



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO MODELO GLOBAL  
MPI-ESM-LR E PELO MODELO REGIONAL MPI-ESM-LR-RCA4 NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA

EMANUELLA ALMEIDA FIGUEIREDO

JOÃO PESSOA

2017

EMANUELLA ALMEIDA FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO MODELO GLOBAL  
MPI-ESM-LR E PELO MODELO REGIONAL MPI-ESM-LR-RCA4 NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como pré-requisito para a  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Ambiental pela Universidade  
Federal da Paraíba.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Claudia  
Fernandes Medeiros Braga.

JOÃO PESSOA

2017

F475a Figueiredo, Emanuella Almeida

Avaliação da precipitação simulada pelo modelo global MPI-ESM-LR e pelo modelo regional MPI-ESM-LR-RCA4 na bacia hidrográfica do rio Paraíba./ Emanuella Almeida Figueiredo. – João Pessoa, 2017.

71f. il.:

Orientadora: Profa. Dra. Ana Claudia Fernandes Medeiros Braga

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) Campus I  
- UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Mudanças Climáticas 2. Precipitação 3. Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba Desertificação I. Título.

## FOLHA DE APROVAÇÃO

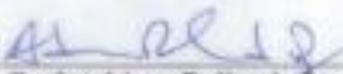
EMANUELLA ALMEIDA FIGUEIREDO

### AVALIAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO SIMULADA PELO MODELO GLOBAL MPI-ESM-LR E PELO MODELO REGIONAL MPI-ESM-LR-RCA4 NA BACIA DO RIO PARAÍBA

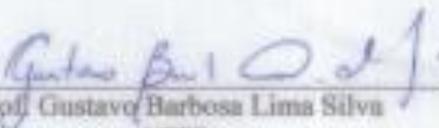
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 31/05/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup> Ana Claudia Fernandes Medeiros Braga  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPB

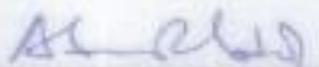
\_\_\_\_\_  
APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Adriano Rolim da Paz  
UFPB

\_\_\_\_\_  
APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Gustavo Barbosa Lima Silva  
UFPB

\_\_\_\_\_  
APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Adriano Rolim da Paz  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

*“Just keep following the heartlines on  
your hand”*

*Florence Welch*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, **Adi** e **Manuel**, grandes incentivadores e exemplos de pessoas íntegras, que nunca mediram esforços para possibilitarem uma boa educação e que sempre me rodearam com muito amor e palavras de otimismo.

À minha irmã, **Cyntia**, que sempre se manteve presente, me incentivando e me apoiando.

À minha família, e em especial a minhas tias **Ivete** e **Ivânia**, que sempre me estimulou a estudar e crescer profissionalmente.

A todos os **bons professores** da graduação, pelos ensinamentos durante o curso.

À minha orientadora **Ana Claudia**, por toda a ajuda durante os projetos de iniciação científica e na elaboração deste trabalho. E também por ser um exemplo de pessoa e de profissional.

Aos professores que compõem a banca, **Adriano** e **Gustavo**, por terem aceitado o convite de avaliar o presente trabalho, me sinto honrada em poder contar com a opinião acadêmica de dois profissionais tão competentes.

Aos amigos, **Alecsander Cruz**, **André Honorato**, **Antero Martins**, **Augusto Delunardo**, **Camila Porto**, **Cássio Lemos**, **Cinthia Botelho**, **Larissa Santana**, **Lucas Britto**, **Marcela Freitas**, **Moana Duarte**, **Renan Honorato**, **Rodrigo Madruga**, **Vanessa Wortmann** e **Victoria Lina**, por todas as histórias vividas e por se tornarem essenciais na minha vida.

Aos amigos, **Elaine Henrique**, **Gabriela Freitas**, **Gerlandia Bias**, **Hesmaelly Pereira**, **Lusielson Pereira**, **Palloma Morais** e **Thayse Moura**, presentes desde o início do curso, por estarem sempre dispostos a ajudar.

À **Maria Teresa** e **Bruno Gomes**, pela amizade incondicional desde os tempos de escola.

À **Cecilia Flavia** e **Fernanda Ellen**, pela amizade e pelos conselhos.

À equipe da Terra Consultoria, **Akira Duarte**, **Alan Pinheiro**, **Jamille Amorim**, **Juliana Garcia** e **Talles Chateaubriand**, que contribuíram ao deixar as minhas tardes mais leves.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram com a minha formação.

## RESUMO

A previsão climática, em particular a análise de padrões de precipitação numa bacia hidrográfica, é fundamental para estudos hidrológicos necessários para o gerenciamento eficiente dos recursos hídricos, principalmente em áreas como o Nordeste brasileiro, região caracterizada por altas variabilidades espacial e temporal da precipitação. A previsão de variáveis atmosféricas, como a precipitação, é comumente realizada através de Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Modelos Climáticos Regionais (MCRs) - modelos numéricos capazes de descrever os principais processos físicos e dinâmicos da atmosfera, do oceano e da superfície terrestre para todo o planeta e para uma área específica, respectivamente. Neste trabalho, investiga-se o desempenho de um modelo global (MPI-ESM-LR) e de um modelo regional (RCA4 aninhado ao MPI-ESM-LR) do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) na simulação da precipitação para o clima atual (1994 a 2005) sobre a bacia hidrográfica do rio Paraíba. As precipitações simuladas pelos modelos foram avaliadas quanto a sazonalidade, a intensidade e a localização. Os resultados mostraram que ambos os modelos apresentam viés na simulação da precipitação e que, de maneira geral, o modelo regional não conseguiu superar expressivamente a qualidade da simulação produzida pelo modelo global, apesar de alguns resultados promissores serem notados na avaliação quantitativa e na avaliação espacial da precipitação simulada.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas, precipitação, bacia hidrográfica do rio Paraíba.

## ABSTRACT

Climate prediction, in particular the analysis of rainfall patterns in a watershed, is essential for hydrological studies required for water resources management, especially in areas as the Brazilian Northeast, region influenced by a high spatial and temporal rainfall variability. Accordingly, the prediction of atmospheric variables, as rainfall, is usually performed through Global Climate Models (MCGs) and Regional Climate Models (MCRs) - numerical models able to describe the main physical and dynamic processes of the atmosphere, ocean and surface for the entire world and for a specific area, respectively. This study investigates the performance of a global model (MPI-ESM-LR) and a regional model (RCA4 nested to MPI-ESM-LR) from the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in the simulation of rainfall for the current climate (1994 to 2005) on the Paraíba watershed. The rainfall simulated by the models were evaluated by seasonality, intensity and location. The results showed that both models present bias in the rainfall simulation and that, in general, the regional model was not able to improve substantially the quality of the simulation performed by the global model, although some promising results were observed in the quantitative and spatial rainfall evaluation.

**Keywords:** climate change, rainfall, Paraíba watershed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de processos que causam variabilidade e mudanças no sistema climático	4
Figura 2 - Representação do fluxo de dados em modelo de previsão numérica de tempo.....	9
Figura 3 - Cascata de incertezas na produção de cenários .....	11
Figura 4 - Metodologia do trabalho .....	14
Figura 5 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba .....	15
Figura 6 - Mesorregiões paraibanas na bacia do rio Paraíba.....	16
Figura 7 - Postos pluviométricos localizados dentro da bacia do rio Paraíba .....	17
Figura 8 - Componentes do modelo MPI-ESM.....	19
Figura 9 - Grade do modelo global e localização dos pontos de grade .....	20
Figura 10 - Grade do modelo regional e localização dos pontos de grade .....	21
Figura 11 - Tabela de contingência 2x2 (a), tabela de contingência 3x3, (b) tabela 3x3 reduzida a uma 2x2 (c) .....	24
Figura 12 - Metodologia de comparação pixel-a-pixel entre campos de chuva por índices de desempenho .....	28
Figura 13 - Chuva média mensal para pontos da grade do modelo global e regional situados a oeste da bacia (a) e (c) e a leste da bacia (b) e (d).....	30
Figura 14 - Chuva média anual para pontos da grade do modelo global e regional situados a oeste da bacia (a) e (c) e a leste da bacia (b) e (d).....	32
Figura 15 - Tabelas de contingência para as faixas 1 e 5 do modelo MPI-ESM-LR (Ponto 8)	33
Figura 16 - Gráficos de POD para pontos da grade do modelo global e regional.....	34
Figura 17 - Gráficos de FAR para pontos da grade do modelo global e regional .....	34
Figura 18 - Gráfico do BIAS para todos os pontos da grade do modelo regional .....	35
Figura 19 - Distribuição de frequência da chuva diária para um ponto do modelo regional ...	36
Figura 20 - Imagens com distribuição espacial dos índices de desempenho obtidos para os modelos global e regional sobre a bacia do rio Paraíba .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caminhos representativos de concentrações .....	7
Tabela 2 - Características dos dados baixados para os modelos global e regional .....	18
Tabela 3 - Valores máximos obtidos para os índices de desempenho nos modelos global e regional .....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
CMIP	<i>Coupled Model Intercomparison Project</i>
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase 5</i>
COLA	<i>Center for Ocean-Land Atmosphere Studies</i>
CORDEX	<i>Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment</i>
CPI	<i>Climate Prediction Index</i>
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
DKRZ	<i>German Climate Computing Centre</i>
ESGF	<i>The Earth System Grid Federation</i>
HIRLAM	<i>High Resolution Limited Area Model</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IQD	Inverso do Quadrado da Distância
MPI	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>
MCGs	Modelos de Circulação Global
MCRs	Modelos Climáticos Regionais
NCEP	<i>National for Environmental Prediction</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
WCRP	<i>World Climate Research Programme</i>

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral .....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1 Mudanças climáticas e impactos sobre o meio ambiente .....	3
3.2 Cenários de mudanças climáticas .....	5
3.3 Modelos atmosféricos .....	8
3.4 Incertezas associadas a simulação .....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	13
4.1 Descrição da área de estudo.....	14
4.2 Dados observados .....	16
4.3 Dados dos modelos atmosféricos.....	17
4.3.1 Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution (MPI-ESM-LR) .....	18
4.3.2 Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4 (RCA4) .....	19
4.4 Extração dos dados e recorte espacial das grades dos modelos.....	20
4.5 Cálculo da precipitação observada por célula de grade.....	21
4.6 Avaliação da precipitação simulada .....	21
4.6.1 Avaliação da sazonalidade da precipitação.....	22
4.6.2 Avaliação quantitativa da precipitação .....	22
4.6.2.1 Análise por totais anuais .....	22
4.6.2.2 Análise por faixa.....	22
4.6.2.2.1 Faixas de precipitação .....	23
4.6.2.2.2 Tabelas de contingência .....	23
4.6.2.2.3 Índices de desempenho.....	25
4.6.3 Avaliação espacial da precipitação .....	26
4.6.3.1 Discretização dos dados.....	26
4.6.3.2 Interpolação dos dados .....	26
4.6.3.3 Comparação entre campos de chuva.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
5.1 Avaliação da sazonalidade da precipitação .....	29
5.2 Avaliação quantitativa da precipitação .....	30

5.2.1	Análise por totais anuais .....	31
5.2.2	Análise por faixa .....	33
5.3	Avaliação espacial da precipitação .....	36
6.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	42
	APÊNDICES .....	51

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as discussões referentes à variabilidade e às mudanças climáticas se intensificaram, devido às inúmeras pesquisas que comprovaram alterações na composição da atmosfera e, conseqüentemente, nas variáveis relacionadas ao clima. Paralelamente, houve uma significativa evolução dos estudos acerca do entendimento dos processos físicos e biológicos que interferem no ambiente, o que propiciou o desenvolvimento das diferentes tecnologias usadas para reproduzir os fenômenos naturais. Em relação a estes fatos, destacam-se os avanços das técnicas inerentes à previsão do clima.

A abordagem mais comum para estimar impactos de mudanças climáticas é a simulação do clima em escalas global e regional. Nesse sentido, as principais ferramentas utilizadas são os Modelos de Circulação Global (MCGs), definidos como modelos numéricos capazes de descrever os principais processos físicos e dinâmicos da atmosfera, do oceano e da superfície terrestre, bem como as interações entre esses componentes e os mecanismos de retroalimentação (Giorgi e Mearns, 1991; Marengo et al., 2012).

Para estudos regionais, no âmbito de uma bacia hidrográfica, por exemplo, não é recomendada a utilização isolada dos MCGs, em virtude da baixa resolução desses modelos (100 a 300 km). Assim, faz-se uma desagregação das variáveis climáticas para a escala da bacia hidrográfica através de um processo de *downscaling*, que pode ser estatístico (com base em funções desta natureza) ou dinâmico. O *downscaling* dinâmico é realizado por meio de Modelos Climáticos Regionais (MCRs), que são modelos numéricos que usam condições de contorno fornecidas pelos MCGs e fornecem resultados com resolução mais refinada (5 a 100 km), propiciando o detalhamento dos processos climáticos a nível local (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2016).

A previsão numérica do tempo é capaz de prever diversas variáveis, como a precipitação, a temperatura, a umidade e a pressão. Nesse contexto, a precipitação é reconhecida como a variável climatológica mais importante na caracterização do clima na região tropical (Moraes *et al.*, 2005), ao mesmo tempo que é um dos elementos que mais sofrem influência das alterações sentidas pelo sistema climático. As mudanças climáticas afetam os regimes de precipitação e, assim sendo, provocam conseqüências diretas sobre os recursos hídricos, aumentando consideravelmente o grau de incerteza no que concerne à sua gestão e segurança.

Dessa forma, o emprego de séries de precipitação simuladas pelos modelos climáticos como parâmetro de entrada em modelos hidrológicos tem sido visto como uma alternativa para minimizar os impactos causados por extremos climáticos, visto que possibilita a antecipação de ações mitigadoras. Nessa perspectiva, o uso de previsões de clima para o gerenciamento de recursos hídricos tem sido utilizado nos últimos anos em especial em locais como o Nordeste brasileiro (NEB) (Galvão *et al.*, 2005; Braga *et al.*, 2007), área caracterizada principalmente pelos longos períodos de seca e uma alta variação espacial na ocorrência de chuvas, que historicamente provoca consequências que afetam economicamente e socialmente a região (Garcia, Moreira e Mattos, 2011). Além das previsões de curto prazo e sazonais, alguns estudos abrangem a escala de tempo das mudanças climáticas (Braga *et al.*, 2012).

Embora a avaliação de desempenho de modelos climáticos na simulação de variáveis atmosféricas em bacias hidrográficas não seja recente, os modelos climáticos e os cenários envolvidos são periodicamente atualizados de acordo com a publicação de relatórios por parte do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*), órgão responsável pela disseminação de informações técnicas e científicas sobre as mudanças climáticas. Assim, na liberação do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC em 2013, foram consideradas todas as adequações e aperfeiçoamentos no que se refere aos modelos atmosféricos apresentados mais recentemente.

Nesse sentido, este trabalho visa analisar o desempenho de um modelo global e um modelo regional do AR5 na simulação da precipitação para o clima atual (1994 a 2005) sobre uma bacia hidrográfica no NEB, de modo a investigar a utilidade desses modelos como ferramentas passíveis de uso para projeções futuras do clima na área de estudo e também como dado de entrada em modelos de gerenciamento de recursos hídricos. Isto é, pretende-se aqui avaliar as incertezas na simulação do clima de forma que se compreendam os efeitos dos modelos sobre os resultados. Dessa forma, este trabalho não tem como intenção fazer projeções de mudanças climáticas, mas sim avaliar como os modelos utilizados nessas projeções interferem em uma simulação do clima atual.

Como estudo de caso, foi escolhida a bacia hidrográfica do rio Paraíba, que corresponde a segunda maior bacia do território paraibano e apresenta uma área de 20.071,83 km<sup>2</sup> (aproximadamente 39% da área do estado). A bacia em questão é de extrema importância, pois nela estão contidas as maiores cidades do estado, como João Pessoa e Campina Grande. Além disso, o rio Paraíba contribui com o abastecimento de água para irrigação e consumo humano, turismo e pesca local.

Este trabalho está inserido no âmbito do projeto BRAMAR - “Estratégias e tecnologias para a escassez de água no nordeste brasileiro”. Está previsto nesse projeto a avaliação de impactos das mudanças climáticas na vazão gerada na bacia hidrográfica do rio Paraíba, logo, neste estudo, a análise da simulação do clima atual por modelos do AR5 é realizada tendo em vista o uso desses dados para modelagem hidrológica.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a precipitação simulada por um modelo climático global e um modelo climático regional do AR5 para o clima atual (1994-2005) sobre a região da bacia hidrográfica do rio Paraíba.

### **2.2 Objetivos específicos**

São objetivos específicos desse trabalho:

- Avaliar a sazonalidade da precipitação simulada pelos modelos global e regional;
- Avaliar quantitativamente a precipitação simulada pelos modelos global e regional;
- Avaliar espacialmente a precipitação simulada pelos modelos global e regional.

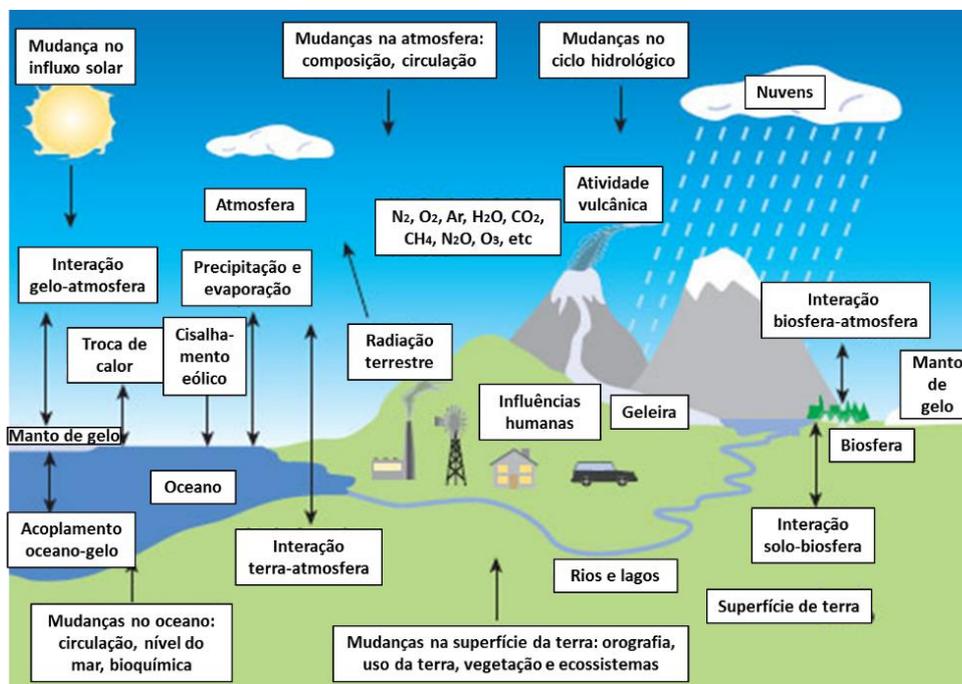
## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Mudanças climáticas e impactos sobre o meio ambiente**

Conforme definição do IPCC (2007), as mudanças climáticas são uma variação estatisticamente significativa no estado médio do clima ou em sua variabilidade, que persiste por um período prolongado de tempo, geralmente de décadas ou mais. Essas mudanças podem ocorrer devido a processos internos e/ou forçantes externas de origem natural ou antropogênica (Figura 1). Nesse sentido, a radiação solar e o vulcanismo são influências externas que ocorrem naturalmente e contribuem para a variabilidade natural do sistema climático, enquanto que outras mudanças externas que se intensificaram com a revolução

industrial, como a composição da atmosfera, são resultantes das atividades humanas (Gondim *et al.*, 2011).

Figura 1 - Esquema de processos que causam variabilidade e mudanças no sistema climático



Fonte: adaptado de Barry e Chorley (2013).

Em seu relatório mais recente, o IPCC afirmou que grande parte do aquecimento observado nos últimos 50 anos foi decorrente do lançamento de muitos gases do efeito estufa (GEEs) de origem antropogênica, proveniente principalmente da queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, o carvão e o gás natural, e dos desmatamentos. Em relação ao que se espera para o futuro, a partir de dados disponíveis até 1990 e da tendência de emissões nos níveis atuais, sem a implementação de políticas específicas para a redução de emissões, a projeção do IPCC é que o aumento da temperatura média na superfície terrestre seja entre 1 e 3,5°C no decorrer dos próximos 100 anos (Jones *et al.*, 1999).

O clima interfere diretamente nos processos naturais, consequentemente, as alterações climáticas são capazes de gerar impactos significativos no meio ambiente. Primavesi, Arzabe e Pedreira (2007) relatam como efeito das mudanças climáticas a perturbação nas correntes marinhas. Tem-se que o aumento do degelo da região polar norte diminuiu a temperatura, a salinidade e a densidade da água do oceano Atlântico, e culminou em implicações no acesso de correntes de águas quentes para o norte da Europa e de águas frias ao Golfo. Adicionalmente, nos oceanos das regiões tropicais, observa-se a ocorrência do aquecimento

mais intenso das águas, que acaba por impulsionar fenômenos naturais como o El Niño-La Niña, que, por sua vez, intensificam as alterações nos climas regionais e no clima global.

IPCC (2013) explica que as mudanças climáticas também influenciam na acidificação dos oceanos. De acordo com estudos recentes (IPCC, 2013; Orr et al., 2005; Le Quéré et al., 2013) o pH oceânico está reduzindo, o que acaba por influenciar na capacidade do mesmo em absorver e reter o carbono. Assim, se a emissão atual de GEEs for mantida, poderá haver uma aceleração nas concentrações de gás carbônico na atmosfera. Além da acidificação, um outro efeito sentido nos oceanos é o aumento do seu volume e, conseqüentemente, a elevação do nível médio do mar, devido ao aumento da temperatura da água e ao maior aporte de águas resultantes do degelo das calotas polares e das geleiras continentais. Pesquisas indicam que o nível do mar está cada vez mais alto, chegando a crescer em média 24 centímetros de 1850 a 2010 (Kopp et al., 2009; Domingues et al., 2008; Gleckler et al., 2012).

Outra consequência relativa às mudanças climáticas diz respeito à alteração nos regimes de precipitação ao redor do mundo. O IPCC (2007) argumenta que a variação dos padrões de precipitação quanto à intensidade e distribuição temporal e espacial pode repercutir em alterações na frequência e intensidade de eventos extremos. Nesse cenário, Huntington (2006) informa que em alguns lugares a ausência de precipitação conduz a um aumento no risco de seca, ao mesmo tempo que em outros, chuvas fortes, e conseqüentemente enchentes, são projetadas para se tornar muito mais freqüentes. Isto posto, a variação nos regimes de precipitação pode levar à intensificação do ciclo da água em algumas regiões, o que pode acarretar em mudanças na disponibilidade de recursos hídricos e portanto, no suprimento de água doce. Nessa linha de entendimento, o IPCC (2007) aponta que os problemas com a disponibilidade de água devem aumentar em regiões semiáridas a baixas latitudes.

No geral, as mudanças climáticas causam consequências desastrosas nos âmbitos ambiental, econômico e social. Os efeitos adversos das mudanças climáticas podem provocar um aumento da vulnerabilidade do planeta em diversas áreas, como perdas na agricultura, expansão de vetores de doenças endêmicas, danos na geração de energia, etc. Nesse contexto, atualmente buscam-se relações que permitam entender os processos de mudanças climáticas a fim de avaliar os impactos e mitigá-los (Adam, 2016).

### **3.2 Cenários de mudanças climáticas**

Desde a década de 1980, a problemática das mudanças climáticas vem despertando um crescente interesse no público e na comunidade científica, o que vem provocando uma significativa evolução dos estudos acerca do entendimento dos processos que interferem no clima do planeta.

Nesse contexto, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) estabeleceram no ano de 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. O IPCC foi criado pelos governos com o objetivo de disseminar informações técnicas e científicas sobre as mudanças climáticas e fornecer suporte a trabalhos de avaliações do clima. Trata-se de um organismo internacional responsável por disponibilizar periodicamente Relatórios de Avaliação (ARs) e elaborar cenários de mudanças climáticas, no intuito de contribuir no planejamento e tomada de decisões.

Os cenários para mudanças climáticas representam as principais forças, processos e os impactos (físicos, ecológicos e econômicos) que influenciam o sistema climático. Para cada premissa de evolução desses elementos, tem-se a previsão de um determinado comportamento que influencia de forma direta na mudança do clima futuro e nas consequências que isso acarretará para o meio ambiente (Escarião, 2009). Os cenários publicados pelo IPCC até então são os *Scientific Assessment* (SA90), *IPCC Scenarios 92* (IS92), *Special Report Emission Scenarios* (SRES) e, mais recentemente, os *Representative Concentration Pathways* (RCPs).

Os primeiros cenários produzidos pelo IPCC, os SA90, projetaram as tendências de desenvolvimento futuro de acordo com as do passado, considerando que não ocorreria qualquer mudança nas políticas. Além disso, esses cenários admitiam que as emissões de gases do efeito estufa eram oriundas da combinação de fontes de energia e eficiência. Eles abordaram quatro caminhos de emissões e tinham como propósito contribuir com o Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC em 1992, o FAR (IPCC, 1990).

Os IS92 foram apresentados no FAR em 1992, sendo apenas utilizados como bases para as projeções climáticas no Segundo Relatório de Avaliação (SAR) publicado em 1996. No SAR, as projeções da mudança climática devido a causas antropogênicas dependem, entre outras coisas, das considerações feitas sobre as futuras emissões de gases de efeito estufa e aerossóis e da proporção de emissões remanescentes na atmosfera. O IS92 reuniu seis cenários alternativos que aperfeiçoavam os cenários do SA90, incorporando pressupostos para as emissões de gases estufa considerando a ausência de políticas climáticas (Leggett, Pepper e Swart, 1992).

Os SRES são cenários socioeconômicos-ambientais de emissão usados como base para as projeções climáticas tanto do Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) do IPCC publicado em 2001 quanto do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC de 2007. Os cenários SRES investigam a incerteza das emissões futuras de gases de efeito estufa e poluentes de curta duração dado variáveis como o aumento populacional e desenvolvimento socioeconômico, e compreendem quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para o futuro (Nakicenovic e Swart, 2000).

No Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC em 2013, a abordagem que antes era baseada em cenários de emissões mudou para cenários das forçantes radiativas. Os chamados *Representative Concentration Pathways* (RCPs) foram desenvolvidos para elaborar as projeções de clima e são definidos como conjuntos consistentes de projeções dos componentes da forçante radiativa (a mudança no equilíbrio entre a radiação de entrada e saída para a atmosfera causada principalmente por alterações na composição atmosférica) que se destinam a servir como entrada para a modelagem climática (IPCC, 2013). Os RCPs são categorizados em quatro cenários (Tabela 1) identificados pela sua forçante radiativa no ano 2100.

Tabela 1 - Caminhos representativos de concentrações

<b>Cenários</b>	<b>Força radioativa total</b>
RCP 2.6	2.6 W/m <sup>2</sup>
RCP 4.5	4.5 W/m <sup>2</sup>
RCP 6.0	6.0 W/m <sup>2</sup>
RCP 8.5	8.5 W/m <sup>2</sup>

Fonte: adaptado de IPCC (2013).

Uma diferença fundamental entre os RCPs e os cenários anteriores é que nesses novos cenários não existem conjuntos fixos de suposições relacionadas ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico ou tecnologia associada. Qualquer caminho (RCP) pode resultar de um amplo espectro de cenários de desenvolvimento socioeconômico e tecnológico. Isto é, diferentes futuros socioeconômicos são possíveis usando mesmo nível de forçamento radiativo (Bjørnæs, 2015).

Bjørnæs (2015) ainda cita como outra característica relevante dos RCPs o fato de que eles fornecem informações a uma grade global com uma resolução de aproximadamente 60 quilômetros, o que permite o fornecimento de informação espacial e temporal sobre a

localização de emissões e também de mudanças no uso da terra. Esta é uma melhoria importante, pois a localização de algumas emissões afeta o aquecimento das regiões.

De modo geral, os cenários de mudanças climáticas evoluíram com o tempo, propiciando o surgimento de outros cenários, mais amplos, e gerados agora com integração de diferentes ferramentas: avaliação integrada de modelos, impactos de emissões, ferramentas de análise de impacto, adaptação e vulnerabilidade, etc. Sendo assim, os cenários RCP têm uma cobertura mais ampla que os cenários anteriores de emissão do IPCC, pois representam cenários com política climática e uso do solo.

### **3.3 Modelos atmosféricos**

Os modelos atmosféricos foram desenvolvidos no início dos anos sessenta com o objetivo de simular o comportamento da atmosfera. Desde então, observa-se um crescente aumento do seu uso para diversas finalidades, como estudos de fenômenos meteorológicos, previsão de tempo, projeções de mudanças climáticas e de cenários de intervenções antrópicas (Paz e Collischonn, 2011).

Nesses modelos, a atmosfera é representada por um sistema complexo de equações matemáticas e leis da física que simulam o seu estado futuro a partir de condições iniciais específicas e de condições de contorno da superfície (terra ou oceano). Alguns processos físicos como fluxos de calor, radiação, processos de precipitação e convecção são representados através de parametrizações, visto que ocorrem em uma escala espacial menor do que a resolução do modelo (Fernandes, 2009).

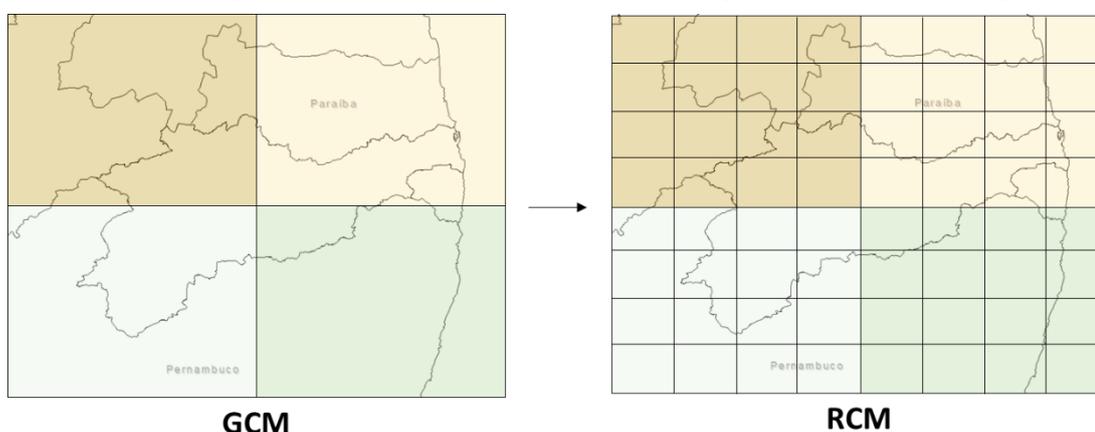
Os Modelos Atmosféricos de Circulação Global simulam o comportamento de todo o planeta e os Modelos Atmosféricos de Circulação Regional simulam o comportamento da atmosfera para uma área delimitada ou específica. Os MCGs possuem resolução espacial na ordem de várias dezenas ou algumas centenas de quilômetros, sendo capazes de representar o comportamento de fenômenos de grande escala (Kalma e Calder, 1994), enquanto que os MCRs possuem resolução na ordem de poucas dezenas de quilômetros sendo capazes de representar comportamento de mesoescala em uma área específica (Pielke, 2002).

Para se fazer previsões de um estado futuro da atmosfera com os MCRs, faz-se uma desagregação das variáveis climáticas que foram simuladas por um MCG em maior escala. Essa transferência de informação da maior escala (MCG) para uma escala menor (MCR) é geralmente realizada através de técnicas de *downscaling* (Figura 2). Existem vários métodos

de *downscaling* disponíveis para converter saídas de MCG em variáveis meteorológicas adequadas para estudos do impacto das mudanças climáticas. Entre as diversas técnicas, duas abordagens principais podem ser identificadas, a dinâmica e a estatística.

O *downscaling* dinâmico é um método de extração de informações de escala local, desenvolvendo modelos de clima regional (MCRs) com resolução de MCG, utilizando dados de MCGs como condições de contorno. Por outro lado, o *downscaling* estatístico começa com a premissa de que o clima regional é o resultado da interação da circulação geral atmosférica e dos oceanos, bem como da topografia regional. Os métodos de *downscaling* estatístico mais usados são a regressão linear e técnicas estocásticas (INPE, 2009).

Figura 2 - Representação do fluxo de dados em modelo de previsão numérica de tempo



Fonte: autoria própria.

Vários estudos têm demonstrado a eficácia dos modelos em simulações das variáveis meteorológicas, como é o caso do estudo de Ji e Vernekar (1997), que utilizaram o modelo ETA do *National for Environmental Prediction* (NCEP), aninhado ao modelo global do *Center for Ocean-Land Atmosphere Studies* (COLA), para simular circulações de monções de verão sobre a região asiática. Outro exemplo é o de Christensen et al. (1998), em simulações climáticas na região da Península Escandinava, utilizando os modelos regional e global OPYC3 e ECHAM4 do *Max Planck Institute for Meteorology* (MPI).

Para a região do Nordeste brasileiro, destacam-se os estudos de Nobre, Moura e Sun (2001) que realizaram uma avaliação de uma previsão climática sazonal com o uso dos modelos RSM97 do NCEP e ECHAM3 do MPI; Silva e Castro (2008) que apresentaram a eficácia da técnica aninhando o modelo regional RSM97, desenvolvido pelo NCEP, com o ECHAM4.5 do MPI, para a simulação da climatologia sazonal de precipitação em algumas

bacias no estado do Ceará; e Alves et al. (2005), que utilizam o modelo regional RSM97 (NCEP) forçado por campos gerados pelo modelo global ECHAM4.5 (MPI) em um conjunto de simulações numéricas (30 anos) de precipitação sobre toda a região Nordeste do Brasil.

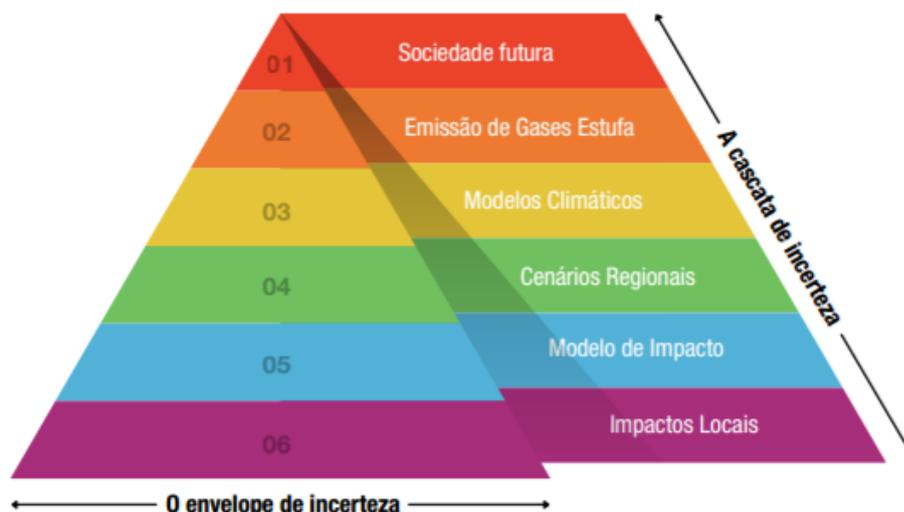
A evolução dos modelos climáticos permitiu que o grau de confiança das projeções climáticas aumentasse ao longo do tempo, porém, ainda assim, deve-se reconhecer que os modelos ainda apresentam limitações e que os resultados dessas simulações estão sujeitos a erros. Os modelos podem produzir previsões de baixa qualidade em alguns eventos, subestimando ou superestimando a sua intensidade (Chou, 1998), logo, é fundamental que se leve em consideração a incerteza nesses resultados.

### **3.4 Incertezas associadas à simulação**

Existem três principais tipos de incertezas inerentes às simulações do clima: as concentrações e emissões dos gases de efeito estufa, a arquitetura do modelo numérico e as parametrizações dos processos que ocorrem em escala inferior à da grade dos modelos (Chou, 1998). Adicionalmente, vários outros fatores contribuem para as incertezas nas simulações, como os processos estocásticos e não-lineares do sistema climático, os aspectos randômicos das forçantes naturais e antrópicas, o desconhecimento da completa condição inicial do sistema climático e a não representação de todos os processos atmosféricos em um modelo numérico. (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2016).

Nesse sentido, existe uma cascata de incertezas, conforme apresentado pela Figura 3, que se desenvolve em todos os estágios de geração dos cenários de impactos e que segundo Langsdale (2008) não pode ser evitada ou eliminada. A amplitude, ou envelope, de incerteza se expande ao passar de um nível a outro, chegando ao último nível (nível local ou regional) que, de tão amplo, pode não ajudar muito no planejamento de longo prazo (ANA, 2016).

Figura 3 - Cascata de incertezas na produção de cenários



Fonte: ANA (2016).

Uma cascata de incerteza provém de diferentes percursos socioeconômicos e demográficos, traduzidos em concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera (GEE). A partir daí os modelos climáticos geram resultados globais e regionais, que então são refletidos em impactos locais sobre os sistemas naturais e humanos. O aumento do número de triângulos em cada nível simboliza o crescente número de permutações e, conseqüentemente, a expansão do envelope de incerteza (Wilby e Dessai, 2010).

Quantificar as incertezas nas projeções de cenários climáticos utilizados para as avaliações de impacto é uma necessidade de estudos e inspirou diversos trabalhos (por exemplo, Jones, 2000; New e Hulme, 2000; Katz, 2001). Atualmente, tem sido muito comum o uso da estatística convencional para avaliar o desempenho de modelos climáticos.

Adeniy (2016), por exemplo, avaliou a performance de 30 MCGs participantes do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) na previsão da precipitação sobre o oeste da África através do cálculo de índices de correlação, bias, erro médio absoluto, raiz quadrada do erro quadrático médio e desvio padrão entre os dados do *Climatic Research Unit* (CRU) e os dados simulados. Os modelos que apresentaram melhores resultados foram selecionados para a simulação dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do AR5.

Outro exemplo é o de Taylor et al. (2001), que analisaram o desempenho de modelos a partir de índices de correlação, erro médio quadrático e da razão de variância e, posteriormente, combinaram essas três estatísticas em um único diagrama, que resultou em visualizações gráficas do desempenho do modelo. Nesse trabalho, avaliou-se a sazonalidade

do ciclo de precipitação anual de 28 MCGs sobre a Índia. Essa metodologia foi utilizada também em outros estudos (Gates et al., 1999; Boer e Lambert, 2001).

Pode-se citar também Min e Hense (2006), que avaliaram a habilidade dos MCGS participantes do AR4 em simular a temperatura média global da superfície do ar para o século XX a partir de abordagem Bayesiana. Nesse tipo de abordagem, o desempenho do modelo é medido em termos de uma razão de verossimilhança em relação a alguma referência (observação). O fator de Bayes ou razão de verossimilhança de cada modelo para o modelo de referência fornece uma habilidade que varia de 0 (muito ruim) a 1 (muito bom).

Uma abordagem amplamente utilizada (Connolley and Bracegirdle, 2007; Franco et al., 2011) em estudos climatológicos para avaliação de modelos é o uso do *Climate Prediction Index* (CPI). Murphy et al. (2004) avaliaram a habilidade de um conjunto de 53 modelos na simulação de 32 variáveis (e.g. precipitação, cobertura de nuvens, pressões de nível superior, etc.) a partir do índice de previsão do clima CPI. Esse índice tem por finalidade inferir a confiabilidade do modelo baseado na soma dos erros quadráticos médios de uma gama de variáveis climáticas.

Dessai, Lu e Hulme. (2005), por outro lado, calcularam funções de densidade de probabilidade utilizando dados sazonais de modelos climáticos para avaliar a incerteza nas projeções. Eles propuseram uma pontuação que leva em consideração o viés do modelo e a variação espacial para comparar modelos e seus respectivos dados de temperatura do ar e precipitação. Mais recentemente, Perkins et al. (2007) usaram dados de precipitação diária e temperaturas máximas e mínimas para classificar o desempenho de 14 modelos ao combinar a função de densidade de probabilidade de dados observados e simulados em 12 regiões na Austrália.

Índices de performance ou índices de desempenho, obtidos a partir do uso de tabelas de contingência, também são métodos comumente aplicados na determinação de incertezas das simulações de modelos. Por exemplo, Fernandes (2009) utilizou tabelas de contingência para determinar diferentes índices de desempenho (taxa de acerto, probabilidade de detecção, falso alarme e bias), com a finalidade de medir a habilidade, precisão e tendência da precipitação simulada para a região do semiárido brasileiro a partir do aninhamento do modelo atmosférico regional BRAMS ao modelo atmosférico global CPTEC.

Em outro estudo, Paz e Collischonn (2011) propuseram um método de comparação entre campos de chuva observados e estimados baseado na comparação pixel a pixel e na

construção de tabelas de contingência para a obtenção de índices de desempenho através de uma análise integrada no espaço e uma análise integrada no tempo.

Identificar e quantificar as fontes de incertezas associadas às previsões dos modelos é uma das etapas mais importantes na avaliação dos impactos das mudanças climáticas, sendo fundamental para tomar melhores decisões no que diz respeito à mitigação e adaptação (Katz et al., 2013). Uma vez que não existe uma abordagem ideal para a avaliação do desempenho dos modelos, as performances vem sendo analisadas a partir de uma variedade de técnicas.

#### **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

A metodologia utilizada neste trabalho está resumida no fluxograma da Figura 4.

A primeira parte da metodologia consistiu em definir o escopo do trabalho e caracterizar a área escolhida para o estudo de caso, que nesse caso é a bacia hidrográfica do rio Paraíba.

Posteriormente, na segunda parte, buscou-se coletar os dados referentes aos pluviômetros (dados observados) e aos pontos de grade dos modelos atmosféricos (dados simulados) situados na região. Em seguida, realizou-se a seleção do período de dados a ser trabalhado, de acordo com o período de dados disponíveis para a precipitação observada e simulada; a extração dos dados simulados e o recorte espacial da grade dos modelos; e, finalmente, o cálculo das precipitações médias observadas pelos postos pluviométricos em cada célula da grade dos modelos global e regional, resultado utilizado na avaliação da sazonalidade e na avaliação quantitativa da precipitação.

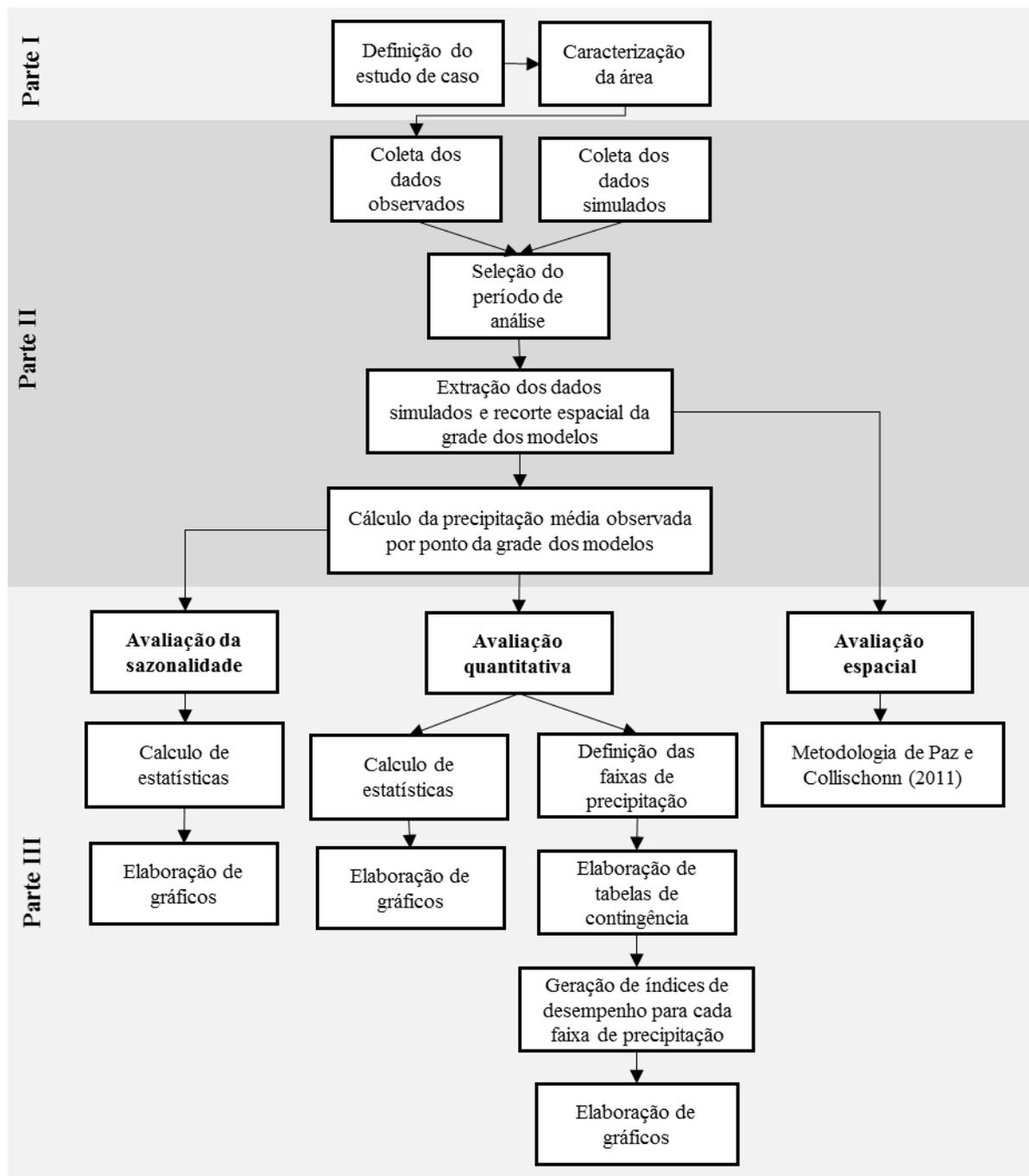
A terceira parte compreendeu a avaliação da sazonalidade, a avaliação quantitativa e avaliação espacial da precipitação simulada pelos modelos.

A avaliação da sazonalidade limitou-se a uma análise mais simples, baseada no cálculo de somatórias e médias e na elaboração de gráficos.

A avaliação quantitativa foi subdividida em 2 análises : (i) a análise por totais anuais, que se deu através do cálculo de estatísticas e geração de gráficos; e (ii) a análise por faixas de precipitação, que foi realizada em 4 etapas, sendo elas: a definição dos limiares de precipitação utilizados para a análise, a elaboração de tabelas de contingência para cada faixa definida, a geração de índices de desempenho e a produção de gráficos com o resultado de cada índice para os pontos de grade dos modelos global e regional.

A avaliação espacial foi feita a partir da metodologia de Paz e Collischonn (2011), descrita como análise integrada no tempo, através do uso de uma rotina computacional. O procedimento completo é explicado no tópico 4.6.3.

Figura 4 - Metodologia do trabalho

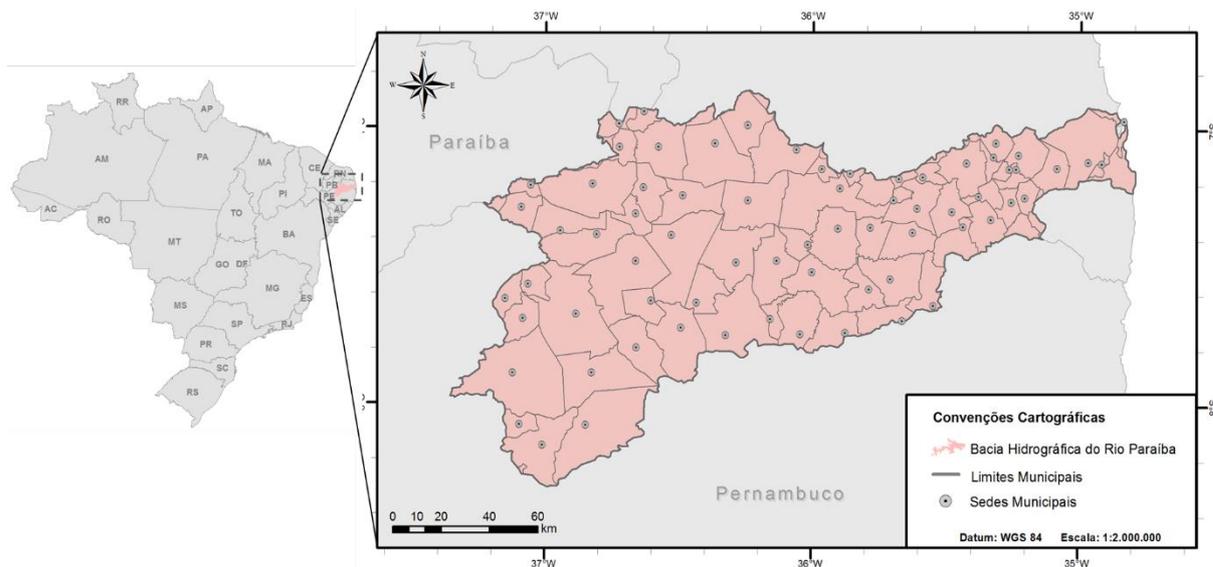


Fonte: autoria própria.

#### 4.1 Descrição da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba (Figura 5) está localizada no estado da Paraíba entre as coordenadas 6°51'46,77" S e 8°18'12,15" S de latitude e 34°47'29,13" O e 37°21'21,08" O de longitude. Sua área de drenagem é de 19456,73 km<sup>2</sup>, com 78 municípios parcialmente ou totalmente inseridos em seu território.

Figura 5 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba



Fonte: autoria própria.

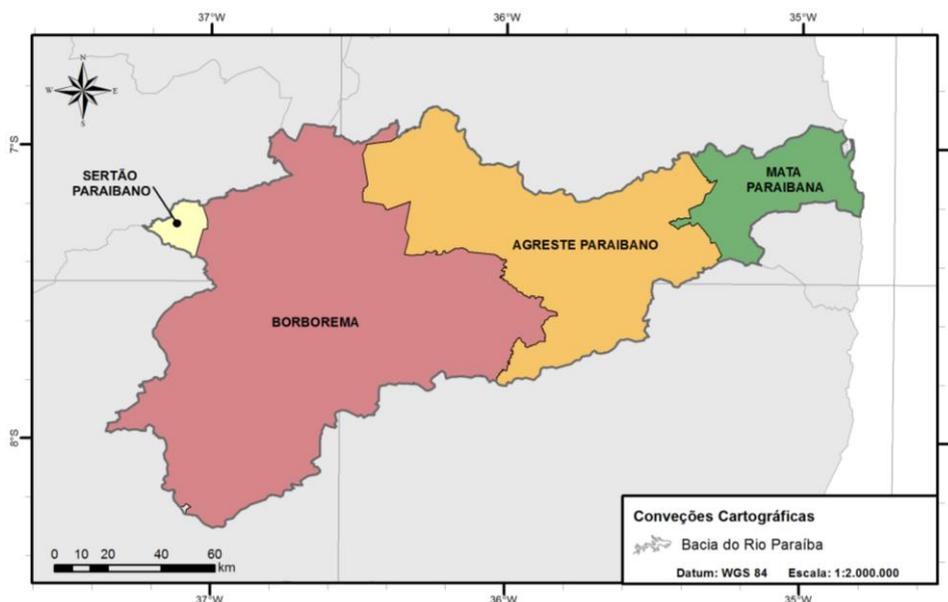
O clima da bacia do rio Paraíba, segundo a classificação de Köppen, é o Tropical (Aw), com estação seca no inverno (Peel *et al.*, 2007). A região apresenta temperaturas elevadas durante o ano todo, com pequena queda nos meses de inverno. As massas de ar que atuam na bacia são: a Massa Equatorial Atlântica, a Massa Tropical Atlântica e a Massa Polar Atlântica. O clima dessa região também sofre a influência de outros fenômenos, tais como: El Niño, que interfere principalmente no bloqueio das frentes frias vindas do sul do país, e Dipolo do Atlântico, caracterizado pelas variações de temperaturas do oceano Atlântico favoráveis às chuvas no Nordeste (Suassuna, 2002).

Em termos geológicos, observa-se na região o predomínio de rochas do embasamento cristalino do Pré-Cambriano. No embasamento cristalino, os solos geralmente são rasos (cerca de 0,60 m), apresentando baixa capacidade de infiltração, alto escoamento superficial e reduzida drenagem natural (Bezerra e Rodriguez, 2000). No que se refere aos domínios hidrogeológicos, os aquíferos dessa área caracterizam-se pela forma descontínua de armazenamento. A água é armazenada em fendas/fraturas na rocha (aquífero fissural) e, em regiões de solos aluviais (aluvião) forma pequenos reservatórios, de qualidade não muito boa, sujeitos à exaustão devido à ação da evaporação e aos constantes bombeamentos realizados.

O uso do solo é caracterizado pela prática da agricultura e da pecuária intensiva, entretanto ainda existe uma grande porção de terra ocupada por vegetação remanescente. Os principais tributários da bacia em questão são o Rio Paraíba, o Rio Taperoá, o Rio Umbuzeiro, o Rio Boa Vista, o Rio Ingá e o Rio Sucuru.

Devido a sua extensão territorial, a bacia do rio Paraíba abrange as 4 mesorregiões do estado da Paraíba, sendo elas: Sertão Paraibano, Borborema, Agreste Paraibano e Mata Paraibana. Essas mesorregiões dividem o estado conforme certas características relativas às formas de organização socioeconômicas e políticas do mesmo (Figura 6).

Figura 6 - Mesorregiões paraibanas na bacia do rio Paraíba



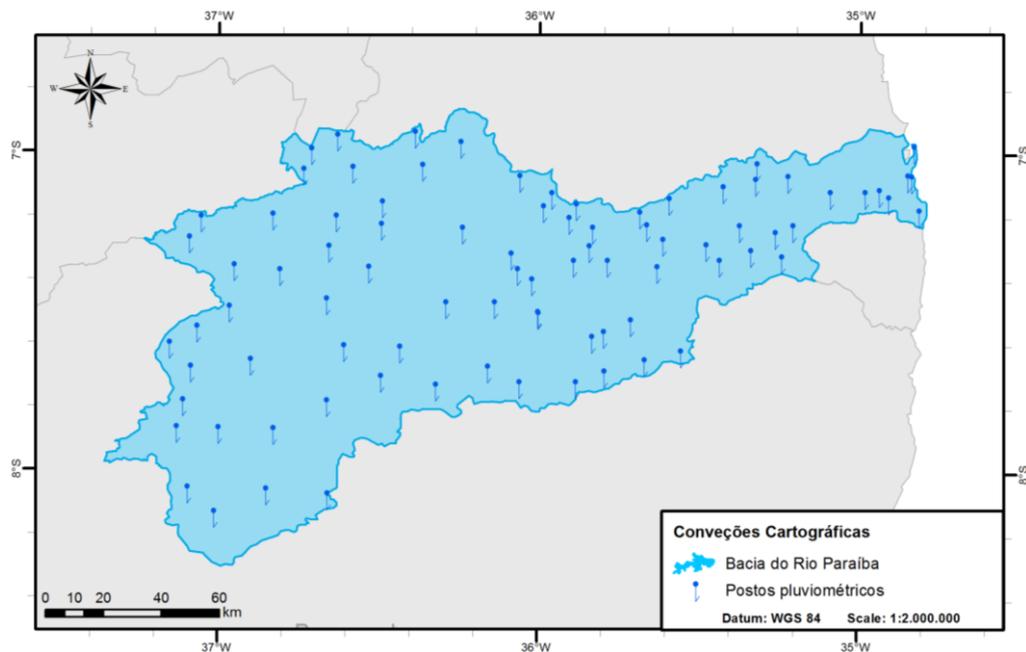
Fonte: autoria própria.

## 4.2 Dados observados

Os dados de precipitação observada foram obtidos da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA), órgão gestor dos recursos hídricos do estado. Foram coletados dados diários de precipitação dos 269 postos pluviométricos inseridos dentro do estado da Paraíba para o período de 1994 a 2005.

Para a avaliação espacial, foram utilizados os dados fornecidos pelos 269 postos pluviométricos. Entretanto, para a avaliação da sazonalidade e a avaliação quantitativa os postos pluviométricos utilizados foram obtidos do universo de 86 postos (Figura 7) que estão restritos à área da bacia. O Anexo A mostra os postos pluviométricos inseridos dentro da área de estudo.

Figura 7 - Postos pluviométricos localizados dentro da bacia do rio Paraíba



Fonte: autoria própria.

### 4.3 Dados dos modelos atmosféricos

No âmbito do Programa de Pesquisa Climática Mundial (WCRP, sigla da denominação em inglês *World Climate Research Programme*), o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*) foi estabelecido como um protocolo padrão para o estudo das saídas de modelos acoplados atmosfera-oceano. O CMIP fornece uma infraestrutura para que os resultados dos modelos globais possam ser comparados diretamente uns com os outros, em que todas as simulações são padronizadas.

Na mesma linha de entendimento, o *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX; Giorgi, Jones e Asrar, 2009) surgiu a partir da necessidade de se uniformizar as avaliações do desempenho de diversos MCRs e coordenar um conjunto de experimentos padronizados que permita a comparação direta de seus resultados. Para que grupos de modelagem participem desse projeto coordenado, a escolha da região de estudo deve ser comum aos domínios do CORDEX.

Diante da ampla variedade de MCGs com projeções muitas vezes divergentes, o modelo utilizado neste trabalho foi selecionado de acordo com: (i) a disponibilidade de dados na plataforma do CMIP5 (Taylor, Stouffer e Meehl, 2011), uma das fases do projeto de simulações de modelos globais de alguns centros de pesquisa que estão presentes no AR5 e (ii) a qualidade do modelo em representar a sazonalidade da precipitação na região, resultado

obtido a partir do estudo de Silveira et al. (2016), que apresenta uma avaliação dos modelos globais do AR5 quanto a representação da sazonalidade da precipitação na bacia do rio São Francisco.

Desse modo, nesse trabalho foi utilizado o modelo global MPI-ESM-LR (Max Planck Institute, Raddatz et al., 2007; Marsland et al., 2003) e o modelo regional RCA4 (Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4, Samuelsson *et al.*, 2011) aninhado ao MPI-ESM-LR. A escolha do modelo regional deu-se visto a disponibilidade de dados no CORDEX e a possibilidade de analisar os efeitos da regionalização do modelo global sobre os resultados da simulação.

Os dados de ambos os modelos encontram-se disponíveis para disseminação no site do *German Climate Computing Centre (DKRZ)* e *The Earth System Grid Federation (ESGF)* (<https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz>), onde se tem acesso às plataformas do CMIP5 e do CORDEX. Mais detalhes sobre os dados baixados podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos dados baixados para os modelos global e regional

Modelo	Resolução (Lat x Long)	Domínio	Simulação	Experimento
MPI-ESM-LR	1,875° × 1,865°	-	r1i1p1	<i>Historical</i> (1850-2005)
MPI-ESML-LR-RCA4	0,44° × 0,44°	SAM44i	r1i1p1	<i>Historical</i> (1951-2005)

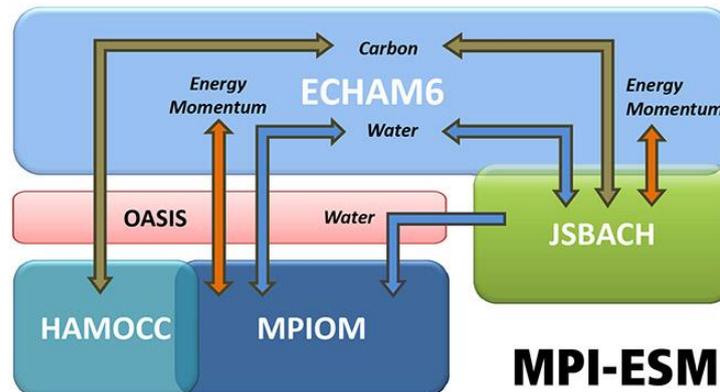
Fonte: autoria própria.

O domínio SAM44i é uma denominação do CORDEX que representa os dados regionalizados na área da América do Sul interpolados para grade com espaçamento regular de 0,5 graus. A simulação r1i1p1 significa que se trata da "rodada" 1, com inicialização 1 e física 1 do modelo.

#### 4.3.1 Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution (MPI-ESM-LR)

O modelo MPI-ESM, desenvolvido pelo Max Planck Institute - MPI para Meteorologia (MPI-M), acopla a atmosfera, o oceano e a superfície terrestre através de trocas de energia, impulso, água e gases traços, como o dióxido de carbono. Este modelo baseia-se no ECHAM6 para os componentes de atmosfera e MPIOM para o oceano, bem como JSBACH para a biosfera terrestre e HAMOCC para a biogeoquímica do oceano (Figura 8).

Figura 8 - Componentes do modelo MPI-ESM



Fonte: Stevens et al. (2013).

Tanto o acoplamento da atmosfera e da terra quanto o do oceano e da biogeoquímica só é possível graças ao programa de acoplamento separado chamado OASIS3 (Valcke, 2013). O procedimento de acoplamento possui diferentes escalas de tempo, dependendo dos processos e componentes. O escoamento superficial do rio é calculado pelo modelo de descarga horizontal de Hagemann e Dümenil-Gates (2003), que interpola a precipitação sobre a terra em uma grade de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , na qual as bacias hidrográficas são definidas.

O MPI-ESM foi desenvolvido para uma variedade de configurações que diferem quanto a resolução do ECHAM6 ou quanto a configuração de órbita de vegetação. Dentro dessas configurações, a versão de baixa resolução (LR) do MPI-ESM utiliza uma resolução horizontal T63/1.9 e 47 níveis de pressão para a atmosfera. Os passos de tempo na atmosfera e no oceano são 600 e 4320 s, respectivamente. Mais detalhes sobre a configuração do modelo MPI-ESM-LR podem ser encontrados em Stevens et al. (2013).

#### 4.3.2 Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4 (RCA4)

RCA é um modelo regional de medição do clima originalmente baseado no modelo de previsão numérica do tempo *High Resolution Limited Area Model* (HIRLAM; Undén et al., 2002). Trata-se de um modelo hidrostático com 24 níveis verticais que se baseia em equações primitivas de ponto de grade.

No desenvolvimento de RCA4, foram utilizados dados fisiográficos globalmente válidos como ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) para a vegetação, Gtopo30 para topografia, profundidade do lago (Kourzeneva, 2010) e *Global Soil Data Task* para densidade de carbono no solo.

Adicionalmente, no modelo de superfície foi implementado um novo modelo de lago (FLake) (Samuelsson et al., 2011) e o albedo e os processos do solo foram melhorados no que se refere à transferência de calor e à umidade do solo. O tratamento da convecção foi ajustado através da troca dos esquemas de convecção profunda e superficial de Kain-Fritsch (Kain e Fritsch, 1990) pelo esquema de Bechtold-KF (Bechtold et al., 2001).

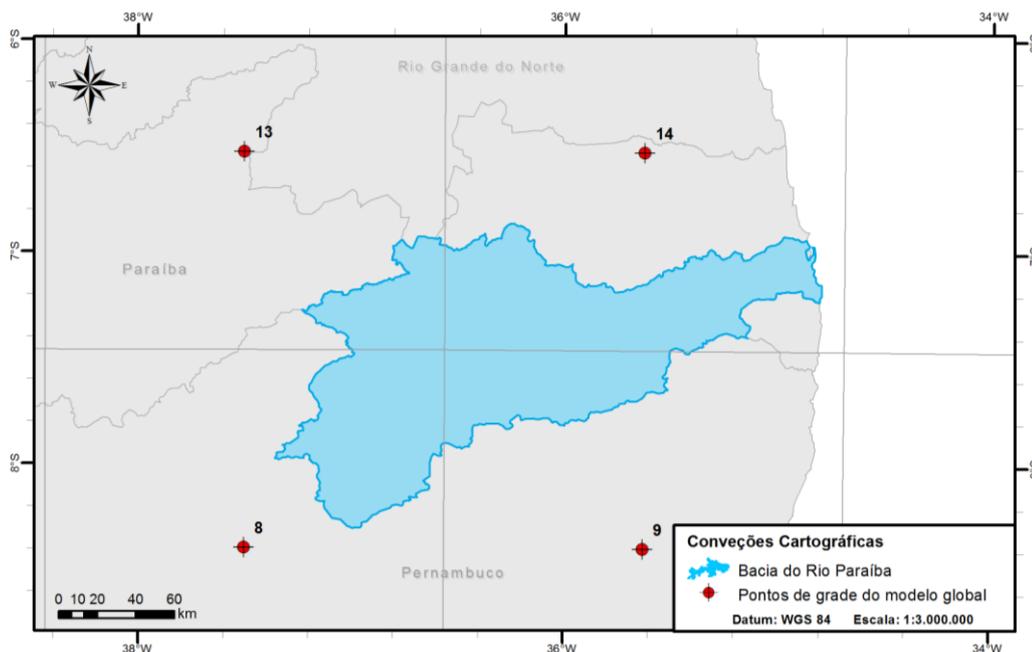
Mais detalhes sobre a configuração do modelo RCA4 podem ser encontrados em Strandberg et al. (2014).

#### 4.4 Extração dos dados e recorte espacial das grades dos modelos

Os dados simulados pelos modelos global e regional foram disponibilizados no formato NetCDF e o processo de extração foi realizado através de um script no software R escrito no âmbito do projeto BRAMAR, que permitiu a conversão desses dados para o formato CSV (*Comma-Separated Values*).

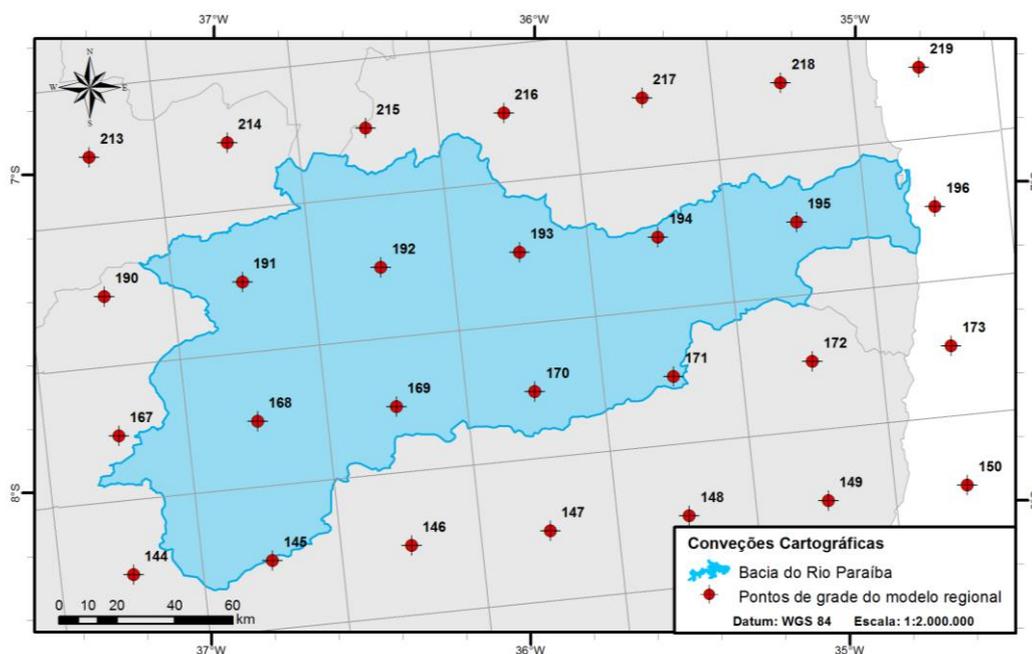
Ainda no script foi realizado um recorte espacial nas grades dos modelos a fim de que fossem selecionados apenas os pontos de grade do modelo global (Figura 9) e regional (Figura 10) localizados na área de interesse, o que proporcionou a diminuição do esforço computacional e, conseqüentemente, uma redução no tempo de processamento dos dados.

Figura 9 - Grade do modelo global e localização dos pontos de grade



Fonte: autoria própria.

Figura 10 - Grade do modelo regional e localização dos pontos de grade



Fonte: autoria própria.

#### 4.5 Cálculo da precipitação observada por célula de grade

Os campos de chuva estimados por modelos numéricos são constituídos por valores médios de precipitação sobre a área de cada elemento da grade.

A fim de minimizar os erros oriundos da variabilidade espacial da chuva não capturada na rede de pluviômetros em virtude da baixa densidade de instrumentos dentro da bacia, tanto na avaliação da sazonalidade quanto na avaliação quantitativa a precipitação simulada não foi comparada pontualmente com um posto pluviométrico próximo, mas sim com a média aritmética da precipitação dos postos pluviométricos localizados dentro da célula de cada ponto de grade dos modelos.

Os Apêndices B e C mostram os postos pluviométricos que compõem a precipitação observada em cada ponto de grade nos modelos global e regional, respectivamente.

#### 4.6 Avaliação da precipitação simulada

Simulações de precipitação realizadas ao longo do tempo podem apresentar erros quanto ao instante de tempo de ocorrência, a intensidade do evento e a localização. Nesse sentido, a fim de avaliar esses aspectos, nesse trabalho foi realizada a avaliação sazonal,

quantitativa e espacial da precipitação simulada pelos modelos global e regional em relação a precipitação observada para o período de tempo entre 1994 e 2005.

#### **4.6.1 Avaliação da sazonalidade da precipitação**

Avaliar a sazonalidade da precipitação simulada consiste em analisar se o modelo consegue simular satisfatoriamente a climatologia observada para a região, isto é, se ele aloca corretamente o período seco e chuvoso ao longo do ano.

Desse modo, de posse dos dados de precipitação observada e simulada pelos modelos global e regional, elaborou-se tabelas para a transformação dos dados diários de todo o período (1994-2005) em dados mensais.

Em seguida, foram calculadas as médias mensais de chuva e em busca de uma melhor apresentação dos dados, foram construídos gráficos com as tendências dos modelos frente à precipitação observada.

#### **4.6.2 Avaliação quantitativa da precipitação**

A avaliação quantitativa visa inferir sobre a capacidade do modelo em estimar a intensidade do evento chuvoso. Neste trabalho, a avaliação quantitativa da precipitação simulada foi realizada através de uma análise por totais anuais e de uma análise por faixas de precipitação, detalhadas a seguir.

##### **4.6.2.1 Análise por totais anuais**

Para essa análise, calculou-se as médias anuais de chuva para pontos dos modelos global e regional e gerou-se gráficos para a representação do comportamento dos totais anuais dos modelos em comparação aos totais anuais observados.

##### **4.6.2.2 Análise por faixa**

A análise da precipitação simulada por faixa de precipitação é relevante visto que segundo Ebert (2007) alguns erros são estratificados por patamar de chuva. Essa análise foi

realizada a partir do cálculo de índices de performance ou índices de desempenho, obtidos a partir de tabelas de contingência.

#### **4.6.2.2.1 Faixas de precipitação**

Antes dos demais procedimentos, tornou-se necessária a delimitação dos limites quantitativos de chuva a serem analisados.

A avaliação das simulações de precipitação foi realizada em 5 faixas de lâmina precipitada, facilitando a identificação de padrões simulados, como o viés do modelo em alocar valores em determinadas faixas. A última faixa possui um intervalo mais extenso, visto a baixa frequência de ocorrência de chuva de altas intensidades na região.

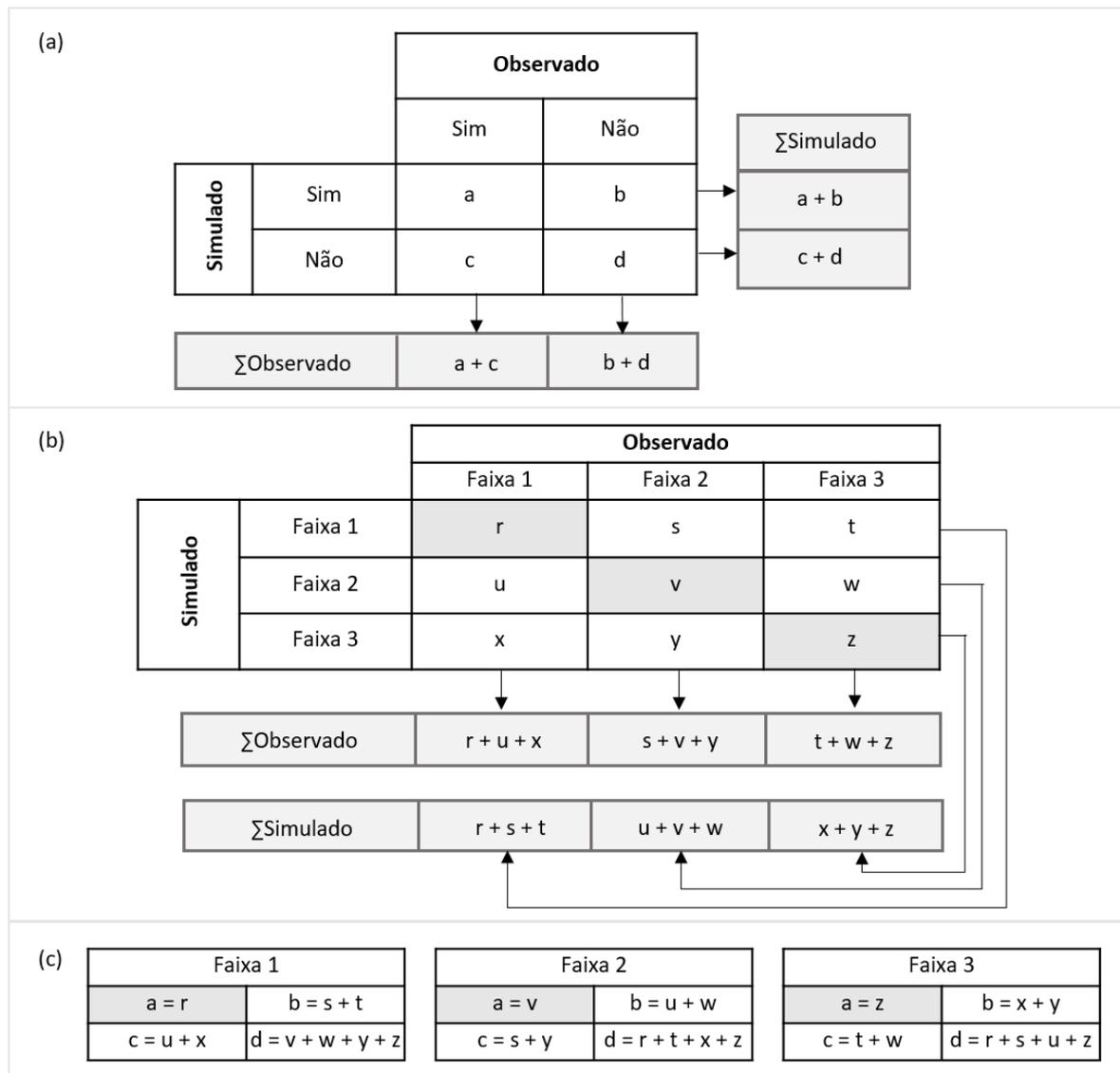
Assim, segundo a descrição dada, as faixas são: faixa 1 (0-5 mm]; faixa 2 (5-10 mm]; faixa 3 (10-15 mm]; faixa 4 (15-20 mm] e faixa 5 (20-200 mm].

#### **4.6.2.2.2 Tabelas de contingência**

A utilização de uma tabela de contingência (Figura 11) para comparação por faixa dos dados observados com os simulados mostra o grau de precisão da precipitação simulada pelos modelos.

Nesse tipo de análise, o critério de erro ou acerto da previsão baseou-se na ocorrência ou não ocorrência do evento chuvoso dentro de um determinado intervalo de valores.

Figura 11 - Tabela de contingência 2x2 (a), tabela de contingência 3x3, (b) tabela 3x3 reduzida a uma 2x2 (c)



Fonte: adaptado de Fernandes (2009).

Cada grandeza (a, b, c, d) da tabela representa o quantitativo quanto à ocorrência (“sim”) e não ocorrência (“não”) do evento chuvoso. Nesse sentido, a grandeza “a” é definida como a quantidade de acertos na estimativa de ocorrência do evento, a quantidade “b” corresponde ao número de vezes em que foi estimada a ocorrência do evento, mas ele não aconteceu; o valor “c” é a quantidade de vezes em que a ocorrência do evento foi observada, mas sua ocorrência não foi estimada; e a categoria “d” é a quantidade de acertos na estimativa de não ocorrência do evento.

Com os valores obtidos por meio da tabela de contingência, podem ser determinados vários índices com diferentes enfoques quanto à avaliação da performance das estimativas realizadas de ocorrência/não ocorrência do evento (Wilks, 2006).

#### 4.6.2.2.3 Índices de desempenho

Os índices de precisão mais comuns são: a Taxa de Acerto (TA), a Probabilidade de Detecção (POD) e o Falso Alarme (FAR) (Pinto et al., 2005, Sansigolo, 1989). Neste estudo, além desses 3 índices também foi utilizado o índice BIAS (B).

Baseados em tabelas de contingência de dimensão 2x2 (Figura 11a) os índices são determinados da seguinte maneira:

A Taxa de Acerto (TA) corresponde ao percentual de acerto das previsões do modelo incluindo as ocorrências ou não do evento (Equação 01). Seus valores variam de 0 a 1 ( $0 \leq TA \leq 1$ ) e seu valor ideal é igual a 1.

$$TA = \frac{a+d}{a+b+c+d} \quad (01)$$

A Probabilidade de Detecção (POD) representa a probabilidade de ocorrência de um evento supostamente previsto pelo modelo (Equação 02). Seus valores variam de 0 a 1 ( $0 \leq POD \leq 1$ ) e em uma previsão perfeita  $POD = 1$ , isto é,  $c = 0$ .

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (02)$$

O Falso Alarme (FAR) é a proporção de eventos simulados em certos intervalos que não se concretizaram (Equação 03). Seus valores variam de 0 a 1 ( $0 \leq FAR \leq 1$ ), sendo o valor ideal igual a 0 ( $b = 0$ ).

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (03)$$

O BIAS (B) é a medida do viés ou tendência da previsão. Ele compara a quantidade de 'sim' previstos pelo modelo com os da observação. Uma previsão sem viés teria  $B = 1$ , indicando que o evento foi previsto na mesma quantidade de vezes que foi observado. Um  $B > 1$  indica que o evento foi previsto com mais frequência que observado e um  $B < 1$  indica que o evento foi previsto com menor frequência que observado. Assim, segundo a Equação 04 tem-se:

$$B = \frac{a+b}{a+c} \quad (04)$$

### **4.6.3 Avaliação espacial da precipitação**

A avaliação espacial foi realizada a partir da metodologia de Paz e Collischonn (2011), descrita como abordagem integrada no tempo, através do uso de uma rotina computacional.

A metodologia em questão analisa a performance espacial das estimativas a partir do cálculo de índices de desempenho obtidos pelo uso de tabelas de contingência em sua forma padrão (Figura 11a). Dessa forma, a análise espacial da precipitação simulada foi executada sob o aspecto da ocorrência em si do evento chuvoso, isto é, houve uma análise do tipo chuva/não chuva para verificar a habilidade dos modelos quanto à distinção da ocorrência ou não da chuva.

Como dado de entrada para a precipitação observada, foram utilizados os 269 postos pluviométricos inseridos dentro do estado da Paraíba. A própria rotina computacional encarregou-se de selecionar apenas os postos pluviométricos de interesse para os pixels situados dentro da área da bacia.

Diante da dificuldade das estimativas numéricas em gerar valores exatamente nulos de chuva, considerou-se um limiar (Plim) não nulo para diferenciar as classes chuva e não chuva. O valor adotado para o Plim foi de 1,0 mm. Assim, para um valor de precipitação superior ao 1,0 mm, considera-se que o evento ocorreu; e para um valor inferior ao 1,0 mm, considera-se que o evento não ocorreu.

#### **4.6.3.1 Discretização dos dados**

Para a comparação dos dados de chuva provenientes dos modelos atmosféricos na forma de grade com dados pontuais obtidos de pluviômetros, foi necessário realizar a discretização espacial dos dados dos modelos e dos postos pluviométricos, de maneira que esses atingissem a mesma resolução espacial.

Assim, realizou-se o *downscaling* dos dados dos modelos atmosféricos e a interpolação dos dados dos postos pluviométricos para a resolução espacial de 5 km x 5 km.

#### **4.6.3.2 Interpolação dos dados**

Para a interligação espacial dos dados provenientes dos modelos e dos postos pluviométricos, fez-se uso da técnica de interpolação no intuito da inserção desses dados para dentro dos limites de discretização dos campos de chuva de interesse.

A interpolação para cada um dos campos de chuva dos modelos atmosféricos e dos postos pluviométricos foi realizada através do método de interpolação conhecido por Inverso do Quadrado da Distância (IQD) (Equação 05).

$$IQD = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \times V_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (05)$$

Sendo “IQD” o valor da chuva estimado na célula de interesse; “ $v_i$ ” é o valor conhecido dos “ $i$ ” pluviômetros ou dos “ $i$ ” campos dos modelos atmosféricos; “ $d_i^2$ ” é a distância dos “ $i$ ” dados pontuais (ou pixel) elevados a potência quadrada e “ $n$ ” é o número total de valores (pluviômetros e pixels) considerados na interpolação para a célula de interesse.

Desse modo, interpolou-se os valores para cada pixel das grades dos modelos global e regional e dos postos pluviométricos e repetiu-se o processo para cada dia entre os anos de 1994 a 2005.

Ao fim dessa etapa, os mapas de campos de chuva produzidos pelos modelos e pelos postos pluviométricos para cada dia do período estudado foram comparados.

#### **4.6.3.3 Comparação entre campos de chuva**

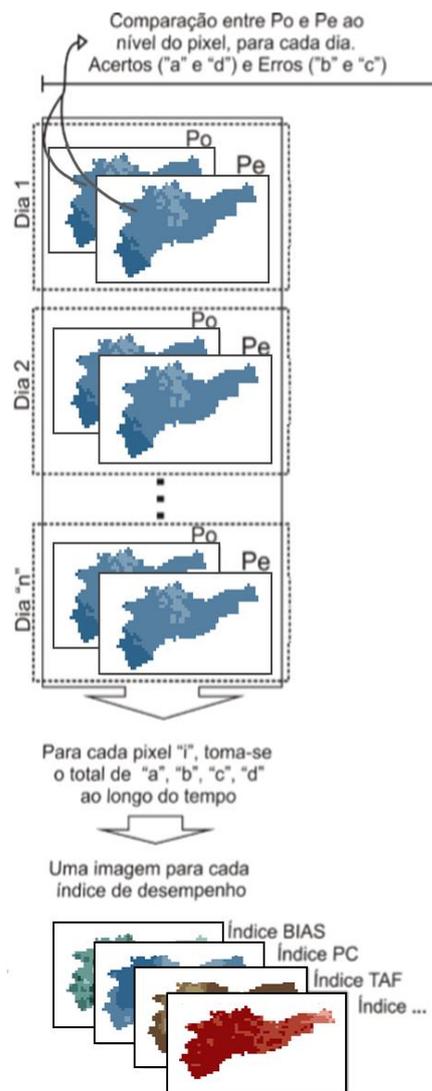
De posse dos mapas de campos de chuva, comparou-se os valores pixel a pixel entre pares de chuva observada e estimada referentes a um mesmo instante de tempo, conforme mostrado na Figura 12.

Em um dado instante de tempo  $t$ , a ocorrência ou não de chuva em um pixel  $i$  é averiguada de acordo com o valor de chuva observado nesse pixel. De maneira análoga, toma-se a chuva estimada em tal pixel para definir se o evento foi estimado ou não para ocorrer nesse pixel. Ao comparar as duas verificações, tem-se que ocorreu um acerto (tipo “a” ou “d”) ou um erro (tipo “b” ou “c”) para o pixel  $i$  no instante  $t$ . Esse procedimento é repetido para todos os pixels da imagem nesse instante de tempo  $t$ , e em seguida para todas as imagens ao longo do tempo.

O número de acertos (tipo “a” ou “d”) e erros (tipo “b” ou “c”) ao longo do tempo para um pixel  $i$  é tomado para construção de uma tabela de contingência específica desse pixel. Dispondo espacialmente os valores dos índices de performance obtidos para cada pixel, são geradas imagens que refletem o padrão espacial de desempenho do estimador.

Os índices utilizados para a avaliação espacial foram a Taxa de Acerto (TA), a Probabilidade de Detecção (POD), o Falso Alarme (FAR) e o BIAS (B), já detalhados anteriormente.

Figura 12 - Metodologia de comparação pixel-a-pixel entre campos de chuva por índices de desempenho



Fonte: adaptado de Paz e Collischonn (2011).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5.1 Avaliação da sazonalidade da precipitação

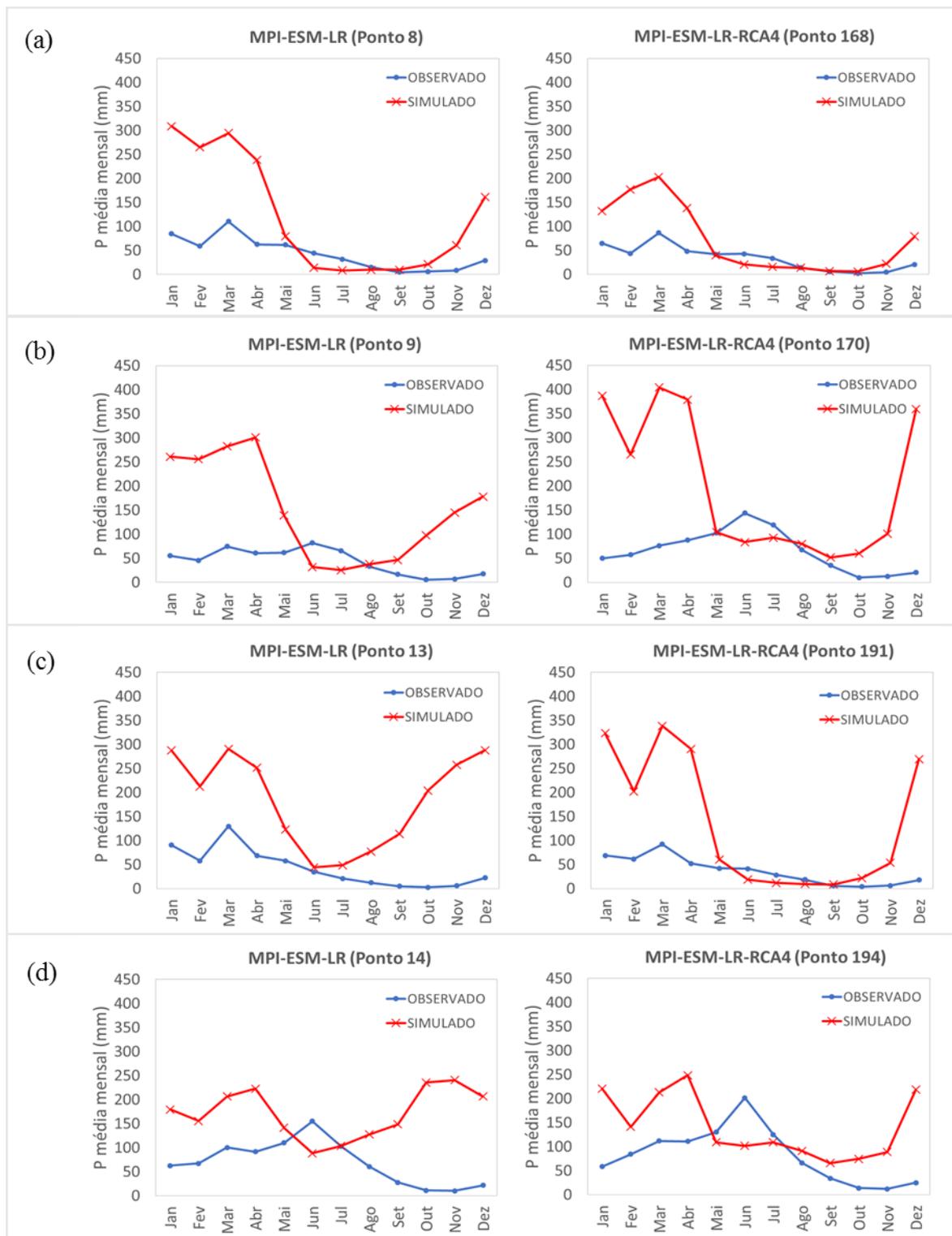
Para a avaliação da sazonalidade da precipitação simulada, foram levados em consideração os 4 pontos do modelo global (Pontos 8, 9, 13 e 14) mostrados na Figura 9, e 4 pontos correspondentes do modelo regional (Pontos 168, 170, 191 e 194) mostrados na Figura 10, de forma que fosse possível avaliar a qualidade da simulação ao longo da extensão da bacia em questão.

A Figura 13 mostra o comportamento médio mensal da precipitação simulada para pontos dos modelos global e regional em relação a precipitação observada. Os pares de pontos (8, 168) e (13, 191) estão situados na porção oeste da bacia, enquanto que os pares de pontos (9, 191) e (14, 194) estão localizados na porção leste.

No que diz respeito aos pontos situados a oeste da bacia, percebe-se que os modelos atmosféricos conseguiram representar adequadamente a sazonalidade da precipitação ao longo do ano, ou seja, tanto o modelo global quanto o regional acertaram o período seco e chuvoso da região. Entretanto, observa-se também a tendência dos modelos em superestimar a precipitação durante o começo e o final do ano e a subestima-la no meio do ano (entre os meses de junho e agosto).

Em relação aos pontos situados na porção leste da bacia, observa-se que os modelos atmosféricos não representaram a sazonalidade da precipitação de maneira satisfatória, isto é, os períodos seco e chuvoso da região não foram alocados de maneira correta. Além disso, assim como nos pontos situados a oeste da bacia, também existe uma tendência de superestimação da chuva na maior parte do ano e de subestimação geralmente durante os meses de junho e julho.

Figura 13 - Chuva média mensal para pontos da grade do modelo global e regional situados a oeste da bacia (a) e (c) e a leste da bacia (b) e (d)



Fonte: autoria própria.

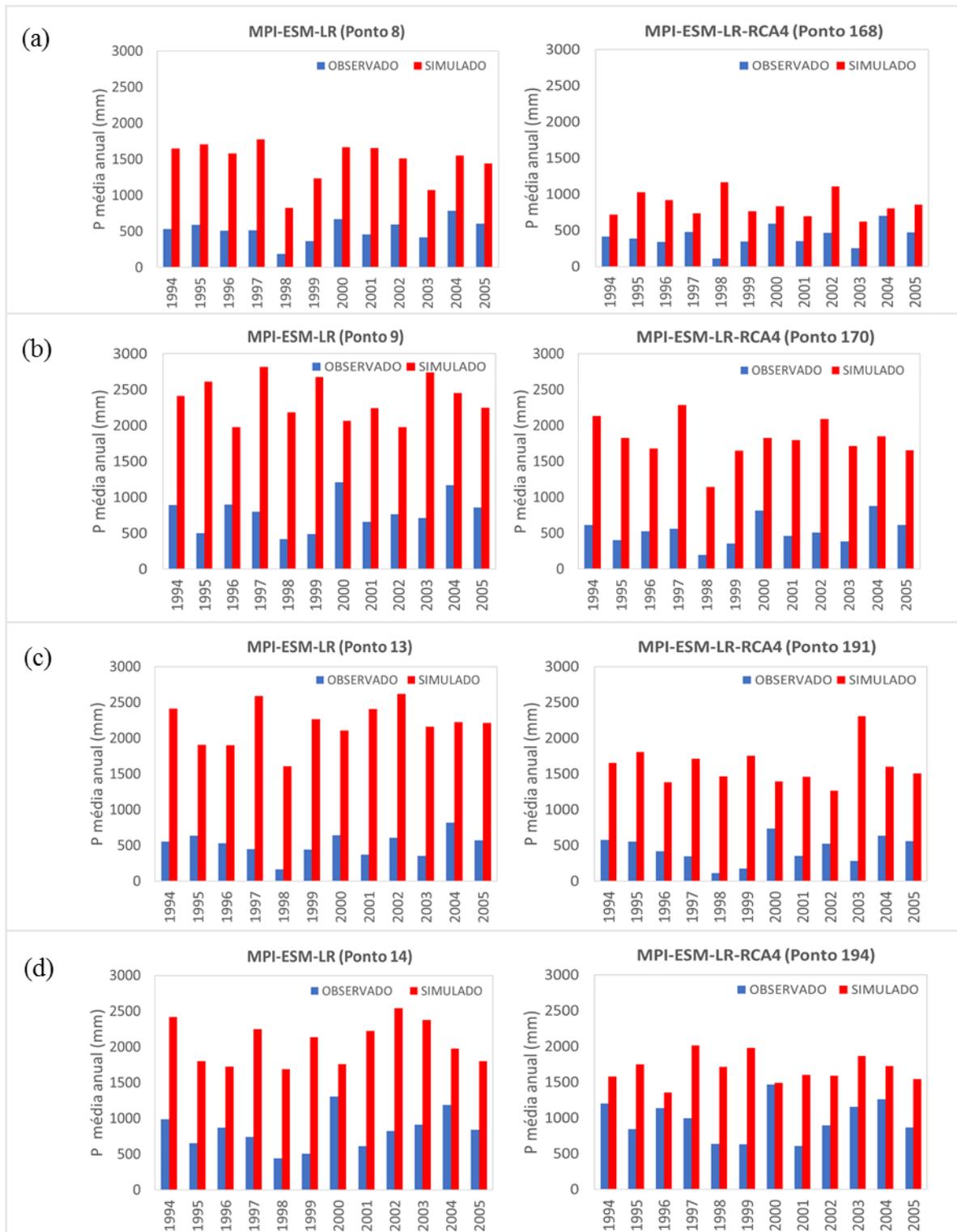
## 5.2 Avaliação quantitativa da precipitação

### **5.2.1 Análise por totais anuais**

Nessa abordagem, foram levados em consideração os mesmos pontos citados anteriormente para os modelos globais e regionais. Isto é, pontos 8, 9, 13 e 14 para o modelo global e pontos 168, 170, 191 e 194 para o modelo regional. A Figura 14 exibe a precipitação média anual para esses pontos.

Como já era esperado, visto o viés do modelo em superestimar a precipitação na maior parte do ano, os valores simulados apresentaram-se bem acima dos valores observados. Todavia, percebe-se que a amplitude do erro para o modelo regional é menor do que para o modelo global. Isto é, apesar de haver a superestimação da precipitação média anual em ambos os modelos, observa-se que o viés no modelo global é mais forte do que no modelo regional, de modo que os erros do modelo global são maiores.

Figura 14 - Chuva média anual para pontos da grade do modelo global e regional situados a oeste da bacia (a) e (c) e a leste da bacia (b) e (d)



Fonte: autoria própria.

## 5.2.2 Análise por faixa

Para a avaliação quantitativa por faixa de precipitação foram selecionados apenas os pontos de grade que possuíam em sua área de influência postos pluviométricos (com série histórica válida) dentro da bacia do Rio Paraíba.

Desse modo, foram selecionados os 4 pontos de grade do modelo global (Pontos 8, 9, 13 e 14) e 12 pontos de grade do modelo regional (Pontos 145, 167, 168, 169, 170, 171, 191, 192, 193, 194, 195 e 215). Os gráficos para todos os pontos analisados podem ser encontrados nos Apêndices C e D.

As simulações de precipitação obtidas quando comparadas com as observações, mostraram que ambos os modelos apresentaram resultados semelhantes no que diz respeito ao desempenho dos índices ao longo das faixas de precipitação. Além disso, tanto o modelo global quanto o modelo regional alocam com menor frequência a precipitação na faixa de (0-5 mm] e com maior frequência as faixas de precipitação de maior patamar.

Para ambos os modelos analisados, a taxa de acerto apresentou melhor desempenho nas faixas de intervalo de precipitação mais elevadas, isto é, nessas faixas encontram-se os maiores valores de acerto de ocorrência (sim ocorreu/sim simulou) e não ocorrência (não ocorreu/não simulou) de chuva em relação ao número total de eventos, como apresentado na Figura 15. A justificativa para esse fato é que a estimativa para a não ocorrência de precipitação nessas faixas torna-se mais fácil e ocorre com mais frequência do que os eventos de chuva.

Figura 15 - Tabelas de contingência para as faixas 1 e 5 do modelo MPI-ESM-LR (Ponto 8)

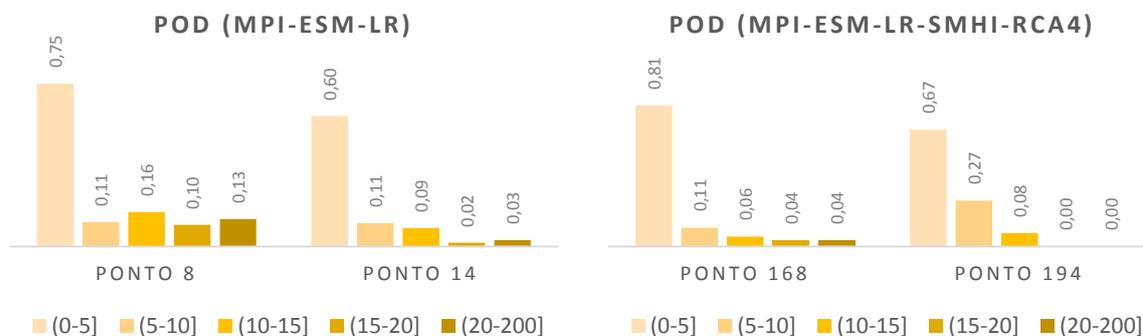
ESTIMADO		Faixa 1 (0-5 mm]		ESTIMADO		Faixa 5 (20-200 mm]	
		SIM	NÃO			SIM	NÃO
SIM		3028	206	SIM		7	220
NÃO		1005	144	NÃO		48	4108
		SIM	NÃO			SIM	NÃO
		OBSERVADO				OBSERVADO	

Fonte: autoria própria.

Ao contrário da TA, a probabilidade de detecção (Figura 16), que expressa a quantidade de acertos dos eventos que realmente ocorreram, apresentou valor máximo na faixa de precipitação de (0-5 mm]. Assim, existe uma maior facilidade em detectar eventos de

chuva nesse intervalo, dado o fato de existirem mais eventos de chuva nessa faixa de precipitação.

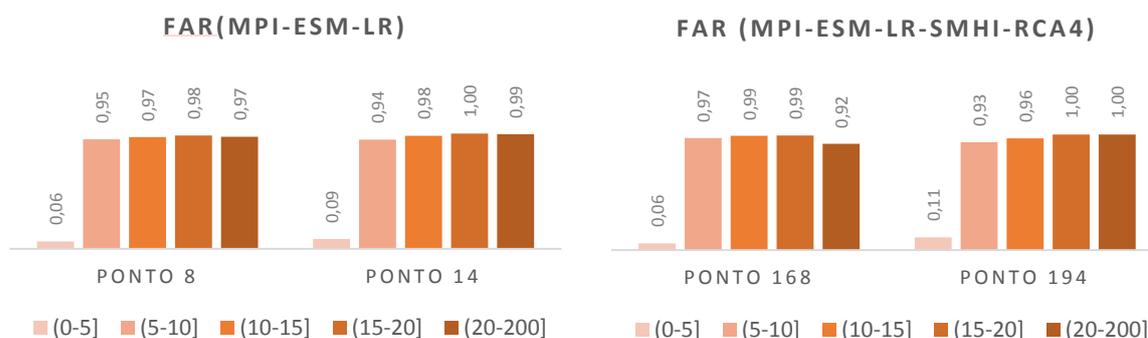
Figura 16 - Gráficos de POD para pontos da grade do modelo global e regional



Fonte: autoria própria.

Esse comportamento da POD é compatível com os resultados do índice falso alarme (Figura 17), que indicam que na faixa de (0-5 mm] a grande maioria da chuva que foi estimada ocorreu de fato. O mesmo não aconteceu para as faixas superiores, onde o número de vezes em que a chuva foi estimada e esta não ocorreu foi bastante elevado.

Figura 17 - Gráficos de FAR para pontos da grade do modelo global e regional

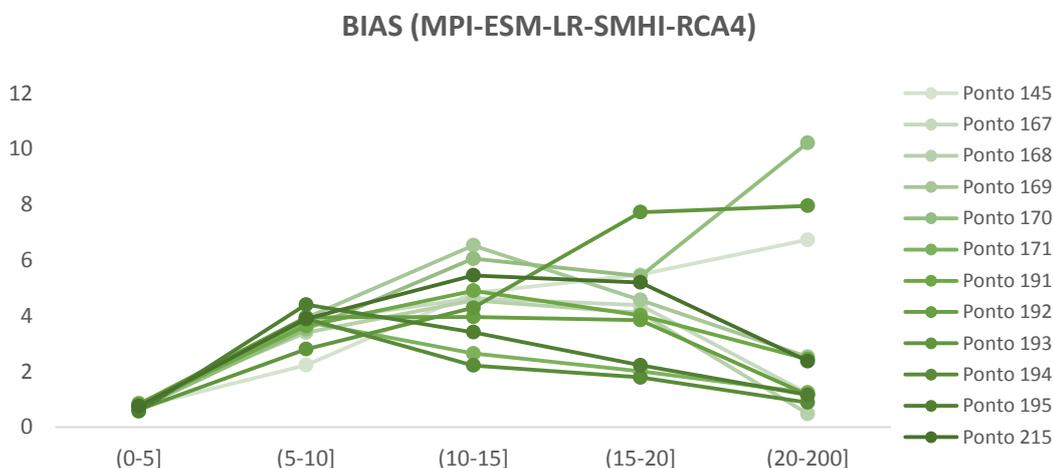


Fonte: autoria própria.

Em relação ao índice BIAS, os resultados indicaram um valor menor que 1 na faixa de (0-5 mm], o que significa que os modelos subestimaram a precipitação nesse intervalo. As demais faixas apresentaram valores maiores do que 1, logo existe um viés de superestimação da precipitação nas faixas maiores. Porém, a exemplo do que mostra a Figura 18, tanto no MPI-ESM-LR quanto no MPI-ESM-LR-SMHI-RCA4 não foi possível verificar um padrão

constante para os pontos de grade de modo que se possa definir a(s) faixa(s) de precipitação que mais sofre(m) com o viés de superestimativa do modelo.

Figura 18 - Gráfico do BIAS para todos os pontos da grade do modelo regional

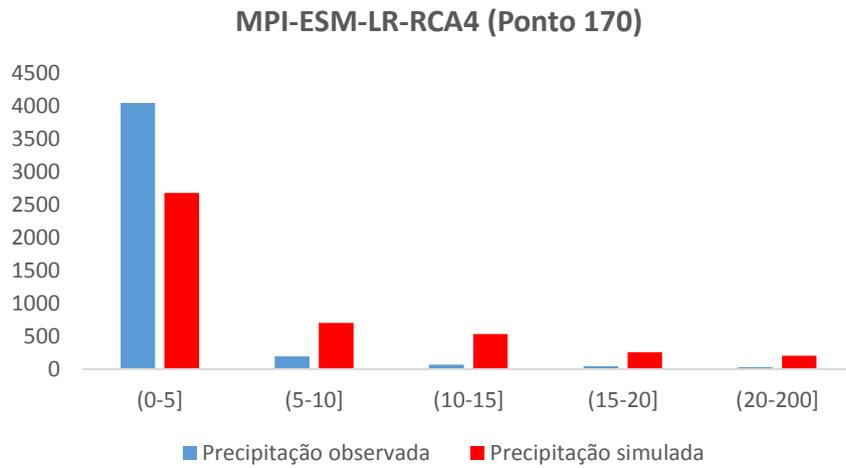


Fonte: autoria própria.

A figura 19 mostra a distribuição de frequência da chuva diária simulada para um ponto da grade do modelo regional (Ponto 170), considerando os mesmos limiares de precipitação utilizados nessa análise. O comportamento do gráfico, que é comum aos pontos da grade dos dois modelos, explica o comportamento dos índices de desempenho para os modelos atmosféricos analisados.

Percebe-se que há a subestimação da precipitação em sua menor faixa (0-5 mm] e a superestimação desta nas faixas posteriores. Porém, embora os modelos tenham superestimado valores alocando precipitação para as faixas 2 a 5 (precipitação superior a 5 mm), os eventos chuvosos simulados para essas faixas não ocorrem no mesmo intervalo de tempo que a chuva observada, sendo assim, ocorre um erro temporal de simulação, que se reflete no desempenho dos índices para essas faixas de chuva.

Figura 19 - Distribuição de frequência da chuva diária para um ponto do modelo regional



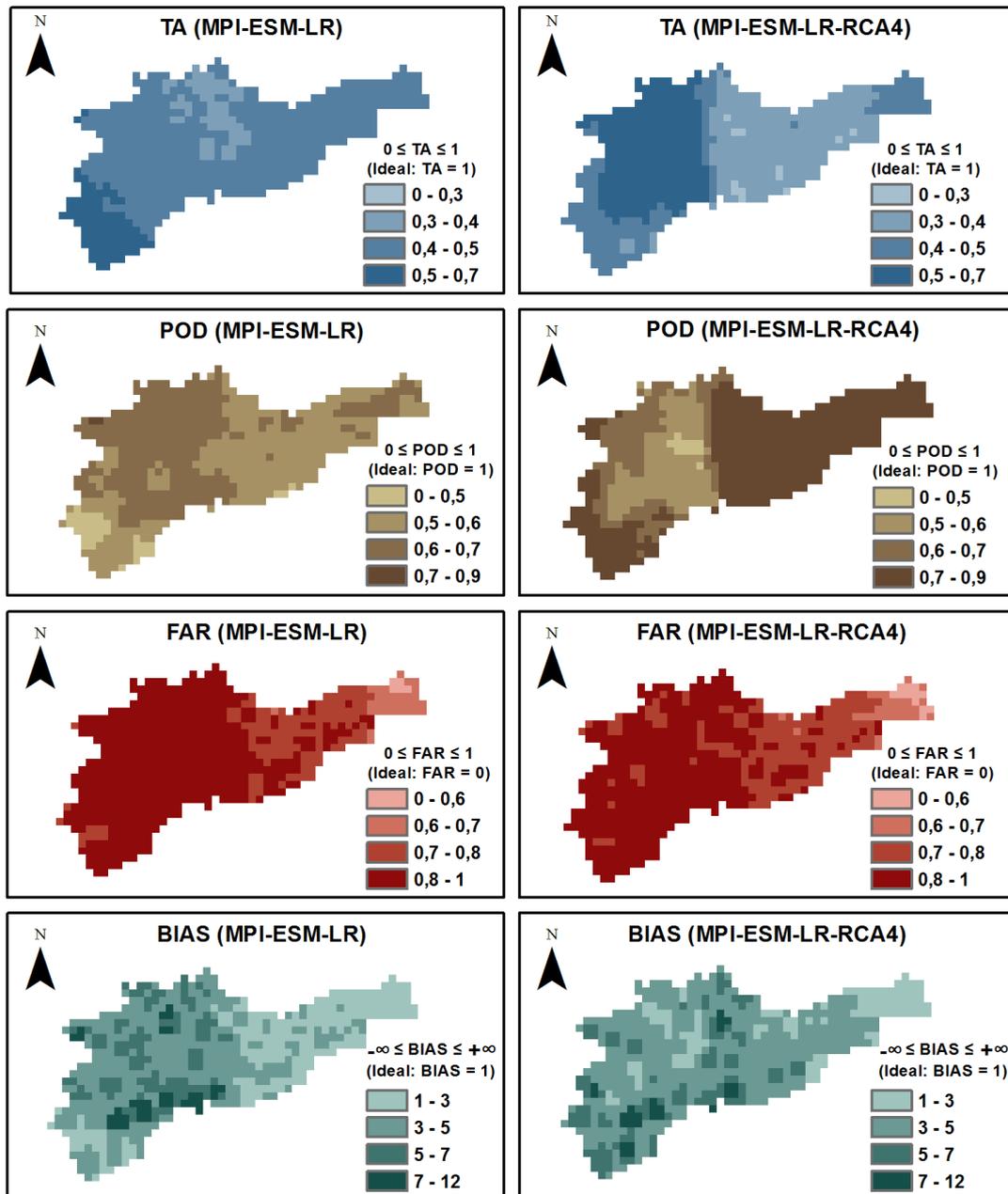
Fonte: autoria própria.

### 5.3 Avaliação espacial da precipitação

Para a avaliação espacial, foram utilizados todos os pontos da grade do modelo global e regional mostrados, respectivamente, nas Figuras 9 e 10.

A Figura 20 apresenta 8 imagens que representam a distribuição espacial de cada índice de desempenho sobre a região da bacia hidrográfica do rio Paraíba na malha de 5 km × 5 km para os modelos analisados.

Figura 20 - Imagens com distribuição espacial dos índices de desempenho obtidos para os modelos global e regional sobre a bacia do rio Paraíba



Fonte: autoria própria.

Para a taxa de acerto, no modelo global os maiores desempenhos de resposta ( $0,5 < TA \leq 0,7$ ) situam-se na região da cabeceira do rio Paraíba e os maiores erros ocorrem na porção central e norte da bacia, onde se concentram valores em torno de 39%. Na maior parte da bacia, o índice apresenta valores no intervalo entre (0,4-0,5).

No que diz respeito ao modelo regional, a TA apresenta um padrão espacial que notadamente manifesta relação com as mesorregiões do estado da Paraíba (Figura 6),

resultado também constatado por Santos (2014) em estudo da análise do desempenho da precipitação estimada pelo satélite TRMM sobre o estado da Paraíba

Os desempenhos mais satisfatórios para o índice ( $0,5 < TA \leq 0,7$ ) compreendem a área onde se localiza a mesorregião da Borborema, a exceção da região próxima à cabeceira do rio Paraíba. No que configura o Agreste Paraibano, os valores da TA diminuem chegando a atingir 30% em alguns pixels. Já na direção do exutório da bacia, dentro da chamada Mata Paraibana, o desempenho da TA volta a aumentar, variando entre 41% e 49%.

Como a região da Borborema é caracterizada por uma baixa frequência na ocorrência de chuva, o alto desempenho obtido para esse índice na região pode ser explicado pelo fato da TA não distinguir os acertos ocasionados pela ocorrência ou não ocorrência do evento chuvoso. Logo, o alto número de acertos na não ocorrência do evento chuvoso contribuiu para elevar o desempenho do índice.

Em relação a probabilidade de detecção, no modelo global o índice apresenta menores desempenhos ( $0 < POD \leq 0,5$ ) na região próxima à cabeceira do rio Paraíba e maiores desempenhos (em torno de 71%) em poucos pixels localizados na parte noroeste da bacia. Em geral, na porção oeste da bacia há o predomínio de valores entre (0,6-0,7] e na porção leste os valores mais frequentes estão na faixa entre (0,5-0,6].

Para o modelo regional, a relação do POD com as mesorregiões do estado também se apresenta verdadeira (Figura 6). Os maiores valores para o índice estão distribuídos na região que representa o Agreste Paraibano e a Mata Paraibana, a se adicionar a região da cabeceira da bacia do Paraíba, que também apresentou valores elevados ( $0,7 < POD \leq 0,9$ ). No que resta da área que se configura a mesorregião da Borborema, a probabilidade de detecção obteve valores entre 47% e 60%.

Na Borborema, o resultado obtido para a probabilidade de detecção é compatível com o comportamento da taxa de acerto no que se refere ao modelo regional. A imagem gerada mostra que nessa área, o índice apresenta baixo desempenho, ou seja, existe uma menor facilidade de detecção de eventos chuvosos. Esse fato é justificado pela baixa frequência na ocorrência de chuva na região.

Além disso, na porção leste da bacia, onde se localizam as mesorregiões do Agreste Paraibano e Mata Paraibana, o desempenho do índice é alto, ou seja, existe uma maior facilidade na detecção da chuva, que se deve a maior ocorrência de chuva nessa região.

Para ambos os modelos, a distribuição espacial do índice FAR apresentou um gradiente direcional no sentido leste-oeste. Os valores para o índice se iniciam em 57%

(modelo global) e 56% (modelo regional) na região que compreende a Mata paraibana e chegam a 93% (modelo global) e 97% (modelo regional) na região da Borborema. Isto é, os desempenhos mais satisfatórios na detecção da chuva estão localizados na Mata Paraibana e os menos satisfatórios situam-se na Borborema.

Os resultados do falso alarme e da probabilidade de detecção se conectam, uma vez que a grande maioria da chuva estimada na parte leste ocorreu de fato e a grande maioria da chuva estimada na porção oeste não ocorreu.

Quanto ao BIAS, nos resultados obtidos para ambos os modelos não houve valores inferiores ou iguais a 1, ou seja, a precipitação foi superestimada para toda a região da bacia. Adicionalmente, a distribuição espacial do índice não apresentou um padrão muito definido, mas, em geral, os menores valores para o índice situam-se na parte leste e os maiores na parte oeste, o que indica que o viés dos modelos é menor na porção leste e maior na porção oeste da bacia.

Nesse sentido, a tendência de um viés menor na parte leste da bacia relaciona-se com menores valores do índice FAR nessa região, enquanto que valores mais altos para o índice FAR foram obtidos na porção oeste, onde o viés dos modelos é maior.

A tabela 3 abaixo apresenta os valores máximos obtidos para os índices de desempenho nos modelos analisados.

Tabela 3 - Valores máximos obtidos para os índices de desempenho nos modelos global e regional

<b>Índices</b>	<b>MPI-ESM-LR</b>	<b>MPI-ESM-LR-RCA4</b>
Taxa de acerto	0,65	0,58
Probabilidade de detecção	0,71	0,85
Falso alarme	0,93	0,92
BIAS	9,78	11,06

Fonte: autoria própria.

## **6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES**

Esse trabalho objetivou avaliar a precipitação simulada pelo modelo global MPI-ESM-LR e pelo modelo regional MPI-ESM-LR-RCA4 na bacia hidrográfica do rio Paraíba para o período de 1994 a 2005.

No que diz respeito a avaliação da sazonalidade, a análise da precipitação média mensal ao longo do ano mostrou que a capacidade dos modelos em simular a sazonalidade da precipitação varia de acordo com a região da bacia. Além disso, verificou-se que os modelos

possuem a tendência de superestimar a precipitação durante o começo e o final do ano e de subestimá-la no meio do ano.

Acerca da avaliação quantitativa, os valores de precipitação média anual simulados por ambos os modelos se apresentaram bem acima dos valores observados. No entanto, percebe-se que a amplitude do erro para o modelo regional é menor do que para o modelo global. Na abordagem por faixa, os resultados obtidos para os índices de performance relativo aos dois modelos apresentaram-se de maneira bastante semelhante. Nesse sentido, foi verificado que tanto no modelo global quanto no modelo regional a precipitação é subestimada em sua menor faixa (0-5 mm] e superestimada nas faixas posteriores.

No que concerne a avaliação espacial, as imagens obtidas para os índices de performance mostraram alguns resultados interessantes. Os índices TA e POD apresentaram resultados bem diferentes para o modelo global e regional. No tocante a esse fato, destaca-se a distribuição espacial obtida para esses índices pelo modelo regional, que claramente apresenta relação com as mesorregiões do estado da Paraíba. Já os índices FAR e BIAS apresentaram resultados semelhantes para os dois modelos. Nesse sentido, o BIAS não apresentou um padrão espacial muito definido, porém, percebe-se que o viés dos modelos é menor na porção leste e maior na porção oeste da bacia.

Em geral, a análise da precipitação simulada pelos modelos climáticos MPI-ESM-LR e MPI-ESM-LR-RCA4 possibilitou a demonstração de que ambos possuem viés na simulação da precipitação. Dessa forma, para que esses modelos sejam considerados ferramentas passíveis de uso para projeções futuras do clima na bacia do rio Paraíba e para dado de entrada em modelos de gerenciamento de recursos hídricos, é necessário que sejam aplicadas correções.

Adicionalmente, de maneira geral, o RCA4 não conseguiu superar expressivamente a qualidade da simulação produzida pelo modelo global. Contudo, alguns resultados promissores foram notados na avaliação quantitativa e na avaliação espacial, como um viés menor na superestimação da precipitação anual, e a relação entre os resultados obtidos pelos índices desempenho (TA e POD) com a localização das mesorregiões do estado da Paraíba.

Para estudos futuros sugere-se:

- Realizar algum procedimento de remoção do viés antes das análises;
- Considerar um limiar não nulo para diferenciar a classes não chuva da primeira faixa (0-5 mm] na avaliação quantitativa;
- Realizar a avaliação da significância estatística;

- Utilizar uma maior variedade de índices de performance tanto na avaliação quantitativa quanto na avaliação espacial, com o objetivo de garantir uma análise das estimativas sob diferentes aspectos;
- Empregar a metodologia de Paz e Collischonn (2011) utilizada na avaliação espacial na abordagem por faixas de precipitação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K. N. **Incertezas e impactos de mudanças climáticas sobre o regime de vazões na bacia hidrográfica do rio Uruguai**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 237 p., 2016.

ADENIYI, M. O. The consequences of the IPCC AR5 RCPs 4.5 and 8.5 climate change scenarios on precipitation in West Africa. **Climatic Change**, v. 139, p. 245-263, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Mudanças climáticas e recursos hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília: GGE, 2016. 87 p.

ALVES, J. M. B.; CAMPOS, J. N. B.; SOUZA FILHO, F. A.; MONCUNNIL, D. F.; SILVA, E. M.; BARBOSA, W. L.; FERREIRA, A. G.; SUN, L.; MOURA, A. D. Uma avaliação preliminar entre simulações climáticas de um modelo global (ECHAM4.5) e um downscaling dinâmico para o setor norte da Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, p. 40-55, 2005.

BARRY, R. G.; CHORLEY, J. R. **Atmosfera, tempo e clima**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 528 p.

BECHTOLD, P., BAZILE, E., GUICHARD, F., MASCART, P. AND RICHARD, E. A mass-flux convection scheme for regional and global models. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 869–886, 2001.

BEZERRA, C. P.; RODRIGUEZ, J.L. **Conhecendo o Cariri**. Recife: Gráfica Liceu, 2000. 56p.

BJØRNÆS, C. **A guide to Representative Concentration Pathways**. Disponível em: <<https://www.sei-international.org/mediamanager/documents/A-guide-to-RCPs.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

BOER, G. J.; LAMBERT, S. J. Second order space-time climate difference statistics. **Climate Dynamics**, v. 17, p. 213–218, 2001.

BRAGA, A. C. F. M., GALVÃO, C. O., SOUZA, E. P., CAVALCANTI, E., FERNANDES, R., OLIVEIRA, K. Integrated atmospheric and hydrologic modelling for short-term and

basin-scale forecasts in a tropical semi-arid context. **International Association of Hydrological Sciences**, v. 313, p. 134-140, 2007.

BRAGA, A. C. F. M.; BRAGA, C. F. C.; GALVÃO, C. O. Climate change and water management in a coastal tropical basin in north-eastern Brazil. In: PLANET UNDER PRESSURE - TOWARDS NEW SOLUTIONS, 2012, **Anais...** Londres, 2012.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Base Científica das Mudanças Climáticas: Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2017. 67 p.

CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; GALVAO, J. A. C.; BUSTAMANTE, J.; COUTINHO, M. M. Avaliação de Erros do Modelo Eta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, X, 1998, **Anais...** Brasília, 1998.

CHRISTENSEN, O. B.; CHRISTENSEN, J. H.; MACHENHAUER, B.; BOTZET, M. Very high-resolution regional climate simulations over Scandinavia - present climate. **Journal of Climate**, v. 11, p. 3204-3229, 1998.

CONNOLLEY, W. M.; BRACEGIRDLE, T. J.: An Antarctic assessment of IPCC AR4 coupled models. **Geophysical Research Letters**, v. 34, L22505, 2004.

DESSAI, S.; LU, X.; HULME, M. Limited sensitivity analysis of regional climate change probabilities for the 21st century. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. 1-17, 2005.

DOMINGUES, C. M.; CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.; GLECKLER, P. J.; WIJFFELS, S. E.; BARKER, M.; DUNN, J. R. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. **Nature**, v. 453, p. 1090-1093, 2008.

EBERT, E. Methods for verifying satellite precipitation estimates. In: LEVIZZANI, V.; BAUER, P., TURK. F. J. **Measuring precipitation from space: EURAINSAT and the future.** Netherlands: Springer, 2007. p. 345–356.

ESCARIÃO, R. D. **Influência do modelo na resposta hidrológica a cenários de mudanças climáticas.** Tese (Doutorado em Engenharia Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, 212 p., 2009.

FERNANDES, R. O. **Avaliação de simulações de precipitação e vazão por um modelo atmosféricos em bacias do semiárido brasileiro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, 125 p., 2009.

FRANCO, B.; FETTWEIS, X.; ERPICUM, M.; NICOLAY, S. Present and future climates of the Greenland ice sheet according to the IPCC AR4 models. **Climate Dynamics**, v. 36, p. 1897-1918, 2011.

GALVÃO, C. O.; NOBRE, P.; BRAGA, A. C. F. M.; OLIVEIRA, K. F.; SILVA, R. M.; SILVA, S.R.; SANTOS, C. A. G.; GOMES FILHO, M. F.; LACERDA, F.; MONCUNILL, D. Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil. **International Association of Hydrological Sciences**, v. 295, p. 211-220, 2005.

GARCIA, J. F. C.; MOREIRA, L. F. F.; MATTOS, A. Caracterização dos Eventos de Precipitação no Semi-árido Nordeste. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX, 2011, **Anais...** Maceió, 2011.

GATES, W. L.; BOYLE, J. S.; COVEY, C.; DEASE, C. G.; DOUTRIAUX, C. M.; DRACH, R. S.; FIORINO, M.; GLECKLER, P. J.; HNILO, J. J.; MARLAIS, S. M.; PHILLIPS, T. J.; POTTER, G. L.; SANTER, B. D.; SPERBER, K. R.; TAYLOR, K. E.; WILLIAMS, D. N. An overview of the results of the atmospheric model intercomparison project (AMIP). **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 80, p. 29- 55, 1999.

GIORGI, F.; MEARN, L. O. Approaches to the simulation of regional climate change: a review. **Reviews of Geophysics**. v. 29, p. 191-216, 1991.

GIORGI, F.; JONES, C.; ASRAR, G R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. **World Meteorological Organization Bulletin**, v. 58, p. 175–183, 2009.

GLECKLER, P., SANTER, B., DOMINGUES, C., PIERCE, D., BARNETT, T., CHURCH, J., TAYLOR, K., ACHUTARAO, K., BOYER, T., ISHII, M., CALDWELL, P. Human-induced global ocean warming on multidecadal timescales. **Natural Climate Change**, v. 2, p. 524–529, 2012.

GONDIM, R. S.; MAIA, A. H. N.; EVANGELISTA, S. R. M.; CASTRO, M. A. H.; FRANK JÚNIOR, S. C. F. **Metodologia para avaliação de impactos de mudanças climáticas na**

**demanda de água para a agricultura irrigada em nível de bacia hidrográfica.** Fortaleza: Embrapa Agroindustrial Tropical, 2011. 39 p.

HAGEMANN, S.; DUMENIL-GATES, L. Improving a subgrid runoff parameterization scheme for climate models by the use of high resolution data derived from satellite observations. **Climate Dynamics**, v. 21, p. 349-359, 2003.

HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. **Journal of Hydrology**, v. 319, p. 83-5, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Emissions scenarios from the response strategies working group of the intergovernmental panel on climate change.** In Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Prepared for IPCC by Working Group I. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1990. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg\\_I/ipcc\\_far\\_wg\\_I\\_app\\_01.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/far/wg_I/ipcc_far_wg_I_app_01.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Synthesis Report.** Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.). Geneva, Switzerland, p. 104, 2007. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_full_report.pdf)>. Acesso em 22 jan. 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press (eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, United States of America. p. 1585, 2013. Disponível em: <<http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5ALLFINAL.pdf>> Acesso em: 28 jan. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Boletim do grupo de pesquisa em mudanças climáticas.** São Paulo: GPMC, 2009, 2 p.

JI, Y.; VERNEKAR, A. D. Simulation of the asian summer monsoons of 1987 and 1988 with a regional model nested in a global GCM. **Journal of Climate**, v.10, p. 1965-1979, 1997.

JONES, P. D.; NEW, M.; PARKER, D.; MARTIN, S.; RIGOR, I. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. **Reviews of Geophysics**, v. 37, p. 173-199, 1999.

JONES, R. N. Managing uncertainty in climate change projections: Issues for impact assessment. **Climate Change**, v. 45, p. 403-419, 2000.

KAIN, J.S.; FRITSCH, J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, p. 2784–2802, 1990.

KALMA, J. D.; CALDER, I. R. **Land surface processes in large-scale hydrology**. 1 ed. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1994. 58 p.

KATZ, R. W. Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies. **Climate Research**, v. 20, p. 167-185, 2001.

KATZ, R. W.; CRAIGMILE, P. F.; GUTTORP, P.; HARAN, M.; SANSÓ, B.; STEI, M. L. Uncertainty analysis in climate change assessments. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 769-771, 2013.

KOPP, R. E.; SIMONS, F. J.; MITROVICA, J. X.; MALOOF, A. C.; OPPENHEIMER, M. Probabilistic assessment of sea level during the last inter-glacial stage. **Nature**, v. 462, p. 863-867, 2009.

KOURZENEVA, E.V.: External data for lake parameterization in numerical weather prediction and climate modelling. **Boreal Environment Research**, v. 15, p. 165–177, 2010.

LANGSDALE, S., Communication of climate change uncertainty to stakeholders using the scenario approach. **Journal of Contemporary Water Research and Education**, v.140, p.24-29, 2008.

LEGGETT, J.; PEPPER, W.J.; SWART, R.J. **Emissions Scenarios for IPCC**: an update in Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment eds Houghton, J.T., B.A. Callander & S.K. Varney. Cambridge University Press. Cambridge, UK. p. 69–95. 1992. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC\\_Suppl\\_Report\\_1992\\_wg\\_I/ipcc\\_wg\\_I\\_1992\\_suppl\\_report\\_section\\_a3.pdf](http://www.ipcc.ch/ipccreports/1992%20IPCC%20Supplement/IPCC_Suppl_Report_1992_wg_I/ipcc_wg_I_1992_suppl_report_section_a3.pdf)>. Acesso em 20 mar. 2017.

LE QUÉRÉ, C.; ANDRES, R. J.; BODEN, T.; CONWAY, T.; HOUGHTON, R. A.; HOUSE, J. I.; MARLAND, G.; PETERS, G. P.; VAN DER WERF, G. R.; AHLSTROM, A.; ANDREW, R. M.; BOPP, L.; CANADELL, J.G.; CIAIS, P.; DONEY, S. C.; ENRIGHT, C.; FRIEDLINGSTEIN, C.; HUNTINGFORD, A. K.; JAIN, A. K.; JOURDAIN, C.; KATO, E.; KEELING, R. F.; GOLDEWIJK, K. K.; LEVIS, S.; LEVY, P.; LOMAS, M.; POULTER, B.; RAUPACH, M. R.; SCHWINGER, J.; SITCH, S.; STOCKER, B. D.; VIOVY, N.; ZAEHLE, S.; ZENG, N. The global carbon budget 1959-2011. **Earth System Science Data**, v. 5, p. 165-185, 2013.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, W. R. S.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F.; TAVARES, T. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 1829-1848, 2012.

MARSLAND, S.; HAAK, H.; JUNGCLAUS, J.; LATIF, M.; ROESKE, F. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. **Ocean Modelling**, v. 5, p. 91-127, 2003.

MASSON, V.; CHAMPEAUX, J.-L.; CHAUVIN, F.; MERIGUET, C.; LACAZE, R. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. **Journal of Climate**, v. 16, p. 1261-1282, 2003.

MIN, S.-K.; HENSE, A. A Bayesian approach to climate model evaluation and multi-model averaging with an application to global mean surface temperatures from IPCC AR4 coupled climate models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, L08708, 2006.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazônica**, v. 35, p. 207- 214, 2005.

MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H.; BARNETT, D. N.; JONES G. S.; WEBB, M. J.; COLLINS, M.; STAINFORTH, D. A. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. **Nature**, v. 430, p. 768-772, 2004.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. **Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge University Press. Cambridge, UK. p. 570. 2000. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

NEW, M.; HULME, M. Representing uncertainty in climate change scenarios: A Monte-Carlo approach. **Integrated Assessment**, v. 1, p. 203-214, 2000.

NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP'S regional spectral model at IRI. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 82, p.2787-279, 2001.

ORR, J. C.; FABRY, V. J.; AUMONT, O.; BOPP, L.; DONEY, S. C.; FEELY, R. A.; GNANADESIKAN, A.; GRUBER, N.; ISHIDA, A.; JOSS, F.; KEY, R. M.; LINDSAY, K.; MAIER-REIMER, E.; MATEAR, R.; MONFRAY, P.; MOUCHET, A.; NAJJAR, R. G.; PLATTNER, G.; RODGERS, K. B.; SABINE, C. L.; SARMIENTO, J. L.; SCHLITZER, R.; SLATER, R. D.; TOTTERDELL, I. J.; WEIRIG, M.; YAMANAKA, Y.; YOOL, A. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. **Nature**, v. 437, p. 681-686, 2005.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. Avaliação de estimativas de campos de precipitação para modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 109-120, 2011.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen Geiger climate classification. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PERKINS, S. E.; PITMAN, A. J.; HOLBROOK, N. J.; MCANENEY, J. Evaluation of the AR4 climate models simulated daily maximum temperature, minimum temperature and precipitation over Australia using probability density functions. **Journal of Climate**, v. 20, p. 4356-4376, 2007.

PIELKE, R. A. **Mesoscale meteorological modeling**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 2002. 676 p.

PINTO, D. E. G.; NUNES, H. M. T., DE PALULO, R. G. F. CARVALHO, D. D. Verificação das previsões de precipitação realizadas com o modelo MM5 para o sistema de alerta de

cheias da bacia do Rio Doce. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI, 2005, **Anais...** João Pessoa, 2005.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. S. **Aquecimento global e mudanças climáticas: uma visão integrada tropical.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 213 p.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 7183-7192, 2001.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 93, p. 485-498, 2011.

RADDATZ, T.; REICK, C.; KNORR, W.; KATTGE, J. Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty-first century? **Climate Dynamics**, v. 29, p. 565-574, 2007.

RÄISÄNEN, J. Objective comparison of patterns of CO<sub>2</sub> induced climate change in coupled GCM experiments. **Climate Dynamics**, v.13, p.197-211, 1997.

SAMUELSSON, P.; JONES, C. G.; WILLÉN, U.; ULLERSTIG, A.; GOLLVIK, S.; HANSOSON, U.; JANSSON, E.; KJELLSTRO C.; NIKULIN, G.; WYSER, K. The Rossby Centre regional climate model RCA3: model description and performance. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 63, p. 4-23, 2011.

SANSIGOLO, A. S. Variabilidade Interanual da estação chuvosa em São Paulo. **Climanálise**, vol. 4, p.40- 43, 1989.

SANTOS, A. S. P. **Análise de desempenho dos campos de chuva estimados pelo satélite TRMM na Paraíba para fins de modelagem hidrológica distribuída.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, 120 p., 2014.

SILVA, E. M.; CASTRO, M. A. H. Análise do desempenho de um sistema de previsão climática sobre as regiões das bacias hidrográficas do Estado do Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XV, 2008, **Anais...** São Paulo, 2008.

SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; OLIVEIRA, J. L.; COSTA, A. C.; NOBREGA, M. T.; SOUZA, S. A.; SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na

bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, p. 416-428, 2016.

STEVENS, B.; GIORGETTA, M.; ESCH, M.; MAURITSEN, T.; CRUEGER, T.; RAST, S.; SALZMANN, M.; SCHMIDT, H.; BADER, J.; BLOCK, K.; BROKOPF, R.; FAST, I.; KINNE, S.; KORNBLUEH, L.; LOHMANN, U.; PINCUS, R.; REICHLER, T.; ROECKNER, E. Stevens, B., Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, p. 146–172, 2013.

STRANDBERG, G.; BARRING, L.; HANSSON, U.; JANSSON, C.; JONES, C.; KJELLSTROM, E.; KOLAX, M.; KUPIAINEN, M.; NIKULIN, G.; SAMUELSSON, P.; ULLERSTIG, A.; WANG S. CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. **Report Meteorology And Climatology**, v. 116, p.1-45, 2014.

SUASSUNA, J. **Semi-árido**: proposta de convivência com a seca. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002.

UNDÉN, P.; RONTU, L.; JÄRVINEN, H.; LYNCH, P.; CALVO, J.; CATS, G.; CUXART, J.; EEROLA, K.; FORTELIUS, K.; GARCIA-MOYA, J. A.; JONES, C.; LENDERLINK, G.; MCDONALD, A.; MCGRATH, R.; NAVASCUES, B.; NIELSEN, N. W.; ØDEGAARD, V.; RODRIGUES, E.; RUMMUKAINEN, M.; RÕÕM, R.; SATTLER, K.; SASS, B. H.; SAVIJÄRVI, H.; SCHREUER, B. W.; SIGG, R.; THE, H.; TIJM, A. **HIRLAM-5 Scientific Documentation**. Norrköping: HIRLAM Report, SMHI, , 2002. 144 p.

VALCKE, S. The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 373-388, 2013.

WILBY, R. L.; DESSAI, S. Robust Adaptation to Climate Change. **Weather**, v. 65, p. 180-185, 2010.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. San Diego: Academic Press, 2006. 630 p.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Postos pluviométricos inseridos dentro da bacia hidrográfica do rio Paraíba

Número	Posto Pluviométrico	Latitude	Longitude
1	Alcantil	-7.7422	-36.0572
2	Amparo	-7.5697	-37.0639
3	Aroeiras	-7.5458	-35.7111
4	Assunção	-7.0764	-36.7322
5	Barra de Santana	-7.5217	-36.0008
6	Barra de Santana/Bodocongó	-7.5236	-35.9986
7	Barra de São Miguel	-7.7517	-36.3181
8	Bayeux	-7.1336	-34.9383
9	Boa Vista	-7.2575	-36.2375
10	Boqueirão/Açude Boqueirão	-7.4908	-36.1358
11	Cabaceiras	-7.4922	-36.2869
12	Cabedelo/CAGEPA	-6.9714	-34.8325
13	Cabedelo/EMATER	-7.0878	-34.85
14	Cacimbas	-7.2114	-37.0583
15	Caldas Brandão	-7.1025	-35.3244
16	Camalaú	-7.89	-36.8256
17	Campina Grande/EMBRAPA	-7.2256	-35.9042
18	Campina Grande/Santa Terezinha	-7.2561	-35.8303
19	Campina Grande/São José da Mata	-7.1897	-35.9844
20	Campina Grande/Sítio Açude de Dentro	-7.3386	-36.0842
21	Campina Grande/Sítio Massapê de Galante	-7.3131	-35.8419
22	Caraúbas	-7.7253	-36.4903
23	Caturité	-7.4192	-36.02
24	Caturité/Fazenda Campo de Emas	-7.3872	-36.0647
25	Congo	-7.8022	-36.6586
26	Coxixola	-7.6286	-36.6056
27	Cruz do Espírito Santo	-7.1408	-35.0911
28	Desterro	-7.2903	-37.0881
29	Fagundes	-7.3586	-35.7844
30	Gado Bravo	-7.5831	-35.7953
31	Gado Bravo/Fazenda Lagoa dos Marcos	-7.5986	-35.8322
32	Gurinhém	-7.1261	-35.425
33	Gurjão	-7.2478	-36.4892
34	Ingá	-7.2925	-35.6119
35	Itabaiana	-7.325	-35.3375
36	Itatuba	-7.3778	-35.6297
37	João Pessoa/DFAARA	-7.0833	-34.8333
38	João Pessoa/Mangabeira	-7.1972	-34.8131
39	João Pessoa/Mares	-7.1558	-34.9089
40	Juarez Távora	-7.1628	-35.5931
41	Juazeirinho	-7.0683	-36.58
42	Junco do Seridó	-6.995	-36.7131
43	Juripiranga	-7.3717	-35.2408
44	Lagoa Seca/EMEPA	-7.1572	-35.8817

<b>Número</b>	<b>Posto Pluviométrico</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
45	Livramento	-7.3761	-36.9492
46	Mari	-7.0536	-35.32
47	Mogeyro	-7.3075	-35.4764
48	Monteiro/Açude Poções	-7.8886	-36.9969
49	Monteiro/EMBRAPA	-7.885	-37.1269
50	Monteiro/INMET	-7.8008	-37.1083
51	Natuba	-7.6414	-35.5533
52	Olivedos	-6.9886	-36.2436
53	Ouro Velho	-7.6206	-37.1508
54	Parari	-7.3178	-36.6531
55	Pilar	-7.2675	-35.2608
56	Pocinhos	-7.0778	-36.0592
57	Prata	-7.695	-37.0842
58	Puxinanã	-7.1472	-35.9594
59	Queimadas	-7.3606	-35.8897
60	Riacho de Santo Antônio	-7.6942	-36.1561
61	Riachão do Bacamarte	-7.2472	-35.6631
62	Salgado de São Félix	-7.3558	-35.4344
63	Santa Cecília	-7.7403	-35.8808
64	Santa Rita	-7.1406	-34.9828
65	Santo André	-7.2214	-36.6311
66	Sapé	-7.0925	-35.2233
67	Seridó/São Vicente do Seridó	-6.9356	-36.3772
68	Serra Branca	-7.4819	-36.66
69	Serra Redonda	-7.1861	-35.6797
70	São Domingos do Cariri	-7.6331	-36.4311
71	São João do Cariri	-7.3825	-36.5286
72	São João do Tigre	-8.08	-36.8472
73	São João do Tigre/Santa Maria da Paraíba	-8.1053	-36.6397
74	São José dos Cordeiros	-7.3908	-36.8058
75	São José dos Ramos	-7.2475	-35.3728
76	Soledade	-7.0608	-36.3619
77	Soledade/Fazenda Pendência	-7.1769	-36.4864
78	São Miguel de Taipu/São Miguel de Taipú	-7.2458	-35.2058
79	São Sebastião do Umbuzeiro	-8.1517	-37.0097
80	Sumé	-7.6736	-36.8964
81	Sumé/Fazenda Bananeiras	-7.5069	-36.9631
82	Taperoá	-7.2164	-36.8281
83	Tenório	-6.9408	-36.6294
84	Umbuzeiro	-7.6958	-35.6642
85	Umbuzeiro/Mata Virgem	-7.74	-35.7936
86	Zabelê	-8.075	-37.0931

**APÊNDICE B** – Postos pluviométricos utilizados no cálculo da precipitação média para pontos do modelo global

<b>Ponto de grade</b>	<b>Postos pluviométricos</b>
Ponto 8	Amparo
	Camalaú
	Congo
	Coxixola
	Monteiro/Açude Poções
	Monteiro/EMBRAPA
	Monteiro/INMET
	Ouro Velho
	Prata
	Serra Branca
	São João do Tigre
	São João do Tigre/Santa Maria da Paraíba
	São Sebastião do Umbuzeiro
	Sumé
	Sumé/Fazenda Bananeiras
	Zabelê
Ponto 9	Alcantil
	Aroeiras
	Barra de Santana
	Barra de Santana/Bodocongó
	Barra de São Miguel
	Boqueirão/Açude Boqueirão
	Cabaceiras
	Caraúbas
	Gado Bravo
	Gado Bravo/Fazenda Lagoa dos Marcos
	Natuba
	Riacho de Santo Antônio
	Santa Cecília
	São Domingos do Cariri
	Umbuzeiro
	Umbuzeiro/Mata Virgem
Ponto 13	Assunção
	Cacimbas
	Desterro
	Juazeirinho
	Junco do Seridó
	Livramento
	Parari
	Santo André
	São José dos Cordeiros
	Taperoá
	Tenório

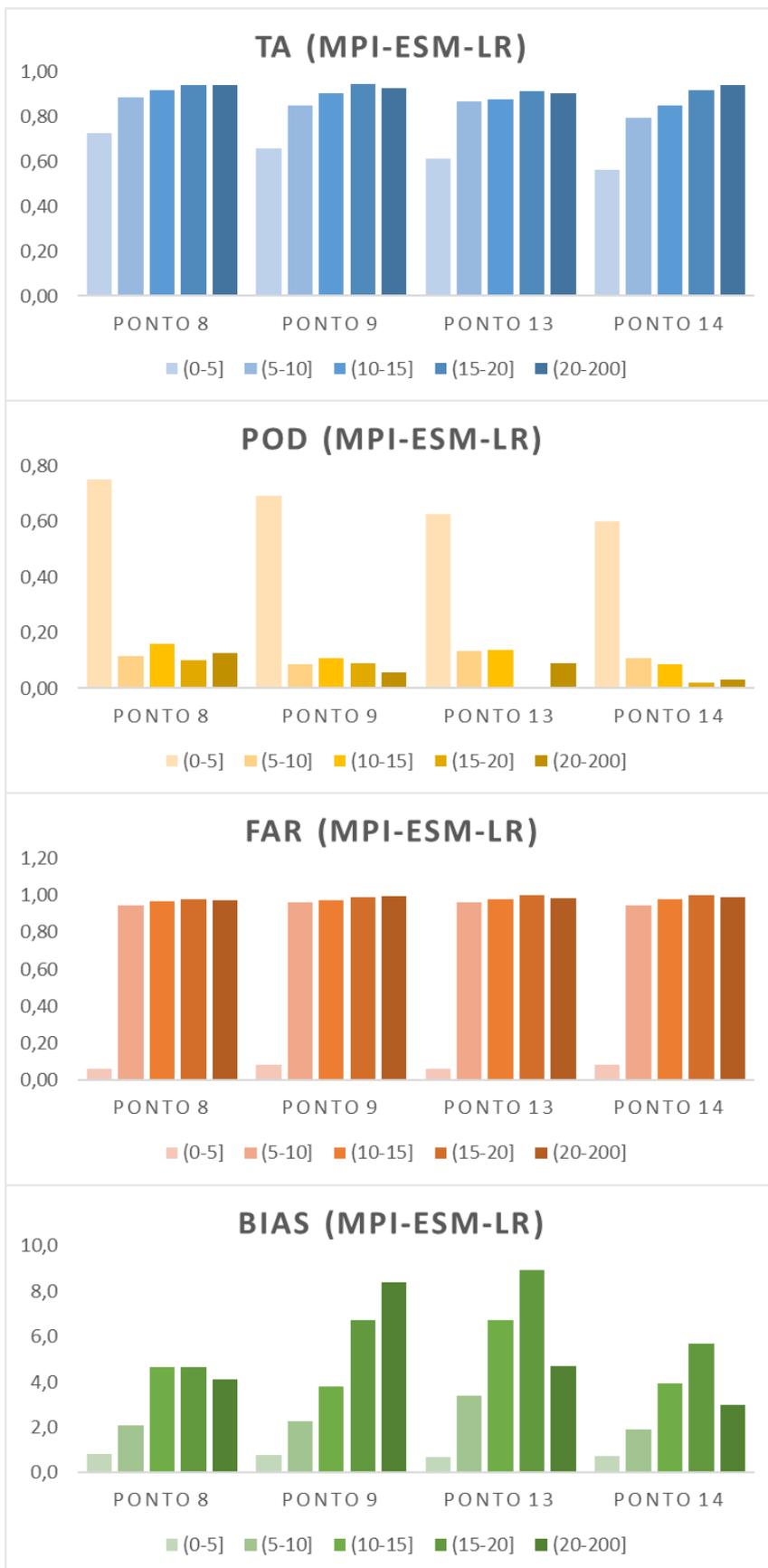
Ponto de grade	Postos pluviométricos
Ponto 14	Boa Vista
	Cabedelo/CAGEPA
	Cabedelo/EMATER
	Caldas Brandão
	Campina Grande/EMBRAPA
	Campina Grande/Santa Terezinha
	Campina Grande/São José da Mata
	Campina Grande/Sítio Açude de Dentro
	Campina Grande/Sítio Massapê de Galante
	Caturité
	Caturité/Fazenda Campo de Emas
	Cruz do Espírito Santo
	Fagundes
	Gurinhém
	Gurjão
	Ingá
	Itabaiana
	Itatuba
	João Pessoa/DFAARA
	João Pessoa/Mangabeira
	João Pessoa/Mares
	Juarez Távora
	Juripiranga
	Lagoa Seca/EMEPA
	Mari
	Mogeiro
	Olivedos
	Pilar
	Pocinhos
	Puxinanã
	Queimadas
	Riachão do Bacamarte
	Salgado de São Félix
Santa Rita	
Sapé	
Seridó/São Vicente do Seridó	
Serra Redonda	
São João do Cariri	
São José dos Ramos	
Soledade	
Soledade/Fazenda Pendência	
São Miguel de Taipu/São Miguel de Taipú	

**APÊNDICE C** – Postos pluviométricos utilizados no cálculo da precipitação média para pontos do modelo regional

<b>Ponto de grade</b>	<b>Postos pluviométricos</b>
Ponto 145	São João do Tigre
	São João do Tigre/ Santa Maria da Paraíba
	São Sebastião do Umbuzeiro
Ponto 167	Monteiro/EMBRAPA
	Ouro Velho
	Prata
Ponto 168	Camalaú
	Congo
	Monteiro/Açude Poções
	Sumé
Ponto 169	Barra de São Miguel
	Cabaceiras
	Caraúbas
	Coxixola
	São Domingos do Cariri
Ponto 170	Alcantil
	Barra de Santana
	Barra de Santana/ Bodocongó
	Boqueirão
	Gado Bravo
	Gado Bravo/ Fazenda Lagoa dos Marcos
	Riachão do Santo Antônio
	Santa Cecília
Umbuzeiro/Mata Virgem	
Ponto 171	Aroeiras
	Natuba
	Umbuzeiro
Ponto 191	Amparo
	Cacimbas
	Desterro
	Livramento
	São José dos Cordeiros
	Sumé/Fazenda Bananeiras
	Taperoá

<b>Ponto de grade</b>	<b>Postos pluviométricos</b>
Ponto 192	Gurjão
	Parari
	Santo André
	Serra Branca
	São João do Cariri
	Soledade
	Soledade/ Fazenda Pendência
Ponto 193	Boa Vista
	Campina Grande/EMBRAPA
	Campina Grande/ Santa Terezinha
	Campina Grande/ São José da Mata
	Campina Grande/Sítio Açude de Dentro
	Campina Grande/Sítio Massapê de Dentro
	Caturité
	Caturité/Fazenda Campo de Emas
	Lagoa Seca/EMEPA
	Pocinhos
	Puxinanã
	Queimadas
	Ponto 194
Gurinhém	
Ingá	
Itatuba	
Juarez Tavora	
Mogeirol	
Riachão do Bacamarte	
Salgado de São Félix	
Serra Redonda	
Ponto 195	Caldas Brandão
	Cruz do Espírito Santo
	Itabaiana
	Mari
	Pilar
	Santa Rita
	Sapé
	São José dos Ramos
	São Miguel de Taipú
Ponto 215	Juazeirinho
	Junco do Seridó
	Seridó/São Vicente do Seridó
	Tenório

**APÊNDICE D** - Gráficos dos índices de desempenho para os pontos do modelo global



**ANEXO E - Gráficos dos índices de desempenho para os pontos do modelo regional**

