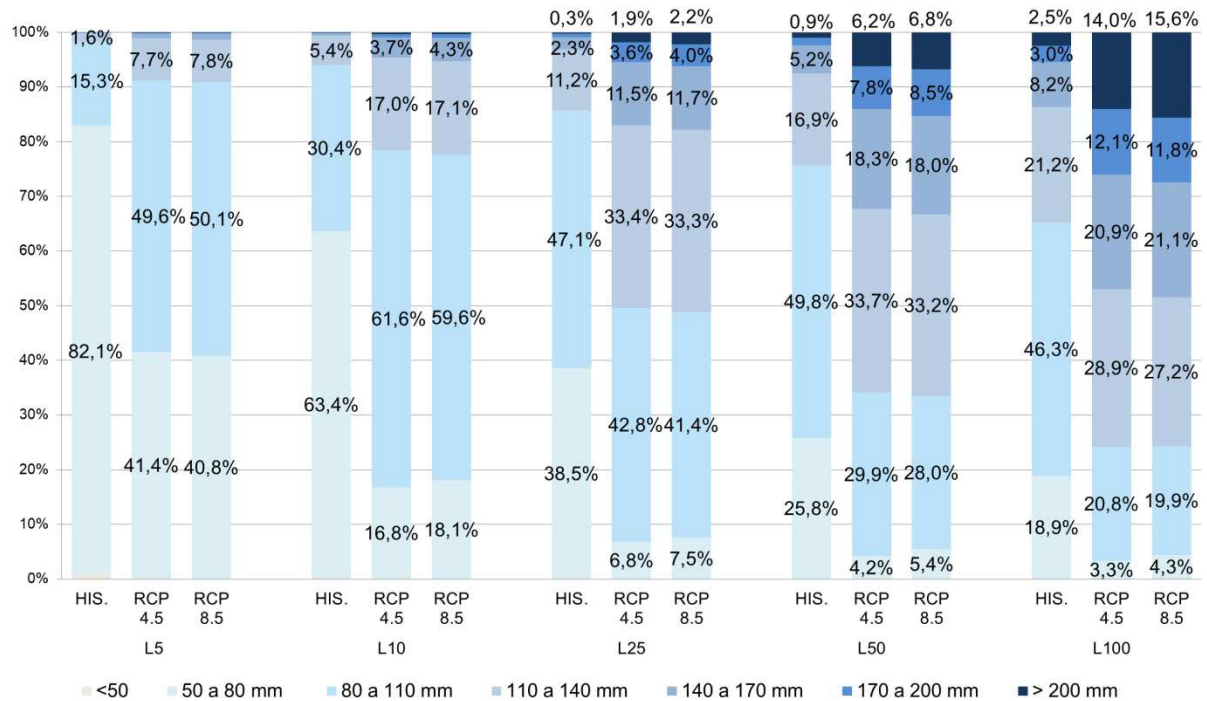
Figura 16- Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia: a), b), c), d), e), para o período histórico; f), g), h), i), j), para 2020 a 2059 no cenário RCP 4.5; k), l), m), n), o), para 2020 a 2059 no cenário RCP 8.5.



Fonte: Autora.



Figura 17 - Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor das lâminas de precipitação máxima calculadas para o período histórico (1980 a 2015) e futuro (2020 a 2059) no cenário RCP 4.5 e RCP 8.5, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos (L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>25</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>100</sub>).



Fonte: Autora.

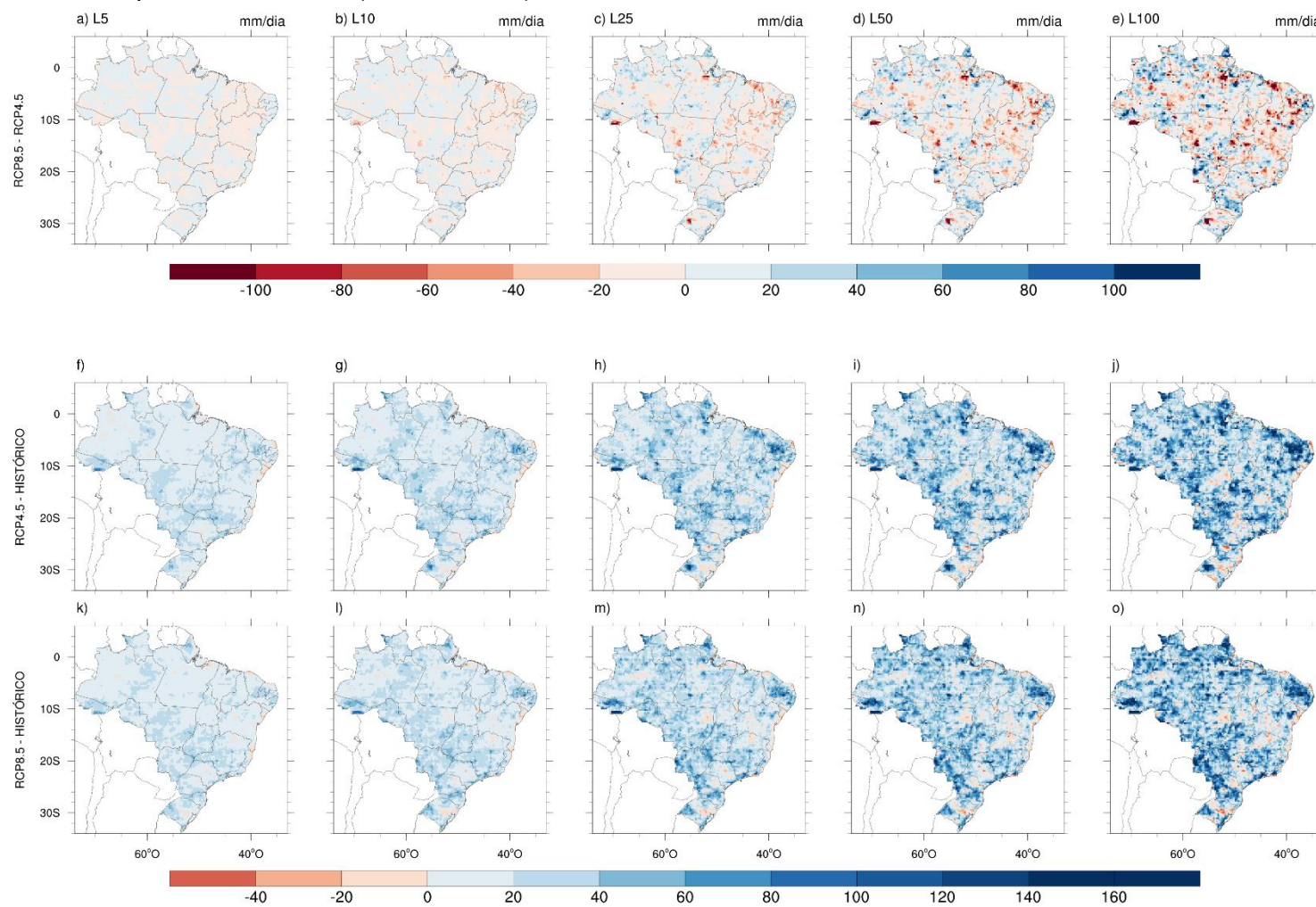
Além disso, os cenários apresentaram valores de anomalias das lâminas de precipitação máxima muito próximos. Nesta pequena diferença, observa-se que o cenário RCP 8.5 apresentou valores de lâminas de precipitação extrema maiores que o RCP 4.5, em especial para o litoral do Nordeste, o norte do estado de Santa Catarina e sul do estado do Paraná, oeste do Mato Grosso do Sul, norte do Amapá. Por outro lado, uma pequena fração da área de estudos, como o interior do Nordeste, a maior parte do estado da Bahia, o norte de Minas Gerais e o sudoeste do Rio Grande do Sul, apresentou lâminas de precipitação extrema menores para o cenário RCP 8.5 do que para do cenário 4.5 (Figura 18). O valor da diferença entre as lâminas de precipitação máxima destas regiões aumenta conforme o aumento do período de retorno associado (Figura 19).

Nota-se também, que 70% e 55% da região de estudo, no L<sub>5</sub> e L<sub>10</sub>, respectivamente, tiveram um aumento de até 20 mm/dia nas lâminas de precipitação máxima, nos dois cenários em relação ao período histórico. Para as demais lâminas este aumento ocorreu de forma mais intensa. Os resultados indicam um aumento de 20 a 40 mm/dia para aproximadamente de 41,4%, 35,6% e 28,4% da área de estudo

nos períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos respectivamente. Além disso, com o aumento do período de retorno observa-se o aumento do percentual de áreas com anomalias mais intensas. No RCP 4.5, por exemplo, as regiões com lâminas futuras de pelo menos 120 mm/dia, maiores que as lâminas históricas representaram 0,3%, 1,2% e 4,1% da área de estudo, para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

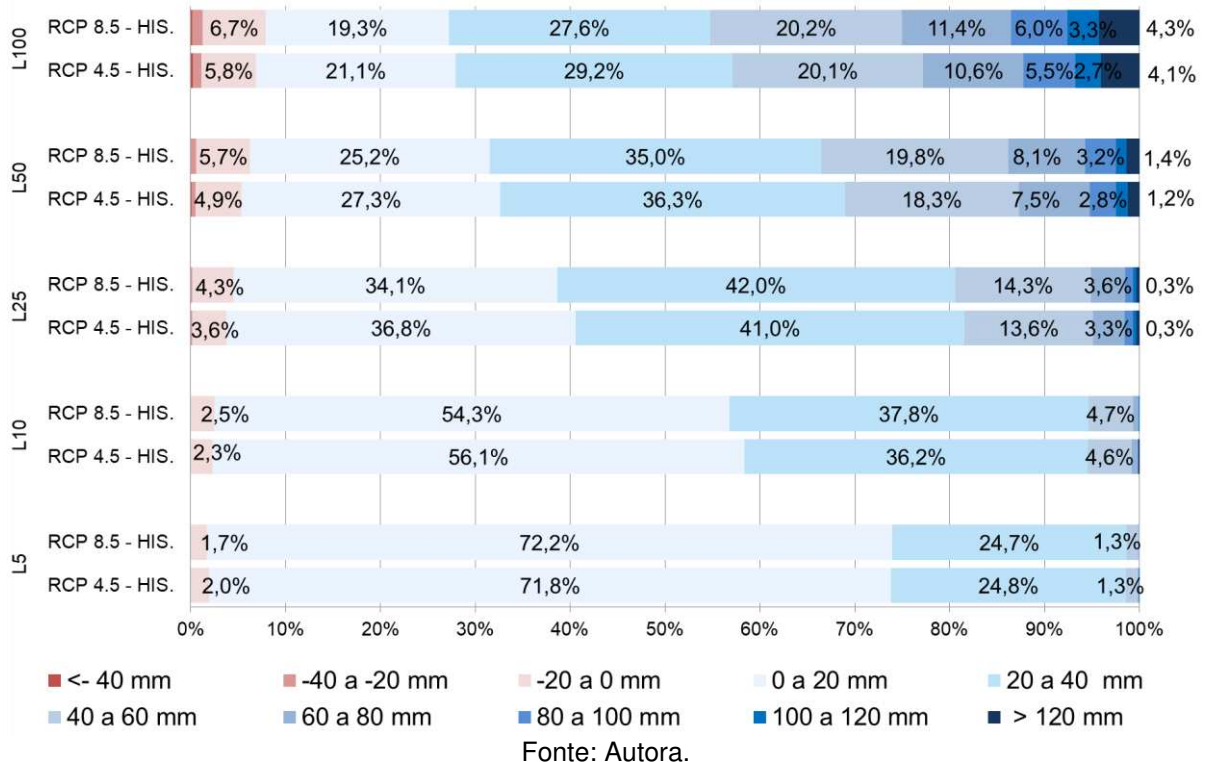
Em resumo, os resultados da análise do período de 2020 a 2059 indicam que os cenários de mudanças climáticas apresentaram lâminas de precipitação extrema maiores que as do período histórico (1980 a 2015). Este resultado foi observado no cenário RCP 4.5 em 98,0%, 97,7%, 96,2%, 94,6% e 93,1% da área de estudo, e para o cenário RCP 8.5 em 98,3%, 97,5%, 95,5%, 93,7% e 92,1%, para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 anos, respectivamente (Figura 19).

Figura 18- Distribuição espacial da anomalia das lâminas de precipitação máxima, em mm/dia, para os dados de precipitação futuros de 2020 a 2059, associados aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ): a), b), c), d), e), entre os cenários RCP 8.5 e 4.5; f), g), h), i), j), entre o cenário RCP 4.5 e o período histórico (1980 a 2015); k), l), m), n), o), entre o cenário RCP 8.5 e o período histórico (1980 a 2015).



Fonte: Autora.

Figura 19 - Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor da anomalia entre as lâminas de precipitação máxima do período futuro (2020 a 2059) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, e do período histórico (1980 a 2015), para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos (L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>25</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>100</sub>).



#### 4.3.3. Precipitação extrema estimada para o período de 2060-2099

Os resultados obtidos na distribuição espacial das lâminas futuras para o período de 2060 a 2099 são similares aos resultados do período de 2020 a 2059. Além da distribuição espacial, observamos que as lâminas futuras obtidas para o RCP 4.5 e 8.5, indicam um aumento no percentual de áreas com lâminas de maior magnitude (Figura 20). Este comportamento se mostrou presente em um percentual de área maior no período em análise (2060 a 2099) do que no primeiro período (2020 a 2059).

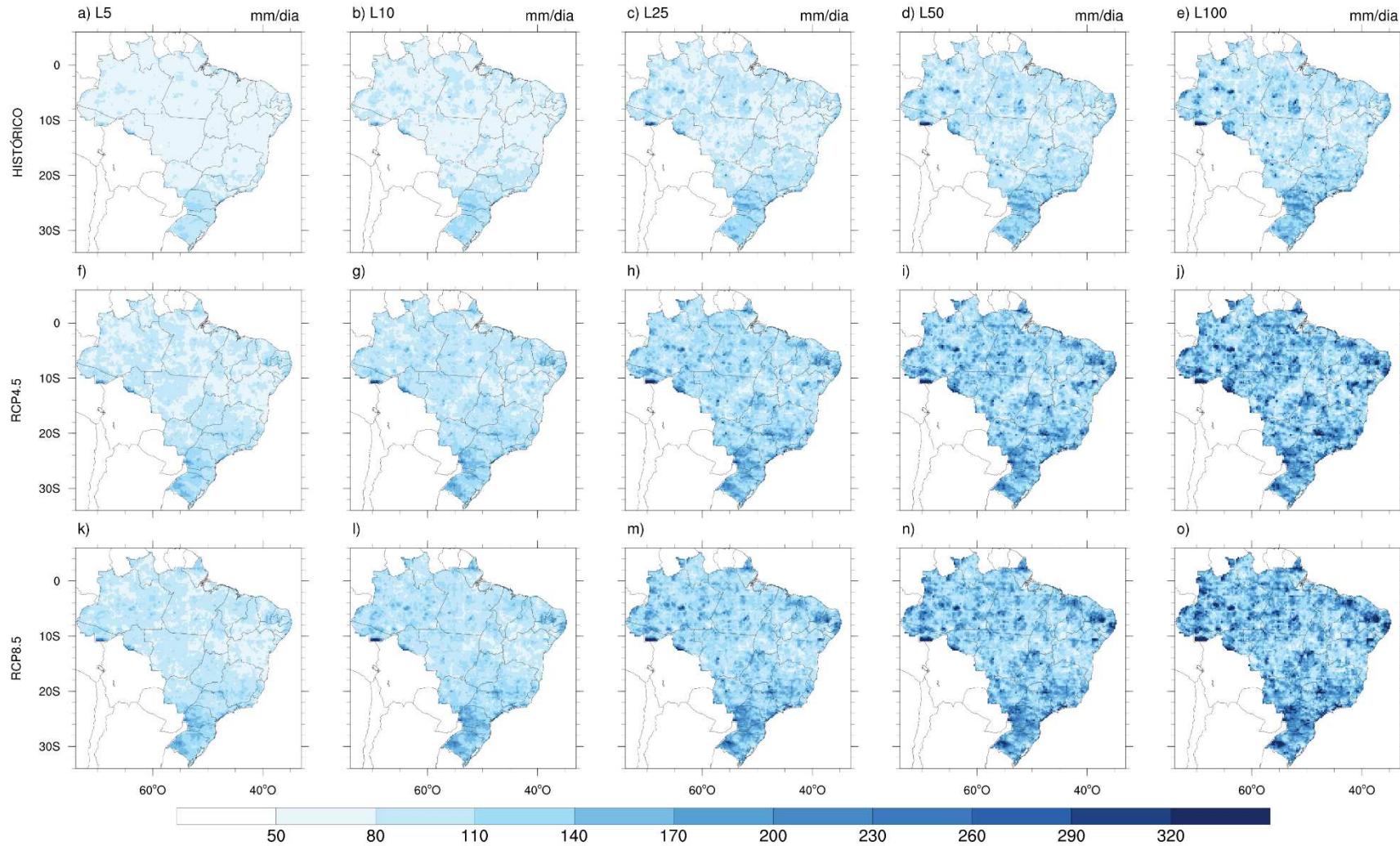
Da mesma forma, no período 2060 a 2099 os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 apresentaram valores de distribuição da área segundo o valor das lâminas próximas, com maior magnitude no último cenário (Figura 20).

Ademais, ao compararmos os resultados dos cenários com o período histórico (Figura 21), verificamos uma grande discrepância nos percentuais de área em todos os intervalos de precipitação analisados. Os resultados do período 2060 a 2099 mostram uma intensificação ainda maior dos valores das lâminas futuras de precipitação extrema do que o período 2020 a 2059.

Destacamos o aumento do percentual de áreas com lâminas acima de 200 mm/dia. Para exemplificar isso, nota-se que a extensão das áreas atingidas por chuvas acima de 200 mm/dia aumentou aproximadamente 12, 10 e 7 vezes, no cenário RCP 8.5, visto que as lâminas maiores que 200 mm/dia representaram para o período histórico 0,3%, 0,9% e 2,5% da área de estudo, e os resultados do RCP 8.5 indicam que estas lâminas representam 3,8%, 9,8% e 18,5% da área de estudo, para os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos, respectivamente.

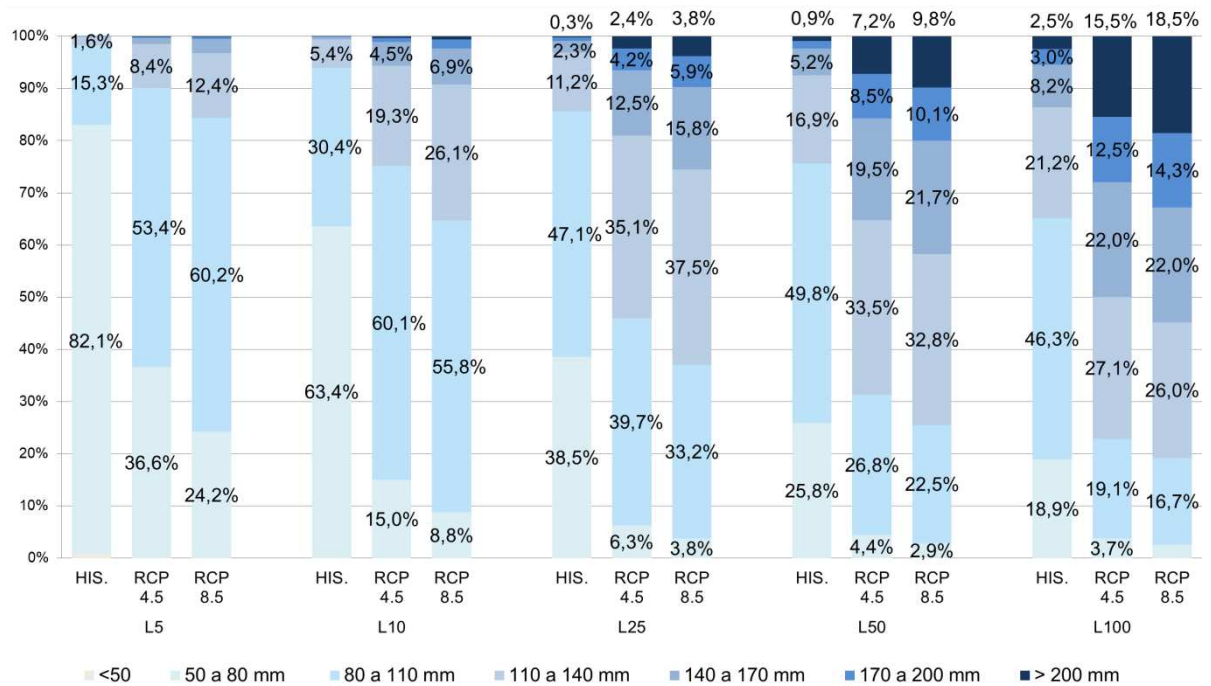


Figura 20- Distribuição espacial das lâminas de precipitação máxima associadas aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ), em mm/dia: a), b), c), d), e), para o período histórico; f), g), h), i), j), para 2060 a 2099 no cenário RCP 4.5; k), l), m), n), o), para 2060 a 2099 no cenário RCP 8.5.



Fonte: Autora.

Figura 21- Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor das lâminas de precipitação máxima calculadas para o período histórico (1980 a 2015) e futuro (2060 a 2099) no cenário RCP 4.5 e RCP 8.5, para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos ( $L_5$ ,  $L_{10}$ ,  $L_{25}$ ,  $L_{50}$ ,  $L_{100}$ ).



Fonte: Autora.

O cenário RCP 8.5 apresentou valores de lâminas de precipitação extrema maiores que o RCP 4.5 na maior parte das áreas (Figura 22), em especial o estado de Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul, a maior parte do estado do Amazonas, e o litoral do Nordeste. Em menor proporção, regiões em que as lâminas para o cenário RCP 8.5 foram menores que do RCP 4.5, estão distribuídas principalmente no estado do Rio de Janeiro, parte do Espírito Santo, Rondônia e sudoeste do estado do Mato Grosso, observados na Figura 22-e. Similarmente ao período de 2020 a 2059, o valor da diferença entre as lâminas de precipitação máxima destas regiões aumentam conforme o aumento do período de retorno associado. Destaca-se ainda que as regiões dos estados do Acre, Paraná, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, o litoral norte de São Paulo, e a região Nordeste apresentaram os maiores valores intensificação das lâminas de precipitação máxima futuras, comparadas ao período histórico, nos dois períodos e nos dois cenários.

Com isso, observa-se que para os períodos de retorno de 5 e 10 anos, cenário RCP 8.5 apresentou 50,6 e 56,2% de área com aumento de 20 a 40 mm/dia em relação ao período histórico, nas lâminas de precipitação extrema, enquanto

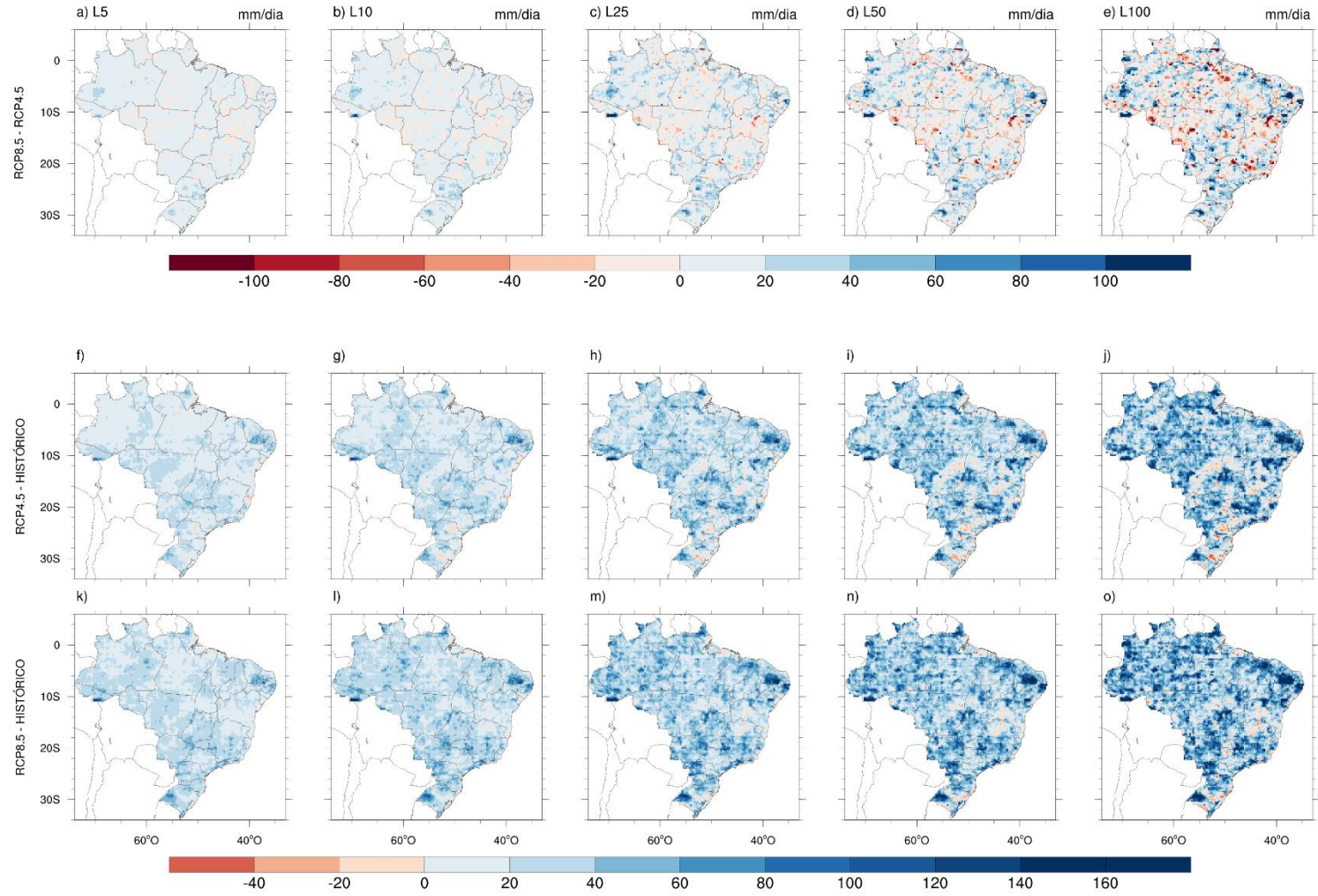
para o RCP 4.5 a maior parte da área teve um aumento de até 20 mm/dia (Figura 23). Assim como no primeiro período, para as demais lâminas este resultado se intensificou. O cenário 4.5 indica um aumento de 20 a 40 mm/dia para aproximadamente de 42,9%, 35,0% e 26,8% e o cenário RCP 8.5 para 43,6%, 32,6% e 25,4% da área de estudo nos períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos respectivamente.

Os resultados da análise do período de 2060 a 2099 demonstram que os cenários de mudanças climáticas apresentaram lâminas de precipitação extrema maiores que as lâminas do período histórico (1980 a 2015). Este resultado foi observado no cenário RCP 4.5 em 98,9%, 98,3%, 97,0%, 95,6% e 94,2% da área de estudo, e para o cenário RCP 8.5 em 99,6%, 99,4%, 98,3%, 96,9% e 95,3%, para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100 anos, respectivamente (Figura 23).

Dessa forma, os resultados do cálculo das lâminas em cenários de mudanças climáticas futuras ( $L_{FUT}$ ), para os períodos de 2020 a 2059 e 2060 a 2099 indicam o aumento na magnitude das Lâminas de precipitação extrema em relação às lâminas calculados para o período histórico ( $L_{HIS}$ ) (1980 a 2015).

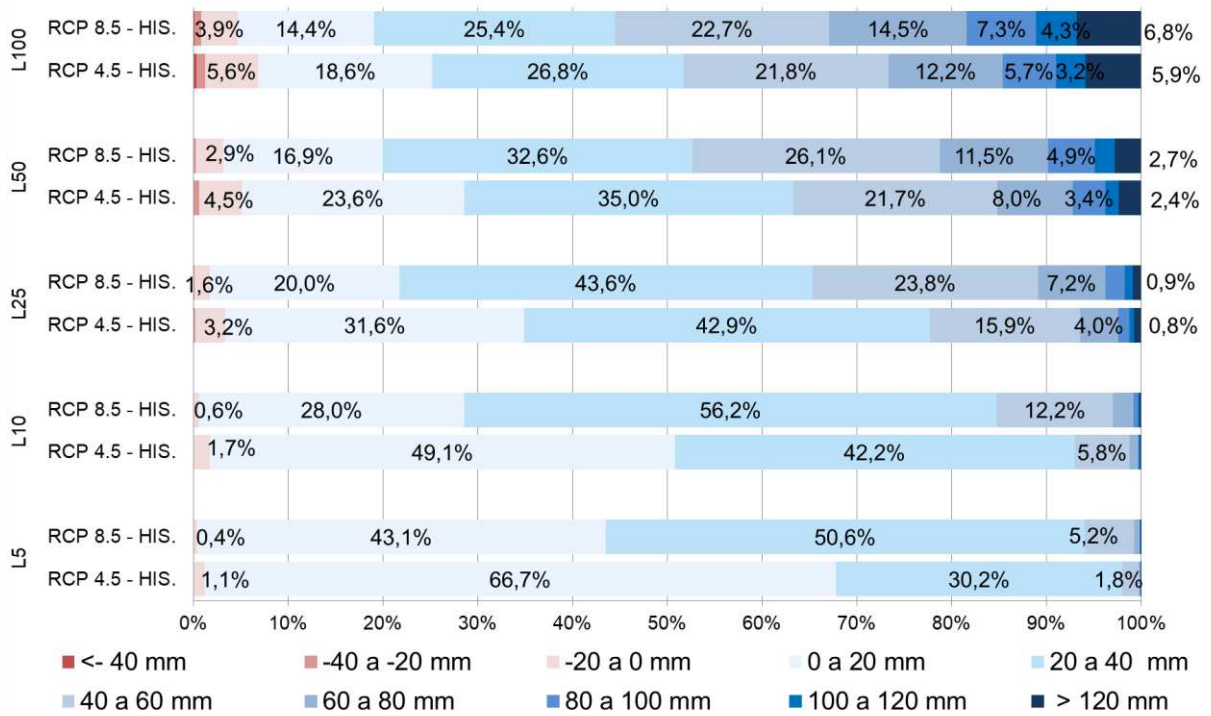


Figura 22- Distribuição espacial da anomalia das lâminas de precipitação máxima, em mm/dia, para os dados de precipitação futuros de 2060 a 2099, associados aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos (L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>25</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>100</sub>): a), b), c), d), e), entre os cenários RCP 8.5 e 4.5; f), g), h), i), j), entre o cenário RCP 4.5 e o período histórico (1980 a 2015); k), l), m), n), o), entre o cenário RCP 8.5 e o período histórico (1980 a 2015).



Fonte: Autora.

Figura 23 - Porcentagem da área de estudo distribuída segundo o valor da anomalia entre as lâminas de precipitação máxima do período futuro (2060 a 2099) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, e do período histórico (1980 a 2015), para os períodos de retorno associados 5, 10, 25, 50 e 100 anos (L<sub>5</sub>, L<sub>10</sub>, L<sub>25</sub>, L<sub>50</sub>, L<sub>100</sub>).



Fonte: Autora.

## 5. DISCUSSÃO

A não estacionariedade em séries de variáveis climáticas e ambientais se faz presente em diversos estudos sobre eventos extremos por todo o globo indicando a existência de tendências, sejam elas positivas ou negativas (ALASHAN, 2018; CHENG et al., 2014; OUARDA; CHARRON, 2019; PAREY; HOANG; DACUNHA-CASTELLE, 2010). Estudos relatam que os extremos climáticos, incluindo fortes eventos de precipitação, aumentaram substancialmente nas últimas décadas (ALEXANDER et al., 2006; CHENG et al., 2014) e um aumento global na precipitação diária máxima anual foi documentado (WESTRA; ALEXANDER; ZWIERS, 2013).

Estudos para o Brasil buscaram identificar tendências em séries observadas de eventos extremos de precipitação, principalmente para as regiões Sul e Sudeste, que concentram elevados índices pluviométricos. Para o estado do Rio de Janeiro e Espírito Santo, de acordo com Zilli et al. (2017), a precipitação tornou-se mais concentrada em menos eventos, e tanto estações individuais quanto dados de precipitação em grade indicam tendências positivas na magnitude das chuvas diárias extremas. Ainda, pesquisas indicam que a frequência dos eventos extremos de precipitação diária aumentaram no estado de São Paulo (ZILLI et al., 2017) e na capital (CAVALCANTI et al., 2017; SILVA DIAS et al., 2013).

Ademais, estudos como de Porto de Carvalho et al. (2014) realizados para a região Centro-Oeste, Sul e Sudeste mostraram que a precipitação diária máxima anual teve uma tendência crescente nas três regiões estudadas, principalmente nas regiões Centro-Oeste e Sul. Os testes estatísticos realizados nestas regiões sugeriram mudanças no comportamento da precipitação diária máxima extrema, evidenciando-se na redução do período de retorno da precipitação diária máxima anual superior a 100 mm/dia em todas as regiões (PORTO DE CARVALHO et al., 2014). Ainda para a região Sul, o estudo de Xavier et al. (2019) investigou a ocorrência de padrões estacionários e não estacionários nos extremos diários e as tendências médias de precipitação de 1980 a 2010 na bacia do rio Paraná, com uma metodologia semelhante a empregada neste estudo. Das estações analisadas aproximadamente 8% apresentaram séries de precipitação extremas não estacionárias, com mudanças temporais no parâmetro de localização e de escala (XAVIER et al., 2019).

Os resultados deste trabalho indicam que, já para o período histórico, 17,5% da área do Brasil apresentam séries de extremos de precipitação não estacionárias distribuídas por todo o território nacional. Os resultados para os estados da região Sul do país estão de acordo com os estudos relatados anteriormente. Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná apresentaram tendências estatisticamente significativas positivas. Os resultados para os estados do Espírito Santo e Rio de Janeiro também convergem com estudos anteriores que indicam tendências estatisticamente significativas positivas.

Estudos de extremos de clima no Nordeste têm sido desenvolvidos em nível regional ou microrregional. Entretanto as diferentes formas para definir extremos, tal como a ausência de séries completas e longas de dados climáticos a nível diário, não permitem uma integração dos resultados a nível regional (MARENGO et al., 2011).

Entretanto esta região vem sofrendo com ocorrência destes eventos. Enchentes foram registradas por vários anos (MARENGO et al., 2011), como em 1985 com excesso de chuva de até 300% para maior parte dos estados: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e parte do Maranhão. Em 2009 houve perdas em decorrência das chuvas e deslizamentos para os estados do Ceará, Maranhão, Bahia, Alagoas, Paraíba, Sergipe e Pernambuco. Ainda, as enchentes de 2010 ocorreram principalmente nos estados de Alagoas e Pernambuco, onde mais de 30 municípios declararam situação de emergência. Já no último ano (2019), em Pernambuco novamente eventos de precipitação extrema causaram transtornos. Marengo et al. (2011) afirmam que as análises de tendência das séries de precipitação evidenciam que as precipitações extremas estão aumentando para diferentes regiões do semiárido do Nordeste. Entretanto, como estes estudos utilizam diferentes bases de dados e períodos, não é possível fazer comparações que confirmem afirmações concretas sobre essas tendências (MARENGO et al., 2011).

Os resultados apresentados neste estudo acerca da análise de tendência no período histórico para a região Nordeste apresentou tendências significativas positivas em especial para os estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas e Sergipe, tanto na região litorânea como no interior dos estados. Como esta é uma região particularmente vulnerável, destaca-se a necessidade de mais estudos regionais que busquem compreender melhor o

comportamento destes eventos extremos de precipitação e desenvolver soluções para mitigar os impactos relacionados a eventos de precipitação mais intensos em algumas regiões no futuro.

A região Sudeste apresentou áreas com tendências estatisticamente significativas negativas para boa parte do estado de Minas Gerais e para o Estado de São Paulo, o que diverge dos resultados obtidos por Silvia Dias et al. (2013), Zilli et al. (2017) e Cavalcanti et al. (2017). Estes estudos, em sua maioria, são realizados localmente e baseados em estações individuais que refletem características locais e geográficas, o que difere da comparação de uma análise de maior escala. Nesses casos, a utilização de um conjunto de estações ao invés das individuais forneceria uma caracterização da variabilidade espacial das tendências das chuvas.

Além disso para a região da Amazônia, que também apresentou áreas com tendências significativas negativas, com destaque para o estado do Amazonas e Rondônia, deve ser analisada com cautela, uma vez a bacia do rio Amazonas apresenta baixa densidade de pluviômetros e chuva essencialmente convectiva.

Contudo, o principal objetivo deste trabalho é fornecer uma avaliação em larga escala da ocorrência de chuvas extremas no Brasil e as suas projeções futuras para cenários de mudanças climáticas. Não é intenção desta pesquisa esgotar a complexidade das análises de magnitude, frequência e possíveis impactos, e examinar todas as múltiplas dimensões da vulnerabilidade aos eventos extremos no Brasil. Esta avaliação estará em constante desenvolvimento e serão necessários novos estudos para levar a uma análise integrada e completa.

Dessa forma, as tendências em larga escala detectadas nesta pesquisa usando dados observacionais de precipitação fornecem evidências de que as mudanças em eventos extremos de precipitação projetadas para ocorrerem apenas em cenários futuros de mudanças climáticas já estão potencialmente ocorrendo em muitas regiões do país. Essas mudanças ocorrem em diversas áreas que possuem potencial de causar impacto social e econômico para o país. O conhecimento adequado das características dessas mudanças em extremos hidroclimáticos é essencial para o planejamento, execução de projeto e gerenciamento de estruturas hidráulicas.

Há uma ampla gama de técnicas estatísticas desenvolvidas para projetar estruturas hidráulicas a fim de proteger a sociedade e o meio ambiente contra o

impacto dos eventos extremos de precipitações, como inundações, enchentes e deslizamentos de terra. Tanto a segurança quanto custo destas estruturas estão diretamente relacionados com o risco associado à frequência de ocorrência de extremos de precipitação. Diante dos resultados encontrados neste trabalho, infere-se que essas estruturas em sua maioria têm sido projetadas com base em padrões de chuva que, em alguns casos, como observado em 17,5% do território nacional, não estão mais em conformidade com a realidade das condições climáticas atuais.

De modo geral, o dimensionamento de uma estrutura hidráulica para uma bacia hidrográfica em áreas urbanas parte de uma análise hidrológica que inclui: (a) uma análise de frequência de precipitação; (b) delineamento da área da bacia e a estimativa de seus parâmetros; e (c) o cálculo do escoamento direto na superfície usando um modelo de precipitação-escoamento superficial (GONZALEZ-ALVAREZ et al., 2018). Geralmente, a análise de frequência de precipitação para a bacia hidrográfica consiste em encontrar a distribuição de probabilidade que melhor representa o comportamento dos eventos extremos (de diferentes durações), a fim de obter a lâmina de precipitação associado a um dado período de retorno que será adotado para o dimensionamento das estruturas em projeto.

Os métodos tradicionais para análise de frequência de valores extremos para o projeto de estruturas hidráulicas (vazão, precipitação ou intensidade da precipitação) assumem que as funções de distribuição de probabilidade são estacionárias e regidas por um conjunto único de parâmetros. Uma vez reconhecida a existência da não estacionariedade nas séries de precipitação extrema, a utilização destas distribuições estacionárias não é mais adequada e se faz necessária a avaliação de eventos extremos calculados a partir de uma nova metodologia que consiga capturar essa dinâmica, sob o risco de se estar projetando estruturas menos seguras.

Assim, uma preocupação crescente dos especialistas em gerenciamento de recursos hídricos no mundo todo tem sido determinar até que ponto os métodos tradicionais desenvolvidos para regimes estacionários ainda podem ser aplicáveis, ou se métodos mais novos são necessários quando há evidência suficiente de não estacionariedade (SALAS; OBEYSEKERA; VOGEL, 2018). Pesquisas nacionais e internacionais vêm demonstrando que os modelos não estacionários de funções generalizadas de valores extremos podem ser uma ferramenta mais eficiente para explicar a evolução temporal e as dependências entre as variáveis aleatórias e o

clima (CHENG et al., 2014; EL ADLOUNI et al., 2007; GONZALEZ-ALVAREZ et al., 2018; KATZ; PARLANGE; NAVEAU, 2002).

Os resultados deste trabalho para o período histórico demonstram que para algumas áreas do Brasil desconsiderar a não estacionariedade pode significar um aumento não previsto no cálculo das estruturas hidráulicas de 5 a 10 mm/dia no valor das lâminas associadas aos períodos de retorno de 5 e 10 anos. Para as lâminas associadas aos períodos de retorno de 25, 50, 100 anos este valor pode chegar a mais de 30 mm/dia.

No Brasil este tema vem sendo discutido no âmbito dos estudos do clima e suas aplicações, mas é necessário despertar o interesse público para a questão. A capacidade de interagir componentes de infraestrutura social, ecológica e técnica de sistemas complexos para amortecer e adaptar-se a mudanças climáticas é um problema significativo para os gestores (MCPHILLIPS et al., 2018). Contudo, são necessárias estimativas locais confiáveis de projeções de chuvas extremas para definir e embasar os critérios de gerenciamento governamental de infraestrutura urbana e gerenciamento de inundações (KARAMOUZ; NAZIF; ZAHMATKESH, 2013).

Além disso, é importante que os gestores governamentais atentem por investimentos e pesquisas que revisem métricas alternativas que possam ser usadas para avaliar decisões de investimento em infraestrutura, incluindo abordagens econômicas baseadas em riscos, e planejamento sob incerteza adicional imposta por condições climáticas não estacionárias nas estruturas existentes. Assim, devemos repensar as metodologias de dimensionamento de diversas obras que contribuem para a infraestrutura e segurança pública como galerias de águas pluviais, pontes, barragens, determinação de áreas de inundação e enchentes e mapas de risco de desastres. Usar apenas estatísticas de chuvas passadas observadas nestes projetos provavelmente subestimarão futuros eventos extremos.

Os resultados desta pesquisa quanto à análise das projeções climáticas futuras de extremos indicam o aumento na magnitude das lâminas de precipitação extrema em relação às calculadas para o período histórico em pelo menos 90% do território nacional para os dois cenários de mudança climáticas. Nos períodos de retorno de 5 e 10 anos este aumento na maior parte da área foi de 0 a 40 mm/dia, chegando até 80 mm/dia para percentuais menores de área. Já os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos tiveram um aumento mais intenso, com aumentos de

20 a 60 mm/dia, chegando a ser maior que 120 mm/dia para percentuais menores de área. Estes resultados projetam condições climáticas futuras com eventos de precipitação extrema mais intensos e frequentes o que poderá levar, dentre outros impactos, a inundações urbanas mais intensas e mais frequentes, com o aumento dos riscos sociais, ambientais e econômicos.

Além das projeções climáticas, o crescimento populacional urbano é outro fator que sugere o aumento das inundações urbanas. Espera-se que as áreas urbanas absorvam o crescimento futuro da população mundial previsto (Nações Unidas, 2019). Esta urbanização inevitavelmente transforma áreas verdes em áreas impermeáveis, aumentando o escoamento superficial. À medida que mais pessoas vivem em áreas urbanas densamente povoadas, frequentemente situadas em planícies de inundação e áreas costeiras baixas, sua exposição a riscos de inundação aumenta (HAMMOND et al., 2015).

A vida útil destes sistemas de drenagem urbana e das infraestruturas urbanas é longo, da ordem de 50 a 100 anos. O aumento esperado do escoamento e do pico de fluxo devido ao aumento de áreas impermeáveis oriundas do crescimento populacional desordenado na área urbana e às mudanças climáticas pode fazer com que o sistema de drenagem construído hoje não atinja o nível de serviço desejado no futuro (MAILHOT; DUCHESNE, 2010).

Estudos para diferentes regiões do globo buscaram uma avaliação abrangente do desempenho de infraestruturas de drenagem urbanas para projeções de mudanças climáticas, e os impactos dessas mudanças (ALASHAN, 2018; HAMMOND et al., 2015; WILLEMS et al., 2012; XIONG et al., 2019; ZAHMATKESH et al., 2015; ZHOU et al., 2012). Observou-se que os sistemas atuais analisados não comportariam o nível de serviço a que foram projetados. Presumiu-se que o mau desempenho aumentaria o risco de inundações urbanas com o aumento do período de retorno, e sugere-se que os sistemas devem ser reconstruídos ou adaptados no futuro para evitar ameaças à segurança da vida e dos bens tangíveis.

Para o Brasil embora ainda sejam necessários maiores estudos, eventos recentes, com magnitude muito superior à média mensal, como os que atingiram os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo podem indicar que já estamos experimentando esta realidade, em que as estruturas existentes não comportam mais as precipitações a que foram projetadas.



Segundo Willens et al. (2012), as peças com capacidade insuficiente para transmitir futuros fluxos de projeto podem ser atualizadas nas próximas décadas, como parte de um programa de substituição e renovação rotineira e programada da infraestrutura envelhecida. A atualização ou a substituição pode ser realizada por um custo adicional relativamente pequeno, que trará benefícios socioeconômicos muito altos, comparados aos danos que podem vir a ocorrer caso o sistema falhe. Porém estes estudos apresentam análises locais direcionadas a infraestrutura e ao sistema individualizado desenvolvido nas regiões de estudo, e estão sujeitos as próprias limitações e incertezas. Dessa forma, são necessários estudos regionais para o Brasil com essas premissas principalmente para as áreas em que os resultados deste trabalho indicam intensificação das lâminas de precipitação máxima futuras, como o estado do Acre, Paraná, Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, o litoral norte de São Paulo, e a região Nordeste.

Além da influência sobre nível de serviço das obras hidráulicas, os estudos de eventos extremos em cenários de mudanças climáticas podem contribuir com pesquisas voltadas à análise de risco de desastres. Para aplicabilidade adequada dos estudos de eventos extremos é necessário que haja uma interação dinâmica entre as informações geradas pelos estudos de projeções em cenários de mudanças climáticas e as avaliações de risco e vulnerabilidade. A ocorrência de eventos extremos não leva necessariamente a desastres, mas a vulnerabilidade da população exposta a riscos naturais determinam se um fenômeno natural pode ou não causar um desastre (DE ALMEIDA; WELLE; BIRKMANN, 2016; WELLE; BIRKMANN, 2015). O impacto do evento extremo depende também do histórico de desenvolvimento de uma determinada região. Melhorar o nosso entendimento dos eventos extremos e possíveis vulnerabilidades afeta nossa capacidade de aumentar a resiliência a esses eventos ou planejar a recuperação (MCPHILLIPS et al., 2018). Decisões políticas anteriores sobre uso da terra, zoneamento e infraestrutura afetam o nível de exposição a riscos, suscetibilidade e a capacidade adaptativa da região de lidar com os impactos causados por eventos extremos (CHO; CHANG, 2017).

Pesquisas voltadas para o reconhecimento da suscetibilidade a deslizamentos são importantes para identificar e mitigar riscos à população, além de subsidiar políticas públicas referentes ao planejamento e à organização do território e à gestão ambiental, levando a um crescimento urbano mais seguro e sustentável. Uma das poucas avaliações realizadas para o país, estudo recente feito pelo IBGE

buscou contribuir para a melhoria e ampliação da divulgação sobre deslizamentos no Brasil (IBGE, 2019b), por meio da elaboração de mapa de suscetibilidade a deslizamentos do Brasil (Figura A1).

Dentre os temas considerados, a declividade, um dos principais fatores do desencadeamento dos fenômenos de deslizamento, teve o maior peso atribuído (35), enquanto a pluviosidade recebeu o menor peso (5) dentre os temas, apesar de evidenciado pelos autores que as chuvas costumam ser a principal variável deflagradora de deslizamentos em ambientes tropicais. Quanto mais intenso o episódio de precipitação, maior a probabilidade de ocorrerem eventos de deslizamentos em áreas predispostas (IBGE, 2019). Porém, a associação de dados de precipitação extrema foi uma limitação para a elaboração do estudo devido à indisponibilidade de informações de valores de chuva máxima para todo o território brasileiro, e optou-se por utilizar a precipitação média anual oriunda do Atlas Pluviométrico do Brasil (Figura A 2), elaborado pelo CPRM. Além das limitações inevitáveis ao se considerar pluviosidade média ao invés de extrema, esta limitação pode acarretar em resultados de suscetibilidade a deslizamentos subestimados para algumas regiões do Nordeste como interior do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco. Além disso, vale salientar que os resultados das lâminas futuras para os dois cenários e períodos analisados indicam um aumento nas lâminas de precipitação extrema para estas regiões. A precipitação média anual em regiões com longos períodos de seca, pode não representar adequadamente a influência dos eventos extremos em análises de risco a deslizamento. Visto que ao considerar um valor médio anual, os extremos tendem a ser suavizados, em especial para regiões com longos períodos sem precipitação.

O estudo de Almeida et al. (2016) demonstra que 80,23% dos municípios em condição de vulnerabilidade muito alta no país estão localizados nas regiões Norte e Nordeste, principalmente nesta última. O Nordeste enfrenta condições de alta exposição a riscos naturais (não tão altos quanto os municípios da região sul), porém apresentam sérias condições de vulnerabilidade, com menor capacidade de lidar com a recuperação e adaptação às mudanças impostas pelos impactos de desastres e mudanças climáticas (DE ALMEIDA; WELLE; BIRKMANN, 2016).

As regiões Sul e Sudeste apresentam níveis mais baixos de vulnerabilidade (DE ALMEIDA; WELLE; BIRKMANN, 2016), o que torna essas regiões, especialmente a região Sul, mais capazes de resistir, recuperar e adaptar-se às

mudanças socioeconômicas, culturais e ambientais que possam surgir com a ocorrência de desastres e clima. Entretanto, a perspectiva de aumento da magnitude e frequência das lâminas de precipitação extrema, apresentados neste estudo, para essa região que já concentra os maiores valores de precipitação do Brasil pode gerar incertezas quanto a estas capacidades.

Ainda, o mapa de suscetibilidade a deslizamentos do Brasil (Figura A 1) do IBGE (2019b), demonstra que as regiões Sul e Sudeste concentram as maiores áreas de suscetibilidade alta ou muito alta. Estas regiões apresentam condições naturais (clima, estrutura geológica e condições pedológicas), que as torna mais propensas a ocorrências de movimentos de massa. Além disso, a região Sudeste apresenta alta densidade populacional localizada em áreas de declives acentuados, dada a ocupação antrópica dessa região, que concentra, aproximadamente, 42% da população brasileira (IBGE, 2019c). Esse contingente populacional reflete as alterações no uso do solo que exacerbam a análise dos resultados descritos anteriormente.

Embora tenhamos observado um progresso significativo na compreensão dos extremos hidrológicos, ainda persistem incertezas em relação ao papel das forças locais e globais na frequência e magnitude de eventos extremos. É importante ressaltar que o presente estudo realizou as análises com base no banco de dados de precipitação em grade ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) que oferece uma visão geral dos padrões regionais e em larga escala das tendências de precipitação. Assim, a precipitação simulada nessa resolução pode perder alguns processos que ocorrem em escala espacial menor, especialmente de caráter convectivo ou orográfico, o que pode subestimar a precipitação extrema.

Além dessas limitações, existem grandes incertezas nas projeções de precipitação, que é uma variável climática muito difícil de simular, visto que os modelos ainda divergem, principalmente quanto a magnitude da mudança. Grande parte dessas incertezas decorre do fato de modelos climáticos utilizarem diferentes representações físicas de processos em uma grade de resolução relativamente baixa (MARENGO, 2014). As diferenças nas parametrizações físicas entre os diferentes modelos e também o possível papel da urbanização, são fatores que ainda não estão bem representados nos modelos climáticos e são fontes de incerteza, já identificadas por outros estudos (CAVALCANTI et al., 2017). Entretanto, embora os modelos não concordem com a magnitude, concordam no sinal, o que

indica que o aumento das lâminas de precipitação máxima é um resultado robusto. Dessa forma, as incertezas relativas ao cálculo das lâminas de precipitação extrema futuras para este estudo foram calculadas conforme descrito na metodologia e estão apresentadas nas Figuras B 1 – 4 (Anexo B). Para diminuir a incerteza dessas análises dependemos de avanços nas observações e nas representações dos processos que simulam a precipitação dentro dos modelos.

Além disso, outros fatores como a dificuldade da modelagem dos valores extremos não estacionários podem trazer incertezas. Os métodos que estão sendo desenvolvidos para levar em consideração as condições não estacionárias são mais complexos do que aqueles que normalmente foram utilizados assumindo condições estacionárias. Geralmente, para o cálculo das funções generalizadas de valores extremos não estacionários são necessários diferentes modelos GEVs para determinar a melhor relação e as variáveis que modelam aquela distribuição. Isso reflete em um número maior de equações e parâmetros envolvidos, aumentando assim as incertezas.

A dificuldade do processo de cálculo e a falta de diálogo entre a comunidade científica e os técnicos que aplicam o produto destas estimativas inibem a implementação desta metodologia como uma prática usual. Talvez algumas das dificuldades possam ser superadas pelo desenvolvimento de softwares e plataformas digitais que viabilizem estas informações de forma clara e acessível e pelo desenvolvimento de programas e cursos de treinamento para transferir e disseminar o conhecimento necessário. Para implementação destas medidas será necessário melhorar também a comunicação entre a comunidade científica e os gestores públicos a fim de viabilizar estes estudos e tornar a preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos uma prioridade.

Após o desastre na região serrana do Rio de Janeiro em 2011, com aproximadamente 900 pessoas mortas e perdas econômicas, da ordem de 4,8 bilhões de reais (Banco Mundial, 2012), o Ministério de Ciência e Tecnologia criou o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (IBGE, 2018). Esta foi uma medida que tem contribuído para diminuir os impactos dos desastres naturais relacionados a eventos extremos de precipitação. Além disso, ressalta-se que infraestruturas que asseguram os riscos a inundações como instalações operacionais de drenagem de águas pluviais, de transporte, detenção para o amortecimento de vazões de cheias, bem como o tratamento e disposição

final das águas pluviais, incluindo a fiscalização e atualização da rede, são serviços constituintes do saneamento básico no Brasil (ANA., 2019), que devem estar de acordo com esta nova perspectiva. Entretanto atualmente algumas autoridades questionam a existência das mudanças climáticas. Os tomadores de decisão estão em um ambiente composto por céticos e cientistas, com opiniões divergentes. Neste contexto incerto, onde a ciência é questionada por opiniões pessoais, as autoridades tendem a manter a inércia, e essa falta de posicionamento contribui para o aumento da vulnerabilidade que pode acarretar consequências graves para a sociedade (MARENGO, 2014).

Portanto, essas incertezas e limitações reforçam a importância de mais estudos e o desenvolvimento de metodologias para a comunicação eficaz sobre eventos extremos. À medida que os profissionais técnicos, pesquisadores e gestores começarem a atuar de forma conjunta será possível desenvolver mais estratégias para gerenciar e aumentar a resiliência das cidades brasileiras a eventos extremos.

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo analisou a estacionariedade das séries de extremos de precipitações, tanto históricas quanto de projeções futuras em cenários de mudanças climáticas no Brasil. Para o período histórico os resultados do teste de desvio indica a existência de séries não estacionárias em 17,5% da área do Brasil. A análise de tendência realizada pelo teste Mann-Kendall indicou a existência de tendências positivas e negativas distribuídas em todo o território nacional. Em especial foram observadas tendências positivas estatisticamente significativas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Espírito Santo e Rio de Janeiro. Parte do estado de São Paulo e Minas Gerais apresentaram tendências negativas estatisticamente significativas.

As análises de estacionariedade para o período futuro foram realizadas para os dados de projeção de precipitação dos modelos: CCSM4, MRI-CGM3, MIROC5, HADGEM2–ES e para a média dos modelos (*ensemble*). Os resultados do *ensemble* apresentaram percentuais maiores de áreas não estacionárias no primeiro período (2020 a 2059) do que para o segundo período (2060 a 2099). Nos dois períodos os resultados indicam maior percentual de tendências positivas significativas.

As distribuições de precipitações extremas observadas e de projeções futuras em cenários de mudanças climáticas foram modeladas segundo os três modelos GEVs: clássico, com todos os parâmetros constantes ( $GEV_0$ ), modelo com o parâmetro de localização em função do tempo ( $GEV_1$ ) e para o modelo com parâmetros de localização e escala em função do tempo ( $GEV_2$ ). Os resultados do teste de desvio, para as áreas não estacionárias, indicaram melhor aderência das distribuições ao modelo  $GEV_1$  do que ao modelo  $GEV_2$ . Isso sugere que o aumento na complexidade do modelo  $GEV_2$  não trouxe benefícios na capacidade do modelo de representar os dados, para maior parte das distribuições não estacionárias.

O cálculo das lâminas de precipitações extremas associados aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos para o período histórico indicam que uma vez definida a existência de tendência na série, empregar o cálculo das lâminas de precipitação extrema de forma estacionária tende a subestimar a magnitude dos extremos de precipitação. Dessa forma, desconsiderar a não estacionariedade pode significar um aumento não previsto nas lâminas de precipitação utilizadas para dimensionamento das estruturas hidráulicas de 5 a 10 mm/dia no valor das lâminas

associadas aos períodos de retorno de 5 e 10 anos. Para as lâminas associadas aos períodos de retorno de 25, 50, 100 anos este valor pode chegar a mais de 30 mm/dia.

As análises das projeções climáticas futuras de extremos indicaram o aumento na nos valores das lâminas de precipitação extrema em relação às lâminas calculadas para o período histórico, em pelo menos 90% do território nacional, para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Nos períodos de retorno de 5 e 10 anos este aumento na maior parte da área, foi de 0 a 40 mm/dia, chegando até 80 mm/dia para percentuais menores de área. Já os períodos de retorno de 25, 50 e 100 anos tiveram um aumento mais intenso. Na maior parte da área, estes períodos de retorno aumentaram de 20 a 60 mm/dia, chegando a ser maior que 120 mm/dia para percentuais menores de área.

Dessa forma, os resultados deste estudo sugerem condições climáticas futuras com eventos de precipitação extrema mais intensos e frequentes para o Brasil. Isso poderá levar, dentre outros impactos, a inundações urbanas mais intensas e mais frequentes, com o aumento dos riscos sociais, ambientais e econômicos, bem como, o aumento da probabilidade de ocorrerem eventos de deslizamentos em áreas predispostas.

Destaca-se a necessidade de desenvolver trabalhos futuros, principalmente para as áreas em que os resultados deste trabalho indicam intensificação das lâminas futuras, que busquem uma avaliação abrangente do desempenho de infraestruturas de drenagem urbanas para projeções de mudanças climáticas, e os impactos dessas mudanças. Sugerimos ainda a avaliação de riscos de inundação pluvial, considerando os efeitos das mudanças climáticas e os benefícios da adaptação, e trabalhos que integrem abordagens de risco e resiliência ao gerenciamento de catástrofes em sistemas de engenharia no contexto das mudanças climáticas. Além destes, recomendamos trabalhos futuros que avalie a melhor covariável para elaboração de curvas não estacionárias de intensidade, duração e frequência.

Por fim, é indispensável para o controle e a prevenção de impactos de eventos precipitação extrema por meio do dimensionamento adequado dos sistemas de infraestrutura hídrica, onde se conheça o risco assumido sob pena de serem menos seguros, expondo a sociedade ao risco crescente e iminente de um sistema falho, por concepção.

## REFERÊNCIAS

- AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. What are the best covariates for developing non-stationary rainfall Intensity-Duration-Frequency relationship? **Advances in Water Resources**, v. 101, p. 11–22, 2017. a.
- AGILAN, V.; UMAMAHESH, N. V. Modelling nonlinear trend for developing non-stationary rainfall intensity-duration-frequency curve. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1265–1281, 2017. b.
- ALASHAN, S. Data Analysis in Nonstationary State. **Water Resources Management**, v. 32, n. 7, p. 2277–2286, 2018.
- ALEXANDER, L. V. et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 111, n. 5, p. 1–22, 2006.
- ANA., AGÊNCIA NACIONAL DE. de ÁGUAS (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Brasília, 2019.
- Ávila, G. A. et. al. Extreme Climate Indices in Brazil: Evaluation of Downscaled Earth System Models at High Horizontal Resolution. **Climate Dynamics**(em revisão).
- ASSIS, L. C. et al. A model-based site selection approach associated with regional frequency analysis for modeling extreme rainfall depths in Minas Gerais state, Southeast Brazil. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, n. 2, p. 469–484, 2018.
- BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações e Deslizamentos na Região Serrana do Rio de Janeiro - janeiro de 2011**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/pt/260891468222895493/pdf/NonAsciiFileName0.pdf>. Acesso em: 29.01.2020.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, 2002.
- CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. **Atmospheric Research**, v. 118, p. 27–40, 2012.
- CAVALCANTI, I. F. A. et al. Projections of Precipitation Changes in Two Vulnerable Regions of São Paulo State, Brazil Iracema. **American Journal of Climate Change**, [s. l.], v. 06, n. 02, p. 268–293, 2017.
- CHENG, L. et al. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. **Climatic Change**, v. 127, n. 2, p. 353–369, 2014.



CHO, S. Y.; CHANG, H. Recent research approaches to urban flood vulnerability, 2006–2016. **Natural Hazards**, v. 88, n. 1, p. 633–649, 2017.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014. a.

CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014. b.

COLES, S. **An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values**. London: Springer London, v. 53, 2001.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 1051–1075, 2011.

DE ALMEIDA, L. Q.; WELLE, T.; BIRKMANN, J. Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 17, p. 251–272, 2016.

EL ADLOUNI, S. et al. Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. **Water Resources Research**, v. 43, n. W03410, p. 1–13, 2007.

FUSS, S. et al. Betting on negative emissions. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 10, p. 850–853, 2014.

GONZALEZ-ALVAREZ, A. et al. Effect of the non-stationarity of rainfall events on the design of hydraulic structures for runoff management and its applications to a case study at Gordo Creek watershed in Cartagena de Indias, Colombia. **Fluids**, v. 3, n. 2, 2018.

HAMMOND, M. J. et al. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 1, p. 14–29, 2015.

Heffernan, J. E. Original S functions written by Janet E. Heffernan with R port and R documentation provided by Alec G. Stephenson. **ismev: An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values**. R package version 1.42. <https://CRAN.R-project.org/package=ismev>, 2018.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/>. Acesso em 05 de dezembro de 2019. (2019.a).

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População em áreas de risco no Brasil**. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro, (2018).

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil: Primeira aproximação.** Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Rio de Janeiro, (2019b).

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2019.** Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, 2019c.

IPCC, Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp 582, 2012.

IPCC, Summary for policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32, 2014.

IPCC, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., **Cambridge University Press**, Cambridge, UK, pp. 976, 2007.

JANOWIAK, J. E.; KOUSKY, V. E.; JOYCE, R. J. Diurnal cycle of precipitation determined from the CMORPH high spatial and temporal resolution global precipitation analyses. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 110, n. 23, p. 1–18, 2005.

JENKINSON, A. F. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 81, n. 348, p. 158–171, 1955.

KARAMOUZ, M.; NAZIF, S.; ZAHMATKESH, Z. Self-organizing gaussian-based downscaling of climate data for simulation of urban drainage systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 2, p. 98–112, 2013.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B.; NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 25, n. 8–12, p. 1287–1304, 2002.

KAWAZOE, S.; GUTOWSKI, W. J. Regional, very heavy daily precipitation in narccap simulations. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 4, p. 1212–1227, 2013.

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. **British Journal of Statistical Psychology**, v. 9, n. 1, p. 196, 1956.

KHARIN, V. V. et al. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. **Journal of Climate**, v. 20, n. 8, p. 1419–1444, 2007.

KYSELÝ, J.; BERANOVÁ, R. Climate-change effects on extreme precipitation in central Europe: Uncertainties of scenarios based on regional climate models. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, n. 3–4, p. 361–374, 2009.

LANG, M.; OUARDA, T. B. M. J.; BOBÉE, B. Towards operational guidelines for over-threshold modeling. **Journal of Hydrology**, v. 225, n. 3–4, p. 103–117, 1999.

LAWRENCE, D. M. et al. The CCSM4 land simulation, 1850-2005: Assessment of surface climate and new capabilities. **Journal of Climate**, v. 25, n. 7, p. 2240–2260, 2012.

LEADBETTER, M. R.; LINDGREN, G.; ROOTZÉN, H. **Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes**. New York, NY: Springer New York, 1983.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J. P. R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, n. 1, p. 121–135, 2010.

LYRA, A. et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1–2, p. 663–682, 2018.

MAILHOT, A.; DUCHESNE, S. Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 2, p. 201–208, 2010.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.

MARENGO, J. A. **Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI**. 2<sup>a</sup> ed. MMA, Brasília. v. 26, 2007.

MARENGO, J. A. et al. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande - PB, 2011.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25–32, 2014.

MARKUS, M. et al. Communicating the impacts of projected climate change on heavy rainfall using a weighted ensemble approach. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 4, 2018.

MCPHILLIPS, L. E. et al. Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. **Earth's Future**, v. 6, n. 3, p. 441–455, 2018.

MILLY, P. C. D. et al. Climate change: Stationarity is dead: Whither water management? **Science**, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008.

OUARDA, T. B. M. J.; CHARRON, C. Changes in the distribution of hydro-climatic extremes in a non-stationary framework. **Scientific Reports**, v. 9, n. 8104, p. 1–8, 2019.

PAREY, S.; HOANG, T. T. H.; DACUNHA-CASTELLE, D. Different ways to compute temperature return levels in the climate change context. **Environmetrics**, v. 21, n. 7–8, p. 698–718, 2010.

PEDRON, I. T. et al. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba – Southern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 3, p. 1250–1264, 2017.

PORTO DE CARVALHO, J. R. et al. Annual maximum daily rainfall trends in the midwest, southeast and southern Brazil in the last 71 years. **Weather and Climate Extremes**, v. 5, n. 1, p. 7–15, 2014.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIAHI, K. et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

SALAS, J. D.; OBEYSEKERA, J.; VOGEL, R. M. Techniques for assessing water infrastructure for nonstationary extreme events: a review. **Hydrological Sciences Journal**, v. 63, n. 3, p. 325–352, 2018.

SARHADI, A.; SOULIS, E. D. Time-varying extreme rainfall intensity-duration-frequency curves in a changing climate. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 5, p. 2454–2463, 2017.

SILVA DIAS, M. A. F. et al. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. **Climatic Change**, v. 116, n. 3–4, p. 705–722, 2013.

SMITH, R. L. Maximum likelihood estimation in a class of nonregular cases. **Biometrika**, v. 72, n. 1, p. 67–90, 1985.

THOMSON, A. M. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

THRASHER, B. et al. Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 3309–3314, 2012.

TRAMBLAY, Y. et al. Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. **Global and Planetary Change**, v. 82–83, p. 104–114, 2012.

TRAMBLAY, Y. et al. Analyse fréquentielle non-stationnaire des pluies extrêmes dans le Sud de la France. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 2, p. 280–294, 2013.

NAÇÕES UNIDAS. **World Population Prospects 2019: Highlights**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019.

UVO, C. B. et al. The Relationships between Tropical Pacific and Atlantic SST and Northeast Brazil Monthly Precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, p. 551–562, 1998.

VU, T. M.; MISHRA, A. K. Nonstationary frequency analysis of the recent extreme precipitation events in the United States. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 999–1010, 2019.

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010.

WELLE, T.; BIRKMANN, J. The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. **Journal of Extreme Events**, v. 02, n. 01, p. 1550003, 2015.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. **Journal of Climate**, v. 26, n. 11, p. 3904–3918, 2013.

WILLEMS, P. et al. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. **Atmospheric Research**, v. 103, p. 106–118, 2012.

XAVIER, A. C. F. et al. Stationary and non-stationary detection of extreme precipitation events and trends of average precipitation from 1980 to 2010 in the Paraná River basin, Brazil. **International Journal of Climatology**, n. June, p. 1–16, 2019.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016.

XIONG, L. et al. Impacts of Climate Change on Urban Extreme Rainfall and Drainage Infrastructure Performance: A Case Study in Wuhan City, China. **Irrigation and Drainage**, [s. l.], v. 68, n. 2, p. 152–164, 2019.

YUKIMOTO, S. et al. A new global climate model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3: -Model description and basic performance-. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 90.A, p. 23–64, 2012.

ZAHMATKESH, Z. et al. Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York City. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 1, p. 1–13, 2015.

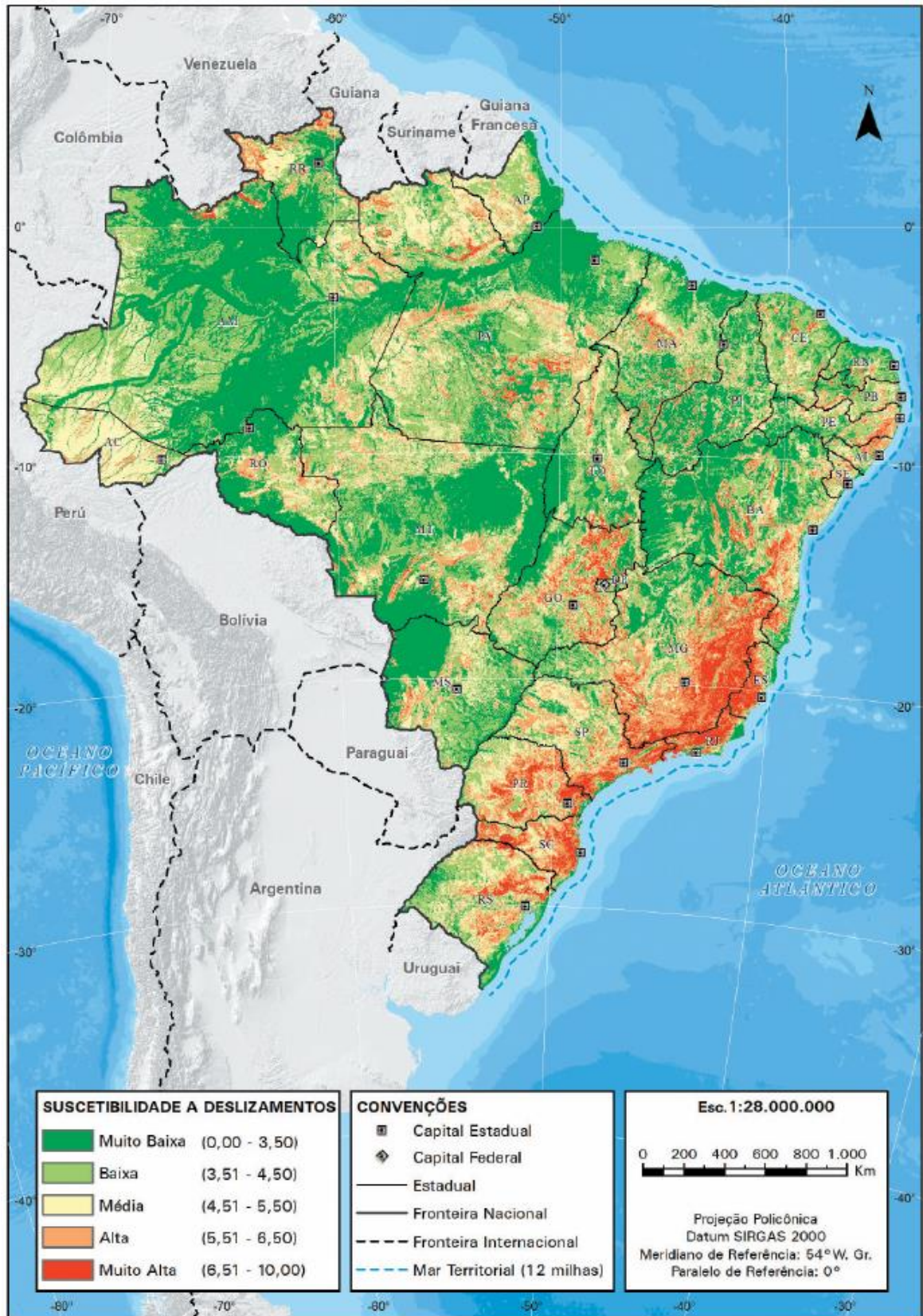
ZHANG, X.; ZWIERS, F. W.; LI, G. Monte Carlo experiments on the detection of trends in extreme values. **Journal of Climate**, v. 17, n. 10, p. 1945–1952, 2004.

ZHOU, Q. et al. Framework for economic pluvial flood risk assessment considering climate change effects and adaptation benefits. **Journal of Hydrology**, v. 414–415, p. 539–549, 2012.

ZILLI, M. T. et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.

## ANEXO A

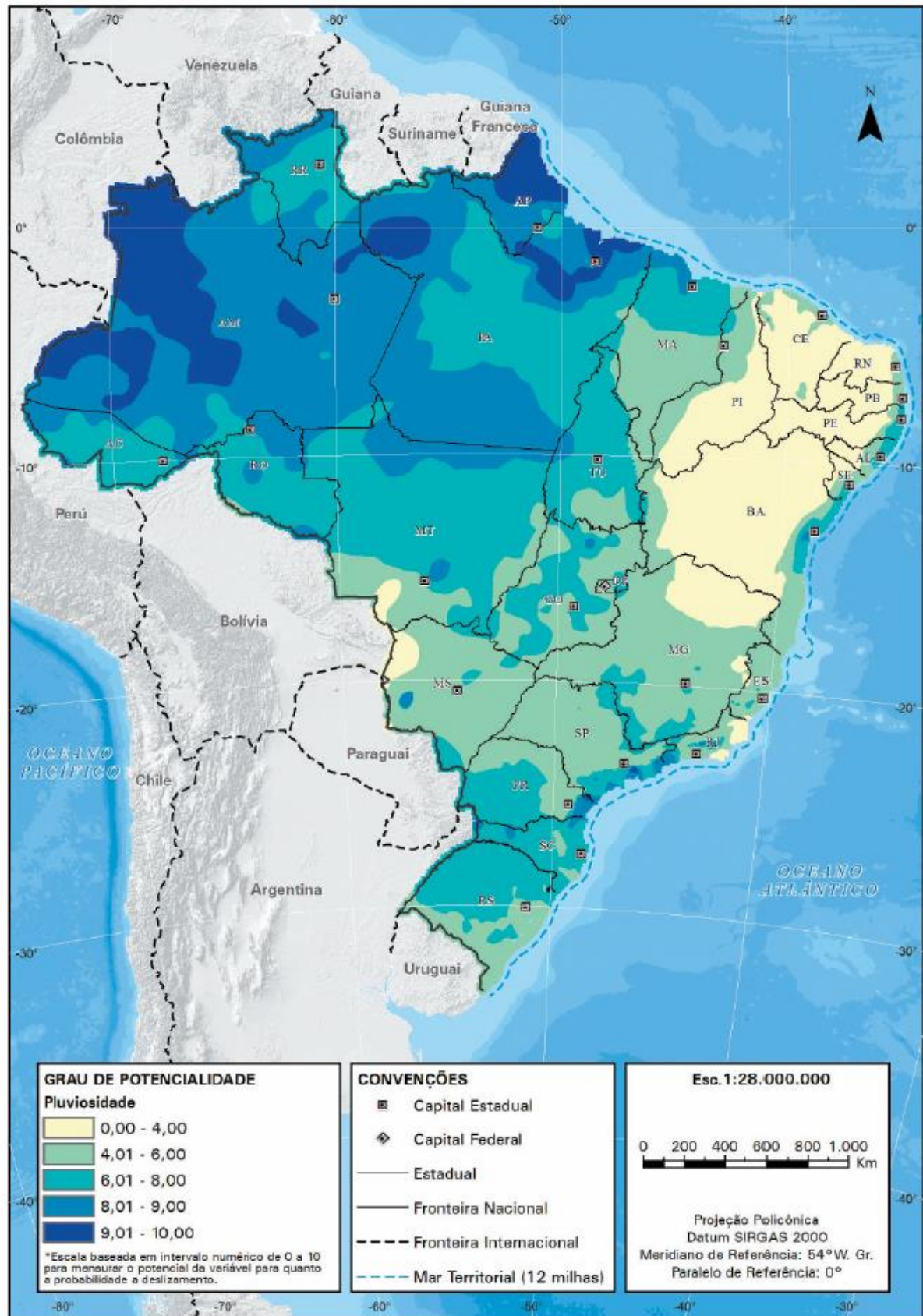
Figura A 1- Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil.



Fonte: IBGE, Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil - Primeira aproximação. Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Página 44. (2019).



Figura A 2-Potencialidade a deslizamentos do tema Pluviosidade.

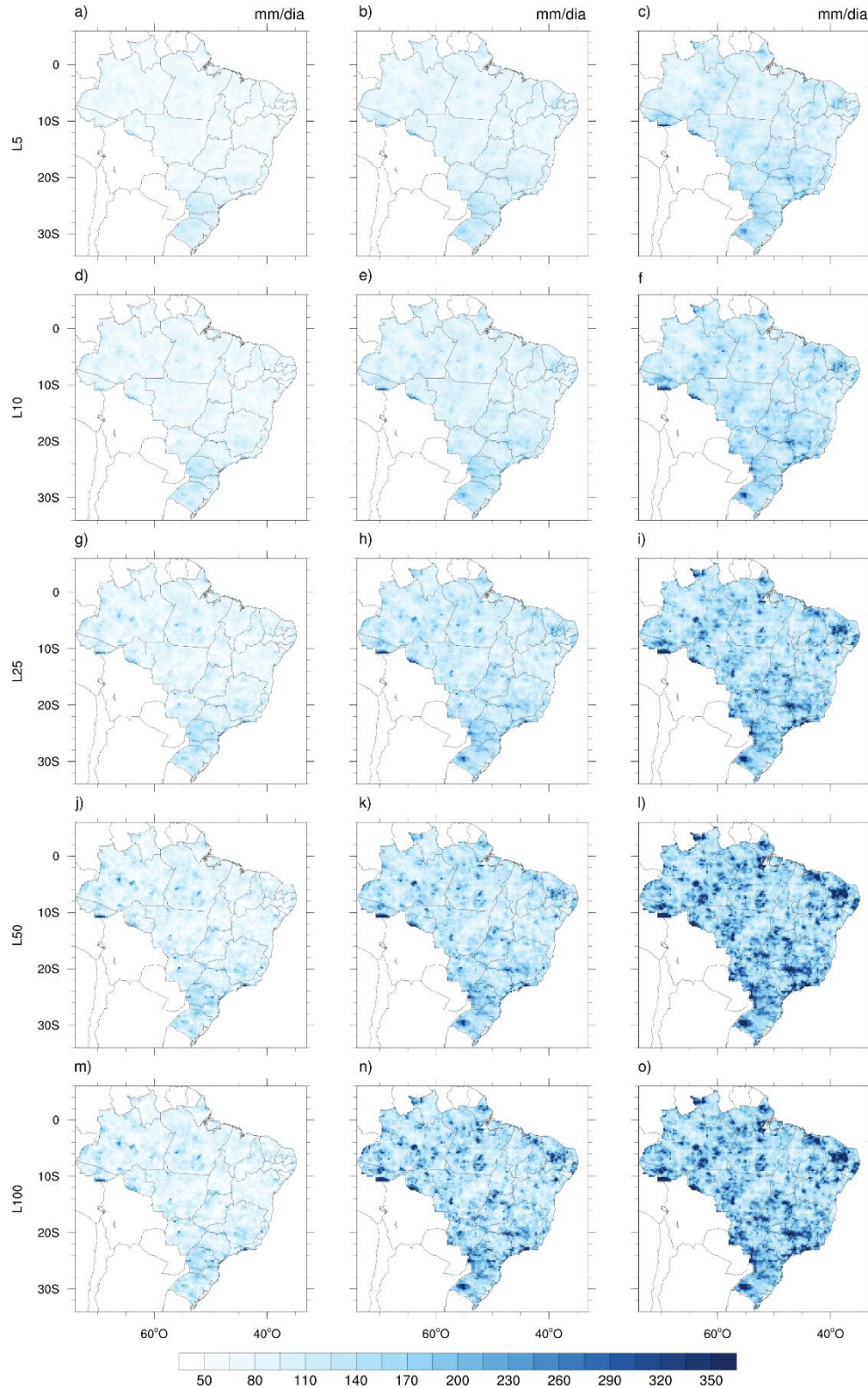


Fonte: IBGE, Suscetibilidade a Deslizamentos do Brasil - Primeira aproximação. Diretoria de Geociências, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Página 36. (2019).



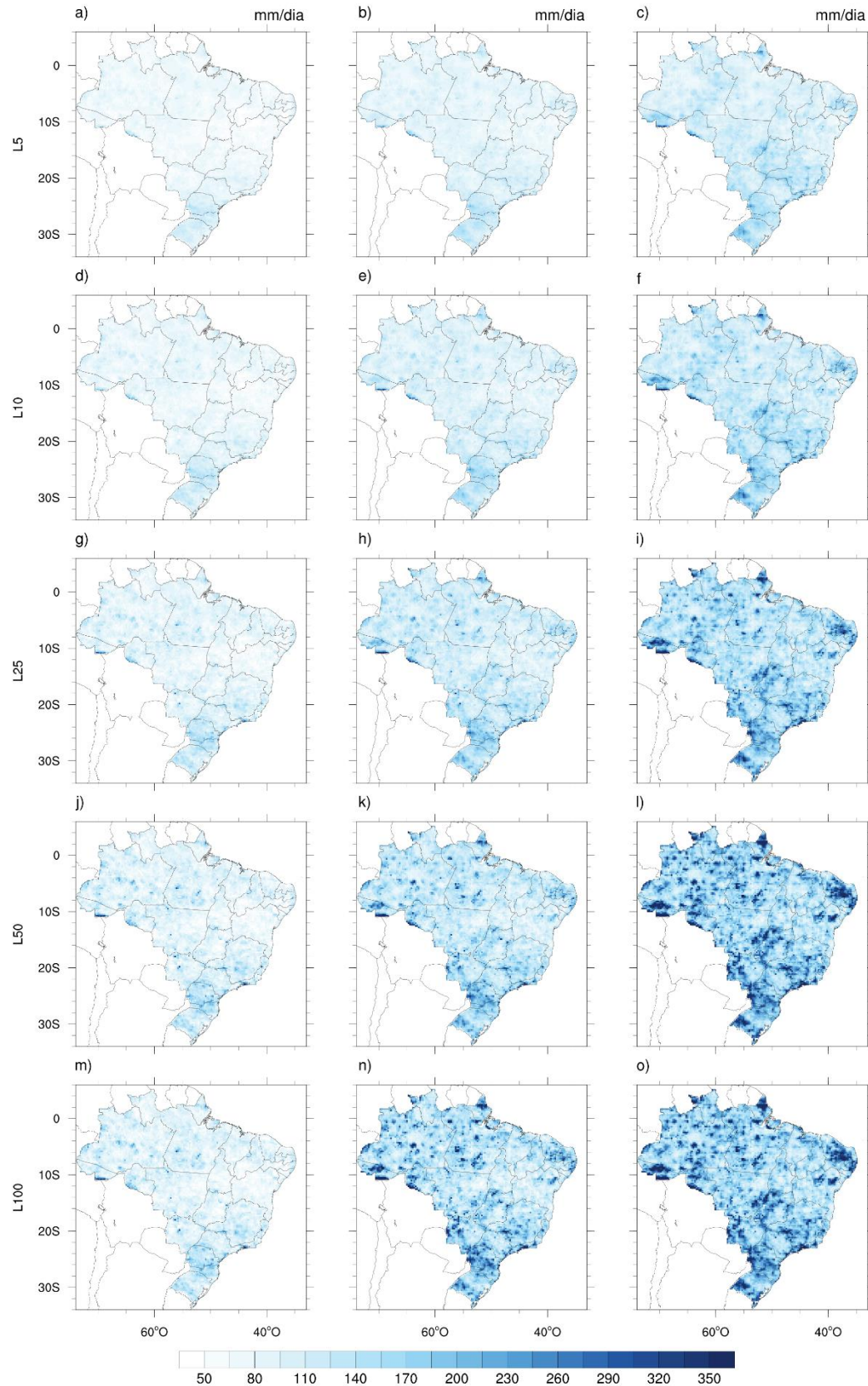
## APÊNDICE B

Figura B 1- Distribuição espacial da incerteza da lâmina de precipitação máxima associada aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em mm/dia, para o período de 2020 a 2059 no cenário RCP 4.5: a), d), g), j), m), valores mínimos; b), e), h), k), n) valor calculado; c), f), i), l), o), valores máximos.



Fonte: Autora.

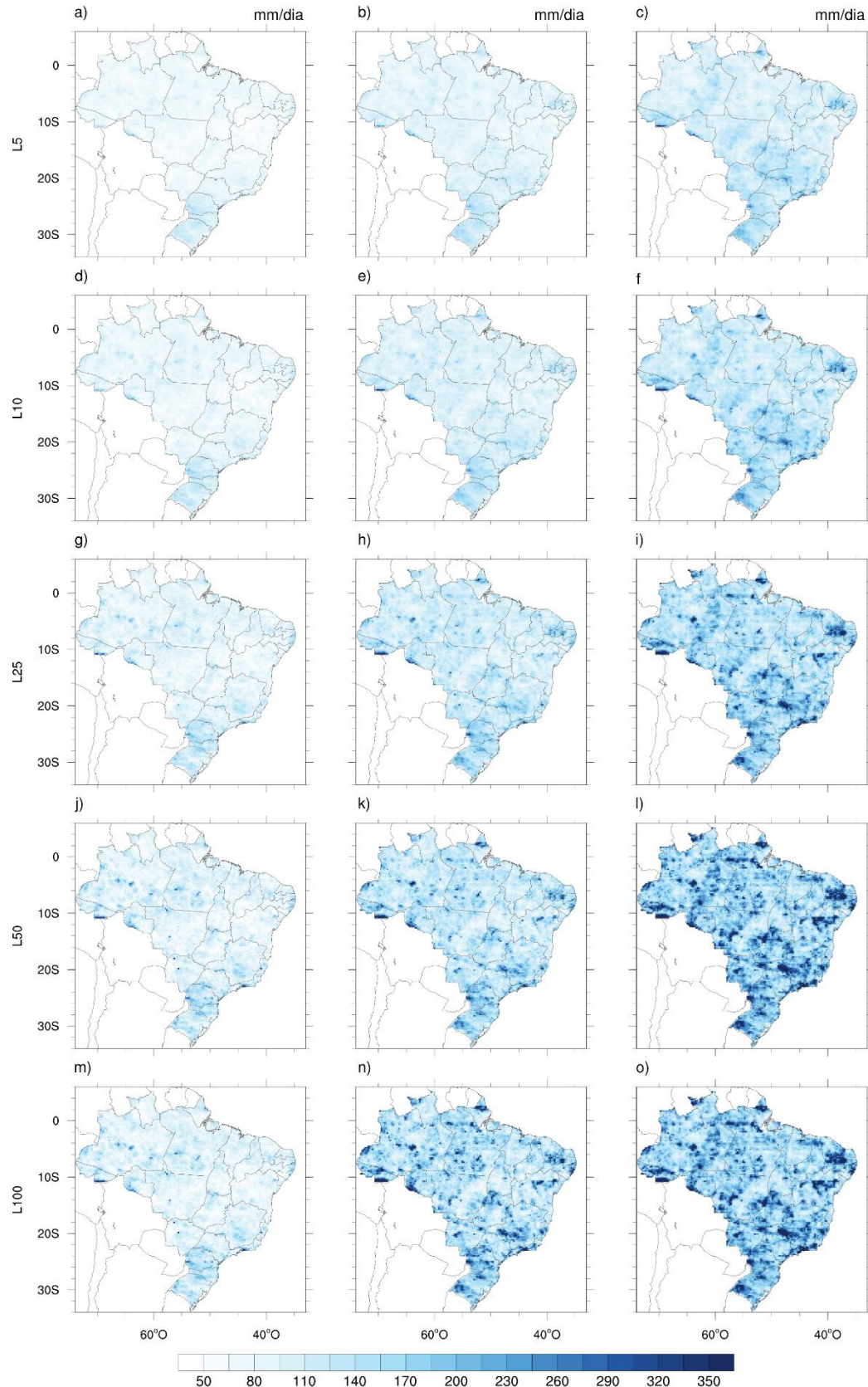
Figura B 2- Distribuição espacial da incerteza da lâmina de precipitação máxima associada aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em mm/dia, para o período de 2020 a 2059 no cenário RCP 8.5: a), d), g), j), m), valores mínimos; b), e), h), k), n) valor calculado; c), f), i), l), o), valores máximos.



Fonte: Autora.

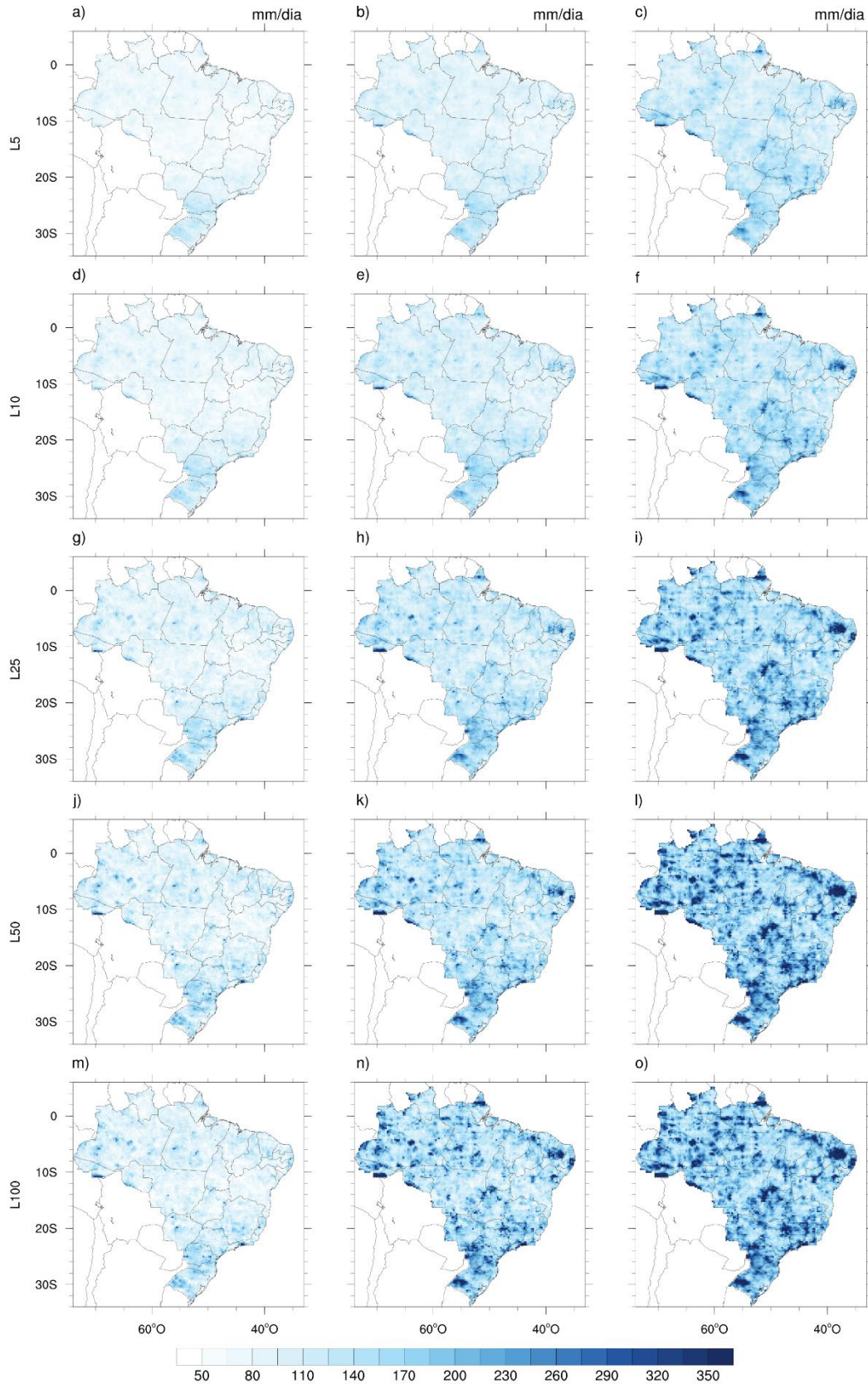


Figura B 3-Distribuição espacial da incerteza da lâmina de precipitação máxima associada aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em mm/dia, para o período de 2060 a 2099 no cenário RCP 4.5: a), d), g), j), m), valores mínimos; b), e), h), k), n) valor calculado; c), f), i), l), o), valores máximos.



Fonte: Autora.

Figura B 4- Distribuição espacial da incerteza da lâmina de precipitação máxima associada aos períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, em mm/dia, para o período de 2060 a 2099 no cenário RCP 8.5: a), d), g), j), m), valores mínimos; b), e), h), k), n) valor calculado; c), f), i), l), o), valores máximos



Fonte: Autora.