



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 DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DA  
BACIA DO RIO PIANCÓ - PB

JOSIVALDO LUCAS GALVÃO SILVA

João Pessoa – PB  
Maio de 2019

JOSIVALDO LUCAS GALVÃO SILVA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DO  
RIO PIANCÓ - PB

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 Cláudia  
Fernandes Medeiros Braga.

JOÃO PESSOA

2019

**Catalogação na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S586a Silva, Josivaldo Lucas Galvão.

Avaliação dos impactos das mudanças climáticas nas  
vazões da bacia do Rio Piancó - PB / Josivaldo Lucas  
Galvão Silva. - João Pessoa, 2019.

70 f. : il.

Orientação: Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Região semiárida. 2. Modelagem hidrológica. 3.  
MGB-IPH. I. Braga, Ana Cláudia Fernandes Medeiros. II.  
Título.

UFPB/BC

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**JOSIVALDO LUCAS GALVÃO SILVA**

### **AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VAZÕES DA BACIA DO RIO PIANCÓ – PB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 06/05/2019 perante a seguinte Comissão  
Julgadora:

Ana Cláudia Fernandes Mcdeiros Braga

Profa. Ana Cláudia Fernandes Mcdeiros Braga  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Adriano Rolim da Paz

Prof. Adriano Rolim da Paz  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADO

Daisy Beserra Lucena

Profa. Daisy Beserra Lucena  
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADO

Elisângela M. R. Rocha

Profa. Elisângela Maria Rodrigues Rocha  
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**Elisângela M. R. Rocha**  
Coordenadora de Eng. Ambiental  
CT/UFPB – Mat. 1821373

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Claudia, pelo apoio e amor incondicional.

À minha orientadora Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga, pela paciência, ajuda e dedicação.

À professora Daisy Beserra Lucena, pelo acompanhamento na monitoria e pesquisa científica. Por ter sido um exemplo de profissional e também por ter aceitado participar da banca examinadora deste trabalho. Muito obrigado pelos ensinamentos e incentivos, Daisy.

Ao professor Adriano Rolim da Paz, pela ajuda no manuseio do modelo MGB-IPH, e também por ter aceitado participar da banca examinadora deste trabalho.

Ao projeto BRAMAR e Wagner de Souza Felix, por terem disponibilizado os dados que tornaram possível a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos de curso Dani, Deborah, Thalita e Tallyson por terem tornado esses anos de graduação mais leves, me proporcionando risadas e sempre dispostos a me ajudar quando necessário.

Aos meus amigos Carlos, Leo, Giovani, Renan, Bianca, Beatriz, Hugo e Nikoly, que caminharam comigo durante todo esse tempo, mesmo que longe, e por terem me ensinado que boas amizades permanecem independente da distância.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram na minha graduação, muito obrigado.

## **RESUMO**

As mudanças climáticas globais são uma pauta importante da sociedade do século XXI e dentre seus principais impactos, pode-se destacar as alterações nas variáveis hidrológicas, sendo essencial analisar suas consequências, principalmente em áreas como o semiárido brasileiro que apresenta grande vulnerabilidade hídrica. Neste trabalho, portanto, avalia-se os impactos das mudanças climáticas nas vazões do Rio Piancó –PB, para duas janelas de tempo futuro (2006 – 2041 e 2041 – 2077). Primeiramente, foi realizado a análise da temperatura e precipitação, com o intuito de verificar o viés do modelo atmosférico e entender sua correção. A avaliação do impacto nas vazões se deu através da utilização da precipitação e temperatura simuladas pelo modelo atmosférico regional MPI-ESM-LR-RCA4 como dado de entrada do modelo hidrológico MGB-IPH. Os resultados obtidos mostram que o modelo atmosférico apresenta um viés de superestimação de precipitação na área da bacia, e projeta diminuição de precipitação para o período futuro mais próximo e aumento de precipitação para o período mais distante. Foram observados aumento de vazão na bacia hidrográfica principalmente no horizonte de tempo mais distante, entretanto tais vazões apresentam grande variação, evidenciando o acréscimo de incertezas a medida que o horizonte de tempo se distancia do período atual.

Palavras-chave: região semiárida, modelagem hidrológica, MGB-IPH.

## **ABSTRACT**

Global climate change is an important agenda of 21st century society. Among its main impacts it is possible to highlight the changes in the hydrological variables and it is essential to analyze their consequences, especially in areas such as the Brazilian semi-arid that presents great water vulnerability. This study evaluates the impacts of climate change on the Piancó-PB runoff for two future time windows (2006-2041 and 2041-2077). Firstly, it was made an analysis of the temperature and precipitation, in order to verify the bias of the atmospheric model and understand its correction. The evaluation of the impact on the runoff was made using the precipitation and temperature simulated by the regional atmospheric model MPI-ESM-LR-RCA4 as input data of the hydrological model MGB-IPH. The results show that the atmospheric model presents a bias of overestimation of precipitation in the area of the basin, and projects decrease of precipitation for the near future period and increase of precipitation for the most distant period. Increases in runoff were observed in the hydrographic basin, mainly in the most distant time horizon. However, these flows show a great variation, evidencing the increase of uncertainties as the time horizon distances itself from the current period.

Keywords: semiarid region, hydrological modeling, MGB-IPH.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Balanço de energia terrestre. ....	5
Figura 2 – Representação da grade horizontal e vertical utilizados nos modelos atmosféricos.	6
Figura 3 – Esquematização do processo de downscaling e fluxo de dados entre modelos. ....	7
Figura 4 - Cascata de incertezas. ....	13
Figura 5 – Relação da água com diversos componentes socioambientais. ....	16
Figura 6 – Diferentes abordagens para definição de estratégias de planejamento. ....	18
Figura 7 – Fluxograma das etapas realizadas no estudo. ....	19
Figura 8 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB. ....	20
Figura 9 - Climograma da bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB.....	21
Figura 10 – Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico selecionados. ....	23
Figura 11 - Componentes do modelo MPI-ESM.....	25
Figura 12 - A) Exemplo da discretização da bacia em células e suas conexões por meio dos canais de drenagem. B) Esquema representando a divisão de N blocos de uso/tipo de solo dentro de uma célula do modelo.....	26
Figura 13 - Ilustração da correção da precipitação utilizando a função de distribuição gama.	30
Figura 14 – Esquema da metodologia do fator de alteração. (Tobs = Temperatura observada; Tcor = Temperatura corrigida; Tsim = Temperatura simulada para o período futuro; This = Temperatura simulada para o período histórico). ....	31
Figura 15 - A) Precipitação média simulada e observada para o período de 1970 - 2005. B) Comparação da precipitação média para o posto pluviométrico de Boa Ventura e o ponto de grade número 5. ....	32
Figura 16 - Precipitação média anual observada e simulada para o período de 1970 - 2005..	33
Figura 17 - Comparação entre precipitações médias não corrigidas (Phist), corrigidas (Phist,corr) e observadas (Pobs) para o período de 1970 - 2005.....	34
Figura 18 - Precipitação média anual corrigida para o período de 1970 – 2005.....	35
Figura 19 - Precipitação média corrigida simulada para os períodos de 2006 - 2041 e 2042 – 2077 em relação ao período observado (1970 – 2005). ....	36
Figura 20 - Temperatura média observada e simulada não corrigida para o período de 1970 - 2005.....	37
Figura 21 - Temperatura média simulada não corrigida simulada para o Futuro 1 (2006 - 2041) e Futuro 2 (2042 - 2077). .....	38

Figura 22 - Projeções do modelo atmosférico da temperatura para os períodos de 2006 - 2041 e 2042 - 2077 .....	39
Figura 23 - Vazões médias mensais simuladas entre o período de 1970 a 2005.....	40
Figura 24 - Hidrograma de vazão para o período de 1971 a 1975. ....	41
Figura 25 – Hidrograma de vazão para o período de 1991 a 1995.....	41
Figura 26 - Vazões médias mensais calculadas para o Futuro 1 (2006 - 2041) e Futuro 2 (2042 - 2077) .....	42
Figura 27 - "Box-plot" das vazões simuladas para o período de 2006 - 2041. ....	43
Figura 28 - "Box-plot" das vazões simuladas para o período de 2042 - 2077. ....	44

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico dos cenários de mudanças climáticas .....	9
Tabela 2 – Descrição dos RPCs – Representatives Concentration Pathways .....	10
Tabela 3 - Descrição de estudos sobre mudanças climáticas e seus impactos nos recursos hídricos.....	17
Tabela 4 - Postos pluviométricos utilizados na pesquisa .....	22
Tabela 5 - Pontos de grade do modelo atmosférico utilizados na pesquisa. ....	24
Tabela 6 - Configuração das simulações do modelo hidrológico.....	27
Tabela 7 - Valores dos outliers superiores do gráfico “Box-Plot” para o período de 2006 a 2041. ....	43
Tabela 8 - Valores dos outliers superiores do gráfico “Box-Plot” para o período de 2042 a 2077. ....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
ANA	Agência Nacional de Águas
DKRZ	<i>German Climate Computing Centre</i>
ESGF	<i>The Earth System Grid Federation</i>
GEE	Gases Efeito Estufa
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MCG	Modelos de Circulação Global
MCR	Modelos de Circulação Regional
MGB	Modelo hidrológico de Grandes Bacias
MPI	<i>Max Planck Institute</i>
MPI-ESM-LR	<i>Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution</i>
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCA4	<i>Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
SMAP	<i>Soil Moisture Accounting Procedure</i>
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i>
UPH	Unidade de Planejamento Hidrológico
URH	Unidade de Resposta Hidrológica

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo Geral .....	3
2.2.	Objetivos Específicos .....	3
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	4
3.1.	Mudanças climáticas.....	4
3.2.	Modelos atmosféricos.....	6
3.3.	Cenários de Mudanças Climáticas.....	8
3.4.	Modelos hidrológicos para avaliação de mudanças climáticas.....	10
3.5.	Incertezas.....	13
3.6.	Mudanças climáticas e planejamento de recursos hídricos.....	15
4.	METODOLOGIA.....	19
4.1.	Visão geral do estudo.....	19
4.2.	Área de estudo .....	20
4.3.	Levantamento de dados.....	21
4.3.1.	Dados observados .....	21
4.3.2.	Dados simulados pelo modelo atmosférico.....	22
4.4.	Modelo Atmosférico .....	24
4.4.1.	Max Planck Institute-Earth Model-Low Resolution .....	24
4.4.2.	Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4.....	25
4.5.	Modelagem hidrológica .....	25
4.6.	Análise da precipitação .....	28
4.7.	Análise da temperatura .....	29
4.8.	Correção do viés do modelo atmosférico.....	29
4.9.	Análise da vazão.....	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32

5.1.	Avaliação da precipitação .....	32
5.1.1.	Precipitação não-corrigida simulada pelo modelo atmosférico para o período histórico	32
5.1.2.	Precipitação corrigida simulada pelo modelo atmosférico para o período histórico	33
5.1.3.	Precipitação simulada para os períodos futuros .....	35
5.2.	Avaliação da temperatura.....	36
5.2.1.	Temperatura simulada para o período histórico .....	36
5.2.2.	Temperatura simulada para o período futuro .....	37
5.3.	Análise da vazão.....	39
5.3.1.	Vazões para o período histórico .....	39
5.3.2.	Análise das vazões para o clima futuro .....	42
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	46
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	48
	APÊNDICE A .....	56

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios da sociedade para século XXI são as mudanças climáticas. Desde 1988, com a criação do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC<sup>1</sup>) o tema foi ganhando destaque nas discussões políticas e acadêmicas sobre disponibilidade de água, eventos extremos de precipitação, impactos na produção de alimentos, entre outros.

Nesse sentido, começaram a ser elaboradas normas internacionais que tem como objetivo estabelecer metas e diretrizes aos países sobre a diminuição de emissão de Gases Efeito Estufa (GEE) e demais medidas para mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Destaca-se o Protocolo de Kyoto firmado em 1997, contendo metas e prazos de reduções de emissão de GEEs e, no Brasil, a Política Nacional sobre Mudanças Climáticas (Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009), que definiu metas de reduções de GEEs entre 36,1% e 38,9% até 2020. No entanto, apesar dessas medidas, os gases de efeito estufa podem perdurar na atmosfera e causar impactos importantes regionais, tais como na distribuição temporal e espacial das variáveis hidrológicas (IPCC, 2007).

As regiões mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas no Brasil são Norte e Nordeste (MARGULIS e DUBEUX, 2010). Tais regiões, portanto, podem sofrer de forma mais intensa as consequências do aumento da frequência de eventos hidrológicos extremos, perda de diversidade, perda de áreas agricultáveis, etc. Estima-se que, para o semiárido brasileiro, o aumento da temperatura média possa alcançar valores de 3°C, com reduções de precipitação de 3 a 4 mm por dia (MARENGO et al., 2011).

A avaliação dos impactos das mudanças climáticas no ciclo hidrológico normalmente é feita através da associação dos modelos de previsão das condições atmosféricas com o modelo hidrológico chuva-vazão. O modelo atmosférico realiza as simulações de precipitação e temperatura, para os diversos cenários de mudanças climáticas, enquanto o modelo hidrológico utiliza essas informações para a geração de vazão.

Os modelos atmosféricos podem apresentar erros sistemáticos que, por exemplo, causam a diferença entre os dados simulados e observados (HAERTER et al., 2011). Portanto, a utilização das projeções climáticas como dado de entrada do modelo hidrológico pode acarretar em um alto nível de incerteza no cálculo do escoamento resultante. Logo, se faz

---

<sup>1</sup> Do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*

necessário uso de metodologias que promovam a redução dessas incertezas, como a correção de viés do modelo atmosférico (MUERTH et al., 2012).

Ainda, tem-se, que em estudos regionais de impactos de mudanças climáticas, a utilização de Modelos de Circulação Global (MCGs) não é recomendada, uma vez que tais modelos apresentam baixa resolução espacial (100 a 300 km). Portanto, recomenda-se o uso de modelos atmosféricos regionais, que simulam de melhor forma as condições climáticas a nível de bacia hidrográfica (BRAGA et al., 2007).

Nesse sentido, para adequar os dados simulados pelos MCGs à escala de bacia hidrográfica é realizado um processo de *downscaling*. Este processo pode ser estatístico ou dinâmico, este último é feito pelos Modelos Climáticos Regionais (MCRs), que utilizam condições de contorno fornecidas pelos MCGs e geram dados com resolução espacial mais adequada para estes estudos.

Logo, o presente trabalho visa utilizar os dados de precipitação e temperatura de um modelo atmosférico regional como dado de entrada para a modelagem hidrológica com o intuito de avaliar os impactos das mudanças climáticas nas vazões do Rio Piancó, localizado na região semiárida do estado da Paraíba. A bacia hidrográfica do Rio Piancó, dentre diversas particularidades, destaca-se por abrigar o reservatório Coremas – Mãe D’água dentro de sua delimitação, que é a principal fonte de abastecimento de 15 cidades (ANA, 2018), além de proporcionar recursos hídricos para atividades agropecuárias na região.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar os impactos das mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Piancó – PB.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Analisar a precipitação e a temperatura simulada pelo modelo atmosférico quanto a sua eficácia em representar o clima histórico;
- Avaliar as projeções de precipitação e temperatura na bacia para o clima futuro;
- Avaliar os impactos das mudanças climáticas (precipitação e temperatura) nas vazões da bacia.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1. Mudanças climáticas**

De acordo com o IPCC (2007b), as mudanças climáticas globais se referem a alterações do estado médio do clima e/ou da sua variabilidade, que podem ser identificadas por meio de testes estatísticos e que se estendem por um dado período de tempo, normalmente décadas ou períodos maiores. Tais mudanças podem ocorrer influenciadas por diversos fatores, como por exemplo as flutuações naturais da radiação solar que chega à superfície terrestre e atividades vulcânicas, tida como causas naturais, e, mais recente, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) através, principalmente, da queima de combustíveis fósseis para atividades humanas (KADDO, 2016; GONDIM et al., 2011; RIEBEEK, 2010).

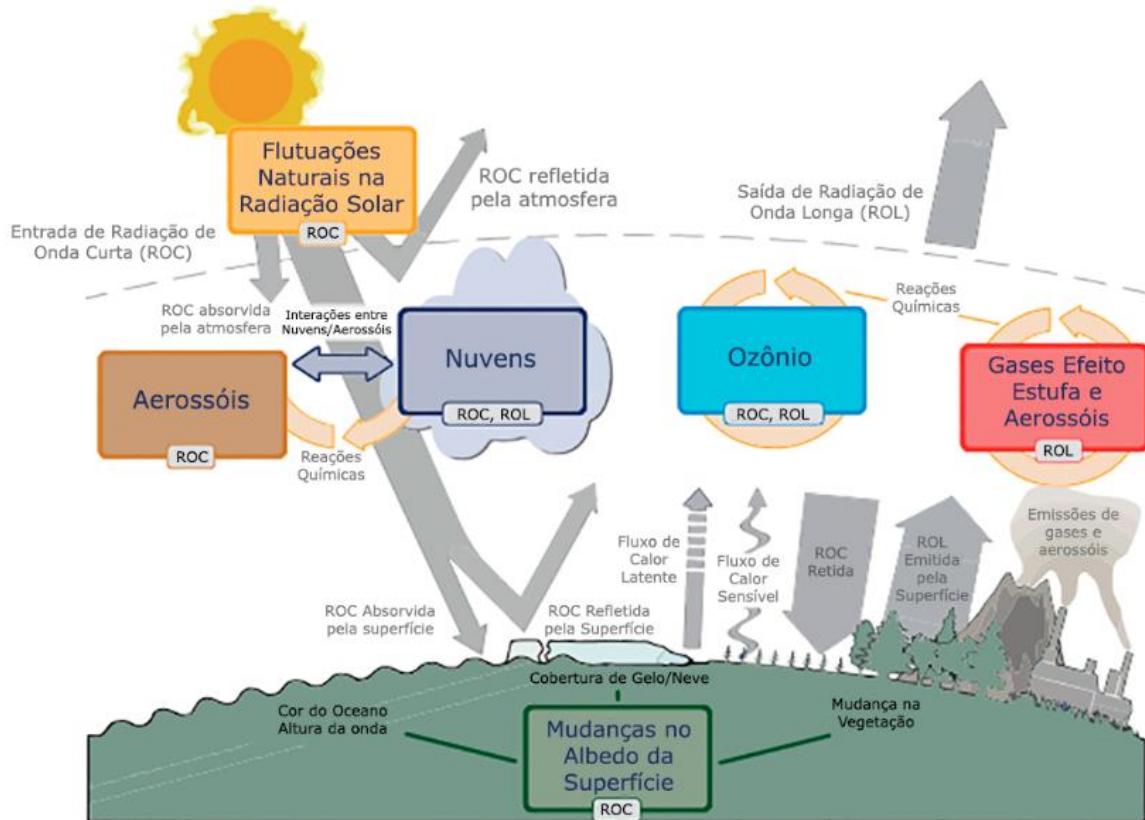
O principal motor do sistema climático terrestre é a energia emitida pelo sol (Figura 1). Estima-se que metade da radiação de onda curta (ROC) que chega ao planeta Terra é absorvida pela superfície terrestre, tal energia é emitida de volta para o espaço na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético, ou seja, radiação de onda longa (ROL), que por sua vez é absorvida em parte pelos gases que compõem a troposfera (IPCC, 2013). A interação entre os componentes da troposfera e o calor emitido pela superfície terrestre caracteriza o fenômeno natural chamado de efeito estufa (AGUIAR e AMARO, 2015).

Embora o efeito estufa ocorra naturalmente, é possível observar uma crescente contribuição de GEE na atmosfera, que estaria associada a um desequilíbrio no balanço de energia do planeta (NUNES, 2003). Segundo Rocha (2003), entre o período de 1750 e 1998, as atividades econômicas e industriais do homem moderno resultou na quase duplicação da concentração de GEE na atmosfera. Sendo assim, dependendo da concentração de emissões de GEE na atmosfera terrestre, projeta-se que a temperatura média global possa aumentar entre 0,3 °C e 3,7 °C, considerando o cenário mais otimista e o cenário pessimista, respectivamente (IPCC, 2014).

Nesse contexto, as mudanças climáticas poderão capazes de produzir impactos significativos no meio ambiente, uma vez que o clima é um importante agente dos processos naturais. Rignot et al. (2011), a partir de observações mensais durante 20 anos da camada de gelo da Groelândia e Antártica, quantificaram a aceleração de seu derretimento e informam que a magnitude da aceleração sugere que ela será a principal contribuição para o aumento do nível do mar. Assim, a partir da modelagem climática, tem-se uma estimativa de aumento médio do

nível do mar em torno de 50 cm, havendo variações em função da região (SILVA e GUETTER, 2003).

Figura 1 – Balanço de energia terrestre.



Fonte: Adaptado de IPCC (2013).

Foden et al. (2013), por sua vez, verificaram a vulnerabilidade de diversas espécies de aves, anfíbios e corais em relação a diferentes cenários de emissão de GEE, obtendo uma relação direta de quanto mais pessimista o cenário, mais espécies foram classificadas como vulneráveis. Também, Barbraud e Weimerskirch (2006) relatam que o atraso na postura de ovos de certas espécies de aves marinhas que habitam a região do oriente da Antártica pode ser explicado pela diminuição da área do mar de gelo que ocorre na região, o que pode estar interligado com as mudanças climáticas.

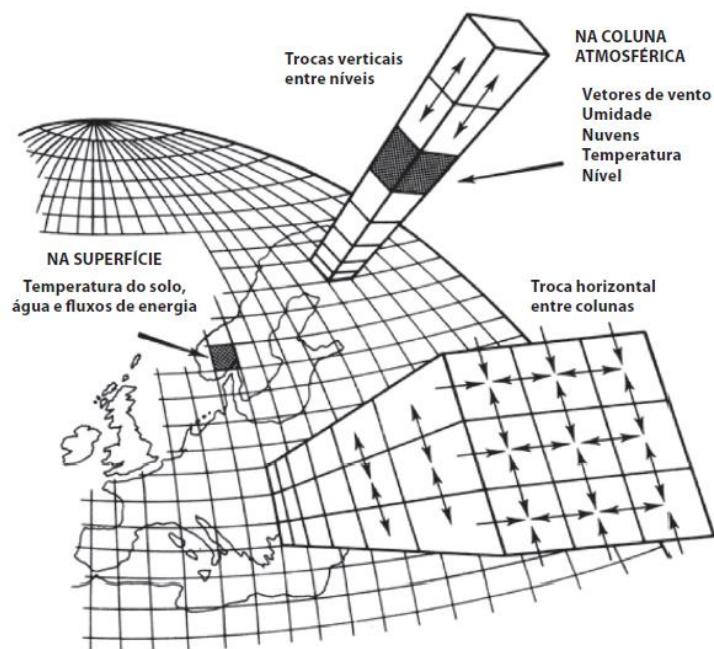
Além disso, as mudanças climáticas poderão exercer grandes impactos às populações, especialmente aquelas que, no clima atual, já são classificadas como vulneráveis, uma vez que terão maiores dificuldades de adaptação. Parte da população que pratica agricultura de subsistência pode ser altamente impactada em frente a um cenário de adversidade climática, principalmente em zonas tropicais equatoriais, que exibem uma tendência de perda de áreas agricultáveis, assim como zonas áridas (MENDONÇA, 2003; MAN et al., 2001).

### 3.2. Modelos atmosféricos

A modelagem atmosférica tem como um dos seus principais objetivos a simulação do presente e futuro estado da atmosfera. Deste modo, os modelos utilizam-se de equações matemáticas para representar as leis da física que governam os movimentos atmosféricos e suas interações entre os diversos componentes do sistema físico climático (SAMPAIO e DIAS (2014).

Nos modelos climáticos, a atmosfera, a superfície terrestre e o oceano são divididos em células (Figura 2), que formam uma grade tridimensional onde ocorrem os cálculos matemáticos (BETTS et al., 2011). Como não há possibilidade de representar perfeitamente os detalhes que ocorrem dentro de cada célula, alguns processos como precipitação, radiação, nuvens e trocas de energia e massa precisam ser parametrizados (FERNANDES, 2009).

Figura 2 – Representação da grade horizontal e vertical utilizados nos modelos atmosféricos.



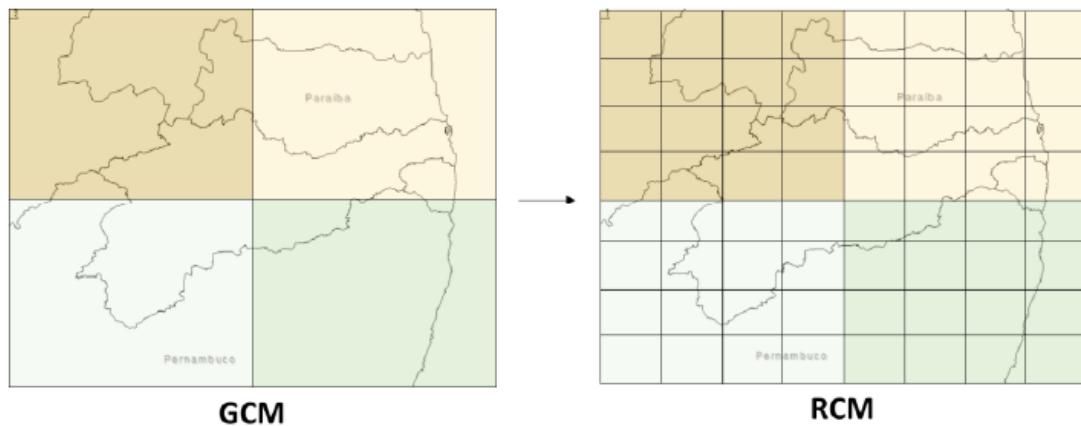
Fonte: Sampaio e Dias (2014)

Os modelos atmosféricos podem ser globais ou regionais. Os modelos climáticos globais (MCG) simulam o clima de toda a superfície terrestre, oceano e atmosfera. São modelos de baixa resolução espacial, na ordem de 100 a 300 km, com representação também de camadas verticais que variam entre 9 a 38 níveis na atmosfera e de 20 a 40 níveis verticais no oceano (SAE, 2015). Por outro lado, os modelos atmosféricos de circulação regional (MCR) possuem alta resolução espacial (de 5 a 50 km), proporcionando uma representação mais fiel das

características da região e de processos atmosféricos que ocorrem nessa escala (BETTS et al., 2011).

Devido à resolução dos MCGs, eles não são capazes de simular processos atmosféricos de menor escala que influenciam o clima regional e/ou local. Para escalas espaciais mais detalhadas, a exemplo de bacias hidrográficas, é necessário fazer uma desagregação ou *downscaling* dos dados do modelo global. As técnicas de *downscaling* (Figura 3), podem ser divididas entre duas abordagens, dinâmica e estatística (FIGUEIREDO, 2017). A técnica de *downscaling* dinâmico utiliza um MCR que é simulado com as condições iniciais e de contorno do MCG, já o *downscaling* estatístico por sua vez é feito através de interpolação ou equações estatísticas que relacionam o clima global ao clima regional (SAE, 2015).

Figura 3 – Esquematização do processo de *downscaling* e fluxo de dados entre modelos.



Fonte: Figueiredo (2017).

Diante disso, diversos estudos vêm utilizando os modelos atmosféricos para simular fenômenos climáticos. Valverde e Marengo (2010) analisaram possíveis mudanças nos padrões de circulação atmosférica na América do Sul frente a um cenário de mudança climática utilizando cinco modelos globais do IPCC AR4 (CCCMA, GFDL, HadCM3, MIROC e GISS). Pode-se citar também Correia et al. (2006), que avaliaram a consequência climática sobre a Bacia Amazônica em função de possíveis alterações da sua cobertura vegetal, e para isso foi utilizado o modelo MCGA/CPTEC acoplado com ao modelo de superfície SSIB.

Gondin et al. (2008) utilizaram o modelo regional PRECIS integrado com o modelo global HadRM3P na Bacia do Jaguaribe, Ceará, para verificar os impactos das mudanças climáticas no uso da água para irrigação. Também, estudos feitos por Machado e Rocha (2011) e Nobre et al. (2001) utilizaram os modelos atmosféricos para simular precipitações sazonais

para a região do Nordeste brasileiro, tanto com o intuito de verificar a eficácia destes modelos quanto para propor melhorias na modelagem regional para esta localidade.

### **3.3. Cenários de Mudanças Climáticas**

A partir da década de 70, iniciou-se a discussão sobre os danos à atmosfera causados pela emissão de gases poluentes, principalmente quando estudiosos alertaram o mundo sobre a destruição da camada de ozônio, que protege o planeta da radiação ultravioleta (CONTI, 2005). Desde então, pesquisadores e instituições mundiais passaram a incluir em suas pautas questões ligadas a poluição da atmosfera e mudanças climáticas.

Em 1988, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. O objetivo do IPCC é sistematizar pesquisas atuais sobre o clima e apresenta-las ao público. Periodicamente, o IPCC disponibiliza os Relatórios de Avaliação (ARs), que são produzidos em quatro etapas, a primeira para apresentar a base científica por trás das mudanças climáticas, a segunda discute suas consequências, a terceira propõe medidas mitigadoras e a quarta é uma síntese das etapas anteriores (VELTRONE, 2017).

Cenários de mudanças climáticas são representações de como pode ser o futuro e são uma ferramenta essencial para modelagem climática, avaliação de impactos, na formulação de políticas adaptativas e mitigatórias (NAKICENOVIC et al., 2000). Moss et al. (2010) apontam a importância dos cenários de mudanças climáticas e afirmam que os cenários facilitam o entendimento de consequências a longo prazo de decisões de curto prazo, como também, possibilitam pesquisadores explorar diferentes possibilidades futuras.

Os cenários publicados pelo IPCC até então foram os *Scientific Assessment* (SA90), *IPCC Scenarios 92* (IS92), *Special Report Emission Scenarios* (SRES) e mais recentemente os *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Uma visão histórica geral desses quatro cenários está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Histórico dos cenários de mudanças climáticas

Ano	Nome	Utilizado em
1990	SA90	Primeiro Relatório de Avaliação
1992	IS92	Segundo Relatório de Avaliação
2000	SRES - <i>Special Report on Emissions and Scenarios</i>	Terceiro e Quatro Relatório de Avaliação
2009	RCP – <i>Representative Concentration Pathways</i>	Quinto Relatório de Avaliação

Fonte: Adaptado de Bjørnæs (2015).

Até o Quarto Relatório de Avaliação, as projeções climáticas eram feitas através de cenários de emissões de GEEs, porém, em 2013, com o lançamento do Quinto Relatório de Avaliação (AR5), o IPCC passou a utilizar cenários de forçantes radiativas. As chamadas forçantes radiativas são um conjunto de condições internas e externas da atmosfera que possuem efeito direto no balanço de energia global. Diferentes forçantes apresentam efeitos distintos sobre a temperatura terrestre, podendo estar associadas ao aquecimento (forçante positiva) e esfriamento (forçante negativa) do globo (NOBRE et al., 2012).

De acordo com IPCC (2013), os RCPs foram desenvolvidos para serem utilizados nas modelagens climáticas, como parte do processo de obtenção de cenários futuros de mudanças climáticas e, diferente das outras projeções produzidas, os RCPs levam em consideração mudanças no uso do solo e GEEs de vida curta na atmosfera. Os RCPs são nomeados de acordo com a forçante radiativa total projetada para 2100 (Tabela 2).

Os quatro cenários selecionados são considerados representativos e incluem diversos caminhos que as emissões podem tomar em um futuro próximo. Os RCPs incluem um cenário de baixa emissão que leva a uma baixa forçante radiativa (RPC2.6), dois cenários de estabilização (RCP4.5 e RCP6) e um cenário com alto patamar de emissões (RCP8.5) (VAN VUUREN et al., 2011).

Tabela 2 – Descrição dos RPCs – *Representatives Concentration Pathways*

<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
RCP8.5	Cenário de forçante radiativa crescente, atingindo 8.5 W/m <sup>2</sup> (aprox.. 1370 ppm CO <sub>2</sub> ) até o ano de 2100.
RCP6	Cenário de estabilização da forçante radiativa sem passar do limite de 6 W/m <sup>2</sup> (aprox.. 850 ppm CO <sub>2</sub> ) após 2100.
RCP4.5	Cenário de estabilização da forçante radiativa sem passar do limite de 4,5 W/m <sup>2</sup> (aprox.. 650 ppm CO <sub>2</sub> ) após 2100.
RCP2.6	Forçante radiativa atinge seu máximo em aprox. 3 W/m <sup>2</sup> (aprox. 490 ppm CO <sub>2</sub> ) antes de 2100 e decresce até 2.6 W/m <sup>2</sup> até 2100.

Fonte: Adaptado de Van Vuuren et al. (2011).

Embora os RCPs sejam amplamente utilizados em estudos sobre mudanças climáticas, paralelamente pesquisadores vêm desenvolvendo um novo conjunto de caminhos alternativos para o desenvolvimento futuro da sociedade, descritos como *shared socioeconomic pathways* (SSPs) (O’NEILL et al., 2017). Os SSPs descrevem o avanço da tecnologia, mudança do uso do solo, estilos de vida, políticas internacionais, demanda de energia, entre outros, que são combinados com os RCPs resultando em uma maior variedade de cenários de mitigação e adaptação às mudanças climáticas globais com o objetivo de auxiliar futuras pesquisas e análises políticas (RIAHI et al., 2017).

### **3.4. Modelos hidrológicos para avaliação de mudanças climáticas**

De acordo com Tucci (2005), a modelagem hidrológica é uma ferramenta que permite representar os processos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica, onde também é possível prever os resultados das diferentes ocorrências em relação aos valores observados. Portanto, para representar os processos hidrológicos de uma região, os modelos utilizam equações matemáticas com diferentes dados de entrada, por exemplo precipitação, temperatura, uso do solo, entre outros (FAN e COLLISCHONN, 2014).

Apesar de serem inicialmente simples, avanços tecnológicos na área de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e processamento computacional permitiram que os modelos hidrológicos passassem a incluir na sua formulação uma gama maior de processos

físicos, variáveis no tempo e espaço, para melhor representação do ciclo hidrológico na região estudada (PAIVA, 2009).

Os modelos hidrológicos que consideram a variação espacial dos processos hidrológicos são chamados de modelos hidrológicos distribuídos. Nesses modelos a bacia hidrográfica é dividida em unidades elementares, cada unidade então passa a representar os processos hidrológicos de transformação chuva-vazão culminando no escoamento até a rede de drenagem (PAZ e COLLISCHONN, 2007). Sendo assim, os modelos hidrológicos têm sido utilizados para estudar fenômenos hidrológicos e fazer análises quantitativas e qualitativas de processos como precipitação, infiltração, produção de sedimentos, escoamento superficial, subterrâneo entre outros (SANTOS, 2009).

Os esforços relacionados a avanços na modelagem hidrológica são motivados pela importância dos recursos hídricos para a sociedade e ecossistemas. Nesse contexto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para tentar entender os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade de recursos hídricos locais (XU et al., 2005). Segundo Teutschbein e Seibert (2012), a sensibilidade da hidrologia local às variações das condições do clima faz com que o uso das projeções climáticas seja essencial para a avaliação das mudanças futuras do ciclo hidrológico. Os autores ainda destacam a importância de se utilizar os modelos regionais, uma vez que eles representam melhor as condições climáticas na escala de bacia hidrográfica.

Em nível de bacia hidrográfica, a avaliação de mudanças climáticas normalmente é feita através do uso de anomalias de precipitação e temperatura (aumento e/ou diminuição) e consequentemente seu efeito no regime de vazão, dado que a precipitação e temperatura exercem influência direta no escoamento e evapotranspiração de uma bacia hidrográfica (ADAM e COLLISCHONN, 2013).

Diferentes modelos têm sido utilizados para estudar os efeitos de cenários de mudanças climáticas nos recursos hídricos. Jiang et al. (2007) utilizaram 6 modelos hidrológicos diferentes (Modelo de Thornthwaite–Mather, Modelo VUB, Modelo mensal Xinjiang, Modelo Guo, Modelo Watbal e Modelo Schaake) na bacia de Dongjiang, no sul da China, para comparar os impactos hidrológicos de mudanças climáticas a partir de cada modelo. Obteve-se como resultado uma boa reprodução da série histórica pelos seis modelos, porém, quando utilizados elementos climáticos projetados para diferentes cenários de mudanças climáticas como dado de entrada, os modelos divergem consideravelmente entre si na previsão de vazões.

O autor também cita a importância da cautela na escolha do modelo hidrológico que será utilizado para simulação de impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos.

Outro exemplo é o de Vicuna et al. (2007), onde foi verificada a sensibilidade dos recursos hídricos em três bacias hidrográficas da Califórnia frente a dois cenários distintos de mudanças climáticas, um de baixo nível de emissão de GEEs e outro de alta emissão, utilizando dados de dois MCGs como entrada para o modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity – VIC*. Obteve-se que os impactos nos recursos hídricos obtidos a partir dos diferentes MCGs foram similares, no entanto o modelo não apresentou boa confiabilidade ao simular anos secos ou eventos extremos.

No Brasil, pode-se citar o trabalho de Santana et al. (2011) que utilizaram o modelo hidrológico MGB-IPH com dados de entrada obtidos pelo modelo climático regional ETA/CPTEC para avaliar os impactos das mudanças climáticas na bacia do Rio São Francisco. Os autores utilizaram dois cenários de emissões do AR4 do IPCC, o cenário B2 considerado como otimista e o cenário A2 considerado pessimista. Como resultado, o estudo aponta uma possível tendência de redução na precipitação sobre a bacia. Também foi observado prováveis reduções entre 12 a 35% nas vazões médias da bacia para 2100.

Os estudos sobre impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos cada vez mais têm explorado outras variáveis hidrometeorológicas além da vazão média no exutório ou precipitação. Adam et al. (2015) utilizaram o modelo hidrológico MGB-IPH para avaliar possíveis impactos das mudanças climáticas nas vazões extremas da bacia do Alto Rio Paraná. Enquanto o modelo SMAP – *Soil Moisture Accounting Procedure* foi utilizado por Valério et al., (2015) onde objetivou-se verificar possíveis alterações associadas às mudanças climáticas nas vazões características da bacia do Rio Catu – BA, onde foi observado redução das vazões.

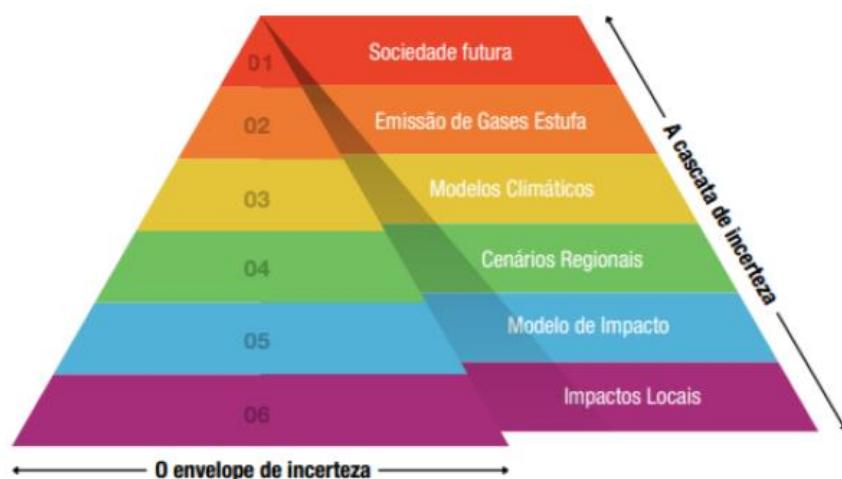
Escarião et al. (2012), avaliaram a influência do modelo hidrológico na simulação de escoamento para cenários artificiais de mudanças climáticas. No estudo foram utilizados quatro modelos de formulação diferentes (GRH, MIKE SHE, SFMODELe RNA), aplicado na bacia do rio Piancó – PB. Como resultado foi obtido que as vazões são muito mais sensíveis às alterações na precipitação do que na temperatura, e as simulações realizadas por cada modelo não são coerentes entre si. Portanto, como a região semiárida possui diversos desafios na gestão de águas, recomenda-se que tanto o modelo e as incertezas do mesmo sejam analisadas antes de planejar políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas.

### 3.5. Incertezas

De acordo com Murphy et al. (2004), a maior fonte de incertezas de um modelo climático é o modelo em si, incluindo a forma como são feitas as interações, os parâmetros que são utilizados, simplificações e hipóteses feitas para estruturar o modelo. Existem também as incertezas relacionadas às suposições sobre o clima futuro, diferentes níveis de emissões de GEEs, estado econômico global e mudanças sociais (MOSS et al., 2010). Ainda que os MCGs sejam considerados as maiores fontes de incertezas para a quantificação dos impactos das mudanças climáticas, Seguí et al. (2010) afirmam que as incertezas provocadas por técnicas de *downscaling* e correção de viés também devem ser levadas em consideração para melhorar essa estimativa.

Diante desse panorama, é possível elaborar uma cascata de incertezas (Figura 4), que estão presentes na formulação dos cenários futuros de mudanças climáticas. A cascata de incerteza inicia-se com as diversas possibilidades socioeconômicas que se pode ter no futuro, consequentemente tais cenários implicam diferentes concentrações de GEEs na atmosfera. Então, com diferentes valores dessa forçante externa (GEEs), os modelos climáticos simulam as condições atmosféricas, globais e regionais, que são utilizados para formular os possíveis impactos locais nas sociedades e nos ecossistemas. O envelope de incerteza atinge sua largura máxima ao chegar no último nível, portanto, o planejamento a longo prazo pode ser prejudicado pela amplitude de incertezas ao lidar com impactos locais (ANA, 2016).

Figura 4 - Cascata de incertezas.



Fonte: Agência Nacional de Águas (2016).

Entender as incertezas das projeções de mudanças climáticas é um passo essencial para o planejamento e definição de medidas mitigadoras. Katz et al. (2013) apontam a importância de identificar as incertezas, como também, a forma de comunicar essas informações para os tomadores de decisões, enfatizando ainda a ligação direta entre as incertezas de cada cenário e as políticas adotadas para o mundo futuro. Também, segundo Nordhaus (2018), as variáveis econômicas possuem incerteza significativa na construção de projeções, e que exercem um papel fundamental para melhorar as políticas públicas sobre o clima.

Sendo assim, fica evidente a importância de estudos que quantifiquem e avaliem as incertezas nos estudos de impactos de mudanças climáticas, tanto na esfera ambiental quanto na socioeconômica.

Dentre as metodologias, a abordagem Bayesiana vem sendo amplamente utilizada para avaliar o desempenho dos modelos atmosféricos e consiste em calcular o fator de Bayes (ou razão de verossimilhança) para os modelos de interesse levando em consideração uma série observada (valor de referência). Tebaldi et al. (2005) utilizaram a abordagem Bayesiana para quantificar as incertezas na simulação de temperatura da superfície terrestre de 22 modelos regionais utilizando um único cenário de emissão de GEEs, e conseguiram identificar regiões do globo com menor número de incertezas nas projeções, entre elas o sudeste da América do Sul.

Outros métodos de avaliação de incertezas também são comumente utilizados. Deser et al. (2012) com objetivo de avaliar o papel da variabilidade interna da atmosfera nas incertezas de um modelo de circulação global (CCSM3) utilizaram ajuste de tendência pelo método dos mínimos quadrados e comparação de séries históricas. Brown et al. (2015) investigaram as incertezas que surgem no modelo socioeconômico CLIMSAVE IAP a partir dos dados de entrada utilizados, também permitindo que eles quantificassem as incertezas dos impactos das mudanças climáticas em diferentes cenários socioeconômicos.

De fato, existem diversos processos na modelagem atmosférica que resultam em um alto grau de incertezas. Entre eles, têm-se principalmente a dificuldade dos modelos em simular as condições do clima presente com precisão, ou seja, cada modelo apresenta uma tendência de subestimar ou superestimar, em diferentes magnitudes, os elementos climáticos simulados e carregam esse *bias* ou viés para a simulação do clima futuro. (CHRISTENSEN et al., 2008).

Saber qual incerteza possui o maior efeito na avaliação hidrológica de mudanças climáticas é de fundamental importância, e deve ser avaliado em diferentes escalas de tempo

(BAE et al., 2011). Portanto, estudos têm sido desenvolvidos tanto no sentido de aprimorar as metodologias de avaliação existentes quanto de identificar tais incertezas (GUO et al., 2018; BASTOLA et al., 2011).

De forma geral, existem três tipos de incertezas nos impactos das mudanças climáticas nos regimes de vazões (TENG et al., 2012):

1. Incertezas nas projeções dos MCGs;
2. Incertezas nos processos de *downscaling*;
3. Incertezas na modelagem hidrológica.

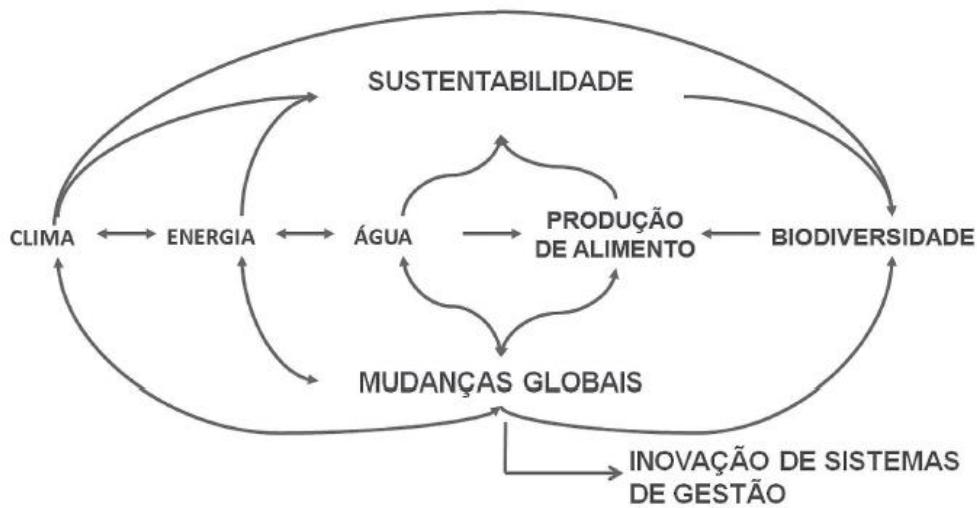
Com o propósito de diminuir as incertezas na avaliação de impactos de mudanças climáticas, procedimentos de correção do viés do modelo atmosférico é uma etapa fundamental no tratamento dos dados de entrada para a modelagem hidrológica (HAERTER et al., 2011). Dentre as metodologias utilizadas para a correção do viés da precipitação e temperatura modelados, destacam-se os métodos estatísticos, correções lineares e não-lineares (AHMED et al., 2013; LAFON et al., 2013).

### **3.6. Mudanças climáticas e planejamento de recursos hídricos**

Atualmente se têm discutido sobre recursos hídricos e mudanças climáticas, uma vez que as projeções futuras estão fortemente relacionadas com alterações nos padrões de precipitação e temperatura. Em seu último relatório, o IPCC (2013) afirma que as tendências de aumento de intensidade e variabilidade de precipitação poderá causar alterações no ciclo hidrológico e, consequentemente, terá efeito sobre a disponibilidade e distribuição temporal dos recursos hídricos.

De acordo com Tundisi (2008), alterações globais de eventos hidrológicos destacam-se como um dos principais fatores de contribuição para a “crise da água” no século XXI, podendo citar também a intensa urbanização e demanda de água para abastecimento, falta de infraestrutura em redes de distribuição de água e coleta de esgoto, falta de ações governamentais sobre recursos hídricos, entre outros. O autor ainda cita o papel dos recursos hídricos em todos os campos da sociedade e natureza, enfatizando a produção de alimentos, geração de energia e conservação da biodiversidade (Figura 5).

Figura 5 – Relação da água com diversos componentes socioambientais.



Fonte: Adaptado de Tundisi (2008).

As projeções para a América do Sul realizadas pelo IPCC apontam para possível redução do volume dos reservatórios de água no solo, mudança do tipo de vegetação em certas localidades, perda de biodiversidade e mudanças nos padrões de chuvas (IPCC, 2007a). No Brasil, os possíveis impactos no ciclo hidrológico decorrentes de mudanças climáticas associados ao aumento da demanda por água devido ao crescimento populacional e desenvolvimento econômico, pode acabar provocando grande pressão nos ecossistemas aquáticos (SAE, 2015).

O Nordeste brasileiro possui, naturalmente, grande potencial de evaporação das águas, uma vez que a região apresenta altas temperaturas e alta incidência de radiação solar (MARENGO, 2008). Projeções estimam que ocorram redução no padrão de precipitações, ainda durante o século XXI, principalmente na região Nordeste, sendo importante ressaltar, ainda, que o nível de incerteza de tais projeções é significativo (MARGULIS e DUBEUX, 2010).

Os impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos poderão atingir com mais magnitude a população que vive em áreas de vulnerabilidade hídrica, como o semiárido brasileiro. Os cenários propostos para o semiárido indicam um aumento na frequência e intensidade de períodos secos, sendo considerada a região mais sujeita aos riscos da variabilidade climática, podendo passar a ser considerada uma região árida e com grande processo de desertificação (MARENGO, 2014).

A provável diminuição do volume precipitado combinado com o aumento de temperatura pode aumentar ainda mais a competição já existente pelos recursos hídricos, ou seja, um semiárido mais árido com aumento na frequência de ocorrência de secas poderá ter influência direta na sobrevivência da população que vive na região (MARENGO et al., 2011).

Fica então evidente a importância de avaliar o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos e setores usuários. A Tabela 3 apresenta um resumo de algumas pesquisas realizadas nesse sentido.

Tabela 3 - Descrição de estudos sobre mudanças climáticas e seus impactos nos recursos hídricos

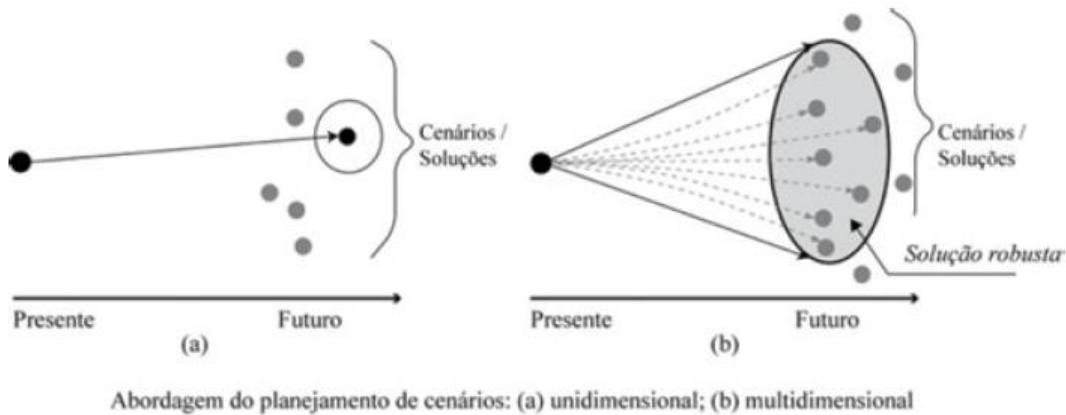
<b>Autores</b>	<b>Descrição da pesquisa</b>
Arancibia et al. (2017)	Empregou-se uma nova metodologia para identificar as políticas energéticas mais robustas frente a cenários de mudanças climáticas com o objetivo de auxiliar no planejamento da expansão da capacidade de geração futura.
Schmidt et al. (2018)	Os autores avaliaram, por meio do balanço hídrico climatológico, o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica para uma região do semiárido do Rio Grande do Norte. Puderam observar o aumento do déficit hídrico na região, sugerindo um agravamento da situação crítica de oferta hídrica.
Lopes et al. (2017)	Foram feitas análises de impactos das mudanças climáticas nas descargas máximas na região da Bacia Amazônica, sendo observado decrescimento das vazões máximas anuais, eventos extremos mais severos e menor duração média das cheias.
Gamarra-Rojas e Fabre (2017)	O estudo discutiu o impacto da agricultura para as mudanças do clima e também analisou os impactos das mudanças climáticas na agricultura familiar, dando foco ao semiárido brasileiro. Além disso, foram propostas medidas para o setor da agricultura para mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Fonte: Autoria própria (2019)

Diante disso, a gestão eficaz dos recursos hídricos é de suma importância para garantia do conforto hídrico, tanto no presente quanto no futuro, principalmente em regiões com histórico de escassez. Levando em consideração a complexidade e incertezas dos processos

envolvidos na avaliação de impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos, se faz necessário a criação de novas práticas de gestão de recursos hídricos (Figura 6).

Figura 6 – Diferentes abordagens para definição de estratégias de planejamento.



Fonte: Agencia Nacional de Águas (2016).

De acordo com a Agencia Nacional de Águas (2016), combinar ferramentas de prospectiva estratégica com planejamento baseado em cenários seria uma alternativa para a gestão de águas, ou seja, definir uma estratégia que seja robusta o suficiente para garantir o funcionamento do sistema frente aos diversos cenários alternativos.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Visão geral do estudo

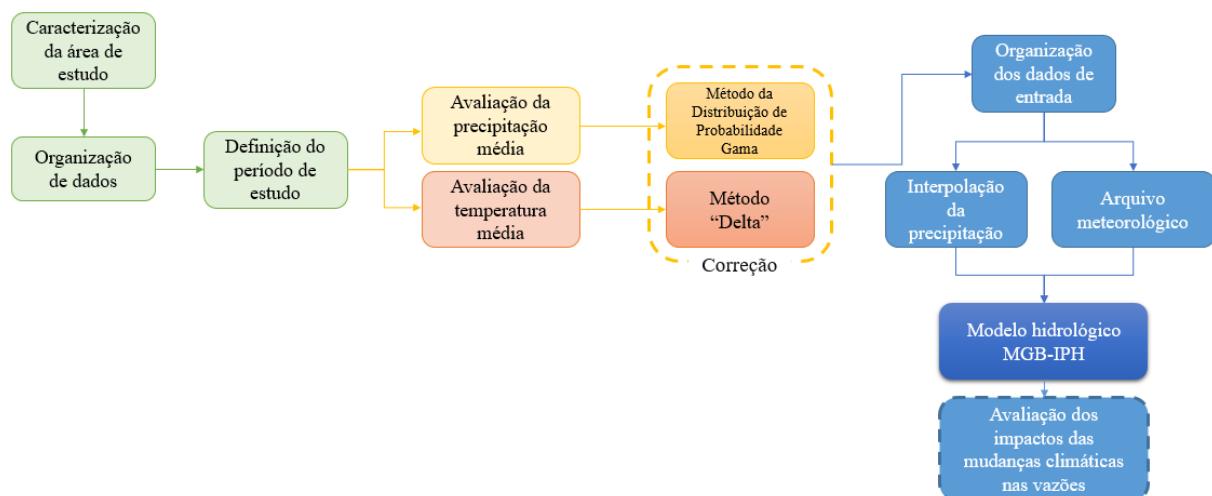
O presente estudo comprehende a avaliação dos impactos das mudanças climáticas em alguns elementos do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB.

Os dados de temperatura e precipitação simulados pelo modelo global MPI-ESM-LR (*Max Planck Institute-Earth System Model-Low Resolution*) aninhado ao modelo regional RCA4 (*Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4*) foram disponibilizados pelo BRAMAR – “Estratégias e tecnologias para a escassez de água no nordeste brasileiro”. Em seguida foram feitas análises dos dados de precipitação e temperatura, corrigidos e não-corrigidos, para melhor entendimento do viés do modelo atmosférico, bem como da redução do viés através da aplicação da correção.

Após a análise, os dados de temperatura e precipitação foram organizados em arquivos de entrada do modelo MGB-IPH para geração de vazão. Como o modelo calcula vazões diárias, além da apresentação dos hidrogramas diários, optou-se pelo uso de gráficos Box-Plot com objetivo de auxiliar a visualização geral do comportamento das suas variações.

A metodologia utilizada nesse estudo é melhor discutida nos itens a seguir. A Figura 7 apresenta de forma esquemática as etapas deste estudo.

Figura 7 – Fluxograma das etapas realizadas no estudo.

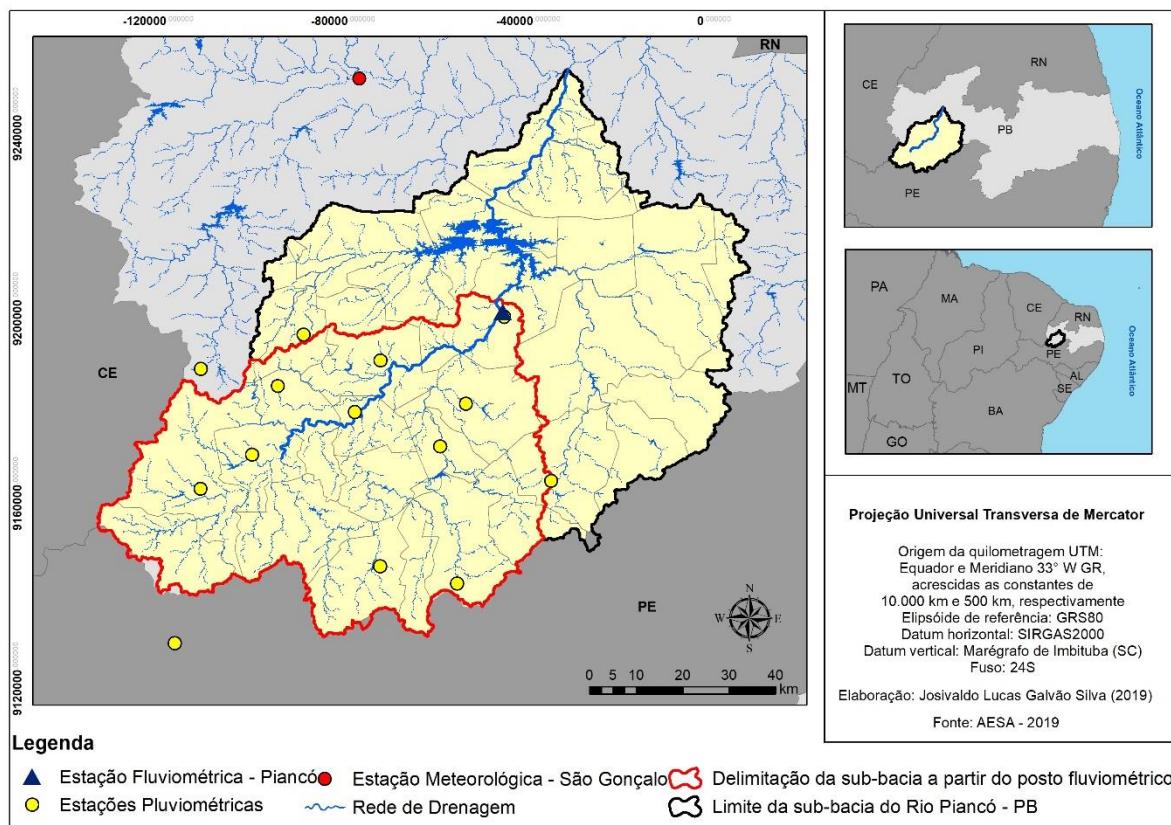


Fonte: Elaboração própria (2019).

## 4.2. Área de estudo

O local de estudo está inserido na bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB (Figura 8), que compreende uma área de 9.205 km<sup>2</sup> e é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. Para o estudo foi utilizada a sub-bacia delimitada pelo posto fluviométrico Piancó, compreendendo uma área de 4.603,39 km<sup>2</sup>. Segundo UFPB (2011) o posto fluviométrico Piancó não sofre influência dos reservatórios a montante da bacia hidrográfica.

Figura 8 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Piancó – PB.



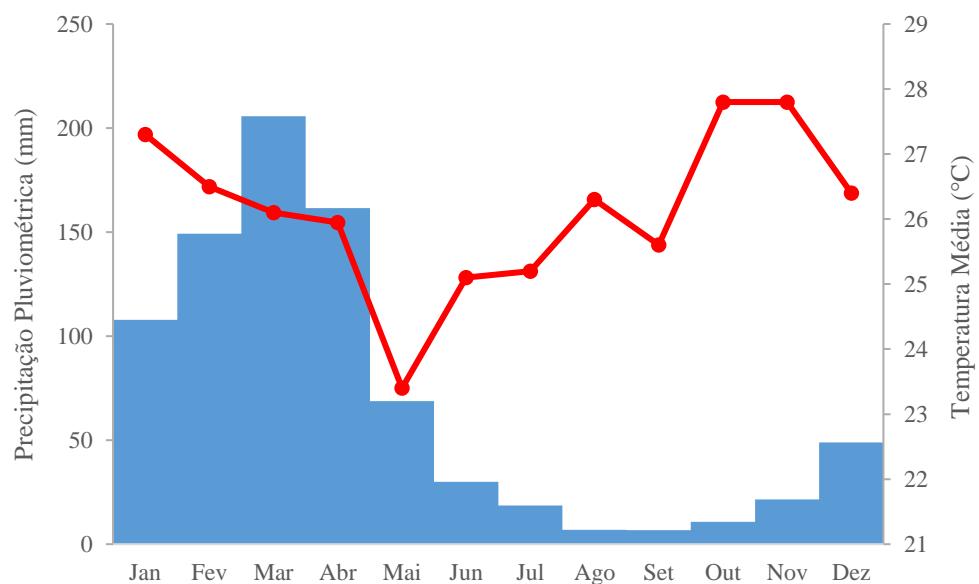
Fonte: Elaboração própria (2019).

A região apresenta clima semiárido quente pela classificação de Köppen (BSw'h'), é formado por solo predominantemente cristalino e arenoso, com vegetação do tipo caatinga (SCHMIDT e MATOS, 2013). Além disso, nesta bacia do Rio Piancó localiza-se o reservatório Coremas – Mãe D'água que fornece abastecimento de água para região urbana e rural, como também possibilita a realização de atividades de agricultura e pecuária (QUEIROZ et al., 2013).

A bacia do Rio Piancó é a segunda maior Unidade de Planejamento Hidrológico<sup>2</sup> (UPH) da bacia do Piranhas-Açu, possuindo 21,1% da área total das UPHs com 41 municípios totalmente ou parcialmente inseridos dentro de seu território (ANA, 2018). Está situada no extremo sudoeste do Estado da Paraíba, e faz fronteira com o Alto e Médio Piranhas, ao norte, a bacia do Rio Espinharas, a leste, o Estado do Ceará a oeste e o Estado de Pernambuco, ao sul.

A Figura 9 apresenta o climograma da região estudada, utilizando a série de dados obtidas por Felix (2015) para o período de 1970 a 2011. A precipitação na bacia apresenta períodos secos e chuvosos bem definidos. O período chuvoso acontece entre os meses de janeiro a maio, tendo março como mês de maior precipitação média, aproximadamente 206 mm. Já no período mais seco, destacam-se os meses de agosto e setembro com precipitação média de 7 mm. Em relação a temperatura média na bacia há grande amplitude térmica, variando entre 23,4 °C no mês de maio e 27,8 °C nos meses de outubro e dezembro.

Figura 9 - Climograma da bacia hidrográfica do Rio Piancó - PB.



Fonte: Adaptado de Felix (2015).

#### 4.3. Levantamento de dados

##### 4.3.1. Dados observados

A primeira aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na bacia do Rio Piancó foi realizada por Felix e Paz (2016), com objetivo de avaliar a eficiência do modelo na

<sup>2</sup> No plano de recursos hídricos de bacias hidrográficas, a subdivisão da bacia é feita em Unidades de Planejamento Hidrológico – UPH.

representação dos processos hidrológicos na região. Portanto, os dados observados de precipitação e temperatura, como demais informações necessárias utilizadas para modelagem hidrológica no presente trabalho foram concedidas pelos autores.

Os dados observados de precipitação pluviométrica foram obtidos por Felix (2015) na plataforma *online* HidroWEB da ANA (Agência Nacional de Águas), e cedidos também pela AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba) de 1970 a 2011. Na Tabela 4 são apresentadas as estações pluviométricas utilizadas. Os dados meteorológicos necessários como dados de entrada para o modelo MGB-IPH foram obtidos no banco de dados histórico do Instituto Nacional de Meteorologia, para a estação meteorológica convencional São Gonçalo, ver Figura 8.

Tabela 4 - Postos pluviométricos utilizados na pesquisa

<b>Nome do Posto</b>	<b>Código do Posto</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
Piancó	00737006	-07° 12' 51"	-37° 55' 33"
Princesa Isabel	00738013	-07° 44' 00"	-38° 01' 00"
Itaporanga	00738017	-07° 18' 00"	-38° 10' 00"
Conceição	00738020	-07° 33' 00"	-38° 31' 00"
Manaíra	00738015	-07° 42' 00"	-38° 10' 00"
Nova Olinda	00738014	-07° 28' 00"	-38° 03' 00"
Boa Ventura	00738012	-07° 24' 00"	-38° 13' 00"
Ibiara	00738018	-07° 29' 00"	-38° 25' 00"
Juru	00737016	-07° 32' 00"	-37° 50' 00"
Caiçara	00738028	-07° 51' 00"	-38° 34' 00"
Garrotes	00738019	-07° 23' 00"	-38° 00' 00"
Serra Grande	00738010	-07° 15' 00"	-38° 19' 00"
Bom Jesus	00738023	-07° 21' 00"	-38° 22' 00"
Bonito de Santa Fé	00738022	-07° 19' 00"	-38° 31' 00"

Fonte: Felix (2015).

#### 4.3.2. Dados simulados pelo modelo atmosférico

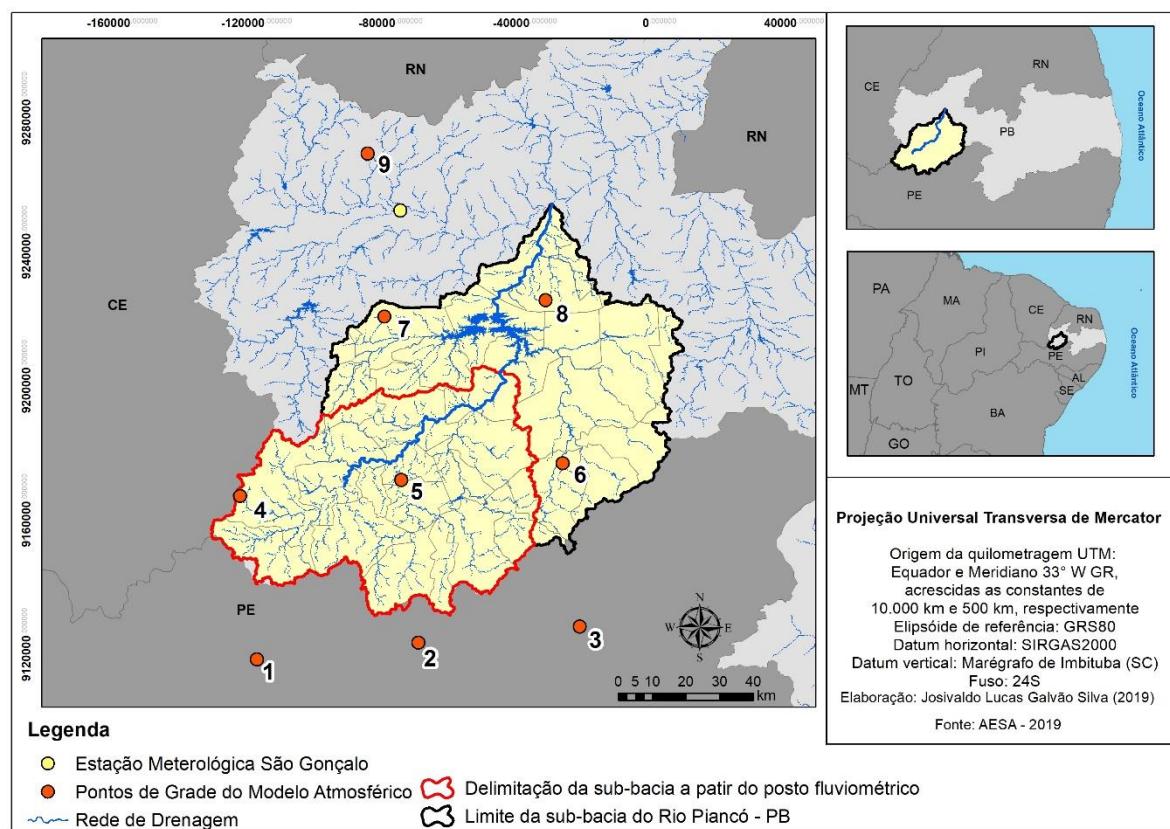
Os dados de temperatura e precipitação simulados pelo modelo regional RCA4 aninhado ao modelo global MPI-ESM-LR são disponibilizados no formato NetCDF através do portal

eletrônico *German Climate Computing Centre* (DKRZ) e *The Earth System Grid Federation*<sup>3</sup> (ESGF). No âmbito do projeto BRAMAR foi criado um script no software R que permitiu a extração desses dados em formato CVS (*Comma-Separated Values*).

Os dados levantados são referentes ao período *historical* (1951-2005), e ao período futuro (2006 – 2100) utilizando o RCP 4.5 como forçante radiativa de mudanças climáticas.

Foram escolhidos 8 pontos de grade para a extração dos dados de precipitação, distribuídos de forma uniforme sobre a sub-bacia do Rio Piancó (Figura 10). O ponto 9 se encontra afastado dos demais pois foi escolhido para extração dos dados de temperatura, para realizar a interpolação destes dados para o ponto onde está localizado a estação meteorológica de São Gonçalo. Na Tabela 5 são apresentados os pontos de grade utilizados na pesquisa.

Figura 10 – Localização dos pontos de grade do modelo atmosférico selecionados.



Fonte: Elaboração própria (2019).

<sup>3</sup> Endereço eletrônico: <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz>

Como o modelo hidrológico foi calibrado e validado por Felix (2015) para o período de 1970 – 2011, optou-se por fazer o recorte temporal da série de dados simulados em 3 períodos de 36 anos, apresentados a seguir:

- Período *Historical* (1970 – 2005)
- Período Futuro 1 (2006 – 2041)
- Período Futuro 2 (2042 – 2077)

Tabela 5 - Pontos de grade do modelo atmosférico utilizados na pesquisa.

Número	Latitude	Longitude
1	-07° 57' 17"	-38° 35' 39"
2	-07° 54' 37"	-38° 09' 35"
3	-07° 51' 53"	-37° 43' 31"
4	-07° 31' 00"	-38° 38' 21"
5	-07° 28' 22"	-38° 12' 21"
6	-07° 25' 38"	-37° 46' 22"
7	-07° 02' 06"	-38° 15' 06"
8	-06° 59' 23"	-37° 49' 11"
9	-06° 35' 50"	-38° 17' 51"

Fonte: Elaboração própria (2019).

#### 4.4. Modelo Atmosférico

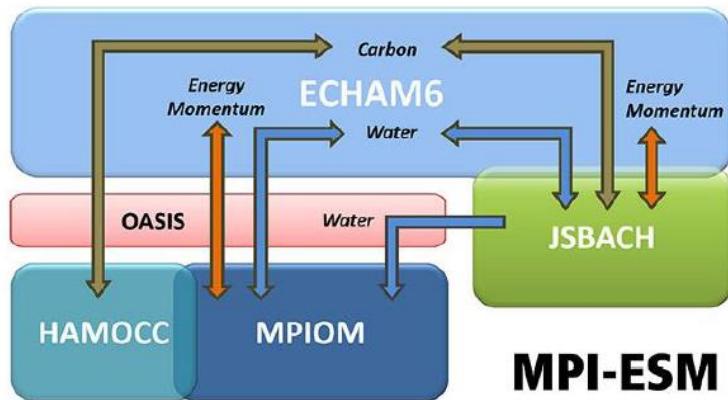
##### 4.4.1. Max Planck Institute-Earth Model-Low Resolution

O modelo global MPI-ESM-LR foi desenvolvido pelo Max Planck Institute – MPI (MARSLAND et al., 2003). Na sua formulação, o modelo acopla a atmosfera juntamente com o oceano e superfície terrestre por meio de trocas energéticas, gases e água. O MPI-ESM-LR utiliza o modelo ECHAM6 para os componentes de atmosfera, o modelo MPIOM e o HAMOCC para os componentes do oceano e seus processos biogeoquímicos, respectivamente, assim como o JSBACH para os componentes da biosfera terrestre (Figura 11).

O acoplamento entre os componentes do modelo MPI-ESM é realizado através do programa de acoplamento separado OASIS3 (VALCKE, 2013). Segundo Giorgetta et al. (2013), o modelo MPI-ESM foi desenvolvido para diversas configurações que diferem entre si na resolução, a configuração low resolution (LR) utiliza resolução horizontal de T63/1,9° e 47

níveis de pressão atmosférica, e para o oceano são utilizadas grades com resolução de 1.5° e 40 níveis verticais. A configuração detalhada do modelo MPI-ESM-LR pode ser encontrada em Stevens et al. (2013).

Figura 11 - Componentes do modelo MPI-ESM.



Fonte: Giorgetta et al. (2013).

#### 4.4.2. Rossby Centre Regional Atmospheric Model Version 4

Por sua vez, o RCA foi desenvolvido no *Rossby Centre*, e trata-se de um modelo regional utilizado para realização do *downscaling* das informações obtidas pelos MCGs. O modelo passou por diversas atualizações ao longo do tempo, chegando na versão 4 com substantivas melhorias físicas e técnicas, tais melhorias têm como objetivo tornar o modelo mais amigável para o usuário e que ele possa ser utilizado para qualquer localidade do globo sem que seja necessário refinamento adicional (STRANDBERG et al., 2014).

Portanto, o RCA4 utiliza dados fisiográficos globais validados, sendo eles o Gtopo30 para dados de topografia, ECOCLIMAP para a vegetação, profundidade de lagos e densidade de carbono no solo e conta com grades de alta resolução (50 km) para realização do *downscaling*. O detalhamento do modelo e todas as atualizações realizadas são apresentados em Strandberg et al. (2014).

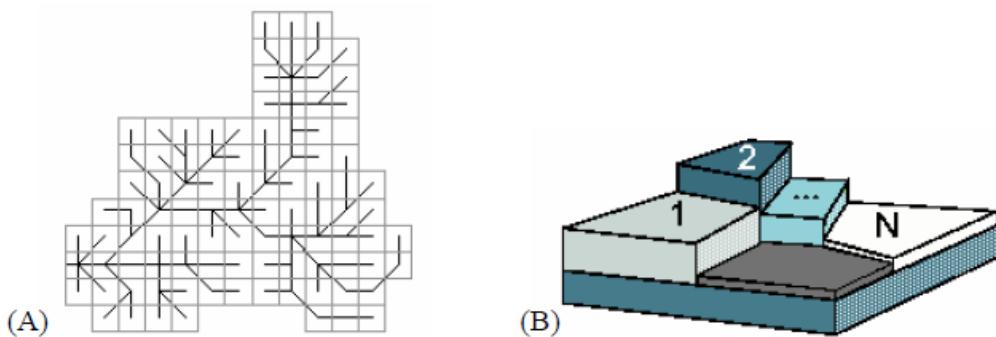
#### 4.5. Modelagem hidrológica

A modelagem hidrológica foi realizada utilizando o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias MGB-IPH. Trata-se de um modelo distribuído na escala diária desenvolvido para representar os processos de transformação da chuva em vazão em bacias hidrográficas de grandes dimensões, constituídos pelos seguintes módulos: balanço de água no solo;

evapotranspiração; escoamento superficial; escoamento subsuperficial e subterrâneo em cada célula; e escoamento na rede de drenagem (COLLISCHONN e TUCCI, 2001; COLLISCHONN et al., 2007).

A versão do modelo utilizada por Felix (2015) adota uma subdivisão da bacia do Piancó em uma grade retangular de  $0,05^\circ$  (5km x 5km), as células dessa grade interagem entre si por meio de canais de drenagem (Figura 12A). Cada uma dessas células é dividida em unidades de resposta hidrológica (URH) (Figura 12B), onde são consideradas as variações nas características físicas da bacia dentro das células (FELIX e PAZ, 2016). As URHs são definidas a partir da combinação de características sobre uso do solo, tipo de solo e cobertura vegetal.

Figura 12 - A) Exemplo da discretização da bacia em células e suas conexões por meio dos canais de drenagem. B) Esquema representando a divisão de N blocos de uso/tipo de solo dentro de uma célula do modelo.



Fonte: Collischonn (2001) e Collischonn e Tucci (2001).

O modelo utiliza as URHs da célula para o cálculo dos escoamentos resultantes, que por sua vez são somados e armazenados em reservatórios de acordo com a natureza do escoamento, podendo ser superficial, subsuperficial e subterrânea. É utilizado um reservatório linear simples para representar o aporte de cada escoamento gerado até a rede de drenagem (FELIX e PAZ, 2016).

Os parâmetros utilizados no modelo são divididos em dois tipos, os fixos e os calibráveis. Segundo Ferreira (2017), são parâmetros fixos aqueles que os valores podem ser medidos ou que não apresentam muita interferência nos resultados são definidos como parâmetros fixos, tais como albedo, índice de área foliar (IAF) e altura da cobertura vegetal. Já os parâmetros calibráveis são modificados no processo de ajuste entre o hidrograma observado e o calculado, por exemplo armazenamento de água no solo ( $W_m$ ), parâmetro de escoamento subsuperficial ( $K_{int}$ ), subterrâneo ( $K_{bas}$ ) e parâmetros para calibração da propagação superficial ( $C_s$ ) e subsuperficial ( $C_i$ ) nas células.

Como citado anteriormente o modelo MGB-IPH foi calibrado e validado para um período de 42 anos (1970 a 2011) por Felix (2015) e Felix e Paz (2016), os quais obtiveram, de forma geral, uma boa representação do regime de vazões.

Logo, com o modelo hidrológico calibrado, foram necessários ajustar os dados simulados pelo modelo atmosférico para que o MGB-IPH pudesse realizar os cálculos.

A precipitação em cada ponto de grade é interpolada para todas as células do modelo hidrológico, para todo o período de simulação, a partir de uma rotina computacional denominada INTERPLU. A rotina requer a discretização da bacia, o período tempo a ser interpolado, a série de dados e as coordenadas dos pontos. A interpolação é feita através do método do inverso da distância ao quadrado. O INTERPLU gera então um arquivo binário com a chuva interpolada para a bacia que será lido, posteriormente, pelo MGB-IPH para geração da vazão.

Os dados meteorológicos não são interpolados, têm-se que o modelo identifica o posto meteorológico mais próximo às células da discretização da bacia e faz uso desses dados. Ao se deparar com falhas nos dados meteorológicos, são usados os dados médios mensais do referido posto para os cálculos. Como nesta pesquisa estão sendo utilizados somente dados de temperatura e precipitação simulados pelo modelo atmosférico, foram adotados os valores médios observados para todos os outros elementos climáticos, de acordo com o aplicado por Felix (2015).

Foram realizadas 3 rodadas do modelo hidrológico, para o período *historical* do modelo (1970 – 2005), para o Futuro 1 (2006 – 2041) e Futuro 2 (2042 – 2077). As simulações foram realizadas de formas diferentes tendo em vista que cada período tem uma temperatura média diferentes a ser utilizada como correção de falhas nas séries de temperatura. A Tabela 6 apresenta detalhadamente as simulações hidrológicas, assim como os dados utilizados pelas mesmas.

Tabela 6 - Configuração das simulações do modelo hidrológico.

<b>Simulação</b>	<b>Período</b>	<b>Precipitação</b>	<b>Temperatura</b>
<i>Historical</i>	1970 – 2005	$P_{corr,HIS}$	$T_{obs^*}$
Futuro 1	2006 – 2041	$P_{corr,F1}$	$T_{corr,F1}$
Futuro 2	2042 – 2077	$P_{corr,F2}$	$T_{corr,F2}$

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a simulação do período *historical*, foi utilizada a temperatura observada uma vez que a correção pelo método “delta” não é capaz de realizar a correção da temperatura simulada pelo modelo para o período histórico (1970 – 2005), como será detalhado no item 4.8.

#### **4.6. Análise da precipitação**

A análise da precipitação teve como objetivo tanto avaliar a capacidade do modelo atmosférico em representar a sazonalidade, a dimensão da precipitação na bacia e também avaliar as projeções da precipitação para cenários futuros. Essa avaliação foi feita de maneira mais geral, na escala mensal e um valor médio para a bacia, para ter noção da subestimativa ou superestima da mesma e os erros que poderiam ser propagados para a geração do escoamento.

Assim, foram organizadas planilhas para a transformação dos dados diários simulados e observados (36 anos) em valores mensais. Logo após foram calculadas as médias mensais para cada posto e pontos de grade da bacia hidrográfica.

Para simplificação da análise, foi utilizada a precipitação média na bacia, obtida através do método do polígono de Thiessen (1911) e realizada através do *software ArcGis*.

O método consiste em:

- Ligar estações através de trechos retos;
- Traçar linhas perpendiculares sobre a mediatriz dos trechos que fazem a ligações das estações;
- Alongar as linhas perpendiculares até a interseção com outra linha perpendicular.

A área de influência de cada estação é definida pela interseção das linhas perpendiculares sobre a mediatriz. Portanto, têm-se que a precipitação média é expressa pela Equação 1:

$$P_m = \frac{\sum A_i P_i}{A} \quad (1)$$

Onde:

Pm é precipitação média (mm); Pi é a precipitação de dada estação; Ai é a área de influência de dada estação; A é a área total da bacia.

Por fim, foram elaborados gráficos comparando as precipitações simuladas com os dados históricos para melhor visualização da tendência do modelo e comportamento das previsões futuras.

#### **4.7. Análise da temperatura**

Semelhante à precipitação, a análise da temperatura objetiva avaliar a coerência do modelo atmosférico em simular o comportamento da temperatura ao longo do ano, verificar se há tendências na simulação e analisar as temperaturas simuladas para o clima futuro.

Como a bacia hidrográfica não apresenta estações meteorológicas distribuídas dentro da sua delimitação, sendo a estação meteorológica São Gonçalo a única estação próxima, foi realizada a interpolação dos dados dos dois pontos de grade (pontos 7 e 9) do modelo atmosférico mais próximo da estação (ver Figura 10).

A interpolação foi realizada através do método do inverso do quadrado da distância, descrito por Mello et al. (2003). O cálculo da interpolação é realizado da seguinte forma (Equação 2):

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \cdot T_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^2} \right)} \quad (2)$$

Onde:

T<sub>p</sub> é a temperatura interpolada; T<sub>i</sub> é o valor da temperatura de dado ponto vizinho; d<sub>i</sub> é a distância euclidiana entre dado ponto vizinho e o ponto amostrado.

Foi utilizada uma planilha eletrônica para o cálculo das médias mensais a partir dos dados diários da série estudada. Além disso, foram elaborados gráficos das temperaturas simuladas juntamente com a temperatura observada para auxiliar a realização das análises.

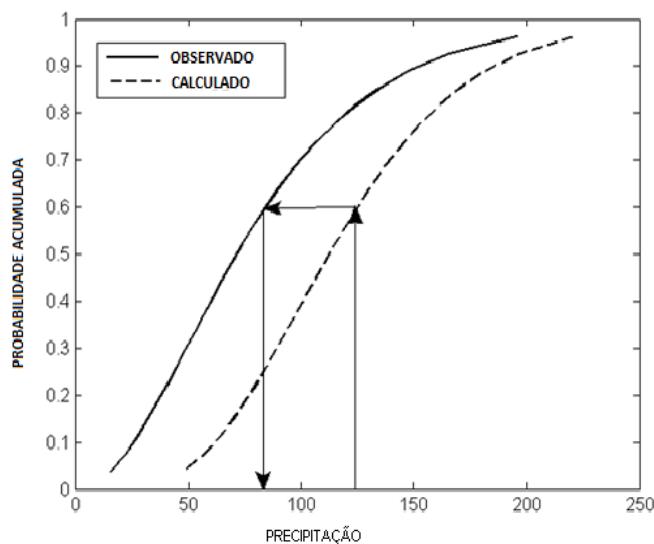
#### **4.8. Correção do viés do modelo atmosférico**

Foram aplicadas duas metodologias distintas para correção do viés apresentado pelo modelo atmosférico, uma para precipitação e outra para temperatura. A correção da temperatura foi realizada como parte metodológica deste trabalho, já a correção da precipitação foi feita no âmbito do projeto BRAMAR e disponibilizadas pelos mesmos.

A correção do viés da precipitação foi realizada com base na distribuição de probabilidade Gama. A abordagem consiste em ajustar uma distribuição gama aos dados do modelo regional e aos dados observados para cada ponto de grade do modelo e para cada mês do ano. Logo, a precipitação corrigida é identificada na função gama ajustada para o período em questão, com um percentil, e para o mesmo quantil é determinada a precipitação correspondente da distribuição gama ajustada para os dados observados (Figura 13) (BÁRDOSSY e PEGRAM, 2011).

Utilizou-se os dados mensais do *Climatic Research Unit* como dados observados, para respeitar a sazonalidade e a climatologia da série de precipitação. Após ser corrigida, houve o processo de desagregação da chuva para a escala diária através da proporção simulada pelo modelo atmosférico.

Figura 13 - Ilustração da correção da precipitação utilizando a função de distribuição gama.



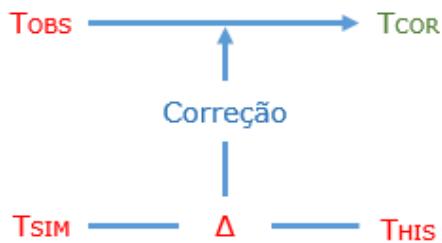
Fonte: Fernandes et al. (2016)

Já na correção da temperatura foi utilizado o método “delta” (Figura 14). Nessa abordagem a temperatura simulada não-corrígida para o período futuro é subtraída da temperatura simulada para o clima atual, resultando em um fator de alteração (delta), que por sua vez é adicionado às temperaturas observadas obtendo-se então a temperatura corrigida para o período futuro (TABOR e WILLIAMS, 2010).

A desvantagem dessa metodologia é que, diferentemente da correção feita para a precipitação, o método “delta” permite somente a correção de dados futuros extraídos do

modelo atmosférico, ou seja, não se corrige os dados para o período *historical* simulado pelo modelo.

Figura 14 – Esquema da metodologia do fator de alteração. (Tobs = Temperatura observada; Tcor = Temperatura corrigida; Tsim = Temperatura simulada para o período futuro; This = Temperatura simulada para o período histórico).



Fonte: Adaptado de Navarro-Racines et al. (2015).

#### 4.9. Análise da vazão

Foram realizadas comparações entre as vazões geradas para o período histórico simulado pelo modelo atmosférico e vazões geradas com os dados observados. Também foi feita uma análise comparativa entre as vazões simuladas para os dois períodos futuros.

Como o modelo hidrológico MGB-IPH simula as vazões de forma diária, escolheu-se tanto a apresentação dos dados em escala diária e valores médios mensais, para auxiliar a visualização e interpretação dos dados.

Além disso, escolheu-se a apresentação dos 36 valores mensais das séries futuras na forma de gráficos “Box-Plot”, onde é possível observar principalmente a dispersão dos dados. O “box-plot” apresenta o primeiro e terceiro quartis, que definem o tamanho da caixa e valor da mediana, que se encontra indicado em forma de traço dentro da caixa. Os *outliers* indicam os valores significantemente diferentes do restante dos dados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

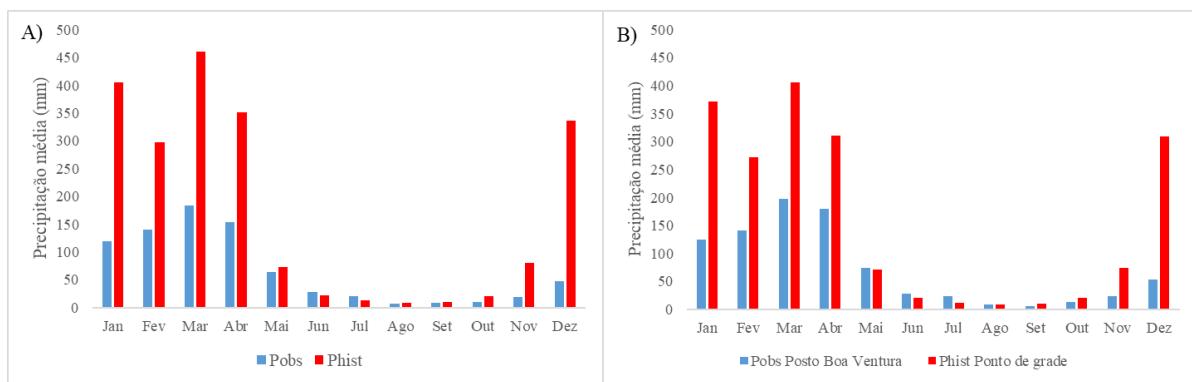
### 5.1. Avaliação da precipitação

#### 5.1.1. Precipitação não-corrigida simulada pelo modelo atmosférico para o período histórico

Para avaliar o desempenho do modelo atmosférico na simulação da precipitação foram consideradas as precipitações médias sobre a área da bacia. Na Figura 15A é possível observar que o modelo atmosférico conseguiu representar de forma satisfatória a sazonalidade ao longo do ano, ou seja, o modelo aferiu corretamente a distribuição temporal da precipitação na bacia.

Por sua vez, analisando o viés do modelo, percebe-se que principalmente no mês de dezembro e na quadra chuvosa (janeiro a abril) ocorre a superestimação da precipitação simulada pelo modelo, com aumentos de 614% para o mês de dezembro, 239% de acréscimo para o mês de janeiro, por exemplo. O modelo também apresentou tendência de subestimação da precipitação para os meses de junho e julho, sendo os únicos meses com esse viés, para junho foi observada uma redução de 21% e 41% para o mês de julho. No estudo feito por Figueiredo (2017), para a bacia hidrográfica do Rio Paraíba e utilizando o modelo regional MPI-ESM-RL-RCA4, foi observado também um viés do modelo em superestimação da precipitação durante o período de 1994 a 2005.

Figura 15 - A) Precipitação média simulada e observada para o período de 1970 - 2005. B) Comparação da precipitação média para o posto pluviométrico de Boa Ventura e o ponto de grade número 5.



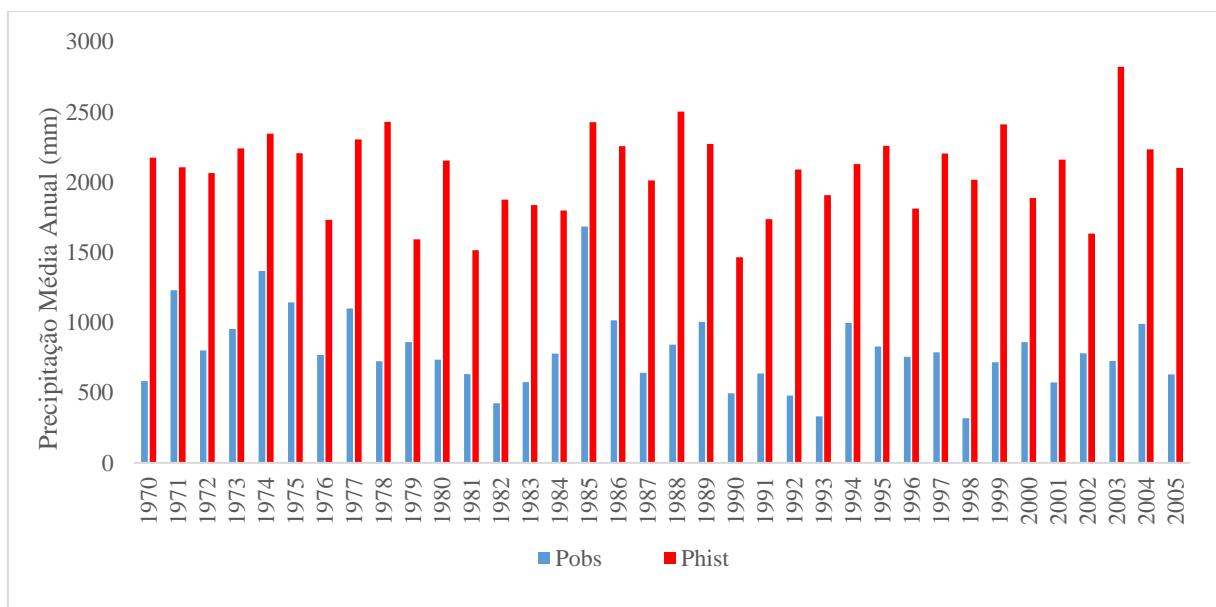
Fonte: Elaboração própria (2019).

A Figura 15B apresenta um comparativo entre a precipitação para o período de 1970 – 2005 para o posto pluviométrico de Boa Ventura e o ponto de grade número 5 do modelo atmosférico. Observa-se que a precipitação simulada no ponto de grade apresenta

comportamento semelhante à precipitação média sobre a bacia, ou seja, o modelo conseguiu representar de forma correta a sazonalidade mas superestimou a precipitação.

Com relação aos totais anuais, percebe-se a predominância da superestimação da precipitação ao longo do período estudado, dado o viés do modelo atmosférico em superestimar a precipitação em boa parte do ano (Figura 16). Destaca-se o ano de 1998 onde foi observado na bacia uma chuva média anual de 318 mm e simulado, para o mesmo ano, 2.016 mm representando, assim, uma superestimação de 533%. Também o ano de 1985, que foi observado uma precipitação média anual de 1.682 mm e tendo 2.427 mm como valor simulado para o mesmo ano, apresentando aumento de 44%.

Figura 16 - Precipitação média anual observada e simulada para o período de 1970 - 2005.



Fonte: Elaboração própria (2019).

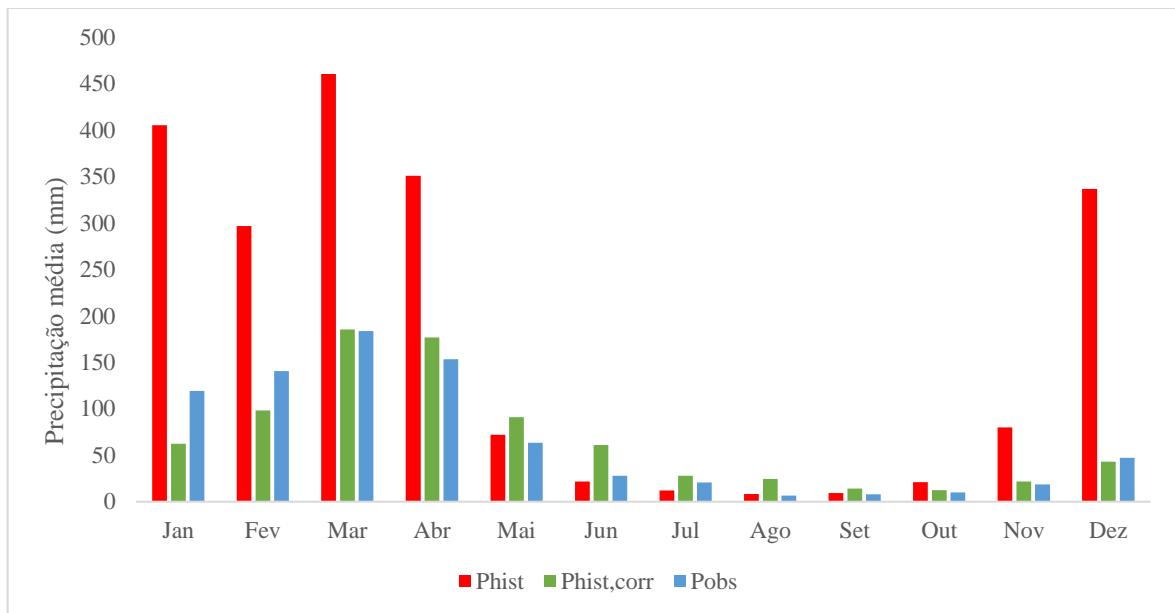
### 5.1.2. Precipitação corrigida simulada pelo modelo atmosférico para o período histórico

A análise com a precipitação corrigida mostrou que a precipitação simulada apresentou uma melhora significativa na representação quantitativa em relação aos dados observados (Figura 17).

A precipitação simulada passou a representar de forma mais correta a quantidade de precipitação observada para o período analisado. Para o período chuvoso, onde as precipitações foram superestimadas, a correção conseguiu diminuir substancialmente a diferença entre os valores simulados e observados, destacando o mês de março, onde foi simulada uma

precipitação média de 460 mm e após a correção esse valor abaixou para aproximadamente 185 mm.

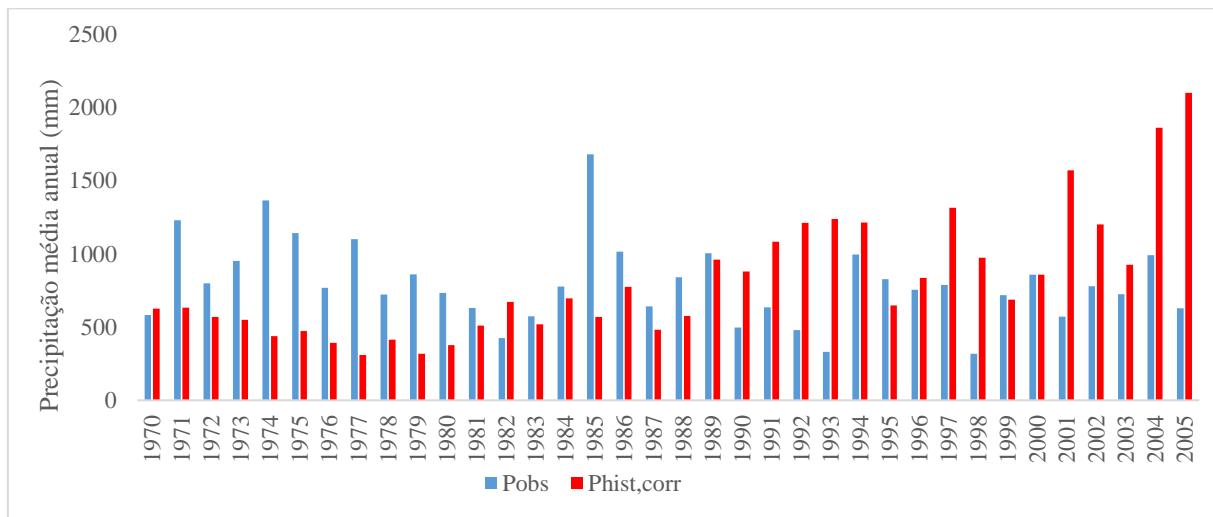
Figura 17 - Comparação entre precipitações médias não corrigidas ( $P_{hist}$ ), corrigidas ( $P_{hist,corr}$ ) e observadas ( $P_{obs}$ ) para o período de 1970 - 2005.



Fonte: Elaboração própria (2019).

A Figura 18 apresenta as precipitações médias corrigidas na forma de totais anuais. Observa-se a melhoria significativa da representação da precipitação modelada para o período histórico (1970 – 2005). Embora possam ser destacados anos onde ocorreram grandes disparidades entre valores observados e simulados, por exemplo, os anos de 1974, 1985 e 2005, em comparação às precipitações simuladas não corrigidas, nota-se a eficiência do método de correção do viés do modelo.

Figura 18 - Precipitação média anual corrigida para o período de 1970 – 2005.



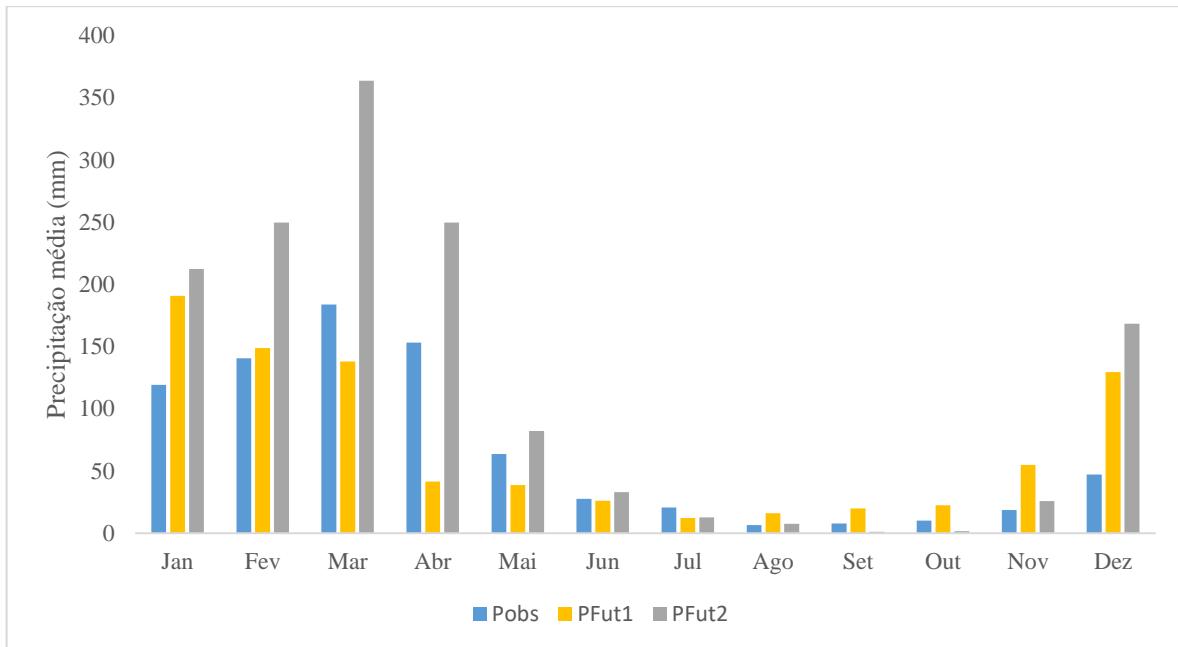
Fonte: Elaboração própria (2019).

### 5.1.3. Precipitação simulada para os períodos futuros

Sobre a precipitação simulada e corrigida para os períodos futuros, de modo geral, o modelo atmosférico apresentou previsão de aumento de precipitação no período chuvoso e redução no período seco (Figura 19). Para o Futuro 1 (2006 – 2041), há o predomínio de meses onde a precipitação média sofreu acréscimo em relação ao período observado, tais aumentos ocorreram nos meses de agosto a fevereiro, significando a previsão do aumento da precipitação no período seco da região. Porém, foi observada reduções da precipitação na bacia para os meses de março, abril e maio, que configuraram parte do período chuvoso.

No tocante a simulação da precipitação no Futuro 2 (2042 – 2077), as estimativas são de aumento da precipitação em 9 meses do ano, número maior que o previsto para o Futuro 1. O aumento mais significativo ocorreu no período chuvoso, principalmente no mês de março. Por outro lado, a previsão aponta para períodos secos mais rigorosos, destacando-se o mês de setembro, onde no Futuro 2 (2042 – 2077) apresentou precipitação média de 1,19 mm.

Figura 19 - Precipitação média corrigida simulada para os períodos de 2006 - 2041 e 2042 – 2077 em relação ao período observado (1970 – 2005).



Fonte: Elaboração própria (2019).

Os resultados das simulações para períodos futuros evidenciam o viés do modelo em superestimar a precipitação na área da bacia do Rio Piancó. Alves et al. (2007) encontraram também viés de superestimação da precipitação para maior parte dos estados do Nordeste Brasileiro, entre eles a Paraíba, porém é importante ressaltar que nesse estudo foram avaliados os modelos ECHAM4.5, MRE/97 e RAMS e utilizou-se o período de 1971-2000.

## 5.2. Avaliação da temperatura

### 5.2.1. Temperatura simulada para o período histórico

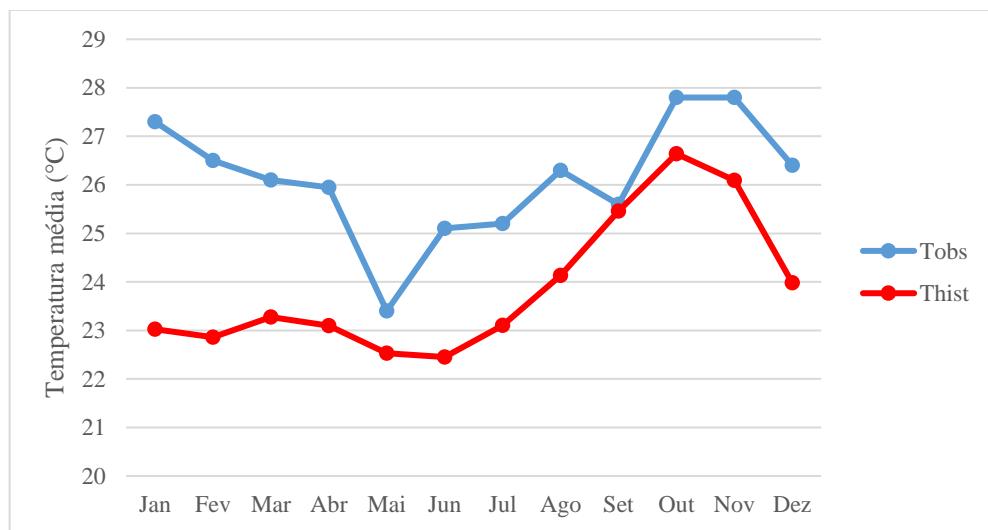
Para a avaliação da eficácia da simulação da temperatura pelo modelo atmosférico, utilizou-se as médias mensais interpoladas dos dois pontos de grade mais próximos ao posto São Gonçalo – INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Ao contrário da precipitação, o modelo atmosférico apresentou um viés de subestimação na modelagem da temperatura no período estudado (Figura 5). Ainda, é possível observar que o modelo conseguiu representar a sazonalidade da temperatura em quase todo do ano, no entanto nota-se grande disparidade dos valores nos meses de janeiro a abril.

Em relação ao período observado, a temperatura média simulada para o mês de janeiro apresentou redução de 4,3 °C. Por outro lado, nota-se o mês de setembro como sendo o mais

representativo, observando-se a diferença de apenas 0,2 °C entre a temperatura observada e simulada.

Figura 20 - Temperatura média observada e simulada não corrigida para o período de 1970 - 2005.



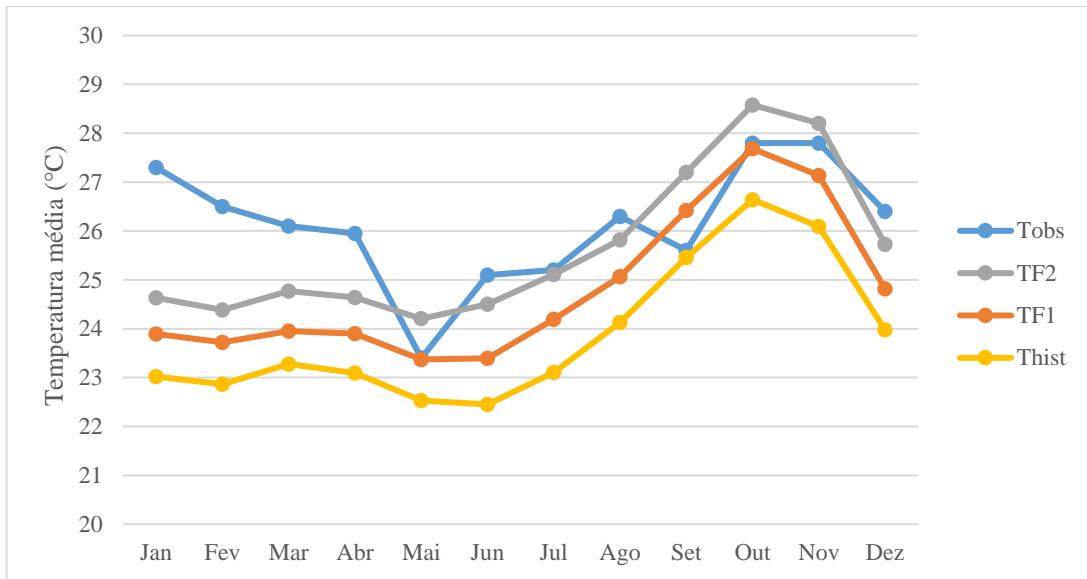
Fonte: Elaboração própria (2019).

### 5.2.2. Temperatura simulada para o período futuro

Foram analisadas primeiramente as temperaturas médias mensais simuladas não corrigidas. De forma geral, o modelo atmosférico projetou aumento de temperatura para os dois períodos estudados em relação ao período histórico simulado pelo modelo (Figura 21). Assim como avaliado no item anterior, a simulação para o clima futuro também subestima a temperatura para os meses de janeiro a abril.

Nota-se, portanto a forte influência do viés do modelo sobre a simulação da temperatura, ou seja, mesmo utilizando o cenário RCP4.5 para a rodada do modelo, na maior parte do período as temperaturas simuladas para ambos cenários futuros (2006 – 2041 e 2042 – 2077) não ultrapassam as temperaturas observadas (1970 – 2005).

Figura 21 - Temperatura média simulada não corrigida simulada para o Futuro 1 (2006 - 2041) e Futuro 2 (2042 - 2077).

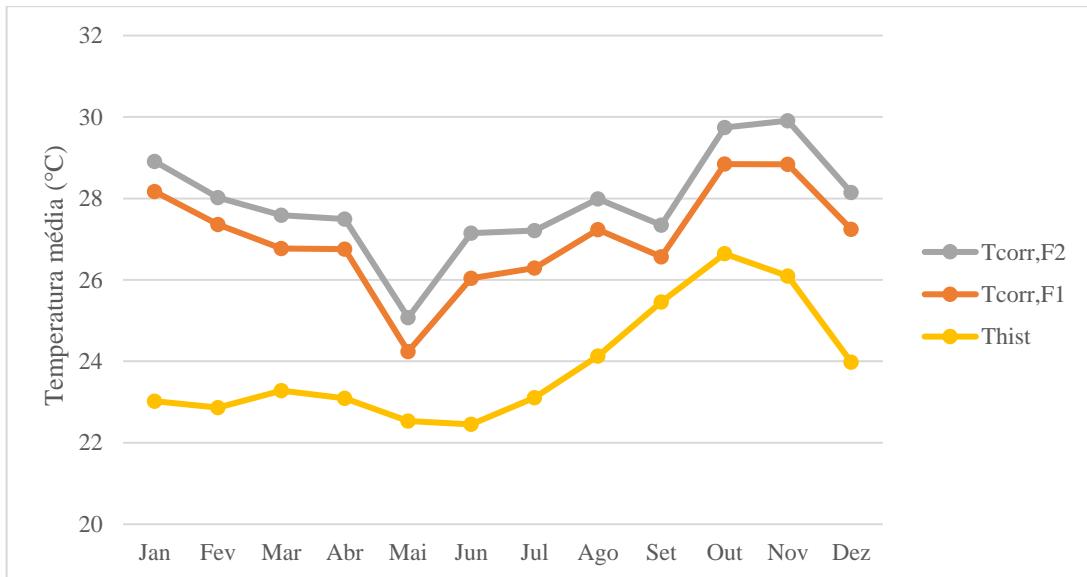


Fonte: Elaboração própria (2019).

Após a aplicação da correção, em ambos períodos futuros, o modelo atmosférico prevê aumento da temperatura em todo o ano (Figura 22). Para o Futuro 1 (2006 – 2041), o modelo sugere aumento de aproximadamente 1 °C em todo o ano em relação ao período observado (1970 – 2005), já para o Futuro 2 (2042 – 2077) o aumento é de aproximadamente 1,8°C ao longo do ano. Ainda para o Futuro 2 têm que os meses de junho, julho e novembro apresentaram 2°C de acréscimo de temperatura tomando como comparação o período observado, especificamente, o modelo atmosférico prevê uma temperatura média de 30°C para o mês de novembro.

Observa-se ainda pela Figura 22 que, a previsão do modelo para os dois futuros distintos não altera a amplitude térmica anual da bacia hidrográfica, pela própria natureza linear do método aplicado para a correção. Ainda, as projeções de aumento de temperatura podem impactar diretamente o ciclo hidrológico da região, principalmente no que concerne a evapotranspiração, que já apresenta valores potenciais de até 2.500 mm para o semiárido da Paraíba (SILVA e ALCANTARA, 2009).

Figura 22 - Projeções do modelo atmosférico da temperatura para os períodos de 2006 - 2041 e 2042 - 2077.



Fonte: Elaboração própria (2019).

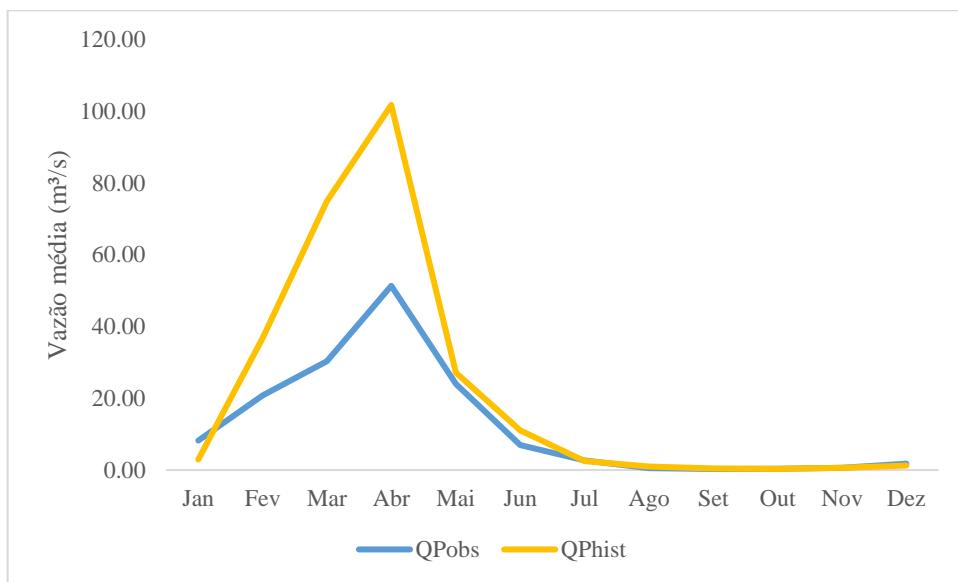
### 5.3. Análise da vazão

#### 5.3.1. Vazões para o período histórico

O modelo hidrológico simula os processos de conversão de chuva em vazão na escala diária, portanto, além do hidrograma na escala diária, optou-se também pela agregação desses dados em valores médios mensais para melhor visualização e interpretação dos dados.

A Figura 23 apresenta as vazões simuladas para o período de 1970 a 2005. Observa-se que o viés do modelo atmosférico em superestimar a precipitação no período chuvoso se refletiu nas vazões, apresentando claro acréscimo, enquanto que no período de estiagem as duas simulações convergem, tendo em vista que o modelo atmosférico conseguiu simular de forma mais satisfatória o período seco ao longo dos anos.

Figura 23 - Vazões médias mensais simuladas entre o período de 1970 a 2005.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Para o mês de fevereiro, a vazão calculada utilizando a precipitação do modelo atmosférico (QPhist) sofreu acréscimo de 76% em relação a vazão simulada com a precipitação observada (QPobs). O mês de março apresentou aumento de 147%, onde a QPobs apresentou o valor médio de 30 m<sup>3</sup>/s e para a QPhist o valor médio foi de 74 m<sup>3</sup>/s. Destaca-se ainda o mês de abril onde aconteceram os picos de vazão

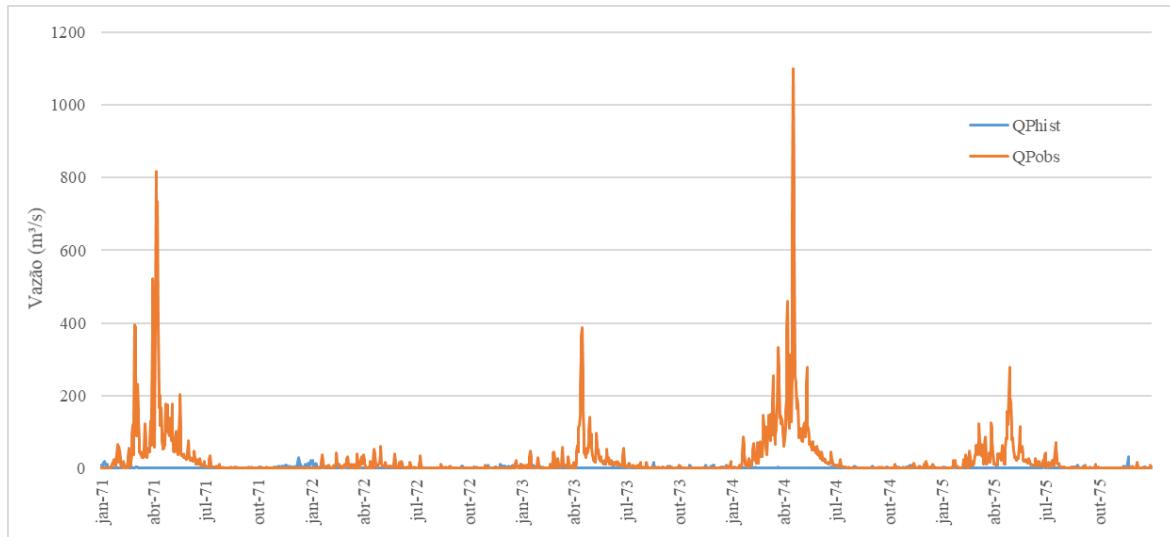
Embora a precipitação média corrigida tenha se assemelhado com a precipitação média observada, a diferença entre a resposta hidrológica do modelo para as duas simulações pode estar relacionada com a escala espacial do modelo, a dificuldade em obter precipitações precisas na escala diária e propagação de erro ou viés do modelo atmosférico para o modelo hidrológico. O mês de março, por exemplo, teve precipitações médias simuladas de 552 mm para o ano de 2002, 547 mm para o ano 2003 e 631 mm para o ano de 2004, que gerou vazões de 152 m<sup>3</sup>/s, 154 m<sup>3</sup>/s e 826 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

A Figura 24 e 25 mostram o hidrograma de vazão na escala diária para o período de 1971 a 1975 e 1991 a 1995, respectivamente. O hidrograma de vazão para o período de simulação completo está contido no Apêndice A.

A Figura 24 mostra as vazões simuladas com a precipitação corrigida do modelo atmosférico e com a precipitação observada. Percebe-se que as vazões geradas com a precipitação histórica não se assemelham às vazões simuladas com a precipitação observada,

apresentado valores pequenos ao longo de todo o período e também não demonstrando picos de vazões, esperadas para o período chuvoso da bacia.

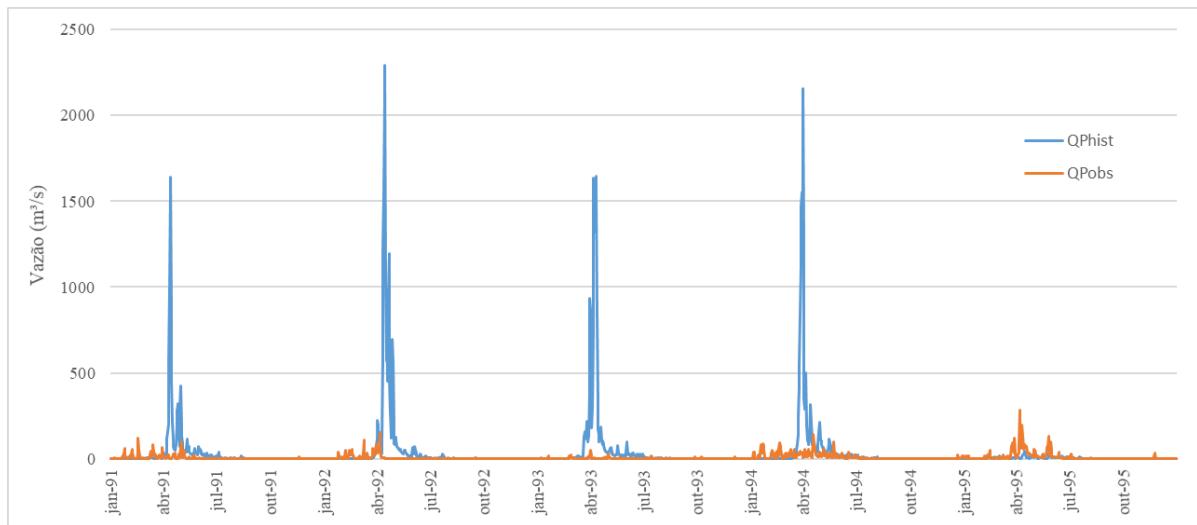
Figura 24 - Hidrograma de vazão para o período de 1971 a 1975.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Na Figura 25 nota-se que há a superestimação das vazões máximas para a simulação do modelo hidrológico com a precipitação histórica do modelo atmosférico, chegando a assumir o valor de 2290 m<sup>3</sup>/s. É possível observar ainda que as vazões simuladas com a precipitação do período histórico respeitam a sazonalidade ao longo do ano, representando bem os meses de cheia e seca, apesar dos valores discrepantes.

Figura 25 – Hidrograma de vazão para o período de 1991 a 1995.



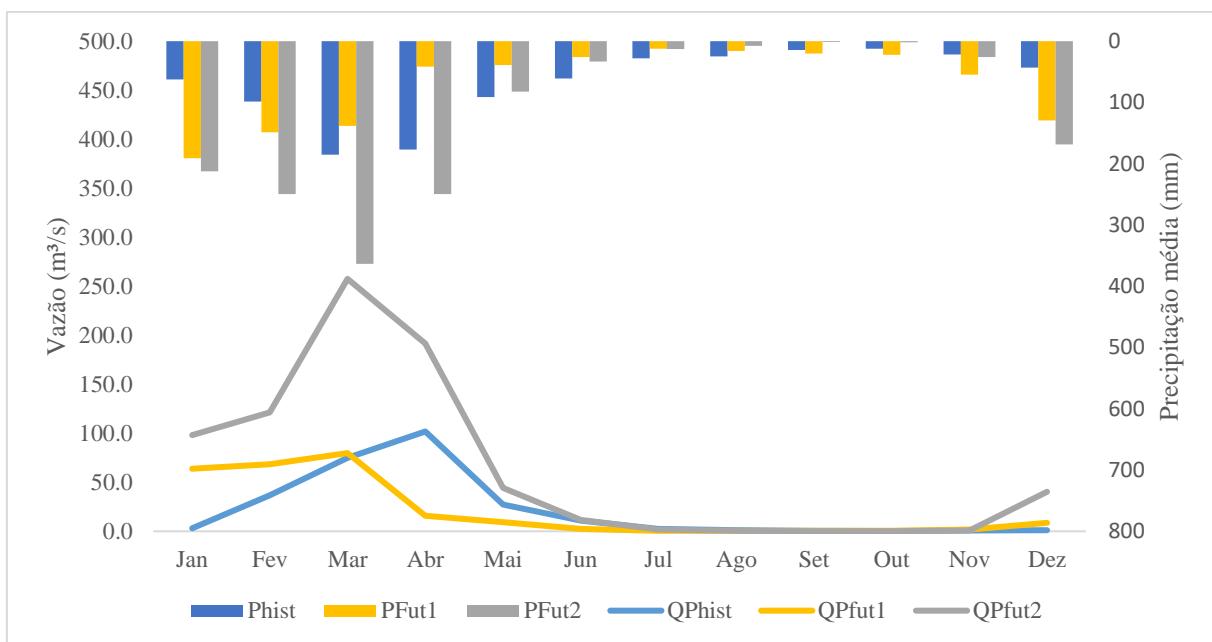
Fonte: Elaboração própria (2019).

### 5.3.2. Análise das vazões para o clima futuro

Com relação às vazões projetadas para o clima futuro, na Figura 26 é possível observar de forma geral que, para a janela de tempo do futuro 1 (2006 – 2041) ocorre diminuição de vazão para os meses de abril, maio e julho, já para o futuro 2 (2042 – 2077) são notáveis os acréscimos das vazões para o período chuvoso. Houve também a antecipação do pico de vazão para o período do Futuro 1.

No tocante ao período seco da região, ambos cenários futuros apresentam vazões calculadas muito próximas a zero ou nulas, evidenciando que mesmo com a projeção de aumento de vazão para o período chuvoso, o Rio Piancó mantém sua intermitência.

Figura 26 - Vazões médias mensais calculadas para o Futuro 1 (2006 - 2041) e Futuro 2 (2042 - 2077)



Fonte: Elaboração própria (2019).

Comparando os dois cenários futuros, a vazão de pico, que acontece no mês de março para ambos períodos, sofreu acréscimo de 222%, passando de 79,8  $m^3/s$  no Futuro 1 para 257,5  $m^3/s$  no Futuro 2. O maior aumento percentual observado foi no mês de abril, apresentando acréscimo de 1.115% na vazão média.

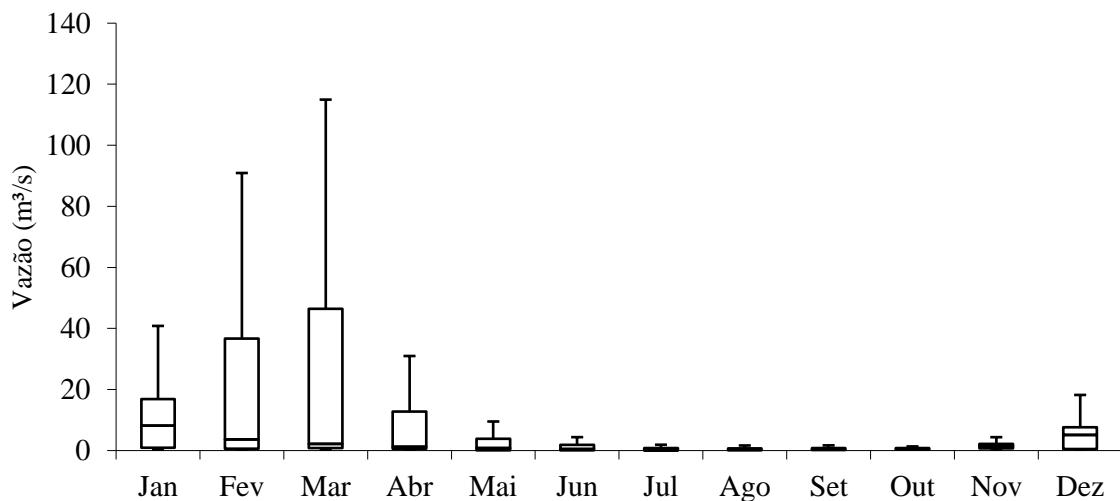
Na Figura 27, é apresentada na forma de gráfico “box-plot” as vazões médias de 36 anos de dados (2006 – 2041). Escolheu-se a retirada dos *outliers* superiores na apresentação visual, uma vez que tais valores promoviam o achatamento do gráfico dificultando sua visualização.

Os *outliers* superiores estão apresentados na Tabela 7, além disso é importante ressaltar que não foram observados *outliers* inferiores.

As maiores variações de vazão foram observadas entre os meses de janeiro a abril. Nota-se que para os meses de fevereiro, março e abril, a mediana do conjunto de dados se contra muito próximo ao primeiro quartil, evidenciando a assimetria nos valores calculados das vazões ao longo dos 36 anos analisados. Comparando a mediana com as vazões médias (ver Figura 24), é notável a influência de grandes valores de vazão na média.

As vazões de junho a novembro não apresentam variações, dado que o período é caracterizado por baixas chuvas, e portanto, são simuladas baixas vazões.

Figura 27 - "Box-plot" das vazões simuladas para o período de 2006 - 2041.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Com relação aos *outliers*, é possível observar que os valores máximos de vazão foram muito discrepantes em relação à distribuição das vazões. Os maiores valores foram simulados para o mês de janeiro com 1336,54 m<sup>3</sup>/s, fevereiro 1204,08 m<sup>3</sup>/s e março 1109,21 m<sup>3</sup>/s. Tais valores foram observados devido às altas chuvas projetadas pelo modelo para os anos de 2006 e 2007.

Tabela 7 - Valores dos *outliers* superiores do gráfico “Box-Plot” para o período de 2006 a 2041.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1336,54	1204,07	1109,21	178,81	244,23	27,37	6,57	2,75	2,52	-	6,27	138,57

Fonte: Elaboração própria.

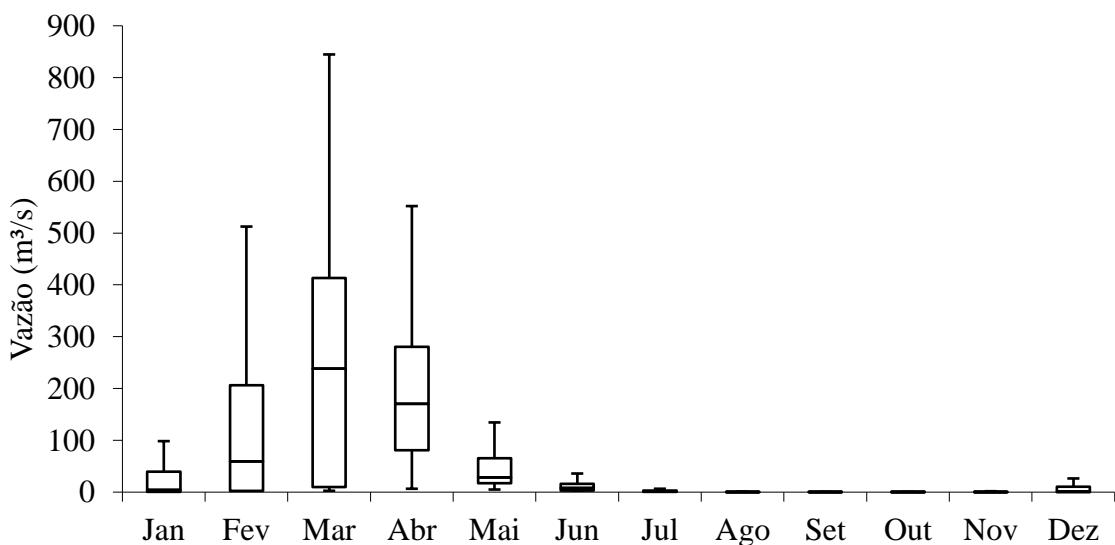
Já em relação ao período do Futuro 2 (2042 – 2077), é possível observar que nos meses de março e abril, embora demonstre grande dispersão no conjunto de vazões calculadas, os valores apresentaram maior simetria em torno da mediana que as vazões calculadas para o Futuro 1 (Figura 28). Os meses com o grupo de dados mais variados foram fevereiro, março e abril. Destaca-se o mês de março com a mais alta dispersão nas vazões, variando de 2 m<sup>3</sup>/s para o ano de 2042 a 844 m<sup>3</sup>/s no ano de 2060, a vazão mediana para esse mês foi de 174 m<sup>3</sup>/s.

Entre os meses de junho a dezembro foram observadas as menores vazões médias, destacando os meses de setembro e outubro que, em 36 anos de dados, apresentaram 30 anos de vazão média 0 m<sup>3</sup>/s.

De forma geral, observa-se forte influência da sazonalidade na distribuição de vazões calculadas para o Futuro 2. Enquanto no período chuvoso há grande variabilidade da vazão, principalmente o mês de março que em média é o mês mais chuvoso do ano, no período seco o achatamento da caixa do “Box-Plot” indica que todo o conjunto de dados de vazões para estão próximos de zero.

Além disso, fica evidente pela magnitude dos dados em relação ao período do Futuro 1 (2006 – 2041), que houve aumento nas vazões da bacia para o período do Futuro 2 (2042 – 2077), porém é importante ressaltar que quanto mais distante o tempo simulado, maiores as incertezas agregadas no processo da modelagem (ADAM et al., 2015).

Figura 28 - "Box-plot" das vazões simuladas para o período de 2042 - 2077.



Fonte: Elaboração própria (2019).

Para os valores dos *outliers* nota-se que não atingiram valores muito superiores aqueles que estão entre os primeiros e terceiros quartis (Tabela 8). Os meses de março, abril e maio não apresentaram *outliers* superiores, indicando a homogeneidade do conjunto dos dados ao longo dos 36 anos avaliados. O valor mais discrepante do *outlier* superior em relação à mediana do grupo de dados ocorreu para a simulação do mês de dezembro de 2067, onde foi calculado vazão média de 655,7 m<sup>3</sup>/s e a mediana para o mesmo mês é de 1,5 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 8 - Valores dos *outliers* superiores do gráfico “Box-Plot” para o período de 2042 a 2077.

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
657,83	554,08	-	-	-	37,58	7,95	2,97	0,64	0,19	6,94	655,71

Fonte: Elaboração própria (2019).

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho objetivou avaliar os impactos das mudanças climáticas nas vazões do Rio Piancó – PB, utilizando o modelo atmosférico regional MPI-ESM-LR-RCA4 e o modelo hidrológico MGB-IPH.

Em relação à precipitação simulada sobre a bacia, foi observado grande tendência do modelo atmosférico em superestimar as precipitações no período chuvoso e subestimá-las no período seco. Ainda que o modelo tenha previsto, de forma coerente, a sazonalidade das precipitações ao longo do ano sobre a bacia hidrográfica do Rio Piancó, destaca-se a sua dificuldade de representar a precipitação na escala diária. Para a janela de tempo futuro foram observadas reduções nas precipitações médias para o período entre 2006 – 2041, e substancial aumento nas precipitações médias para o período de 2042 – 2077.

No que diz respeito às temperaturas, a tendência apresentada pelo modelo atmosférico por sua vez foi de subestimação em comparação aos dados observados, principalmente para o início do ano. Foram observadas ainda, tendência de aumento de temperatura na bacia hidrográfica para as duas janelas de futuro estudadas, tendo quanto mais distante o período de tempo, maior o acréscimo nas temperaturas médias.

O método de correção da precipitação conseguiu melhorar a concordância entre os valores observados e simulados para o período de 1970 – 2005. Já em relação a abordagem aplicada para a correção do viés da temperatura, embora seja simples e de fácil aplicação, ela apresenta a desvantagem de não ser possível corrigir a temperatura para o período histórico. Adicionalmente, a etapa da correção é essencial na avaliação de impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos dado o forte viés apresentado pelos modelos atmosféricos.

De acordo com as análises das vazões calculadas para o período de 1970 – 2005 foi possível observar o impacto da superestimação da precipitação no regime hidrológico da bacia. No primeiro período de tempo foram observadas reduções nas vazões em parte do período chuvoso e no segundo período do clima futuro houveram aumentos substantivos das vazões, seguindo o mesmo padrão de projeções de precipitação. Fica evidenciado então, que nesse estudo as vazões se mostraram mais sensíveis às alterações de precipitação que de temperatura. Observou-se que o efeito do viés do modelo atmosférico na precipitação foi amplificado no escoamento gerado pelo modelo hidrológico MGB-IPH.

De forma geral, tem-se ainda que os impactos das mudanças climáticas nas vazões calculadas, ou seja, a diferença das vazões entre o clima atual e clima futuro tendem a ser mais intensos no período de tempo mais distante (2042 – 2077) indicando aumento da incerteza quanto maior for a janela de tempo analisada.

Para futuros estudos nessa linha, recomenda-se a utilização de uma diversidade maior de modelos atmosféricos, dado que cada modelo apresenta um viés diferente e leva-los em consideração pode auxiliar na determinação de diversos cenários possíveis para um mesmo período de tempo. Recomenda-se também realizar testes de sensibilidade na geração de vazão na bacia e um estudo mais aprofundado na correção do viés do modelo atmosférico.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAM, K. N. et al. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 999-1007, Outubro 2015.
- ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, Julho 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Mudanças Climáticas e Recursos Hídrico: avaliações e diretrizes para adaptação**. Brasília, p. 93. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu: Resumo Executivo. Brasília, p. 169. 2018.
- AGUIAR, L.; AMARO, V. Possíveis efeitos das mudanças climáticas no litoral oriental do RN. **Revista do CERES**, Caicó, v. I, n. 2, p. 108-114, Setembro 2015.
- AHMED, K. F. et al. Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the US northeast. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 320-332, 2013.
- ALVES, J. M. B. et al. Um estudo inter-comparativo de previsão sazonal estatística-dinâmica de precipitação no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 354-372, 2007.
- ARANCIBIA, A. L. S. et al. Políticas energéticas robustas sob condições de mudança climática. In: **Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH**, Florianópolis, 2017.
- BAE, D.-H.; JUNG, I.-W.; LETTENMAIER, D. P. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 401, p. 90-105, Fevereiro 2011.
- BARBRAUD, C.; WEIMERSKIRCH, H. Antarctic birds breed later in response to climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 103, n. 16, p. 6248-6251, Abril 2006.
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, 2011.
- BASTOLA, S.; MURPHY, C.; SWEENEY, J. The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. **Advances in Water Resources**, v. 34, p. 562-576, Janeiro 2011.
- BETTS, R. et al. Como modelamos o clima. In: MARENKO, J. A., et al. **Riscos das Mudanças no Brasil: Análise Conjunta Brasil-Reino Unido sobre os Impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia**. Brasília: MCT/INPE/MOHC, 2011. p. 56.

BJØRNÆS, C. A guide to Representative Concentration Pathways, 2015. Disponível em: <[https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/communication/Im\\_Fokus/IPCC\\_2013/uk\\_ipcc\\_A\\_guide\\_to\\_RCPs.pdf](https://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/communication/Im_Fokus/IPCC_2013/uk_ipcc_A_guide_to_RCPs.pdf)>. Acesso em: 06 Dezembro 2018.

BRAGA, A. C. et al. Integrated atmospheric and hydrologic modelling for short-term and basin-scale forecasts in a tropical semi-arid context. **IAHS PUBLICATION**, v. 313, p. 134, 2007.

BRASIL. Presidência da República (PR). **Lei n° 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e dá outras providências**. Brasília, Dezembro 2009.

BROWN, C. et al. Analysing uncertainties in climate change impact assessment across sectors and scenarios. **Climatic Change**, v. 128, p. 293-306, Fevereiro 2015.

CHRISTENSEN, J. H. et al. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, 2008.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). UFRGS. Porto Alegre, 270p., 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Ajuste multi-objetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 6, n1, p. 95-118, 2001.

COLLISCHONN, W. et al. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, 52-5, p.878-895, 2007.

CONTI, J. B. Considerações sobre as mudanças climáticas globais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 70-75, 2005.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. D. S.; MANZI, A. O. Impacto das modificações da cobertura vegetal no balanço de água na amazônia: um estudo com modelo de circulação geral da atmosfera (MCGA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, p. 153-167, 2006.

DESER, C. et al. Uncertainty in climate change projections: the role of internal variability. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 527-546, Fevereiro 2012.

ESCARIÃO, R. D. et al. Influência do Modelo Hidrológico na Avaliação da Sensibilidade dos Recursos Hídricos a Cenários de Mudanças Climáticas em Região Semiárida. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 81-91, Julho 2012.

FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 243-254, Janeiro 2014.

FELIX, W. de S. **Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). UFPB, João Pessoa, 126p, 2015.

FELIX, W. de S.; PAZ. A. R. da. Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, Porto Alegre. v. 21, p. 1-14, 2016.

FERREIRA, P. M. de L. **Influência da seleção das funções objetivo na calibração do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). UFPB, João Pessoa, 146p, 2017.

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.

FERNANDES, W. de S. et al. Avaliação do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico na bacia do óros usando os modelos de mudanças climáticas do IPCC-AR4 para o cenário A1B. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica**, v. 9, n. 1, p. 28-48. 2016.

FIGUEIREDO, E. A. **Avaliação da precipitação simulada pelo modelo climático global MPI-ESM-LR e pelo modelo climático regional MPI-ESM-LR RCA4 na bacia hidrográfica do Rio Paraíba.** (Trabalho de Conclusão de Curso) Univeridade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 70. 2017.

FODEN, W. B. et al. Identifying the World's Most Climate Change Vulnerable Species: A Systematic Trait-Based Assessment of all Birds, Amphibians and Corals. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, p. 13, Junho 2013.

GAMARRA-ROJAS, G.; FABRE, N. Agroecologia e mudanças climáticas no Trópico Semiárido. **REDES: Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 22, n. 2, p. 174-188, 2017.

GIORGETTA, M. A. et al. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, n. 3, p. 572-597, 2013.

GONDIM, R. S. et al. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 1657-1664, Dezembro 2008.

GONDIM, R. S. et al. **Metodologia para Avaliação de Impactos de Mudanças Climáticas na Demanda de Água para a Agricultura Irrigada em Nível de Bacia Hidrográfica.** 1<sup>a</sup>. ed. Fortaleza: Embrapa Agroindustria Tropical, 2011.

GUO, D.; JOHNSON, F.; MARSHALL, L. Assessing the Potential Robustness of Conceptual Rainfall-Runoff Models Under a Changing Climate. **Water Resources Research**, v. 54, n. 7, p. 5030-5049, Junho 2018.

HAERTER, J. et al. Climate model bias correction and the role of timescales. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1065-1073, 2011.

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, 2007a. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_full\\_report.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment**

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. IPCC, 2007b. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4\\_wg1\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2018.

**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 Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_all\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2018.

**INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).** **Climate Change 2014:** Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Disponível em: < [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)>. Acesso em: 29 nov. 2018.

JIANG, T. et al. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. **Journal of Hydrology**, v. 336, p. 316-33, Abril 2007.

KADDO, J. R. Climate Change: Causes, Effects, and Solutions. **A with Honors Projects**, 2016.

KATZ, R. W. et al. **Uncertainty analysis in climate change assessments**, 2013. Disponível em: <<http://opensky.ucar.edu/islandora/object/articles%3A13013/datastream/PDF/download/citation.pdf>>. Acesso em: 07 Dezembro 2018.

LAFON, T. et al. Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: a comparison of methods. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 6, p. 1367-1381, 2013.

LOPES, L. G. et al. Projeções de descargas extremas sob impactos das mudanças climáticas na região amazônica. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, 2017.

MACHADO, R. D.; ROCHA, R. P. Previsões climáticas sazonais sobre o Brasil: Avaliação do REGCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 121-136, 2011.

MAN, Y. C. et al. A intensificação do efeito estufa planetário e a posição dos países no cenário internacional. **Ra'e Ga - O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, n. 5, p. 99-124, 2001.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revisa USP**, São Paulo, n. 103, p. 25-32, 2014.

- MARENGO, J. A. et al. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. D. S., et al. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. Cap. 13, p. 383-416.
- MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. (Eds.). **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades**. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010.
- MARSLAND, S. et al. The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. **Ocean Modelling**, v. 5, p. 91-127, 2003.
- MELLO, C. R de et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, 2003.
- MENDONÇA, F. Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica – notas introdutórias. **Terra Livre**, São Paulo, v. I, n. 20, p. 205-221, Julho 2003. ISSN 0102-8030.
- MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, Fevereiro 2010.
- MUERTH, M. et al. On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 10205-10243, 2012.
- MURPHY, M. J. et al. Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. **Nature**, v. 430, p. 768-772, Agosto 2004.
- NAKICENOVIC, N. et al. **Special Report on Emissions Scenarios**. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, p. 599. 2000.
- NAVARRO-RACINES, C. E.; TARAPUES-MONTENEGRO, J. E.; RAMÍREZ-VILLEGAS, J. A. Bias-Correction in the CCAFS-Climate Portal: A Description of Methodologies. Decision and Policy Analysis (DAPA) Research Area. **International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia**, 2015.
- NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos Científicos das Mudanças Climáticas**. 1<sup>a</sup>. ed. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.
- NOBRE, P.; MOURA, A. D.; SUN, L. Dynamical downscaling of seasonal climate prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's regional spectral models at IRI. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 12, p. 2787-2796, Dezembro 2001.
- NORDHAUS, W. Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. **American Economic Journal: Economic Policy**, v. 10, n. 3, p. 333-360, 2018.
- NUNES, L. H. Repercussões globais, regionais e locais do aquecimento global. **Terra Livre**, São Paulo, v. I, n. 20, p. 101-110, Julho 2003. ISSN 0102-8030.
- O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

PAIVA, R. C. D. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: Bacia do Rio Solimões.** Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 168. 2009.

PAZ, A. R. D.; COLLISCHONN, W. Rede de drenagem para modelagem hidrológica distribuída. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH**, São Paulo, 2007.

QUEIROZ, M. M. F.; DANTAS, E. F; SILVA, A. L. Qualidade e quantidade da água do rio Piancó, Teibutário do rio piranhas açú na região nordeste. **Revista Verde**, v. 8, n. 2, p. 49-58, 2013.

RIAHI, K. et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

RIEBEEK, H. Global Warming. **Earth Observatory**, 2010. Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming/page1.php>>. Acesso em: 29 nov. 2018.

RIGNOT, E. et al. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 5, 2011.

ROCHA, M. T. **Aquecimento Global e o Mercado de Carbono:** Uma Aplicação do Modelo CERT. 196 p. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTANA, T. B.; SILVA, B. C. D.; SANTOS, A. H. M. (2011). Estimativa de impactos de mudanças climáticas nas vazões do rio São Francisco. In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, p. 17, 2011.

SANTOS, L. L. D. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **RBGF - Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 2, n. 03, p. 01-19, Setembro 2009.

SCHMIDT, D. M. et al. Variabilidade Climática da Disponibilidade Hídrica na Região Semiárida do Estado do Rio Grande do Norte. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 3, p. 483-491, 2018.

SCHMIDT, D. M; MATTOS, A. Dinâmica dos regimes de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do alto Piranhas-Açu-PB. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 67-77, 2013.

SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS (SAE). **Brasil 2040:** Resumo Executivo. Brasília, p. 58. 2015.

SEGUÍ, P. Q. et al. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. **Journal of Hydrology**, v. 383, p. 111-124, Março 2010.

SILVA, D. F.; ALCÂNTARA, C. R. Déficit Hídrico na Região Nordeste: Variabilidade Espaço-Temporal. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 8, n. 1, 2015.

- SILVA, M. E. S.; GUETTER, A. K. Mudanças climáticas regionais observadas no estado do Paraná. **Terra Livre**, São Paulo, v. I, n. 20, p. 111-126, Julho 2003.
- STEVENS, B. et al. 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. et al. CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4. **Report Meteorology And Climatology**, v. 116, p.1-45, 2014.
- TABOR, K.; WILLIAMS, J. W. Globally downscaled climate projections for assessing the conservation impacts of climate change. **Ecological Applications**, v. 20, n. 2, p. 554-565, 2010.
- TEBALDI, C. et al. Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1524-1540, Maio 2005.
- TENG, J. et al. Estimating the Relative Uncertainties Sourced from GCMs and Hydrological Models in Modeling Climate Change Impact on Runoff. **Journal of Hydrometeorology**, v. 13, p. 122-139, Fevereiro 2012.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, v. 456, p. 12-29, 2012.
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly weather review**, v. 39, n. 7, p. 1082-1089, 1911.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005. 678 p.
- TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 07-10, 2008.
- UFPB. Universidade Federal da Paraíba. 2001. Regionalização de vazões características de longo termo para os rios da sub-bacia 37. 40p. Convênio n. 0007/2000 entre a ANAELL e a Universidade Federal da Paraíba – Campus II.
- VALCKE, S. The OASIS3 coupler: a European climate modelling community software. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 373-388, 2013.
- VALÉRIO, E. L. S. et al. Avaliação dos efeitos de mudanças climáticas na bacia do Rio Catu - BA. In: **Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Brasília, 2015.
- VALVERDE, M. C.; MARENKO, J. A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a américa do sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 125 - 145, 2010.
- VAN VUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climate Change**, p. 6-31, Agosto 2011.
- VELTRONE, A. R. A formação do IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change) enquanto comunidade epistêmica. **Revista de História e Geografia ágora**, Santa Cruz do Sul, v. 19, n. 1, p. 133-144, Janeiro 2017. ISSN 1982-6737.

VICUNA, S. et al. The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 43, n. 2, p. 482-498, Abril 2007.

XU, C.-Y.; WIDÉN, E.; HALLDIN, S. Modelling Hydrological Consequences of Climate Change—Progress and Challenges. **Advances in atmospheric sciences**, v. 22, n. 6, p. 789-997, 2005.

**APÊNDICE A**