



**SANY LAISLA DE PAULA**

**PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA DISPONIBILIDADE  
HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE,  
SUDESTE DO BRASIL, SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS  
CLIMÁTICAS**

**LAVRAS-MG  
2019**

**SANY LAISLA DE PAULA**

**PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE, SUDESTE DO BRASIL, SOB CENÁRIOS DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Paula, Sany Laisla de.

Projeções de mudanças na disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do Rio Grande, Sudeste do Brasil, sob cenário de mudanças climáticas / Sany Laisla de Paula. - 2019.

66 p. : il.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Mudanças climáticas. 2. Eta-HadGEM2-ES. 3. Eta-MIROC5. I. Mello, Carlos Rogério de. II. Título.

**SANY LAISLA DE PAULA**

**PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO GRANDE, SUDESTE DO BRASIL, SOB CENÁRIOS DE  
MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**PROJECTIONS OF CHANGES IN WATER AVAILABILITY IN RIO GRANDE  
WATER BASIN, SOUTHEAST BRAZIL UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de abril de 2019.

DSc. Marcelo Ribeiro Viola

UFLA

DSc. Chou Sin Chan

CPTEC/INPE

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2019**

*Aos meus pais, Alessandra e Antônio, e ao meu  
irmão Davi, pela compreensão e amor infinito.  
Vocês são meu norte e meu porto seguro.  
Obrigada por acreditarem nos meus sonhos!*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me abençoar grandiosamente, de maneira que nem sei se mereço. Por ser minha força e ter me dado coragem para seguir meu caminho, e por ter abençoado a realização desse trabalho.

À minha família, meu norte e porto seguro, por terem sido pacientes com o meu mau humor e minha falta de tempo. Em especial aos meus pais, Antônio e Alessandra, por sempre terem apoiado minhas decisões e acreditado nos meus sonhos. Ao meu irmão Davi, por ser minha razão de lutar por um mundo melhor. Vocês são o melhor presente que Deus me deu!

Ao meu orientador, Dr. Carlos Rogério de Mello, por todo o conhecimento transmitido ao longo dos anos de convivência, e pela confiança em mim depositada para a realização deste trabalho.

Aos professores, Dr. Marcelo Ribeiro Viola e Dr. Gilberto Coelho, pela boa convivência e por terem despertado em mim o interesse pelos recursos hídricos. A todos os professores do núcleo de Engenharia de Ambiental e Sanitária, que tanto contribuíram para minha formação profissional.

Ao CPTEC/INPE e à Dra. Chou Sin Chan, pelos dados cedidos e pela oportunidade de ter desenvolvido esta pesquisa.

Aos amigos feitos na CIGTA, por tornarem meus dias mais leves e divertidos, pela troca de experiências, e por todo o aprendizado.

Ao meu namorado Ayslan, pelo apoio, incentivo, amor e carinho. Por sempre acreditar que eu era capaz de superar os desafios encontrados nessa jornada.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, que tanto contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao Rafinha, Nayara, Vinicius, Marcela, Geovane e Charles, pela troca de experiências e, principalmente, pelas palavras de incentivo e apoio. Vocês fizeram de mim uma pessoa melhor e os levarei sempre no meu coração!

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do mestrado.

À FAPEMIG, pela bolsa de Apoio Técnico no projeto 'Evaporação do reservatório da usina hidrelétrica de Camargos/Cemig, sul de Minas Gerais: Caracterização da pegada hídrica' (FAPEMIG CAGAPQ 03393/12).

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

O crescente debate sobre os impactos de mudanças climáticas na disponibilidade hídrica tem despertado intensa preocupação, especialmente na geração de energia hidrelétrica. Estudos de projeções futuras para a disponibilidade e segurança hídrica sob condições de mudanças climáticas têm sido desenvolvidos a partir de Modelos de Circulação Global da Atmosfera (GCM). Estes são ferramentas que auxiliam na simulação e no posterior entendimento de eventos climáticos futuros, sendo de suma importância no contexto da gestão dos recursos hídricos. O objetivo deste trabalho consiste em avaliar o comportamento da disponibilidade hídrica para a bacia hidrográfica do Rio Grande, Sudeste do Brasil, no período de 1961 a 2099, simulada através de dois GCMs dinamicamente regionalizados, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, e dois cenários para projeção, RCP4.5 e RCP8.5, com resolução de 20 Km, agrupados e separados em 4 períodos distintos: 1961-2005, 2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099. Levando-se em consideração o regime pluvial característico da bacia hidrográfica do Rio Grande, os dados foram estudados de forma sazonal, agrupando em períodos úmido (outubro a março) e seco (abril a setembro). Para os períodos analisados, calculou-se a diferença entre as médias diárias de precipitação e evapotranspiração, e realizou-se o mapeamento deste balanço hídrico por krigagem ordinária. A avaliação da precisão dos modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foi feita com base em análise de correlação linear entre os mapas gerados a partir de dados observados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e os simulados para o período histórico. As maiores correlações foram obtidas para o período seco, sendo o modelo Eta-MIROC5, o que apresentou o melhor resultado (0,83). Contudo, para o período chuvoso, os valores apresentaram-se próximos, sendo 0,55 e 0,60 para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, respectivamente. Tomando-se como referência o período histórico, nota-se que a região Noroeste da bacia do rio Grande possui maior tendência em apresentar excedente hídrico, enquanto o maior *déficit* concentra-se na região Sul-Sudeste da bacia. Esta mesma tendência foi observada por ambos os modelos, tanto no período úmido (outubro a março) como no seco (abril a setembro). O modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou maior variabilidade do saldo do balanço hídrico, com uma maior amplitude e distribuição espacial dos valores, além de apresentar tendências mais severas de diminuição da disponibilidade hídrica em ambos os cenários, quando comparado ao modelo Eta-MIROC5.

**Palavras-chave:** Mudanças Climáticas. Disponibilidade Hídrica. Eta-HadGEM2-ES. Eta-MIROC5.

## ABSTRACT

The crescent debate regarding the climate change impacts on water availability has raised growing concern, mainly related to the hydroelectricity generation. Future climate projections studies for water availability and hydric safety have been developed using the Global Circulation Models (GCMs). Such models are tools that simulate and help with the understanding of the climatic patterns throughout the time. Thus, they have great importance in the context of water resources management. The objective of this study was to evaluate the water availability in the Grande river basin, Southeastern Brazil, from 1961 to 2099. For that, two GCMs, dynamically regionalized by the Eta model (HadGEM2-ES and Eta- MIROC5), were used considering two scenarios of the climate projections, RCP4.5 and RCP8.5. These predictions were generated in a resolution of 20 km, sliced in four different periods: 1961-2005, 2007-2040, 2041-2070, and 2071-2099. The study was carried out considering the weather seasonality of the region, grouping in the wet (October to March) and the dry (April to September) periods. For the analyzed periods, water balance was calculated by the difference between the daily averages of precipitation and evapotranspiration. Also, the water balance was mapped employing ordinary kriging. The performance of the Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5 models was evaluated based on the linear correlation between the maps generated using data from meteorological stations of the National Institute of Meteorology (INMET) and the simulated data for the present (1961-2005). The highest correlations were obtained for the dry season, with the Eta-MIROC5 model presenting the best result (0.83). However, for the rainy season, the values were similar, being 0.55 and 0.60 for, respectively, Eta- HadGEM2-ES and Eta-MIROC5. Taking the historical period as a reference, one can note that the northwest region of the Grande river basin has a greater tendency to water surplus. However, the most significant deficits are in the South-Southeast areas of the watershed. Both models also observed the same trend in wet (October to March) and dry (April to September) periods. Eta-HadGEM2-ES model showed greater variability of water balance, with greater amplitude and spatial distribution of values. Besides, it presented trends to water availability decrease in both scenarios when compared to the Eta-MIROC5 model.

**Keywords:** Climate change. Water Availability. Eta-HadGEM2-ES. Eta-MIROC5.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático das interações entre processos físicos em um modelo de circulação geral. ....	16
Figura 2 - Aumento da resolução espacial na superfície terrestre da Europa. ....	17
Figura 3 - Simulação da temperatura média global em face de duas situações de emissão de gases do efeito estufa.....	22
Figura 4 - Localização da área de estudo.....	30
Figura 5 - Caracterização climática da Região Hidrográfica do Paraná, conforme classificação de Köppen e Geiger (1936).....	31
Figura 6 - Unidades de Gestão Hídrica da Bacia do Rio Grande. ....	32
Figura 7 - Distribuição espacial das estações meteorológicas e pontos de projeções climáticas simuladas pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 sobre a bacia hidrográfica do Rio Grande. ....	33
Figura 8 - Balanço Hídrico (mm/6 meses) estimado com base nos dados observados para os períodos úmido (a) e seco (b) e simulados pelos modelos Eta- MIROC5(c, d) e Eta-HadGEM2-ES (e, f).....	39
Figura 9 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico vertical (mm/ 6 meses) simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, para o cenário RCP 4.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).....	43
Figura 10 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico vertical (mm/ 6 meses) simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, para o cenário RCP 8.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).....	44
Figura 11 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico (mm/6 meses) projetado pelo modelo Eta-MIROC5, para o RCP 4.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita). ....	48
Figura 12 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico (mm/6 meses) simulado pelo modelo Eta-MIROC5, para o cenário RCP 8.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos RCPs.....	20
Tabela 1.1 - Descrição resumida dos RCPs.....	20
Tabela 2 - Código, latitude, longitude, altitude e período de dados para as estações meteorológicas do INMET utilizadas. ....	34
Tabela 3 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre balanço hídrico vertical sazonal (períodos úmido e seco) para os dados observados e simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta- MIROC5, em toda a bacia hidrográfica do Rio Grande...	37
Tabela 4 - Média anual do saldo do balanço hídrico vertical (mm/6 meses), desvio padrão e variação (%) em relação ao tempo presente, simulada pelo modelo Eta-HadGEM2–ES, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, em diferentes períodos de tempo. ....	41
Tabela 5 - Média anual do saldo do balanço hídrico vertical (mm/ 6 meses), desvio padrão e variação(%) em relação ao período de tempo histórico, simulada pelo modelo Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, em diferentes períodos de tempo. ....	46
Tabela 6 - Demandas hídricas totais em média anual (DMA), média do mês com maior demanda por irrigação (DMM) e média anual por período de tempo, do saldo do balanço hídrico vertical (mm), simulada pelo modelo Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5.....	54
Tabela 7 - Demandas hídricas totais em média anual (DMA), média do mês de maior irrigação (DMM) e média anual por período de tempo, do saldo do balanço hídrico vertical (mm), simulada pelo modelo Eta-HadGEM2–ES, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5. ....	54

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Clima.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Mudanças climáticas e seus impactos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelos climáticos de previsão .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.1</b>	<b>HadGEM2 – ES .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>MIROC5.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3</b>	<b>ETA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Cenários do IPCC.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Balanco hídrico .....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Balanco hídrico e as mudanças climáticas .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.6.1</b>	<b>Precipitação.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.6.2</b>	<b>Evapotranspiração .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.6.3</b>	<b>Escoamento .....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Projeções climáticas .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3</b>	<b>Dados meteorológicos.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4</b>	<b>Validação das projeções climáticas.....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Balanco hídrico vertical e mudanças climáticas.....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>Comparação do balanço hídrico simulado pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 em relação ao observado para o tempo presente .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Projeções do balanço hídrico na bacia do rio Grande, sudeste do Brasil .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Modelo Eta-HadGEM2-ES.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Modelo Eta-MIROC5.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Impactos futuros nas Unidades de Gestão Hídrica .....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os impactos de elevadas concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, provenientes de atividades antrópicas, têm sido constatados ao longo do tempo no planeta, especialmente a partir da década de 90 (IPCC, 2014; MARENGO, 2007). Este aumento é cientificamente comprovado como a causa principal do aquecimento intensificado da superfície terrestre, sendo que anos consecutivos cada vez mais quentes têm sido registrados, especialmente desde o início do século XXI (IPCC, 2014; MARCOTT et al., 2013).

Estudos científicos referentes à disponibilidade hídrica e às mudanças climáticas tomaram grande proporção nas últimas décadas. Os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, como a disponibilidade e a qualidade de água, são afetados por mudanças climáticas, que por sua vez são influenciadas pelas atividades humanas associadas à emissão de gases de efeito estufa. Essas mudanças podem suscitar riscos ambientais, econômicos e sociais, sendo os países mais pobres e em desenvolvimento, os mais vulneráveis (GONDIM et al., 2011; MELLO et al., 2008; CUNHA et al., 2002).

As mudanças climáticas têm causado alterações no comportamento hidrológico desde a micro (ALVARENGA et al., 2016) até a mesoescala (OLIVEIRA et al., 2017; VIOLA et al., 2015; GAUDARD et al., 2014), em várias partes do mundo, alterando o balanço hídrico e a disponibilidade hídrica, bem como causando inundações e episódios de seca cada vez mais frequentes e intensas (CHOU et al., 2014a).

A redução da disponibilidade hídrica, além de diminuir o potencial de produção de energia elétrica no Brasil (OLIVEIRA et al., 2017), uma vez que as fontes hidráulicas são responsáveis por aproximadamente 65% de toda a geração de energia elétrica do país (ANEEL, 2019), pode levar a uma maior utilização de outras fontes de energia que são poluentes e causadoras de efeito estufa (LIMA, 2016). No Brasil, destaca-se o uso crescente de energia produzida por usinas térmicas, com alto poder poluente e custo de produção mais elevado.

Embora sejam consideradas fontes de energia limpa, há uma crescente preocupação com a sustentabilidade hídrica das usinas hidrelétricas, as quais normalmente são as maiores consumidoras de água numa bacia hidrográfica, especialmente com a crise hídrica que atingiu o Sudeste do Brasil entre 2013 e 2015 (NOBRE et al., 2016; COELHO et al., 2015). Os aproveitamentos hidrelétricos são entendidos como de uso não consuntivo (BUENO et al., 2016), ou seja, a água utilizada na geração retorna ao curso d'água sem ter sido efetivamente consumida no processo produtivo. Contudo, a maior exposição do espelho d'água dos reservatórios das usinas à atmosfera, conduz a uma maior taxa de evaporação em relação às

demais superfícies, fazendo com que ocorra perda de água que não está sendo utilizada em nenhum outro processo produtivo (BUENO, 2018).

As perdas por evaporação em reservatórios têm grande influência na determinação do volume de água disponível para os demais usos na bacia hidrográfica e, portanto, podem afetar o atendimento das demandas existentes, especialmente para usuários a montante dos aproveitamentos hidrelétricos. Neste sentido, o estudo da disponibilidade hídrica é de suma importância dentro do contexto de gestão dos recursos hídricos, subsidiando ações que visam ao melhor uso possível da água na bacia hidrográfica.

Segundo Cantarini et al. (2009), a geração hidrelétrica depende de condições climáticas que podem sofrer alterações como consequência das mudanças no clima global. Esse fato evidencia a importância de se estimar as variáveis climáticas, tais como precipitação e evaporação potencial, em regiões hidrológicas com alto potencial para geração hidrelétrica, visando o melhor gerenciamento dos riscos hidrológicos (LIU et al., 2015; MEKKONEN et al., 2015).

O estudo de projeções futuras para a disponibilidade e segurança hídricas sob condições de mudanças climáticas tem sido desenvolvido a partir de modelos de circulação global do clima (GCM). Segundo Chou et al. (2014a), estes constituem-se da principal ferramenta para gerar informações sobre as mudanças climáticas em diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa.

Devido a grande complexidade dos processos físicos e químicos da atmosfera incorporados aos GCMs, estes podem não apresentar a resolução espacial adequada para capturar os detalhes do comportamento do clima em escalas regional e local, especialmente efeitos de altitude, espelhos d'água e condições topográficas específicas (CHOU et al., 2014b). Para melhorar a resolução espacial dos modelos globais utiliza-se métodos de regionalização (*downscaling*), por meio de modelos climáticos regionais (RCMs). Dentre estes, destaca-se o modelo Eta/CPTEC, o qual possibilita a previsão climática para todo o continente sul-americano, aninhados aos modelos climáticos globais (BETTS et al., 2011; LYRA et al., 2017).

Projetar mudanças climáticas significa simular como as ações antrópicas e as atividades naturais irão influenciar o planeta no longo prazo. Nesse contexto, definir cenários é importante, uma vez que com estes se estabelecem as condições de uso da terra e as forças radiativas em situações hipotéticas de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, medida em concentração de carbono, em partes por milhão (COLLINS et al., 2013). Tais cenários têm sido cada vez mais realistas dos padrões climáticos futuros. Segundo Oliveira et al. (2017) e Siqueira Júnior, Tomasella e Rodriguez (2015), apesar de várias incertezas presentes em simulações

climáticas, elas podem fornecer uma visão detalhada da avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, consistindo-se uma importante ferramenta de auxílio para a gestão e planejamento do meio ambiente.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de investigar os impactos de mudanças climáticas sobre o potencial de produção de energia elétrica, tanto em escala global quanto em escala regional. Van Vliet et al. (2016) simularam os impactos das mudanças climáticas sobre potenciais de geração de energia hidrelétrica e termoelétrica, em escala global, sob condição de cenários de forçantes radiativas de concentração RCP2.6 e 8.5. Os autores concluíram que as hidrelétricas da América Sul, podem produzir, em média, 5,5% menos energia até o fim do século 21. Contudo, seu estudo foi desenvolvido de uma forma abrangente sobre o continente, e não para hidrelétricas instaladas em uma região hidrológica específica, uma vez que há diferentes respostas aos impactos de mudanças climáticas na América do Sul (CHOU et al., 2014b).

Estudos semelhantes têm sido desenvolvidos no Brasil. Mohor et al. (2015) avaliaram os impactos de mudanças climáticas no potencial de produção de energia elétrica na usina hidrelétrica de Teles Pires, na região amazônica, utilizando o modelo hidrológico MDH-INPE forçado por oito GCMs. Os autores relataram que a usina poderá sofrer reduções da produção de energia elétrica de até 82%, ocasionando interrupções no fornecimento de energia em aproximadamente 59% do tempo. Oliveira et al. (2017) avaliaram os impactos de mudanças climáticas no potencial de geração hidrelétrica nas usinas hidrelétricas de Camargos, Itutinga e Funil, na cabeceira da bacia do Rio Grande, por meio do modelo hidrológico SWAT forçado pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, sob influência dos RCPs 4.5 e 8.5. Segundo os autores, as usinas supracitadas poderão apresentar uma redução na produção de energia elétrica variando entre 6,1 e 58,6%, com interrupções de fornecimento de energia em aproximadamente 70% do tempo ao final do presente do século.

Nesse contexto, os objetivos deste estudo foram avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água, com base na análise do balanço hídrico vertical e sazonal, simulado até o ano 2099, sobre a bacia do Rio Grande, no Sudeste do Brasil, usando dois modelos globais, HadGEM2-ES e MIROC5, regionalizados pelo modelo Eta, e sob condições de dois cenários de mudanças climáticas (RCP4.5 e RCP8.5).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Clima**

Na meteorologia, os conceitos de tempo e clima são diferentes. Köppen (1948) define clima como sendo o somatório das condições atmosféricas que fazem um lugar da superfície terrestre ser mais ou menos habitável para os humanos, animais e plantas. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018) o tempo é definido como o estado físico das condições atmosféricas em um determinado momento e local. Já o clima, é o estudo médio do tempo para o determinado período ou mês em certa localidade.

Segundo Vianello (1991), o clima de uma região é influenciado por fatores como precipitação, umidade relativa, radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, direção do vento e pressão atmosférica, que são consequência da altitude, latitude, topografia, características do solo e da vegetação, dentre outros aspectos.

Conforme definido em 1992, na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, o sistema climático inclui a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a geosfera, a biosfera e suas interações. O estado da atmosfera em um dado instante é resultado de complexas interações entre os diversos componentes do sistema físico climático. Dentre as interações entre os sistemas, a mais importante ocorre entre a atmosfera, pela qual a energia solar entra no sistema, e os oceanos, que armazenam e têm a capacidade de transportar grandes quantidades de energia, sendo assim, o regulador de mudanças atmosféricas rápidas (BARRY, 2013; SAMPAIO; DIAS, 2014).

### **2.2 Mudanças climáticas e seus impactos**

O sistema climático integra cinco componentes principais que se relacionam entre si: a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera, e a biosfera. Por influência da própria dinâmica da terra, e devido às forçantes externas naturais e antropogênicas, esse sistema modifica-se com o passar do tempo. Quando as variações permanecem constantes, a um nível de probabilidade significativo e perdurando por um longo período nesse sistema, evidencia-se uma mudança climática (IPCC, 2013).

Impactos climáticos podem ser definidos como as consequências ambientais e socioeconômicas das mudanças climáticas (IPCC, 2014), e os principais efeitos das mudanças climáticas ocorridas no planeta são: aumento nos níveis do mar e mudanças nos padrões da

precipitação alterando os sistemas hidrológicos, suprimento de água doce, tempestades mais frequentes, forte e rápido ressecamento do solo devido a períodos secos mais intensos, afetando os recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade (IPCC, 2014; MARENGO, 2007).

Desde o início do século XX, o crescimento populacional e econômico vem aumentando as emissões de gases de efeito estufa, e anos consecutivos cada vez mais quentes têm sido registrados. A atmosfera e o oceano se aqueceram, a quantidade de gelo e neve diminuiu, o nível do mar e as concentrações de gases de efeito estufa aumentaram. Cada uma das últimas três décadas tem sido sucessivamente mais quente na superfície terrestre que qualquer década anterior, desde 1850 (IPCC, 2014).

Nos últimos anos tem sido crescente a preocupação com relação aos possíveis impactos econômicos e sociais em decorrência das mudanças climáticas que afetam diversos setores da sociedade, como transporte, infraestrutura, captação e distribuição de água e agricultura (IPCC, 2012). O estudo dos impactos é primordial para o entendimento do problema e para subsidiar políticas públicas (BARBOSA, 2011).

Estudos apontam que mudanças climáticas podem provocar impactos sobre os principais biomas brasileiros, muitas espécies mudaram suas atividades sazonais, seus padrões migratórios e sua abundância com consequências sobre a biodiversidade (COX et al., 2004; GOLDING; BETTS, 2008; MALHI et al., 2009; IPCC, 2014).

A produção hidroelétrica brasileira também pode ser afetada pelas mudanças climáticas. A falta de chuvas, além de diminuir o potencial de produção de energia brasileiro, pode levar à utilização de outras fontes de combustíveis para suprir o *déficit* de energia (LIMA, 2016).

Nesse contexto, é essencial o conhecimento das tendências futuras do comportamento do clima e dos impactos que podem resultar das mudanças, de modo a permitir o planejamento de políticas de adaptação a essas mudanças e de mitigação dos seus efeitos.

### **2.3 Modelos climáticos de previsão**

Dentre os diversos avanços científicos que ocorreram no último século está a habilidade em simular complexos sistemas físicos utilizando-se modelos numéricos que constituem uma representação matemática aproximada da realidade. A habilidade de prever o tempo e o clima aumentou muito nas últimas décadas, em função do avanço no entendimento dos processos que controlam a evolução do estado da atmosfera e dos componentes do sistema climático, dos métodos de solução numérica das equações que representam cada parte do sistema climático e

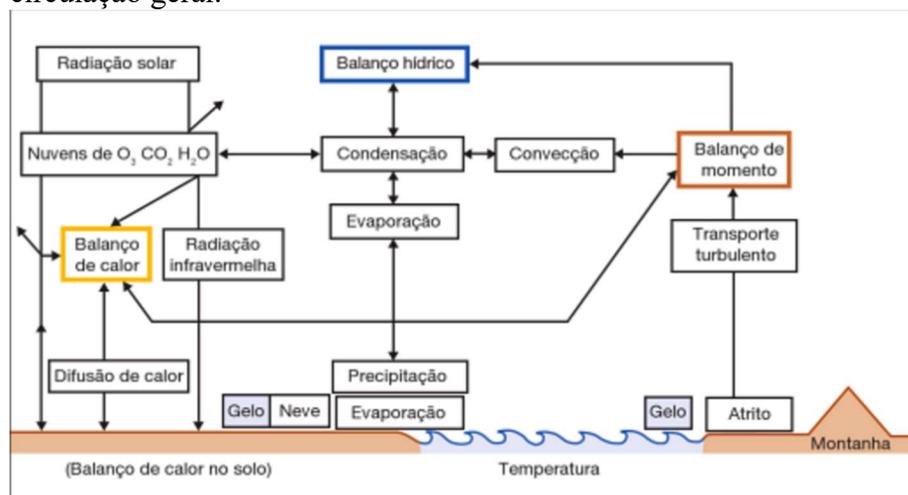
da notável evolução da capacidade de processamento dos computadores (SAMPAIO; DIAS, 2014).

Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (GCMs) são modelos matemáticos que expressam processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera e suas interações com outros componentes de outros sistemas, servindo como ferramentas de grande importância na previsão das tendências de comportamento das variáveis climáticas e projeções do clima futuro. Estes possibilitam prever as condições do tempo para vários dias, dependendo da região e do estado da atmosfera, com alto grau de confiança. Além disso, tais modelos também podem ser utilizados para prever o clima da próxima estação ou para simular características mais gerais do clima futuro, na escala de décadas ou séculos, considerando as modificações antropogênicas, como o aumento dos gases de efeito estufa, aerossóis e as mudanças no uso da terra (PBMC, 2012; SAMPAIO; DIAS, 2014; MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

Tais modelos usam de complexas relações matemáticas para descrever os processos físicos que ocorrem no sistema e expressa-los em códigos computacionais, processados em supercomputadores. Para tanto, são empregados métodos matemáticos com o intuito de gerar dados de projeções futuras dos elementos meteorológicos que compõe o clima (BETTS et al., 2011).

A Figura 1 apresenta as interações existentes entre os oceanos, continentes e atmosfera terrestre, em um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera.

Figura 1 - Diagrama esquemático das interações entre processos físicos em um modelo de circulação geral.



Fonte: Barry (2013).

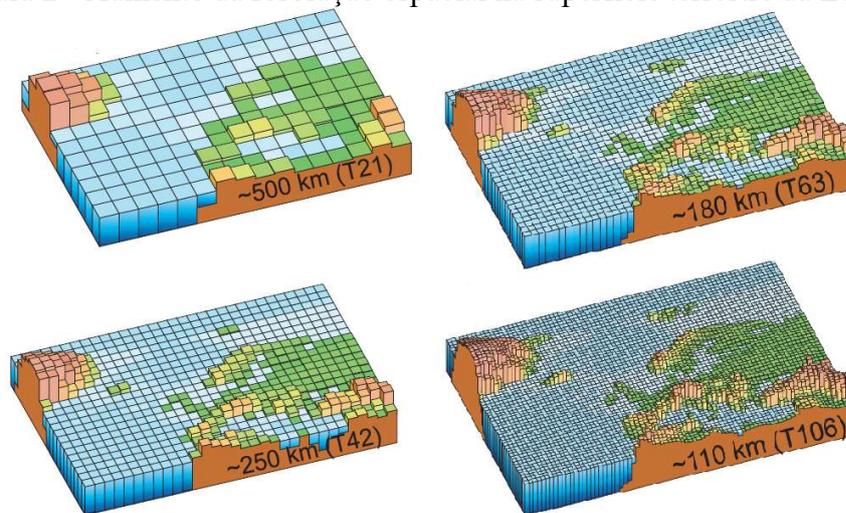
Os resultados de um GCM, as previsões, são apresentados em pontos de grade, que pode ser discriminado nas quatro dimensões (latitude, longitude, altitude (pontos de grade) e tempo).

Devido a grande complexidade dos processos físicos incorporados aos GCMs, estes podem não apresentar a resolução espacial adequada para capturar os detalhes do comportamento do clima em escalas regional e local, especialmente efeitos de altitude e condições topográficas específicas (CHOU et al., 2014b), sendo uma boa ferramenta na macro escala, mas de difícil utilização na escala local.

Para melhorar a resolução espacial dos modelos globais utiliza-se métodos de regionalização (*downscaling*) por meio de modelos climáticos regionais. Uma dessas técnicas é a modelagem aninhada, na qual o modelo climático regional (*Regional Climate Model – RCM*) fica aninhado em um GCM, cujos resultados são usados como condições iniciais e de contorno para o RCM (BETTS et al., 2011).

A Figura 2 apresenta como os modelos regionais visam melhorar as projeções dos modelos globais para locais específicos do globo, e fornecem dados em escala maior (mais detalhada), possibilitando detalhar os resultados simulados por modelos globais com menor custo computacional.

Figura 2 - Aumento da resolução espacial na superfície terrestre da Europa.



Fonte: IPCC (2007).

De acordo com Lyra et al. (2017), os modelos climáticos globais (GCMs) e regionais (RCMs) são utilizados como importantes ferramentas para projeções de cenários climáticos, auxiliando nos estudos do clima no futuro.

Contudo, é necessário considerar que as projeções feitas pelos modelos climáticos carregam incertezas, existentes pela falta de conhecimento e/ou representação matemática imperfeitos sobre, os processos físicos relevantes, sensibilidade do modelo às condições iniciais adotadas, valores futuros de variáveis que podem afetar o sistema climático (gases de efeito

estufa) e como mudanças nessas variáveis se traduzem em mudanças no clima (BURKE et al., 2015).

### 2.3.1 HadGEM2 – ES

O modelo global HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System*) (COLLINS et al., 2011) é um modelo em ponto de grade com resolução N96, equivalente a 18,75 e 12,75 graus de longitude e latitude, respectivamente, e 38 níveis verticais na atmosfera, chegando a cerca de 40 km de altitude, cujo objetivo é simular e entender o clima futuro a partir de respostas de equações que descrevam processos químicos, biológicos e físicos dentro da atmosfera, oceano, criosfera e biosfera marinha e terrestre. O ciclo do carbono é modelado através do sistema de vegetação dinâmica TRIFFID (*Top-down Representation of Interactive Foliage Including Dynamics*). O modelo também inclui a modelagem da química atmosférica e dos aerossóis (COLLINS, et al., 2011; CHOU et al., 2014a).

O HadGEM2-ES foi aplicado pelo *Met Office Hadley Centre* nas simulações do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)* (IPCC, 2013), que utiliza dados históricos de 1960 a 2005 e projeções através dos chamados RCPs (MOSS et al., 2010).

### 2.3.2 MIROC5

O modelo global MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*) (WATANABE et al., 2010), foi desenvolvido em conjunto pelo *National Institute of Environmental Studies (NIES)*, *Center for Climate System Research (CCSR)* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)* (IPCC, 2013), e está atualmente na sua 5ª versão, apresentando uma resolução horizontal de aproximadamente 150 km e 40 níveis verticais na atmosfera (CHOU et al., 2014a, 2014b).

Ele é acoplado como o modelo oceânico *Climate System Research Ocean Component Model (COCO 4.5)*, com 50 níveis de profundidade e 1° de resolução horizontal. O MIROC5 também representa oceanos (CHOU et al., 2014a; as rotas dos rios, o efeito do albedo na neve e a termodinâmica e dinâmica do gelo dos TATEBE et al., 2012).

### 2.3.3 ETA

O modelo regional Eta é um modelo climático desenvolvido pela Universidade de Belgrado e o Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia (MESINGER et al., 1984), o

qual foi posteriormente operacionalizado pela *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) nos Estados Unidos (BLACK, 1994). No Brasil, o modelo Eta vem sendo aplicado pelo CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para previsão do tempo e estudos sobre cenários exploratórios de mudanças climáticas futuras, em diferentes escalas de tempo e resoluções espaciais (CHOU; BUSTAMANTE; GOMES, 2005; BUSTAMANTE; GOMES; CHOU, 2006; CHOU et al., 2014a).

O modelo Eta tem por objetivo produzir a regionalização das simulações dos modelos globais sobre a América do Sul e a América Central, com resolução espacial de 20 km (CHOU, 1996). O sistema vertical de coordenadas utilizado no modelo Eta é altamente recomendado para uso na América do Sul devido à presença da Cordilheira dos Andes (PESQUERO et al., 2009).

As convecções profundas e rasas são parametrizadas pelo modelo Betts-Miller, modificado pela microfísica das nuvens segundo o modelo de Zhao. Os processos da superfície terrestre são representados pelo modelo NOAH, com o ciclo anual de folhas verdes da vegetação, considerando 12 tipos de vegetação e 9 tipos de solo. Os fluxos radiativos são representados pelo modelo Lacis-Hansen, para ondas curtas, e pelo modelo FelsSchwarzkopf, para ondas longas. A temperatura da superfície do mar diária, e a umidade e temperatura iniciais do solo, são fornecidas pelos modelos globais (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b).

#### **2.3.4 Cenários do IPCC**

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi consolidado em 1988 pelo *United Nations Environment Programme* (UNEP) e pela *World Meteorological Organization* (WMO), diante da necessidade de se ter informações científicas confiáveis e atualizadas para a formulação de novas políticas de crescimento, sendo considerado o principal órgão científico responsável pelas avaliações das mudanças climáticas e seus impactos ambientais e socioeconômicos (IPCC, 2007).

Desde então, divulga periodicamente relatórios de avaliações climáticas que vêm reafirmando a tendência do aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa e reforça que eles são responsáveis pelo aquecimento observado nos últimos 250 anos, sobretudo nas últimas três décadas. Além de deixar claro que a alteração no balanço radiativo da Terra tenderá a mudar as temperaturas atmosféricas e oceânicas, e, conseqüentemente, os padrões de circulação da atmosfera o IPCC, também divulga informações para que mecanismos de adaptação e de

mitigação sejam criados a fim de diminuir os impactos ambientais que se tornaram cada vez mais frequentes em todas as regiões do globo, como consequência, principalmente, de eventos extremos. O IPCC apoia com trabalhos científicos as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro, fornecendo subsídio para os estudos de climatologia, mudanças climáticas e áreas afins que fazem uso de cenários de emissões de gases propostos pelo mesmo (MARENGO, 2006; IPCC, 2014; UNITED NATIONS, 2015; NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, 2016).

O Quarto Relatório de Avaliação – AR4 do IPCC fazia uso de uma abordagem ‘sequencial’, onde primeiro eram desenvolvidos os cenários socioeconômicos, posteriormente os cenários de emissões de GEE e de forçamento radiativo, seguido dos cenários climáticos globais e, por fim, eram realizados os estudos de impactos, adaptações e vulnerabilidades. Dessa forma, essa abordagem não permitia uma avaliação integrada das diversas fases da sequência, prejudicando os resultados e fazendo com que o tempo de elaboração dos cenários fosse excessivo (MOSS et al., 2010).

Ao final de 2013, o IPCC apresentou o seu Quinto Relatório de Avaliação (AR5), no qual enfatizou a necessidade de uma redução imediata das emissões dos Gases do Efeito Estufa em todas as partes do planeta, a fim de que o aumento da média de temperatura do ar não ultrapasse a 2 °C até o fim do século, limite a qual os cientistas afirmam que o planeta estaria condenado a um futuro de efeitos devastadores.

Neste relatório, foi desenvolvida uma abordagem ‘paralela’ para a criação de cenários de mudanças climáticas. Neste caso, os modelos climáticos e socioeconômicos de emissões são elaborados simultaneamente, acelerando e melhorando os resultados. No AR5 foram simulados quatro cenários diferentes de emissões de gases de efeito estufa com projeções que vão até o ano de 2100. Estes cenários são chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCPs), sendo eles: RCP8.5, RCP6, RCP4.5 e RCP2.6. Estes consistem em projeções das concentrações de gases de efeito estufa, gases quimicamente ativos, aerossóis e uso e cobertura do solo para o século XXI, e seu consequente aumento da retenção de energia no planeta, denominado de forçante radiativa e mensurado em  $W.m^{-2}$  (VAN VUUREN et al., 2011). As avaliações realizadas por cada um destes cenários são baseadas em diferentes estimativas de emissões de gases de efeito estufa com referência na literatura. As principais características de cada cenário são apresentadas nas Tabela 1 e Tabela 1.1.

Tabela 1 - Principais características dos RCPs.

Componentes	Cenários
-------------	----------

	<b>RCP 2.6</b>	<b>RCP 4.5</b>	<b>RCP 6.0</b>	<b>RCP 8.5</b>
Emissão de GEE	Muito baixa	Média - Baixa	Média	Alta
Área agrícola	Média para agricultura e pastagem	Muito baixa para ambos, agricultura e pastagem	Média para agricultura, mas muito baixa para pastagem	Média para ambos, agricultura e pastagem
Poluição do ar	Média - Baixa	Média	Média	Média - Alta

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

Tabela 1.1 - Descrição resumida dos RCPs.

<b>Cenários</b>	<b>Forçante Radiativa</b>
RCP 8.5	Crescente, chegando a 8,5 W/m <sup>2</sup> (~1370 ppm CO <sub>2</sub> eq) em 2100.
RCP 6.0	Estabilização sem ultrapassar 6 W/m <sup>2</sup> (~850 ppm CO <sub>2</sub> eq) e estabilização depois de 2100.
RCP 4.5	Estabilização sem ultrapassar 4,5 W/m <sup>2</sup> (~650 ppm CO <sub>2</sub> eq) e estabilização depois de 2100.
RCP 2.6	Pico de ~3 W/m <sup>2</sup> (~490 ppm CO <sub>2</sub> eq) antes de 2100 seguido de declínio.

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

O RCP2.6 é o cenário mais otimista dentre os cenários, onde a forçante radioativa atinge um ápice de 2,6 W.m<sup>-2</sup>. Ele prevê um pico na concentração de CO<sub>2</sub> de aproximadamente 490 ppm e um declínio deste valor até o final do século XXI. Nesse contexto, o aumento da temperatura terrestre estaria entre 0,3 °C e 1,7 °C de 2010 a 2100, e o aumento do nível do mar, estaria entre 26 e 55 cm. Entretanto, para que este cenário acontecesse, seria preciso que houvesse estabilização das concentrações de GEE nos próximos 10 anos e então a remoção destes da atmosfera (MMA, 2016).

Já o cenário RCP4.5 tem sido um dos cenários mais utilizados e ele prevê um armazenamento de 4,5 W.m<sup>-2</sup> adicionais de energia e estabilização das emissões de GEE antes de 2100. Neste caso, o aumento da temperatura terrestre estaria entre 1,1 °C e 2,6 °C e do nível do mar entre 32 e 63 cm (MMA, 2016).

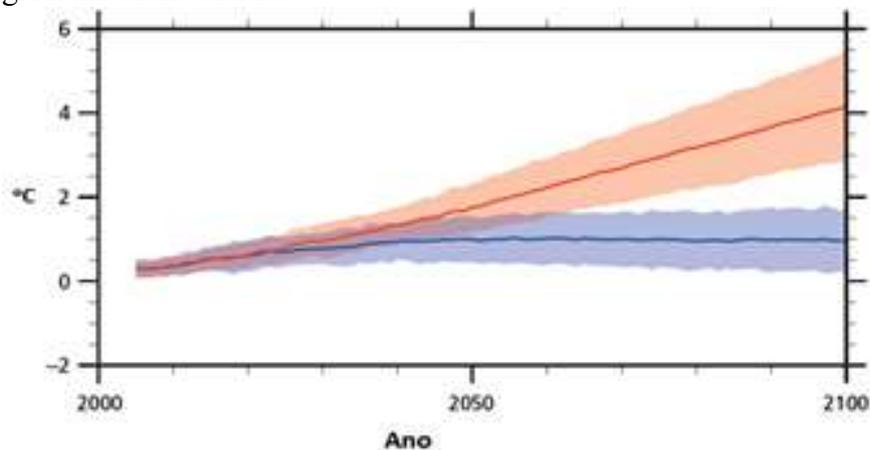
O RCP6 prevê um armazenamento de 6,0 W.m<sup>-2</sup> adicionais de energia com estabilização das emissões de GEE logo após 2100. O aumento da temperatura estaria entre 1,4 °C até 3,1 °C e do nível do mar entre 33 e 63 cm (MMA, 2016).

Por último, o RCP8.5 é um cenário pessimista, e ele é caracterizado por um ritmo acelerado das emissões, sem previsão de estabilização. Este cenário prevê um armazenamento adicional de energia de 8,5 W.m<sup>-2</sup>. Sendo assim, a superfície da Terra poderia sofrer um aquecimento entre 2,6 °C e 4,8 °C ao longo do século, e o nível do mar poderia ter um aumento de 45 a 82 cm (MMA, 2016; SILVEIRA et al., 2016).

As forças radiativas, ou a medida da capacidade de um gás em alterar o balanço energético do planeta designadas para os cenários, são convertidas em concentrações de gases do efeito estufa e, conseqüentemente, em suas emissões. Essas emissões e concentrações são *inputs* para os modelos climáticos, que passam a gerar as projeções futuras de mudanças climáticas.

A Figura 3 apresenta duas projeções do aumento da temperatura média global até o final do século, sendo que a linha em azul mostra a temperatura média da superfície da Terra no melhor cenário (RCP 2.6) e a linha vermelha no pior cenário (RCP 8.5).

Figura 3 - Simulação da temperatura média global em face de duas situações de emissão de gases do efeito estufa.



Fonte: IPCC (2014).

### 2.3.5 Balanço hídrico

O balanço hídrico pode ser compreendido como a diferença entre as componentes de entrada e saída do ciclo hidrológico, sendo estes: precipitação, infiltração, movimento de água no perfil do solo (ascendente ou descendente), deflúvio total (escoamento superficial: direto, subsuperficial e subterrâneo), evaporação e transpiração (TUCCI, 2009).

De acordo Pereira et al. (2002), a disponibilidade hídrica de uma região pode ser quantificada pelo balanço hídrico climatológico (BHC), que representa as variações sazonais dos excedentes e deficiências hídricas através de relações entre as entradas e saídas de água de uma determinada região, sendo a precipitação e evapotranspiração os seus principais componentes.

Para avaliar se em uma região há deficiência ou excesso de água durante o ano é imprescindível comparar dois elementos opostos do balanço hídrico: a precipitação que fornece água para o solo e a evapotranspiração que representa o consumo de água (CAMARGO, 1971).

Segundo Horikoshi e Fisch (2007), devido a grande demanda atual por recursos hídricos, torna-se necessário o conhecimento do ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, sobretudo das variáveis de precipitação e evapotranspiração.

Na escala global, o ciclo hidrológico é fechado, no qual a água circula entre os reservatórios terrestres (continentes e oceanos) e atmosférico. Em nível regional, o ciclo é aberto, pois apenas parte da água retorna, parte é retida pela atmosfera, e outra é trazida de fora pela atmosfera. A fonte de energia propulsora do ciclo é a radiação solar associada à gravidade e rotação terrestre (TUCCI, 2009; MELLO; SILVA, 2013).

Por depender de uma série de fatores, o ciclo hidrológico é um fenômeno muito complexo. É influenciado diretamente pelo movimento de massas de ar, temperatura global, dentre outros fatores ligados à climatologia. Assim, alterações no globo terrestre que envolvem mudanças no clima, provocam uma reação em cadeia, afetando todo ciclo, uma vez que cada componente é interligado, ou seja, nada atua de forma isolada.

### **2.3.6 Balanço hídrico e as mudanças climáticas**

Com o agravamento das mudanças climáticas e das atividades antropogênicas, acredita-se que o balanço hídrico global está se alterando de forma significativa (IPPC, 2013). A intensidade e as características dessas alterações climáticas podem variar significativamente de uma região para outra, assim, Sun et al. (2014) exemplificam que algumas regiões do globo terrestre podem enfrentar secas severas, enquanto outras podem sofrer com inundações.

O ciclo hidrológico se relaciona diretamente com mudanças de temperatura da atmosfera e também com o balanço de radiação (IPCC, 2014). Em função do aquecimento global, espera-se que haja mudanças nos padrões da precipitação, como o aumento da intensidade e da variabilidade da precipitação. Como consequência, poderá afetar expressivamente a disponibilidade e a distribuição temporal da vazão nos rios, tanto positivamente quanto negativamente. Além disso, os eventos hidrológicos extremos, como secas e enchentes, poderão tornar-se cada vez mais frequentes.

De acordo com Santos et al. (2013), nota-se que é possível observar que os efeitos das mudanças climáticas atuais já proporcionam problemas na disponibilidade de água para as atividades humanas, fator que poderá se agravar com as alterações climáticas caso não sejam formuladas políticas públicas voltadas para um planejamento eficaz dos usos múltiplos dos recursos hídricos.

Grande parte das contribuições científicas mundiais relatam alterações na disponibilidade hídrica em virtude das alterações climáticas. Estes estudos, englobam, na maioria dos casos, uso de modelos climáticos globais e regionais na simulação dos cenários futuros do IPCC.

Horikoshi e Fisch (2007) realizaram o balanço hídrico do município de Taubaté (São Paulo), por meio de dados de precipitação e de temperatura ar com o objetivo de analisar a distribuição hídrica futura. Para tanto, foi utilizado o modelo global HadCM3, considerando os cenários SRES A2 e B2 para o período de 2010-2099. Os cenários climáticos futuros demonstram um aumento de +0,5 °C a + 2,7 °C na temperatura do ar, associado a um aumento da precipitação entre 50 e 150 mm. Os autores salientam que tais resultados poderão provocar um aumento do *déficit* de água por volta de 50 a 80 mm e uma diminuição do excedente hídrico de aproximadamente 200 mm.

#### **2.3.6.1 Precipitação**

Alterações no regime de precipitação têm sido intensamente estudadas nos últimos anos, desenvolvidas em várias partes do mundo, utilizando de diferentes metodologias.

Em todo o Brasil são previstas mudanças no regime de precipitação e na temperatura, o que, inevitavelmente, provocariam alterações no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, no balanço hídrico das principais bacias brasileiras (MELLO et al., 2008).

Marengo et al. (2010) utilizaram três RCM's (RegCM3, HadRM3 e Eta-CCS) para avaliar as mudanças climáticas na América do Sul, considerando o cenário SRES A2. O modelo regional foi integrado (resolução horizontal de 40 km) e os cenários futuros foram gerados em períodos de 30 anos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100). Os resultados verificados mostram que as regiões como o Nordeste do Brasil, o Centro-Leste e o Sul da Amazônia, podem sofrer com a falta de chuvas até o final do século XXI.

Chou et al. (2012) simularam o clima presente na América do Sul, para os anos de 1961 a 1990, utilizando o modelo climático global HadCM3 acoplado ao modelo climático regional Eta-CPTEC, focado na avaliação das mudanças climáticas durante as estações do verão e do inverno. Os resultados apontaram que o modelo Eta-HadCM3 foi capaz de reproduzir adequadamente os padrões de circulação geral da atmosfera do clima para os anos de 1961 a 1990. Além disso, o modelo produziu bons resultados para a precipitação e a temperatura, apesar de terem sido verificados pequenos deslocamentos na localização das anomalias típicas apresentadas por esses eventos.

Marengo et al. (2012) simularam as possíveis mudanças climáticas associadas ao cenário SRES A1B, utilizando o RCM Eta acoplado ao GCM HadCM3 na América do Sul, com enfoque nas bacias hidrográficas dos Rios Amazonas, São Francisco e Paraná. Os resultados das simulações indicaram que a precipitação tende a reduzir até 2100, atingindo  $-1 \text{ mm dia}^{-1}$  ( $-0,7$  a  $-1,2 \text{ mm dia}^{-1}$ ) na bacia Amazônica,  $-1 \text{ mm dia}^{-1}$  ( $-0,5$  a  $-1,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ) na bacia do Rio São Francisco e  $-0,2 \text{ mm dia}^{-1}$  ( $+0,5$  a  $-0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ) na bacia do Rio Paraná. No entanto, as projeções variam em função da época do ano e ao longo das bacias hidrográficas. A bacia do Rio Paraná, onde se encontra a região de estudo, obteve um aumento na precipitação, superior a 20%, em algumas em algumas épocas do ano.

Na América do Sul, Vera et al. (2006) projetaram o clima futuro utilizando seis modelos globais e o cenário SRES A1B. Por meio dos resultados observou-se que as variações na intensidade e na posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) afetam o regime pluviométrico sobre as grandes bacias da Amazônia e da Prata. No Norte da Cordilheira dos Andes e no Sul do Chile e da Argentina haverá um aumento nas chuvas de verão e redução na precipitação anual na região mais elevada dos Andes chilenos e argentinos.

Chenoweth et al. (2011) aplicaram o modelo climático regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impact Studies*) (resolução de 25 km), a fim de simular o clima futuro e compará-lo com o período presente (1961-1990), utilizando o cenário climático SRES A1B, nas regiões do Mediterrâneo e Oriente Médio. Os resultados mostraram que poderá ocorrer redução de 10% na precipitação, com considerável variação entre países e bacias hidrográficas. Segundo os autores, os dados simulados indicam mudanças significativas da disponibilidade hídrica da região, resultando em consideráveis ajustes pela gestão dos recursos hídricos, incluindo medidas estruturais.

Liu e Fan (2013) simularam a precipitação na planície Norte da China, utilizando o método *downscaling*, para 2 períodos (2046-2065 e 2081-2100) condicionada pelos fatores atmosféricos de seis GCM's para três cenários SRES de emissões (A1B, A2 e B1). Os resultados apontaram redução da precipitação total anual e a precipitação máxima diária, ao passo que o número de dias anuais de chuva aumentaria em relação ao período base (1961-2010). As chuvas de monções de verão responderam por 50% - 70% das precipitações anuais. De acordo com as simulações, essas chuvas de verão, diminuiriam a partir da segunda metade do século XXI.

### 2.3.6.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é definida como sendo o somatório da evaporação das superfícies e da transpiração das plantas (ALLEN et al., 1998), e tem grande influência sobre os processos hidrológicos, pois se configura como sendo o principal processo responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas. A evapotranspiração está diretamente relacionada com a umidade do solo, a recarga dos aquíferos, e o escoamento superficial. Portanto, o entendimento das variações temporais e espaciais da evapotranspiração é de grande importância para estudos hidrológicos (ALENCAR et al., 2011).

Gondim et al. (2008), com o objetivo de avaliar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica para irrigação de culturas perenes na bacia do Rio Jaguaribe, no Ceará, utilizaram o sistema PRECIS, com as condições de contorno do RCM HadRM3P e os cenários do IPCC A2 e B2. Encontraram que as mudanças climáticas podem trazer impactos na demanda de água para irrigação das culturas perenes, uma vez que as temperaturas mais elevadas causam maior demanda para evapotranspiração das plantas, com tendência de ocorrer aumento na demanda de água para irrigação, o que ainda pode ser agravada pela redução da precipitação. As mudanças climáticas projetadas constataram aumentos na evapotranspiração de 3,1% a 2,2% e diminuições nas precipitações de 30,9% a 37,3%. A disponibilidade hídrica foi avaliada pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração. Os autores concluíram que haverá aumento no *déficit* hídrico, em decorrência de tais alterações. Sendo assim, as mudanças climáticas podem ocasionar aumento na demanda de água para a agricultura, sem contar a necessidade de expansão da área irrigada.

De acordo com Nobre (2001) as previsões para o Brasil indicam um aumento de temperatura entre 1 °C e 6 °C, variando de acordo com os modelos climáticos e os cenários de emissões de gases de efeito estufa adotados, bem como o local de previsão. O autor ressalta que esse aumento provocaria a intensificação da evaporação, o que alteraria significativamente o balanço hídrico.

### **2.3.6.3 Escoamento**

Nas bacias hidrográficas dos rios Araguaia e Tocantins, Tomasella et al. (2009) aplicaram o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo climático regional Eta para analisar o impacto das mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica. A partir dos resultados, os autores verificaram que haveria uma redução de 20% na vazão média do Rio Tocantins, em Tucuruí, no período de 2080 até 2099, se comparados ao período de 1970 a 1999.

Nóbrega et al. (2011) aplicaram o modelo hidrológico MGB-IPH e o modelo climático Global HadCM3 na bacia do Rio Grande, que banha os estados de Minas Gerais e São Paulo e apresenta um dos principais afluentes da bacia do Rio Grande, a fim de simular os impactos hidrológicos associados aos cenários futuros do IPCC (A1B, A2, B1 e B2). A partir dos resultados, tem-se que o aumento da vazão média anual do rio, em relação ao período base (1961-1990), poderá ser de 5% a 10% e sob um aumento na temperatura média do ar entre 1 e 6 °C, de 8% a 51%. As análises das curvas de permanência simuladas mostraram que poderão ocorrer mudanças, principalmente, nas vazões máximas.

Ouyang et al. (2015) utilizaram seis modelos climáticos globais (GCM's) a sob os cenários de emissão RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 para avaliar o impacto das mudanças climáticas na vazão de captação na bacia Huangzhunang (HNZ), na China, por meio do modelo SWAT. Os resultados indicaram que o modelo apresentou bom desempenho na predição dos resultados, na calibração e na validação dos dados. O modelo projetou um aumento da precipitação no meio e no final do século XXI na bacia (HNZ) variando de 2,4% a -9%. A vazão tende a diminuir no futuro, variando de -6,9% a -0,8% devido, principalmente, ao aumento da evapotranspiração, uma vez que em todos os GCM's e RCP's a temperatura do ar aumenta de forma constante. As vazões médias mensais obtidas pelos seis GCM's provavelmente aumentarão de agosto a setembro e diminuirão de outubro a junho. De acordo com os autores, os resultados deste estudo podem informar estratégias de planejamento e gestão da água da bacia em longo prazo, levando em consideração os cenários de mudança global.

No estudo realizado na bacia do rio Lhasa, no planalto do Tibete, Liu et al. (2015) investigaram os plausíveis regimes hidrológicos futuros, pelo método *downscaling*, a partir de dois GCM's (Echam5 e Miroc3.2\_Medres), sobre três cenários (A1B, A2 e B1) para o período de 2046-2065. Os resultados mostraram aumento da temperatura do ar como da precipitação anual. A temperatura máxima do ar pode ter um aumento maior que 2 °C, ao passo que a precipitação anual poderá ter um ligeiro aumento. A variação na precipitação mensal será mais significativa com um aumento acentuado no verão e reduções drásticas nas demais temporadas. A evaporação, o escoamento e a vazão, terão uma tendência de crescimento, enquanto que a cobertura da neve reduzirá drasticamente. Os autores salientam que os resultados devem ser utilizados como referência para a mitigação das mudanças climáticas e gestão dos recursos hídricos nessas regiões vulneráveis.

No Sudeste do Brasil, Viola et al. (2015) simularam os impactos das possíveis mudanças climáticas no comportamento hidrológico na cabeceira da bacia do Rio Grande, no estado de Minas Gerais. Para isso, os autores utilizaram o modelo LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*)

forçado pelas saídas do modelo climático regional (Eta) que foi associado ao modelo climático HadCM3, para o cenário climático A1B (AR4), nos períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2098. Os resultados mostraram para o período de 2011-2040 poderá ocorrer uma redução do escoamento anual, mas para os demais períodos há uma tendência de aumento para a maioria das bacias de cabeceira. Os resultados também evidenciaram que poderá ocorrer um aumento gradual na precipitação na região de cabeceira do rio Grande ao longo do século XXI. No final do inverno, período de seca na região, e início da primavera, a redução das chuvas pode causar uma mudança na dinâmica da recarga do lençol freático, afetando o escoamento base, que por sua vez, pode estender e intensificar o período de recessão, e, portanto, afetar a disponibilidade dos recursos hídricos. Entretanto, os autores salientaram que o aumento das chuvas durante o verão (estação chuvosa), provocará um aumento do escoamento superficial direto, fato que pode modificar os regimes de cheias dos rios nas bacias de cabeceira.

Mishra e Lihare (2016) aplicaram o modelo SWAT para analisar a sensibilidade dos principais componentes do ciclo hidrológico sob projeções climáticas futuras, em 18 bacias subcontinentais indianas. Os resultados previram que as bacias em estudo terão um clima mais quente e úmido no futuro. Durante o período de monção (junho a setembro), na Índia, foram projetadas para o cenário RCP4.5, que a temperatura média do ar aumentaria mais de 0,5 °C, 1,0 °C e 1,5 °C para os períodos de 2010-2039, 2040-2069 e 2070-2069, respectivamente. Já para o cenário RCP8.5, esse aumento seria de 0,8 °C, 2,0 °C e 3,5 °C para os mesmos períodos. A evapotranspiração, para os períodos de 2010-2039 e 2040-2069, pode aumentar em até 10% para a maioria das bacias analisadas, em ambos os cenários. A precipitação pode ter aumentos significativos e o escoamento superficial médio pode aumentar mais de 40% em 11 e 15 bacias para os cenários RCP 4.5 e 8.5 respectivamente, nas estações de monção.

Alvarenga et al. (2016), utilizando o modelo hidrológico DHSVM, simularam os possíveis impactos hidrológicos projetados pelo modelo Eta/HadGEM2-ES, para o cenário RCP 8.5, nos períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e de 2071 a 2099, na bacia hidrográfica Lavrinha, no estado de Minas Gerais. Os resultados indicaram reduções nas vazões médias mensais variando entre 20 e 77% ao longo do século XXI.

Oliveira et al. (2017) avaliaram os impactos de mudanças climáticas no potencial de geração hidrelétrica nas usinas hidrelétricas de Camargos, Itutinga e Funil, na cabeceira da bacia do Rio Grande, por meio do modelo hidrológico SWAT, forçado pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, sob influência dos RCPs 4.5 e 8.5. Os resultados indicaram uma redução significativa no escoamento durante todos os períodos simulados e em ambos os cenários analisados, quando comparadas ao período de base (1961-2005). Segundo os autores,

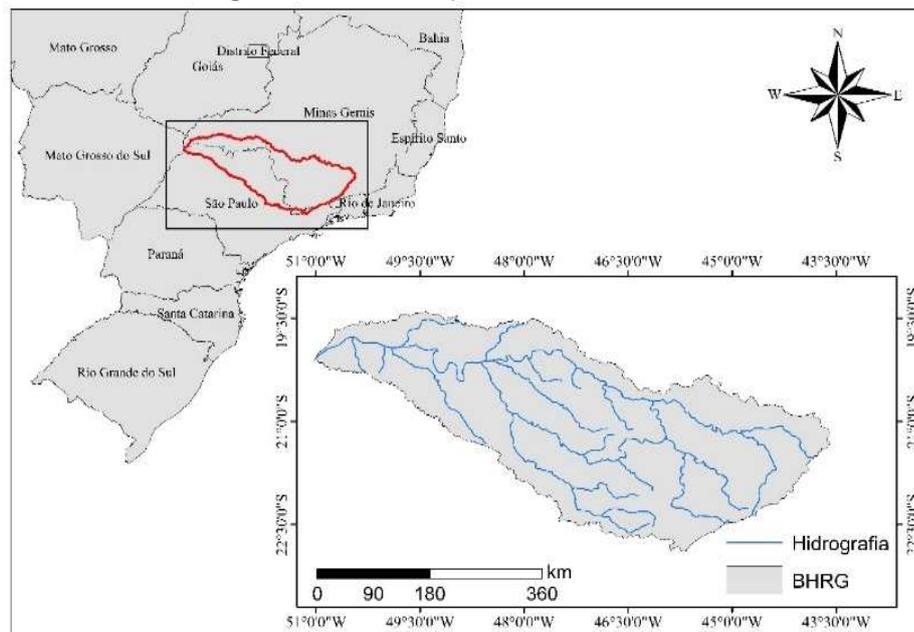
as usinas supracitadas poderão apresentar uma redução na produção de energia elétrica variando entre 6,1 e 58,6%, com interrupções de fornecimento de energia em aproximadamente 70% do tempo ao final do presente do século.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

Este estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Rio Grande (BHRG) (FIGURA 4), que possui área de drenagem de aproximadamente 145.000 km<sup>2</sup>, localizada no Sudeste do Brasil, sendo uma das bacias hidrográficas mais importantes do país em relação ao potencial de produção de energia elétrica e disponibilidade de água, abrangendo 14 instalações ao longo de sua rede de drenagem (NÓBREGA et al., 2011; VIOLA et al., 2015). Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2018), a BHRG apresenta capacidade instalada de 7600 MW, o que corresponde a aproximadamente 8,7% de toda a energia produzida no país.

Figura 4 - Localização da área de estudo.

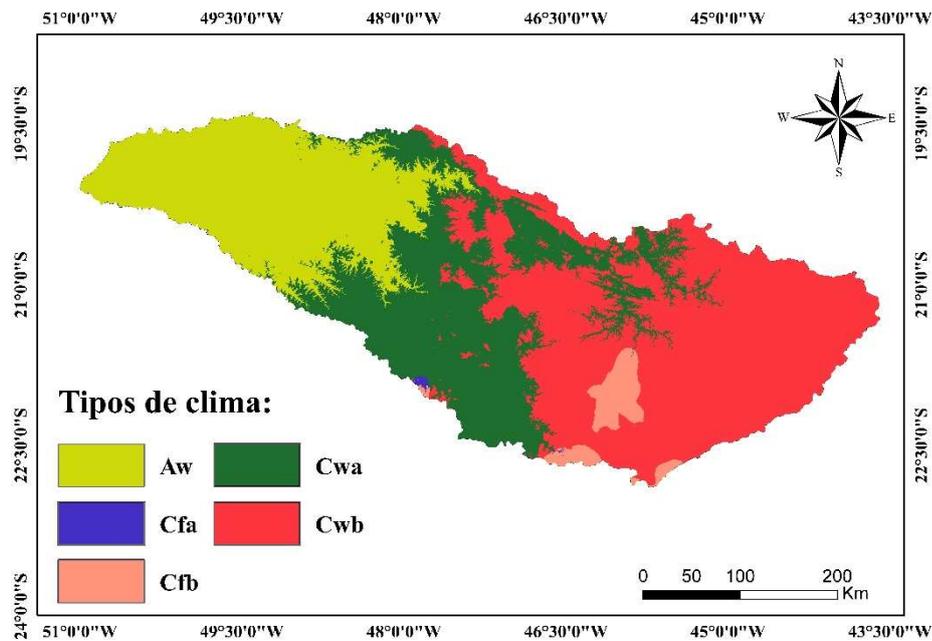


Fonte: Da autora (2019).

O clima da região de estudo pela classificação de Köppen (FIGURA 5), de acordo Bueno (2018), consiste de Aw na faixa oeste da bacia, Cwa na parte sul da bacia e áreas elevadas do Sul de Minas Gerais, e Cwb (com fragmentos de Cfb e Cfa), na região sul/ sudeste da bacia, onde o relevo exerce forte influência na distribuição das chuvas, sobretudo pelo efeito orográfico da Serra da Mantiqueira, levando a maiores precipitações nas regiões de cabeceira, que influencia as temperaturas e a quantidade de precipitação nas áreas vizinhas. Os dois últimos tipos climáticos apresentam duas estações bem caracterizadas por verões amenos e chuvosos e invernos frios e secos. Também são observadas maiores precipitações na porção

centro/norte da bacia do Rio Grande devido à influência da Serra da Canastra. No restante da bacia, destacam-se menores altitudes e menores volumes precipitados e temperaturas mais altas (ANA, 2017).

Figura 5 - Caracterização climática da Região Hidrográfica do Paraná, conforme classificação de Köppen e Geiger (1936).

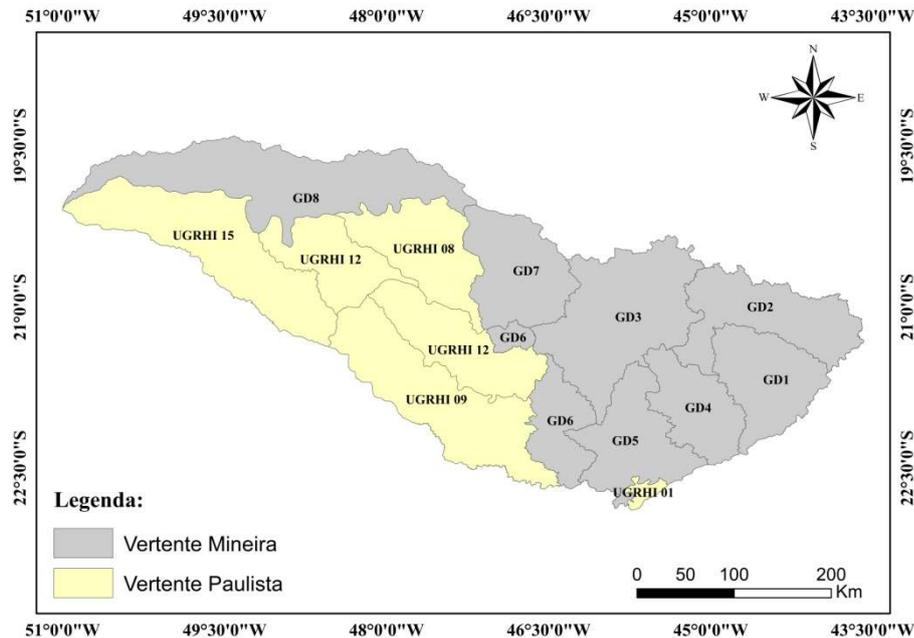


Fonte: Adaptado de Bueno (2018).

A precipitação média anual é de cerca de 1500 mm, que varia de 1100 mm a 2100 mm, dos quais 80% ocorrem entre novembro e março. A temperatura média anual é de aproximadamente 20 °C, com temperaturas médias anuais variando de 14,5 °C a 23,2 °C. A média real da evapotranspiração anual em toda a bacia é de aproximadamente 950 mm (NÓBREGA et al., 2011).

A BHRG está subdividida em 14 Unidades de Gestão Hídrica (UGHs), correspondentes às bacias hidrográficas afluentes ao Rio Grande, sob a atuação dos comitês estaduais, como se pode observar na Figura 6.

Figura 6 - Unidades de Gestão Hídrica da Bacia do Rio Grande.



Fonte: Da autora (2019).

As seis UGHs pertencentes ao estado de São Paulo são denominadas como Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs), e as oito pertencentes a Minas Gerais, são chamadas de Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), codificadas como ‘GDs’, por serem contribuintes do Rio Grande.

### 3.2 Projeções climáticas

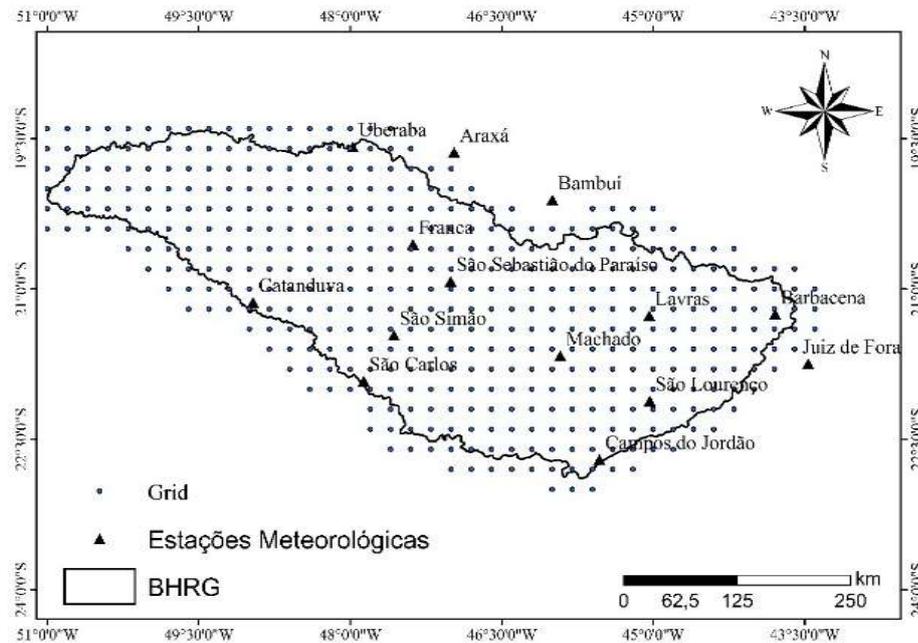
Os dados de projeção de cenários de mudanças climáticas foram obtidos de séries históricas diárias dos modelos climáticos regionalizados Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, com resolução de 20 km, sob dois cenários de emissão: RCP 4.5 (intermediário) e RCP 8.5 (pessimista), das variáveis precipitação (P) e evapotranspiração (ET).

Tal resolução permite uma boa captação da influência do relevo sobre as condições climáticas da região, uma vez que essa tem papel relevante sobre a dinâmica do clima, especialmente nas regiões mais elevadas da bacia do rio Grande (CHOU et al., 2014a). Informações mais detalhadas sobre os modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foram apresentadas por Chou et al. (2014a, 2014b).

As séries históricas dos dados de projeção de cenários de mudanças climáticas contemplaram os seguintes períodos: 1961-2005 (período histórico) e período futuro (2006 - 2040; 2041-2070; e 2071-2099). Estas foram disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), na Plataforma Projeta e foram simuladas por Chou et al. (2014a, 2014b).

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial do *grid* com resolução de 20 km, resultando em 438 pontos na BHRG, bem como a localização das estações meteorológicas utilizadas para a validação das simulações.

Figura 7 - Distribuição espacial das estações meteorológicas e pontos de projeções climáticas simuladas pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 sobre a bacia hidrográfica do Rio Grande.



Fonte: Da autora (2019).

### 3.3 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados no presente estudo são provenientes da rede de estações meteorológicas convencionais disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio do Banco de Dados para Ensino e Pesquisa (BDMEP), localizadas em quatorze municípios distribuídos entre os estados de Minas Gerais e São Paulo, escolhidas de acordo com a maior disponibilidade de dados (FIGURA 7).

Na Tabela 2 estão apresentados código, latitude, longitude e altitude, bem como o período de dados disponível para cada estação. Foram selecionadas séries históricas diárias de precipitação, temperaturas máximas e mínimas, insolação, posteriormente convertida em radiação solar global, umidade relativa do ar e velocidade do vento, do período de 1961 a 2005, quando disponível.

Neste trabalho, o método adotado para a estimativa da evapotranspiração foi o Penman-Monteith, por ser o método considerado padrão pela FAO (*Food and Agriculture Organization*), como descrito por Allen et al. (1998).

Tabela 2 - Código, latitude, longitude, altitude e período de dados para as estações meteorológicas do INMET utilizadas.

<b>Código</b>	<b>Estações/UF</b>	<b>Latitude(°)</b>	<b>Longitude(°)</b>	<b>Altitude(m)</b>	<b>Período(Anos)</b>
83579	Araxá/MG	-19,60	-46,93	1023,61	1965 - 2005
83582	Bambuí/MG	-20,03	-46	661,27	1971-2005
83689	Barbacena/MG	-21,25	-43,76	1126	1961-2005
83714	C. Jordão/SP	-22,75	-45,6	1642	1961-2005
83676	Catanduva/SP	-21,11	-48,93	570	1961-2005
83630	Franca/SP	-20,58	-47,36	1026,2	1965-2005
83692	Juiz de Fora/MG	-21,77	-43,35	939,96	1961-2005
83687	Lavras/MG	-21,75	-45	918,84	1961-2005
83683	Machado/MG	-21,66	-45,91	873,35	1961-2005
83726	S. Carlos/SP	-21,96	-47,86	856	1971-2005
83736	S. Lourenço/MG	-22,1	-45,01	953,2	1961-2005
83631	S. S. Paraíso/MG	-20,91	-47,11	820	1980-2005
83669	S. Simão/SP	-21,48	-47,55	617,39	1961-2005
83577	Uberaba/MG	-19,73	-47,95	737	1961-2005

Fonte: Da autora (2019).

### 3.4 Validação das projeções climáticas

A validação dos modelos climáticos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foi feita pela análise do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), *pixel a pixel* entre os mapas gerados pelos modelos para o tempo presente, e aqueles gerados com base nos dados observados das estações meteorológicas do INMET.

O coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ) é uma estatística utilizada para medir o grau de relação linear entre duas variáveis aleatórias (FERREIRA, 2009). O mesmo descreve o grau de colinearidade entre os dados observados e simulados. Este coeficiente, com variação de -1 a 1, indica o grau de intensidade da correlação entre duas variáveis, e o sentido dessa correlação, se positiva ou negativa (CRESPO, 2002).

Figueiredo Filho e Silva Júnior (2009) interpretaram o coeficiente da seguinte forma:  $r = 0,10$  até  $0,30$  (fraco);  $r = 0,40$  até  $0,6$  (moderado);  $r = 0,70$  até  $1$  (forte). Contudo, de forma geral, quanto mais perto de 1 (independente do sinal) maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis.

A estima da correlação foi realizada a partir da comparação entre as médias sazonais (períodos seco e úmido), das variáveis em estudo, do período de 1961 a 2005, simuladas pelo modelo e observadas nas estações meteorológicas apresentadas na Tabela 2. Para tanto, foram extraídos pontos representando o valor médio de cada *pixel* de 0,36 km<sup>2</sup>, por meio de ferramentas de geoprocessamento, totalizando 558.435 pontos, correlacionados aos pares, com o uso do Excel 2016.

A significância de *r* foi verificada por meio do teste através do teste F, ao nível de significância de 5%.

### 3.5 Balanço hídrico vertical e mudanças climáticas

As variáveis simuladas pelos modelos climáticos utilizadas para a obtenção das projeções futuras de balanço hídrico vertical (BHV) foram precipitação (P) e evapotranspiração (ET). Para caracterizar o balanço hídrico na BHRG foram calculadas as médias mensais anuais para os períodos de 1961-2005 (período histórico), 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099, com base na Equação 1.

$$BHV = P - ET \quad (1)$$

em que: BHV é o balanço hídrico vertical (mm), P é a precipitação (mm) e ET é a evapotranspiração (mm).

Para o cálculo das mudanças climáticas projetadas para a disponibilidade hídrica considerou-se como referência os valores simulados para o período histórico (*baseline*). Assim, quantificou-se as mudanças climáticas simuladas para os períodos de 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099 pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 nos RCPs 4.5 e 8.5, conforme a Equação 2.

$$A = Pf - Ph \quad (2)$$

em que: A é a mudança climática projetada para a disponibilidade hídrica (mm), Pf é a projeção para o período futuro (mm) e Ph projeção para o período histórico (mm).

Para análise das mudanças climáticas projetadas, tem-se que valores positivos representam aumento da variável no período futuro em análise, enquanto que, valores negativos representam redução.

As médias mensais foram analisadas e espacializadas de forma sazonal, ou seja, dividindo-se o ano hidrológico em um período seco (de abril a setembro) e outro úmido (de outubro a março).

Os valores de mudança climática projetada para a disponibilidade hídrica foram mapeados para toda a BHRG, usando o Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGis, versão 10.2.

Para o mapeamento, adotou-se a geoestatística por meio da krigagem ordinária que apresenta resultados mais eficazes na interpolação de variáveis hidrológicas (GARDIMAN JUNIOR et al., 2012; SILVA et al., 2011). Castro et al. (2010), analisando o desempenho de diferentes interpoladores, concluíram que o método da krigagem é o mais eficiente para a espacialização dos parâmetros do balanço hídrico climatológico.

O semivariograma experimental foi testado a partir dos ajustamentos dos modelos esférico, exponencial e gaussiano, tendo o modelo exponencial apresentado o melhor ajuste.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Comparação do balanço hídrico simulado pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 em relação ao observado para o tempo presente

Os coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ), entre os dados observados e simulados para o tempo presente (1961-2005) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação linear de Pearson entre balanço hídrico vertical sazonal (períodos úmido e seco) para os dados observados e simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta- MIROC5, em toda a bacia hidrográfica do Rio Grande.

	<b>BHV - Dados observados - Média sazonal - Período seco</b>	<b>BHV - Dados observados - Média sazonal - Período úmido</b>
<b>BHV - Eta- HadGEM2- ES</b>	0,69	0,55
<b>BHV - Eta- MIROC5</b>	0,83	0,60

Fonte: Da autora (2019).

As médias sazonais do balanço hídrico obtidas por meio dos dados observados e simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 não diferem significativamente, para o período de 1961 a 2005, tendo a significância de  $r$  verificada por meio do teste F, a 5 % de probabilidade ( $p < 0.05$ ).

O melhor desempenho para estimativa do balanço hídrico vertical sazonal foi obtido pelo modelo Eta-MIROC5 no período seco, correspondendo a um coeficiente  $r$  de 0,83, interpretado como forte (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009). Este modelo apresentou melhor correlação quando comparado ao modelo Eta-HadGEM2-ES. Chou et al. (2014a), em suas análises sobre a precipitação para a América do Sul, mostrou que nos períodos seco e chuvoso, o modelo Eta-MIROC5 foi o que apresentou melhores simulações climáticas para a região em que a BHRG se encontra.

O período seco apresentou melhor desempenho quando comparado ao período úmido, para o qual as correlações foram de 0,55 e 0,60 para os modelos Eta- HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, respectivamente. As menores correlações obtidas pelos modelos para o período úmido podem ser justificadas pela dificuldade em se prever os fenômenos que contribuem para a ocorrência de chuva nessas regiões. Estes são controlados majoritariamente pelas condições de umidade e instabilidade do ar e por sistemas meteorológicos transientes, notadamente as frentes frias que organizam as chuvas sobre grandes áreas, e ocorrência de precipitações convectivas (REBOITA et al., 2010), que apresentam, além de elevada intensidade, alta

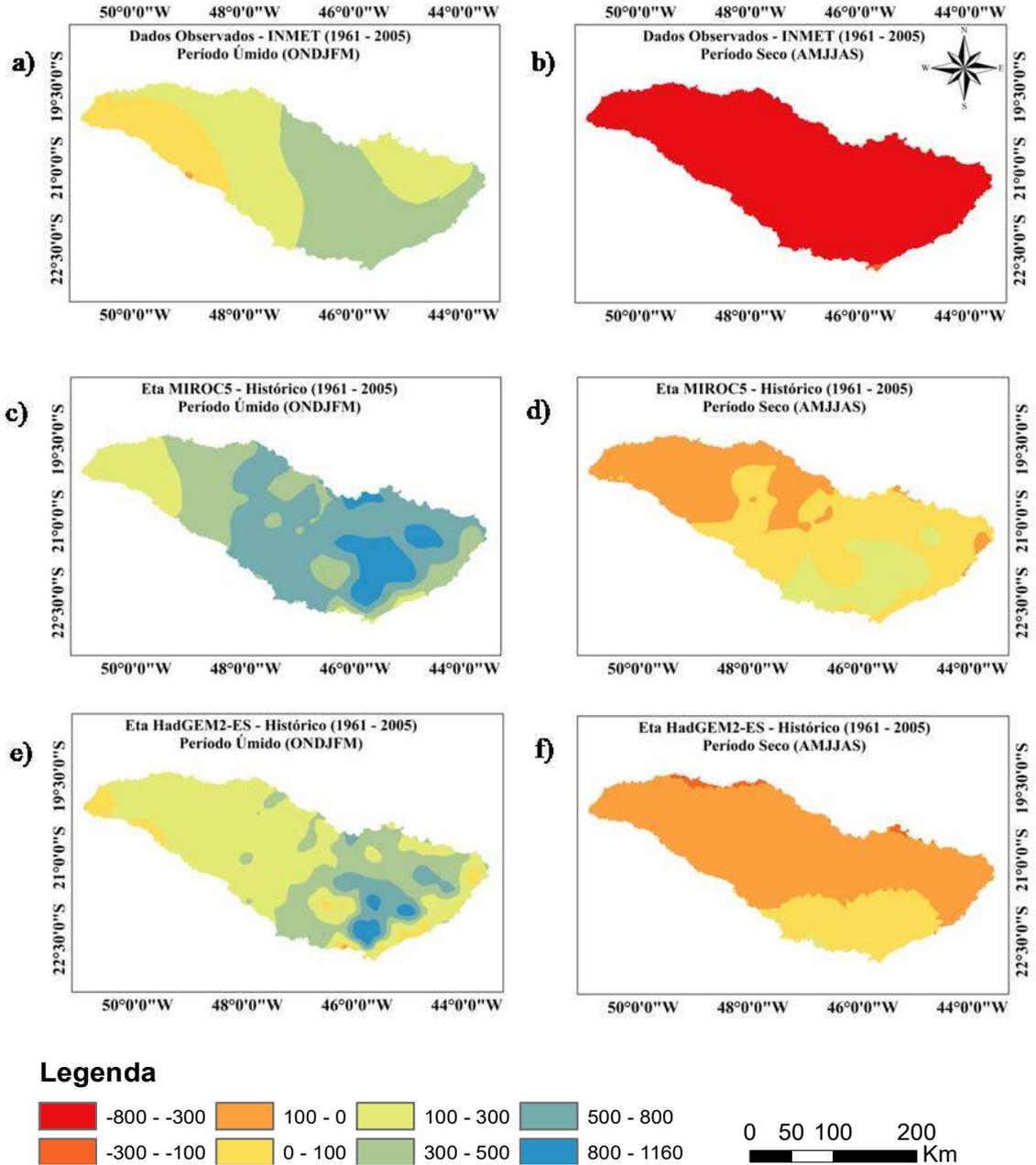
variabilidade espacial (MELLO; SILVA, 2013). Portanto, projeções climáticas nesse sentido exigiriam prognosticar com precisão o comportamento, o deslocamento, o número, e a intensidade de sistemas meteorológicos transientes (SAMPAIO; DIAS, 2014).

É necessário considerar, que as projeções feitas pelos modelos climáticos possuem incertezas especialmente associadas à representação de processos físicos relevantes, sensibilidade do modelo às condições iniciais adotadas, e como mudanças nessas variáveis se traduzem em mudanças no clima (BURKE et al., 2015). Outro aspecto a ponderar-se é a carência de estações meteorológicas existentes com séries de dados disponíveis, fazendo com que a disponibilidade hídrica observada do tempo presente seja estimada por uma pequena quantidade de estações que representam toda a área da BHRG. Essa baixa densidade de estações (aproximadamente 1 estação para cada 10.357 km<sup>2</sup>) diminui a precisão da interpolação e espacialização dos eventos climáticos observados.

Contudo, os modelos apresentaram coeficientes de correlação satisfatórios em relação à climatologia observada, indicando que estes representam a sazonalidade da disponibilidade hídrica na bacia corretamente, considerando-se a boa aderência aos dados observados no período de 1961 a 2005, o que faz com que as projeções futuras representem satisfatoriamente os impactos de mudanças climáticas futuras.

Na Figura 8 estão apresentadas a espacialização dos valores médios para o período controle (1961-2005), do saldo de balanço hídrico vertical sazonal (períodos úmido e seco) para os dados observados (a, b) e simulados pelos modelos Eta-MIROC5 (c, d) e Eta- HadGEM2-ES (e, f), em toda a bacia hidrográfica do Rio Grande.

Figura 8 - Balanço Hídrico (mm/6 meses) estimado com base nos dados observados para os períodos úmido (a) e seco (b) e simulados pelos modelos Eta- MIROC5(c, d) e Eta-HadGEM2-ES (e, f).



Fonte: Da autora (2019).

Analisando os mapas gerados pelos dados observados de balanço hídrico vertical durante os períodos úmido e seco (FIGURAS 8a e 8b), nota-se que a região Norte/Noroeste da bacia do Rio Grande apresenta os menores saldos do balanço hídrico, enquanto os maiores excedentes concentram-se na região sul/sudeste, a qual consiste da região de cabeceira, apresentando condições climáticas muito distintas, tais como maiores totais precipitados e

menores taxas de evapotranspiração, onde o relevo exerce forte influência na distribuição das chuvas, sobretudo pelo efeito orográfico da Serra da Mantiqueira, que influencia fortemente as temperaturas e a quantidade de precipitação nas áreas vizinhas (NÓBREGA et al., 2011).

O padrão de precipitação nesta região está associado a frentes frias bem como ao fluxo de umidade do Oceano do Atlântico e episódios de ZCAS sobre a região. No período seco, os *déficits* mais acentuados são observados para região Norte/Noroeste. Esse comportamento de *déficit* hídrico é padrão em toda a bacia hidrográfica no período de inverno, que está associado à atuação do Anti-Ciclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) sobre o Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, afetando fortemente o regime de precipitação nesta faixa de latitudes (REBOITA et al., 2010).

Observa-se que ambos os GCM's simularam uma maior disponibilidade hídrica em relação à observada, especialmente para o período úmido e para a região sul da bacia. Segundo Sampaio e Dias (2014), a variabilidade climática sazonal é controlada principalmente pelas lentas variações das temperaturas dos oceanos. Sendo assim, as regiões Sudeste e Centro-Oeste apresentam as menores confiabilidades de predição devido à menor dependência com relação aos oceanos e à grande variabilidade dos sistemas meteorológicos que governam estas regiões.

## **4.2 Projeções do balanço hídrico na bacia do Rio Grande, Sudeste do Brasil**

### **4.2.1 Modelo Eta-HadGEM2-ES**

Na Tabela 4 estão apresentados o balanço hídrico vertical médio, desvio padrão e variação (%) em relação ao tempo presente (1961 – 2005), simulados para a BHRG, pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, sob condições dos RCPs 4.5 e 8.5, de forma sazonal (períodos seco e úmido).

Tabela 4 - Média anual do saldo do balanço hídrico vertical (mm/6 meses), desvio padrão e variação (%) em relação ao tempo presente, simulada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, em diferentes períodos de tempo.

RPC	Período do ano	1961-2005		2006 – 2040		2041-2070			2070 – 2099			
		Eta- HadGEM2 -ES										
		Média	DP	Média	DP	$\Delta$ PA	Média	DP	$\Delta$ PA	Média	DP	$\Delta$ PA
4.5	SECO	-32	49	-195	55	-515	-24	32	24	-18	44	43
	ÚMIDO	296	171	84	62	-71	142	78	-52	135	83	-54
8.5	SECO	-32	49	15	30	148	-9	33	78	36	37	214
	ÚMIDO	296	171	89	76	-70	93	60	-68	60	50	-80

Fonte: Da autor (2019).

Os resultados simulam saldos (P-ET) cada vez menores ao longo do século XXI, para o período úmido, por ambos os cenários, sendo o RCP 8.5 aquele que apresentou as maiores reduções e os menores valores de disponibilidade hídrica, na maior parte do tempo, o que pode acarretar importantes alterações ambientais em função da intensificação do *déficit* hídrico. Souza (2017), em um estudo de mudanças climáticas no estado do Tocantins, também encontrou as maiores reduções para as variáveis precipitação e evapotranspiração real simulada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, RCP 8.5, no período úmido (outubro a março).

O período seco, sob influência do RCP 4.5 apresentou uma abrupta redução, na ordem de 515% no primeiro período de tempo (2006-2040), e uma posterior estabilização dos valores, com leve aumento em relação ao tempo controle até o fim do século. Já para o RCP 8.5, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou um comportamento variado, alternando entre elevação e diminuição dos saldos de balanço hídrico.

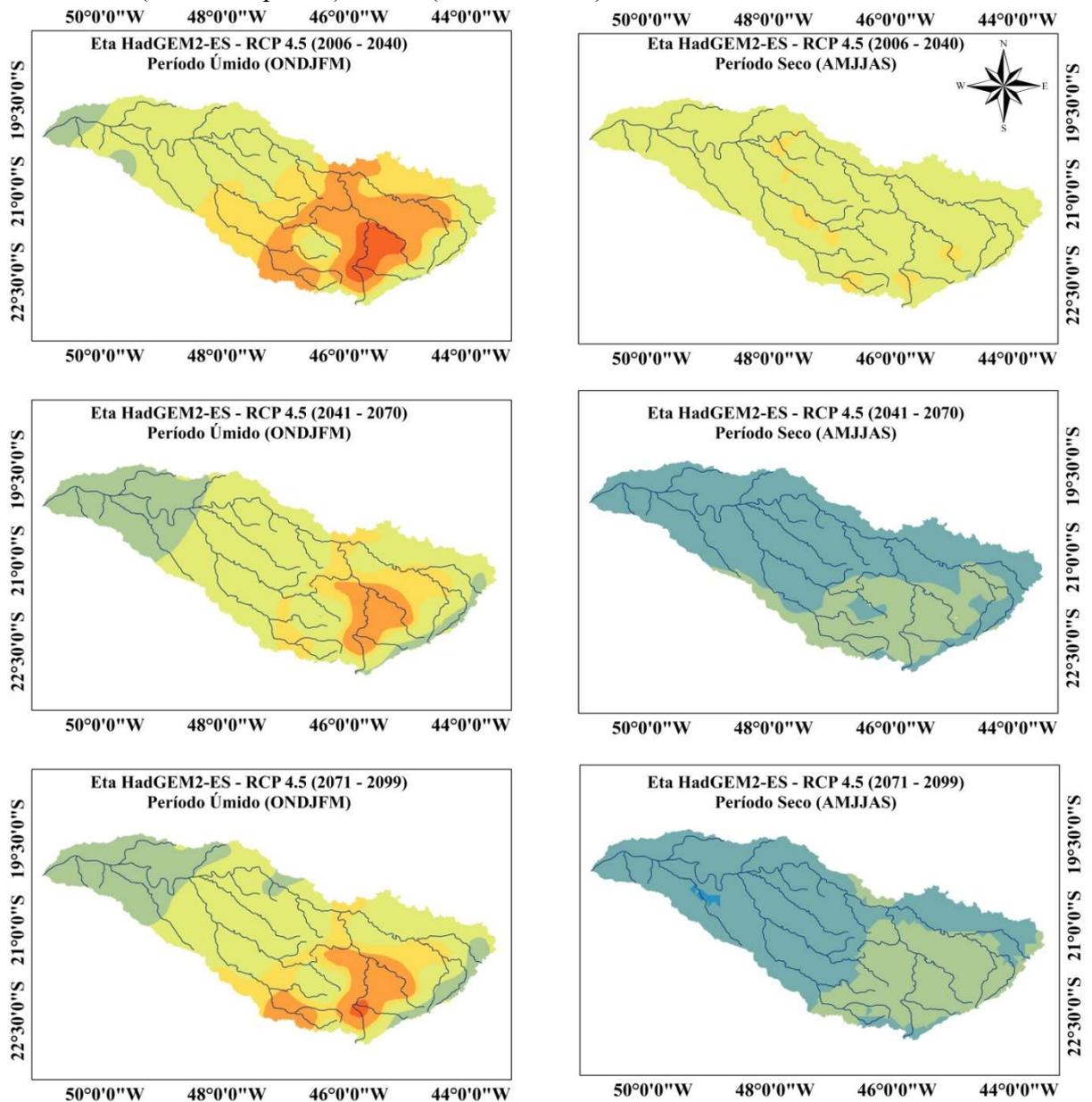
A redução mais significativa pode ser observada no primeiro período de tempo (2006-2040) sob influência do RCP 4.5. Esse comportamento no período úmido é especialmente preocupante, uma vez que pode vir a acarretar impactos hidrológicos negativos para os reservatórios em toda a bacia do Rio Grande, comprometendo o potencial de geração de energia. Esse resultado é reflexo da redução da precipitação no período úmido, o qual é responsável pelo enchimento dos reservatórios de cabeceira, como Camargos e Furnas. Este procedimento de operação visa manter reservatórios de nível constante à jusante no período seco, proporcionando melhor eficiência hidrológica ao sistema, como ocorre com o reservatório do Funil, o qual possui sua operação atrelada ao reservatório de Camargos, localizado a montante (BUENO, 2018).

Mudanças no saldo do balanço hídrico, sejam elas positivas ou negativas, podem afetar o ciclo hidrológico das bacias com impactos significativos na disponibilidade hídrica, afetando a produção de energia elétrica e de alimentos, e no abastecimento de água (VIOLA et al., 2015). Portanto, o balanço hídrico vertical sazonal, em regiões caracterizadas por climas com forte

sazonalidade na precipitação, é uma ferramenta fundamental para avaliar o impacto das mudanças climáticas sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Na Figura 9 apresenta-se a evolução temporal dos valores médios, por período de tempo, das mudanças climáticas projetadas para o balanço hídrico vertical sazonal (períodos úmido e seco), simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES sob condições do cenário RCP4.5, em toda a bacia hidrográfica do Rio Grande.

Figura 9 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico vertical (mm/ 6 meses) simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, para o cenário RCP 4.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).



### Legenda



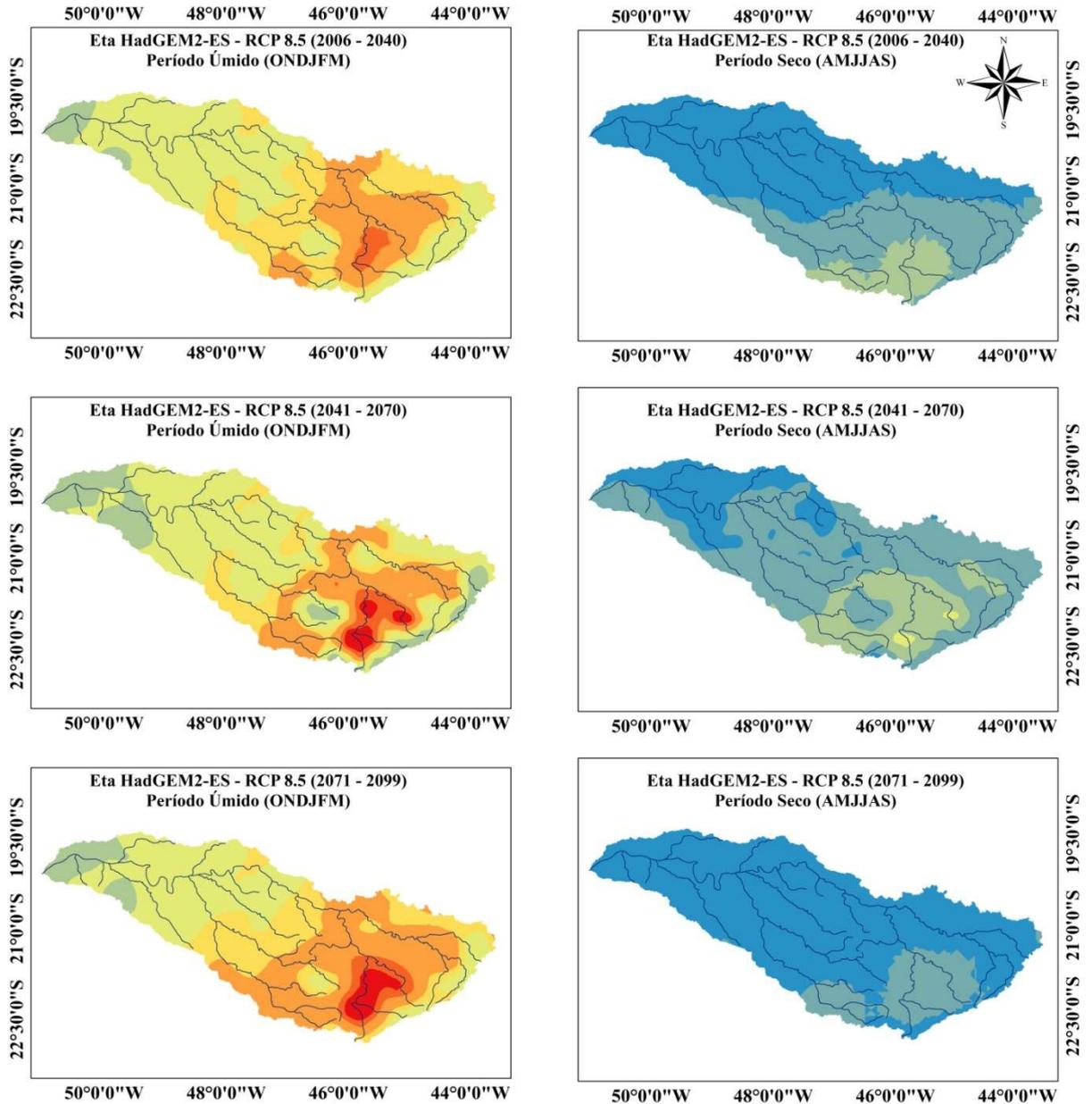
Fonte: Da autora (2019).

Analisando os mapas da Figura 9, observa-se que durante o período úmido (outubro a março), há tendência de diminuição da disponibilidade hídrica ao longo do século XXI em relação ao período controle (tempo presente), para o cenário RCP4.5, principalmente, no sentido sul/sudeste da bacia, com base nas projeções realizadas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. Para o período seco (abril a setembro), foi observada predominância de valores negativos

para toda a bacia, durante o primeiro período de tempo, e uma posterior estabilização dos valores (-100 – 50 mm/6 meses) nos períodos de tempo subsequentes, sendo a região sul/sudeste da bacia, próximo à região da Serra da Mantiqueira, onde se encontram as reduções, cujos valores variaram de 0 a -50 mm/6 meses em relação ao período de tempo presente.

A evolução temporal das mudanças climáticas projetadas para os dados médios de balanço hídrico vertical sazonal simulados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES para o cenário RCP8.5 está apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico vertical (mm/ 6 meses) simulado pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, para o cenário RCP 8.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).



**Legenda**



Fonte: Do autor (2019).

Analisando os mapas, observa-se que no período úmido há uma tendência de redução ainda mais intensa do saldo do balanço hídrico, em toda a bacia, em relação ao período controle e em relação ao RCP4.5. O período seco apresenta um comportamento que oscila entre elevação dos valores de disponibilidade hídrica no primeiro (2006-2040) e terceiro períodos de tempo (2071-2099) e redução no segundo (2041-2070), ambos em relação ao período de controle.

Comparando as projeções do modelo Eta-HadGEM2-ES para o RCP 4.5 em relação ao RCP 8.5, observou-se que estas apresentam similaridade em termos de sua distribuição espacial,

com concentração dos maiores reduções na região Sul/Sudeste onde encontram-se os maiores saldos de disponibilidade hídrica, uma vez que o relevo exerce forte influência na distribuição das chuvas, sobretudo pelo efeito orográfico da Serra da Mantiqueira e proximidade com Oceano Atlântico, levando a maiores precipitações para áreas de cabeceira, e em menor proporção, para o centro/norte da bacia do Rio Grande que está sob influência da Serra da Canastra. No restante da bacia, destacam-se *déficits* acentuados de disponibilidade hídrica, especialmente nas menores altitudes e menores volumes precipitados (ANA, 2017).

No período úmido, os resultados foram semelhantes para ambos os RCPs, contudo, o cenário 8.5 simulou maior *déficit* hídrico na BHRG, resultando em consonância com esperado, uma vez que o mesmo simula condições de aquecimento mais pessimistas, com aumento médio de temperatura do planeta de até 4,8 °C, conduzindo a valores mais elevados de evapotranspiração e demanda atmosférica.

Analisando o período úmido, essas tendências não ocorreram na mesma intensidade, sendo o RCP4.5 o que apresentou as maiores reduções de disponibilidade hídrica. O modelo HadGEM2-ES para o cenário RCP 8.5 simula aumentos de precipitação durante o verão (período úmido) para a bacia, contribuindo para saldos negativos menos impactantes do que aqueles observados para as condições do cenário RCP 4.5.

#### 4.3.2 Modelo Eta-MIROC5

Na Tabela 5 estão apresentados o balanço hídrico vertical médio, desvio padrão e variação (%) em relação ao período de tempo histórico (1961 – 2005), simulados para a BHRG, pelo modelo Eta-MIROC5, sob condições dos RCPs 4.5 e 8.5, de forma sazonal (períodos seco e úmido).

Tabela 5 - Média anual do saldo do balanço hídrico vertical (mm/ 6 meses), desvio padrão e variação(%) em relação ao período de tempo histórico, simulada pelo modelo Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5, em diferentes períodos de tempo.

RPC	Período do ano	Eta- MIROC5			
		1961-2005	2006 – 2040	2041-2070	2070 – 2099

		Média	DP	Média	DP	$\Delta$ PA	Média	DP	$\Delta$ PA	Média	DP	$\Delta$ PA
4.5	SECO	34	70	43	72	30	64	89	90	38	70	15
	ÚMIDO	546	201	490	204	-10	564	244	3	425	186	-22
8.5	SECO	34	70	0	60	-99	37	73	10	5	74	-86
	ÚMIDO	546	201	-43	-22	-108	528	236	-3	569	245	4

Fonte: Da autora (2019).

O modelo Eta-MIROC5 simulou saldos (P-ET) com uniformidade e poucas variações ao longo do século XXI para ambos os cenários e períodos do ano. A redução mais significativa pode ser observada no primeiro período de tempo (2006-2040) sob influência do RCP 8.5, na ordem de 99% para o período seco e de 108% para o período úmido em relação ao período controle, chegando a projetar um valor médio negativo de -43 mm/6meses que é especialmente preocupante, uma vez que pode vir a acarretar impactos hidrológicos negativos para os reservatórios em toda a bacia do Rio Grande, como a crise hídrica que atingiu o Sudeste do Brasil entre 2013 e 2015, onde a precipitação nos meses de janeiro e fevereiro de 2014 foi muito abaixo da normal climatológica no Sudeste do Brasil (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016).

Marengo et al. (2015) ressaltam que foram observados *déficits* de precipitação entre janeiro e março no Sudeste do Brasil, variando de 150 a 200 mm/mês abaixo da normal climatológica. Esses valores concordam com Coelho, Cardoso e Firpo (2016) que afirmam que, em algumas áreas desta região, o *déficit* foi superior a 300 mm durante este período. Reboita et al. (2015) compararam a precipitação de janeiro de 2014 com a média do período de 1979 a 2015 deste mesmo mês, e notaram que há vários meses de janeiro nos quais a anomalia de precipitação foi negativa no sudeste do Brasil, entretanto, os anos mais secos foram 2014 e 2015. O *déficit* de precipitação no verão de 2014 gerou uma grave crise hídrica em relação ao abastecimento da população como relatado por Marengo e Alves (2015).

O período seco, sob influência do RCP 4.5, apresentou elevação dos valores ao longo do primeiro e do segundo períodos de tempo e, apesar de ter uma redução no terceiro período, os saldos projetados para o final do século ainda são maiores que os projetados para o período histórico, simulando assim, uma elevação do excedente hídrico para a BHRG. Já o período seco, sob influência do RCP 8.5, apresentou um comportamento mais variado, com uma abrupta redução no primeiro período de tempo, elevação dos valores no segundo período e redução no terceiro período, chegando ao final do século com valores inferiores de balanço hídrico, em relação àqueles projetados no período histórico.

O período úmido, sob influência do RCP 4.5, apresentou redução dos valores ao longo do primeiro período de tempo, elevação no segundo período, e uma redução expressiva no terceiro período (22%) em relação ao período controle, terminando o século com saldos

inferiores de balanço hídrico em relação àqueles projetados no período histórico. O mesmo período, sob influência do RCP 8.5, apresentou uma drástica redução no primeiro período de tempo (108%), com posterior elevação no segundo e terceiro períodos com saldo projetado para o final do século, ainda maiores que os projetados para o período histórico, simulando assim, uma elevação do excedente hídrico para a BHRG.

O modelo Eta-MIROC5 simulou maior disponibilidade hídrica quando comparado ao modelo Eta-HadGEM2-ES. Os valores do saldo do balanço hídrico vertical mantiveram-se praticamente constantes em ambos os cenários e períodos de tempo ao longo do Século XXI, contudo, com maior impacto também no primeiro período de tempo (2006-2040).

Comparando-se os resultados simulados para o clima presente com a diferença entre precipitação (1500 mm) e a evapotranspiração (950 mm) média anual histórica para o Alto Rio Grande, encontrados na literatura, tem-se um saldo de 550 mm próximo à cabeceira da BHRG (MELLO et al., 2012; NÓBREGA et al., 2011). Este padrão de excedente hídrico foi melhor representado pelo Eta-MIROC5.

As Figuras 11 e 12 apresentam a evolução temporal dos valores médios, por período de tempo (*time slice*), das mudanças climáticas no balanço hídrico sazonal (períodos úmido e seco) em relação ao tempo presente, simulados pelo modelo Eta-MIROC5, respectivamente para os RCP4.5 e 8.5, para a BHRG.

Figura 11 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico (mm/6 meses) projetado pelo modelo Eta-MIROC5, para o RCP 4.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).

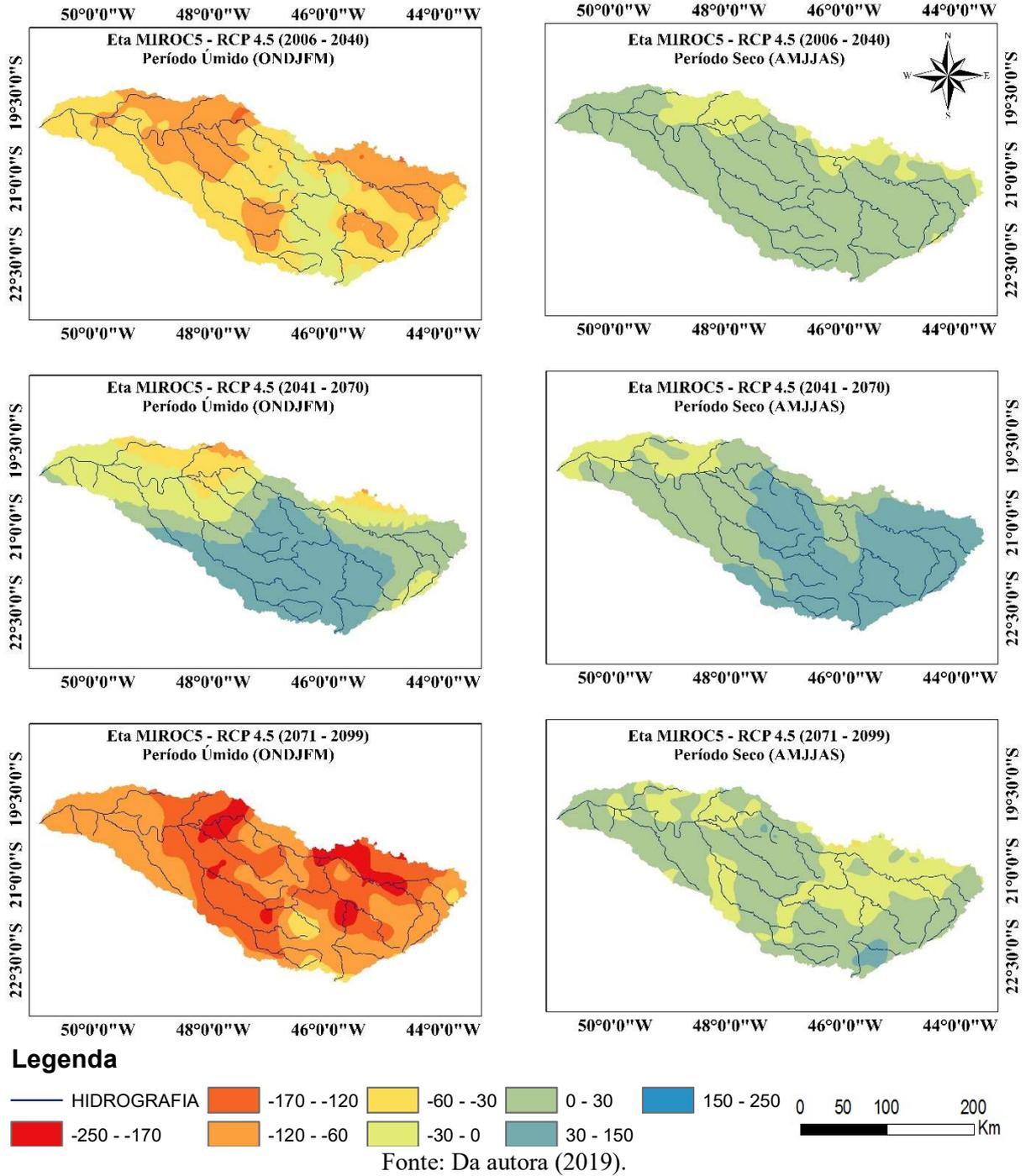
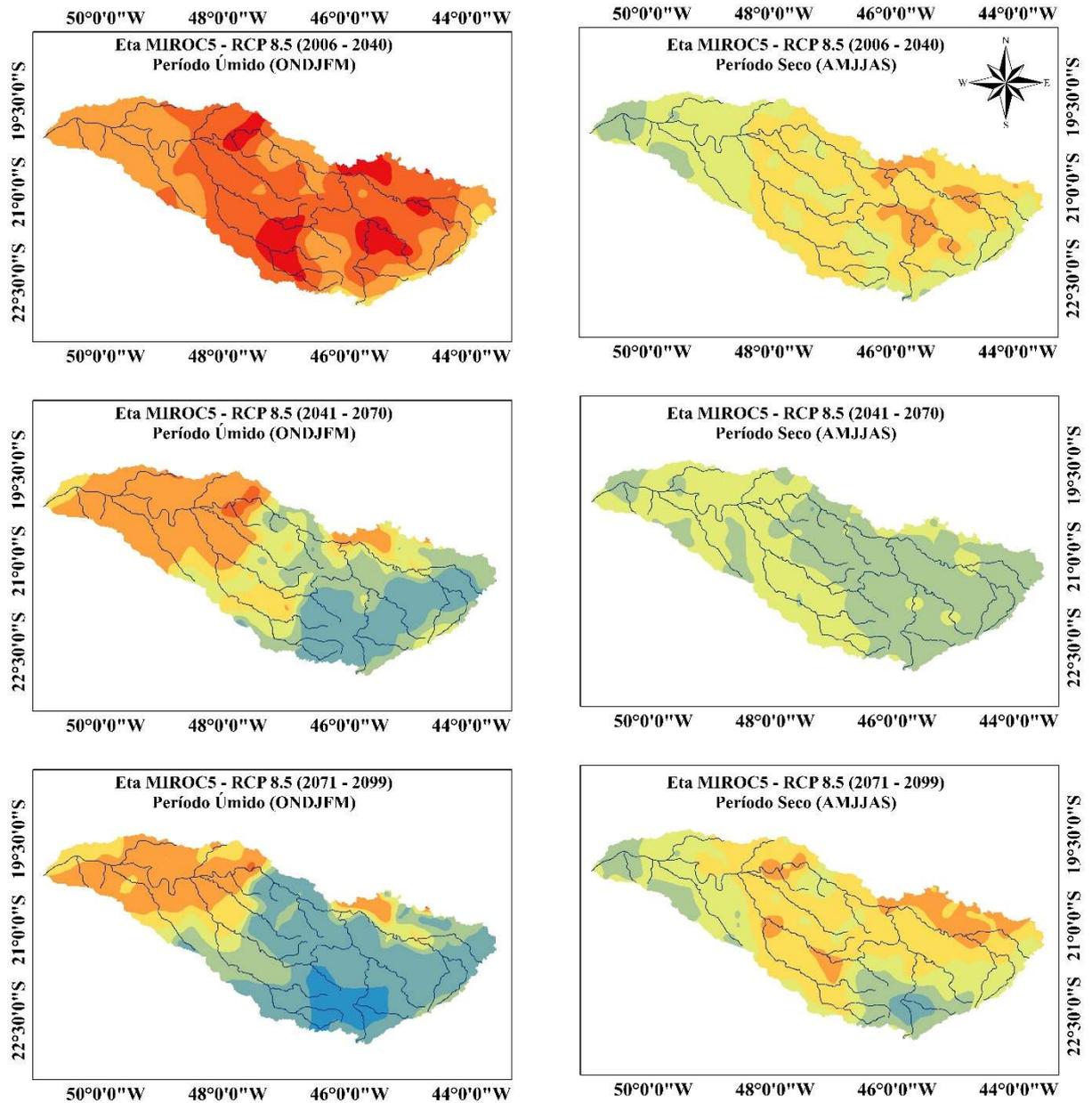


Figura 12 - Mudanças Climáticas no Balanço Hídrico (mm/6 meses) simulado pelo modelo Eta-MIROC5, para o cenário RCP 8.5, dividido em períodos úmido (coluna esquerda) e seco (coluna direita).



### Legenda



Fonte: Da autora (2019).

Analisando as Figuras 11 e 12, observa-se que o modelo Eta-MIROC5 simulou saldos de balanço hídrico vertical com poucas variações durante os períodos futuros (2006-2040, 2041-2070, 2071-2099) em relação ao período histórico, tanto no período seco quanto no úmido, para ambos os RCPs, diferente do modelo Eta-HadGEM2-ES, o qual apresentou maior amplitude e variação espacial do balanço hídrico vertical ao longo do século.

Observa-se ainda, que as Figuras 11 e 12, estão em consonância com os valores médios de saldo do balanço hídrico vertical apresentados na Tabela 5, onde as reduções mais drásticas

foram observadas no período úmido, que sob influência do RCP 4.5, apresentou redução dos valores ao longo do primeiro período de tempo, elevação no segundo período e uma redução abrupta no terceiro período, em relação ao período controle, terminando o século com saldos inferiores de balanço hídrico em relação àqueles projetados no período histórico, sob influência do RCP 8.5, apresentou uma drástica redução no primeiro período de tempo, com posterior elevação no segundo e terceiro períodos com saldo projetado para o final do século ainda maiores que os projetados para o período histórico, simulando assim, uma elevação do excedente hídrico para a BHRG.

O período seco apresentou um comportamento mais variado em ambos os RCPs, sendo que sob influência do RCP 4.5, apresentou elevação dos valores ao longo do século, simulando assim, uma elevação do excedente hídrico para a BHRG. Já sob influência do RCP 8.5, apresentou uma abrupta redução no primeiro período de tempo, elevação dos valores no segundo período, e redução no terceiro período, chegando ao final do século com valores inferiores de balanço hídrico em relação àqueles projetados no período histórico.

Ambos os modelos foram capazes de representar o padrão de distribuição espacial das variáveis climáticas analisadas, as quais estão sob influência do relevo, uma vez que esse tem papel relevante sobre a dinâmica do clima especialmente nas regiões mais elevadas da bacia do rio Grande (CHOU et al., 2014a). Nestas áreas, foram verificadas as maiores reduções, que podem acarretar importantes alterações ambientais em função da intensificação do *déficit* hídrico na região Sul/Sudeste onde o relevo e a proximidade com o Oceano Atlântico, exercem forte influência na distribuição das chuvas, e os menores *déficits* onde se encontram às menores altitudes e menores volumes precipitados.

O modelo Eta-MIROC5 apresentou valores mais elevados de disponibilidade hídrica, principalmente na região sul da bacia, uma vez que o padrão de precipitação nesta região está mais associado a frentes frias bem como ao fluxo de umidade do Oceano do Atlântico. De acordo para com Chou et al. (2014a), a região sudeste do país, o modelo Eta-MIROC5 apresenta uma tendência de maior concentração de chuvas nos períodos mais chuvosos do ano (dezembro, janeiro e fevereiro), mantendo o padrão atual. No entanto, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta tendência de maior distribuição de chuvas ao longo do ano, com aumento no inverno e redução no verão, ou seja, com alteração não somente nos totais precipitados, mas também no padrão de distribuição da precipitação. Tal fato justifica os valores encontrados para o período chuvoso no modelo Eta-MIROC5 quando comparados aos dados do modelo Eta-HadGEM2-ES.

Assim, o modelo Eta-HadGEM2-ES apresenta tendência de diminuição da disponibilidade hídrica de forma mais severa em ambos os cenários ao longo século XXI, em relação ao modelo Eta-MIROC5, especialmente no verão. Observa-se ainda, que tanto com base no Eta-MIROC5 como no Eta-HadGEM2-ES, a região Sul/Sudeste da bacia poderá ser duramente afetada por saldos negativos de balanço hídrico mesmo durante o período chuvoso, comprometendo reservatórios instalados na mesma. Contudo, na região Norte/Nordeste da bacia do Rio Grande, os saldos continuariam a ser positivos, apesar de menores em relação ao clima atual, e os saldos negativos são essencialmente concentrados no período seco. Estes resultados demonstram a necessidade de readequação no funcionamento operacional dos reservatórios no longo prazo, a fim de atenuar os impactos negativos da baixa disponibilidade hídrica.

Sousa (2017) quantificou as mudanças climáticas projetadas para a precipitação, evapotranspiração real, temperatura e umidade relativa nos períodos seco e chuvoso dos intervalos temporais de 2007 a 2040 e 2041 a 2070, para o estado do Tocantins, pelos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, sob influência dos RCPs 4.5 e 8.5. As maiores reduções foram encontradas pelo modelo regional Eta-HadGEM2-ES RCP 8.5, exceto para a precipitação no período seco (abril a setembro) onde o modelo Eta-MIROC5 obteve as maiores reduções.

O MCTI (2016a, b), na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, ressalta que nas projeções futuras, o modelo Eta-HadGEM2-ES, em ambos os cenários, sempre apresenta resultados mais intensos do que o Eta-MIROC5. Tal estudo chama atenção para o fato de que a região Sudeste é uma região com baixa previsibilidade climática, que depende da posição da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante o verão, o que afeta significativamente o resultado das projeções.

O MMA (2016), em seu Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima, destaca que os máximos de aquecimento, se localizam na região Centro-Oeste em todas as estações do ano, e que ao final do século XXI, estes máximos se estendem para as regiões Norte, Nordeste e Sudeste do Brasil, podendo variar de 2 °C a 8 °C em algumas áreas. Os centros de máxima redução de chuvas durante o verão localizam-se sobre Centro-Oeste e Sudeste, se expandindo para as regiões da Amazônia.

Nobre et al. (2016) apresentaram as projeções para o Brasil diretamente do conjunto de modelos globais do AR5 – IPCC, sem o refinamento de modelos regionais. Neste estudo, observou-se que mesmo para os cenários mais otimistas, existe a probabilidade de aquecimento, principalmente para o final do século.

Marengo et al. (2010) avaliaram as possíveis mudanças climáticas futuras para a América do Sul e em três grandes bacias hidrográficas do Brasil (Amazônica, Paraná e São Francisco), a partir de projeções para o cenário climático SRES A1B, modelo Eta-CPTEC/HadCM3 sobre a América do Sul. Os resultados demonstraram que a precipitação tende a diminuir ao longo do século, atingindo  $-0,2 \text{ mm dia}^{-1}$  [ $+0,5$  a  $-0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ], para a bacia hidrográfica do Rio Paraná como um todo. Viola et al. (2015), em um estudo na cabeceira do Rio Grande, usando o mesmo cenário e modelo, observaram maior redução do saldo do balanço hídrico vertical no primeiro período de tempo (2011-2040), de 11,2% em relação ao período controle (1960 -1990), tendência que vai de encontro aos dados obtidos neste trabalho.

### **4.3.3 Impactos futuros nas Unidades de Gestão Hídrica**

As mudanças climáticas poderão causar impactos significativos nos recursos hídricos (OLIVEIRA et al., 2017; ALVARENGA et al., 2016; SILVEIRA et al., 2016; VIOLA et al., 2015), sendo a água, o primeiro recurso pelo o qual a população e os setores usuários irão sentir os efeitos dessas mudanças (MMA, 2016). As principais modificações serão relacionadas ao padrão de precipitação, com alteração na intensidade e variabilidade, padrões de temperatura e evaporação, que poderão impactar a disponibilidade hídrica e intensificar os eventos extremos (MMA, 2016; IPCC, 2014; PBMC, 2012).

As demandas quantitativas dos recursos hídricos influenciam vários usos, como abastecimento humano, dessedentação animal, irrigação, mineração, abastecimento industrial, geração de energia, turismo, lazer, dentre outras. Dessa forma, as tomadas de decisões nessas áreas dependem do planejamento dos recursos hídricos, que é baseado nas condições hidrológicas para diferentes escalas de tempo e espaço, dentro da bacia hidrográfica (SILVA, 2005; SANTANA, 2013; ANA, 2015).

O Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (PIRH) é uma iniciativa do Comitê de Bacias do Rio Grande (CBH-Grande), com apoio técnico da Agência Nacional de Águas (ANA), constituindo-se de um instrumento de planejamento estratégico de longo prazo, para uma adequada gestão dos recursos hídricos da bacia (ANA, 2017). Neste documento, foram estimadas as demandas hídricas para o abastecimento urbano e rural, dessedentação animal, indústria, mineração e irrigação, por UGH da BHRG, em média anual e em média do mês de maior demanda por irrigação, uma vez que é importante considerar que o uso da água para este fim se dá, principalmente, nos meses mais secos, ou seja, coincidindo com a menor disponibilidade hídrica e impactando de forma mais expressiva o

balanço hídrico. Ou seja, as demandas de irrigação não são bem representadas por uma média anual, embora este valor seja referência para comparação com os demais usos.

Nas Tabelas 6 e 7 estão apresentadas as demandas hídricas totais em média anual (DMA) e em média do mês de maior irrigação (DMM), obtidas do PIRH e a evolução temporal dos valores médios anuais por período tempo do saldo do balanço hídrico vertical, simulados pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, respectivamente, para a BHRG.

Tabela 6 - Demandas hídricas totais em média anual (DMA), média do mês com maior demanda por irrigação (DMM) e média anual por período de tempo, do saldo do balanço hídrico vertical (mm), simulada pelo modelo Eta-MIROC5, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5.

UGHs da Bacia hidrográfica do rio grande	PIRH		HISTÓRICO	2006 -2040		2041- 2070		2070 - 2099	
	DMA	DMM		4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
Modelo Eta - MIROC5									
UGRHI 01 – Mantiqueira	6.0	10.6	430.5	388.6	822.0	421.9	475.2	391.7	568.0
GD 04 - Verde	8.3	11.8	933.7	891.1	1619.0	1054.7	991.9	824.3	1007.2
GD 01 - Alto Grande	2.0	3.6	660.0	601.7	1274.8	720.5	711.4	560.9	685.7
GD 02 - Vertentes do Rio Grande	7.4	12.9	693.9	615.2	1333.7	724.6	714.3	564.2	670.0
GD 08 - Baixo Grande	11.5	26.4	326.6	256.4	888.5	297.5	235.7	205.0	231.3
UGRHI 15 - Turvo/Grande	18.9	45.9	264.1	228.6	767.5	270.2	193.5	172.7	207.0
UGRHI 12 - Baixo Pardo-Grande	30.6	76.8	408.1	350.1	965.6	395.5	318.1	275.4	319.3
UGRHI 04 - Pardo	36.0	79.5	600.1	559.2	1155.1	667.1	572.5	471.6	584.2
UGRHI 08 - Sapucaí/Grande	23.9	51.4	519.0	460.3	1124.1	535.3	461.9	386.7	460.9
GD 03 - Entorno do Reservatório de Furnas	10.9	19.3	808.0	766.1	1512.4	858.4	811.6	645.2	796.3
GD 07 - Médio Grande	6.2	10.1	521.9	490.9	1127.5	581.0	527.9	423.2	545.7
UGRHI 09 - Mogi Guaçu	50.7	96.6	651.1	614.1	1157.3	748.1	630.5	525.5	662.9
GD 05 - Sapucaí	10.2	17.7	939.9	924.3	1652.3	1108.0	1027.6	852.3	1092.3
GD 06 - Mogi Guaçu/Pardo	14.4	22.3	546.3	530.8	1010.8	635.6	615.5	485.8	702.2

Fonte: ANA (2017) e Da autora (2019).

Tabela 7 - Demandas hídricas totais em média anual (DMA), média do mês de maior irrigação (DMM) e média anual por período de tempo, do saldo do balanço hídrico vertical (mm), simulada pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, considerando os cenários RCP 4.5 e 8.5.

UGHs da Bacia hidrográfica do rio grande	PIRH		HISTÓRICO	2006 -2040		2041- 2070		2070 - 2099	
	DMA	DMM		4.5	8.5	4.5	8.5	4.5	8.5
	Modelo Eta - HadGEM2-ES								
UGRHI 01 – Mantiqueira	6.0	10.6	208.8	-42.2	87.1	178.5	105.5	123.2	74.6
GD 04 - Verde	8.3	11.8	538.6	50.7	247.2	266.0	192.4	261.2	182.5
GD 01 - Alto Grande	2.0	3.6	310.0	-42.4	137.2	150.1	109.0	152.0	110.7
GD 02 - Vertentes do Rio Grande	7.4	12.9	241.7	-92.6	98.8	115.5	81.8	119.3	82.2
GD 08 - Baixo Grande	11.5	26.4	97.8	-193.4	32.7	38.1	31.8	44.9	48.6
UGRHI 15 - Turvo/Grande	18.9	45.9	87.6	-177.3	33.9	29.9	25.1	39.3	44.0
UGRHI 12 - Baixo Pardo-Grande	30.6	76.8	142.0	-188.0	53.1	60.1	50.9	64.7	71.5
UGRHI 04 - Pardo	36.0	79.5	256.4	-157.0	97.1	98.0	80.6	100.5	98.5
UGRHI 08 - Sapucaí/Grande	23.9	51.4	186.6	-176.4	70.7	76.1	69.0	87.8	85.7
GD 03 - Entorno do Reservatório de Furnas	10.9	19.3	363.3	-89.2	127.3	157.9	95.5	150.3	122.9
GD 07 - Médio Grande	6.2	10.1	201.6	-156.2	66.5	78.1	52.8	82.8	75.5
UGRHI 09 - Mogi Guaçu	50.7	96.6	324.3	-101.2	118.7	127.8	85.2	115.1	94.8
GD 05 - Sapucaí	10.2	17.7	664.2	119.4	299.3	335.6	244.9	326.1	231.2
GD 06 - Mogi Guaçu/Pardo	14.4	22.3	277.1	-78.0	112.2	148.5	97.8	119.4	103.0

Fonte: ANA (2017) e Da autora (2019).

Segundo os dados apresentados nas Tabelas 6 e 7, a vertente paulista da bacia contribui com 70% do total das demandas médias anuais, que atingem 18.3 mm e com 75% das demandas máximas mensais, que somam um total de 39.8 mm em toda a bacia. Observa-se a grande representatividade da irrigação no total das demandas da BHRG, correspondendo a 74% dos consumos médios e a 88% dos máximos. O abastecimento industrial aparece na sequência, com aproximadamente 17% dos consumos médios e de 8% dos máximos. Os demais usos não ultrapassam, cada um, 4% da demanda total média e 2% da demanda máxima (ANA, 2017).

O modelo Eta-MIROC5 estima valores mais elevados de disponibilidade hídrica que o modelo Eta-HadGEM2-ES, que apresenta maiores reduções em relação ao período histórico. Os baixos saldos médios anuais encontrados por modelo para o período de 2006-2040, são especialmente preocupantes, por não atenderem as demandas hídricas necessárias nas unidades de gestão hídrica, com exceção do GD04 e GD05, onde se encontra a serra da Mantiqueira e os maiores padrões de precipitação, bem como saldos positivos do balanço hídrico.

Os dados obtidos no PIRH permitem observar que a demanda para irrigação é bastante expressiva na bacia, especialmente na vertente paulista (mais de 3 vezes a demanda da vertente mineira), com destaque à UGRHI 09. Essa constatação se deve, principalmente, ao maior número de empreendimentos do setor sucroalcooleiro existente na vertente paulista, que se

utiliza de cana-de-açúcar plantada em áreas próximas aos estabelecimentos agroindustriais (ANA, 2017).

O aumento da demanda hídrica para irrigação no Brasil pode levar à diminuição da segurança alimentar e maior vulnerabilidade para a agricultura. Os impactos diretos do clima sobre a produção agrícola no país são apenas alguns dos efeitos econômicos causados pela mudança no clima (DOMINGUES; MAGALHÃES; RUIZ, 2011).

A bacia como unidade de planejamento e gerenciamento, propõe uma visão abrangente, incluindo em seu plano, as políticas públicas, a fim de promover a otimização de recursos e a garantia dos usos múltiplos da água, tudo isso com a participação de usuários, autoridades, cientistas, poder público, organizações públicas e privadas.

É importante ressaltar que os recursos hídricos não são afetados apenas pelas mudanças climáticas, mas também pelo uso e ocupação das bacias hidrográficas, aumento da demanda de água, por aumento da população, e necessidade de aumento na produção, seja ela agrícola ou de energia elétrica, intensificação de processos que comprometem a qualidade e a distribuição da mesma. O estudo do balanço hídrico pelas variáveis climáticas, diante dos futuros cenários de mudanças climáticas, permite identificar se a região apresentará, futuramente, deficiência ou excesso de água no solo, podendo assim, auxiliar no planejamento e na gestão e manejo integrado em longo prazo dos recursos hídricos da bacia.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por finalidade avaliar os impactos das mudanças climáticas sobre a dinâmica da disponibilidade de água, por meio da estimativa do balanço hídrico vertical sazonal, simulados até 2099 na BHRG, Sudeste do Brasil, por dois modelos globais, HadGEM2-ES e MIROC5, regionalizados pelo modelo regional Eta, sob influência de dois cenários de radiação (RCP 4.5 e RCP 8.5).

O modelo Eta- MIROC5 apresentou o melhor desempenho ao simular o clima presente. Apesar de todas as incertezas, tais resultados obtidos são significativos e podem ser utilizados, principalmente, em estudos qualitativos que analisem a tendenciosidade dos dados de disponibilidade hídrica.

Observou-se que a região Noroeste da bacia hidrográfica do Rio Grande possui maior tendência em apresentar excedente hídrico, enquanto o maior *déficit* concentra-se na região Sul-Sudeste da bacia, em relação ao período histórico. Esta mesma tendência é mantida em ambos os modelos e cenários, tanto no período úmido (outubro a março) como no seco (abril a setembro).

Os resultados obtidos neste trabalho são de suma importância no contexto da gestão dos recursos hídricos, podendo subsidiar ações que visem o melhor uso possível da água na bacia hidrográfica, por meio da avaliação do impacto das mudanças climáticas, com impactos significativos na disponibilidade hídrica, afetando a produção de energia elétrica, alimentos, e abastecimento humano.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. de. et al. Tendências recentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa, MG. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 631-642, 2011.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage, N° 56).
- ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological responses to climate changes in a head water watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 6, p. 647-657, 2016.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande – PIRH-Grande**. Relatório Final, 2017. 309 p. Disponível em: <<http://pirhgrande.ana.gov.br/>>. Acesso em: 20 fev. 2019.
- \_\_\_\_\_. Agência Nacional de Águas. **Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: Subsídios ao Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas**. Brasília: ANA, 2015.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informações de Geração. **Capacidade de Geração do Brasil**. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 20 fev. 2018.
- BARBOSA, E. C. P. **Mudanças climáticas e o padrão do uso do solo no Brasil**. 2011. 63 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo- USP, São Paulo, SP, 2011.
- BARRY, R.G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. São Paulo: Bookman Artimed, 2013. 175 p.
- BETTS, R. et al. Como modelamos o clima. In: MARENGO, J. A. et al. **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil – Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. Brasília: MCT/INPE/MOHC, 2011.
- BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, 1994.
- BUENO, E. de O. **Pegada hídrica das usinas hidrelétricas do sistema interligado nacional na região hidrográfica do Paraná**. 2018. 371 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2018.
- BUENO, E. de O.; MELLO, C.; ALVES, G. J. Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. **RBRH**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 570-575, 2016.

- BURKE, M.; DYKEMA, J.; LOBELL, D. B.; MIGUEL, E.; SATYANATH, S. Incorporating climate uncertainty into estimates of climate change impacts. **Rev. Econ. Stat**, v. 97, n. 2, p. 461-71, 2015.
- BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L.; CHOU, S.C. 5-year Eta Model seasonal forecast climatology over South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOUTHERN HEMISPHERE METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY, 8., Foz do Iguaçu (PR). **Proceedings...** São José dos Campos: INPE, 2006. p. 503-506.2
- CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: Secretaria do Estado de São Paulo, 1971. n. 6 (Boletim Técnico).
- CANTARINI, R. et al. **Os riscos financeiros de empreendimentos hidrelétricos devido à mudança climática**, 2009. 100 p. Monografia (MBA em Gestão Sócio Ambiental Aplicada a Energia Hidrelétrica) – Fundação Instituto de Administração, São Paulo, SP, 2009.
- CASTRO, F. S. et al. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 14, n. 8, p. 871–880, 2010.
- CHENOWETH, J. et al. Impact of climate change on water resources of the eastern Mediterranean and Middle East region: modeled 21st century changes and implications. **Water Resources Research**, Washington, v. 47, n. 1, p. 1-18, 2011.
- CHOU, S. C. Modelo Regional Eta. **Climanálise**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996. (Edição Especial).
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 16, 2014a.
- \_\_\_\_\_. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p. 17, 2014b.
- \_\_\_\_\_. Downscaling of South America present climate driven by 4 - member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 38, p. 635-653, 2012.
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theor Appl Climatol.**, v. 125, n. 3, p. 769-784, 2016.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, p. 1-16, 2015.

COLLINS, M. et al. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: STOCKER, T. F et al. (Ed.). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2013. Cap. 12, p. 1029-1136.

COLLINS, W. et al. Development and evaluation of an Earth-system model - HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; JONES C. D. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 137-156, 2004.

CRESPO, A. A. **Estatística fácil**. 17. ed. São Paulo: Saraiva, 2002.

CUNHA, P. P. Vulnerabilidade e risco resultante da ocupação de uma planície aluvial – o exemplo das cheias do rio Mondego (Portugal central), no inverno de 2000/2001. **Territorium**, n. 9, p. 13-36, 2002.

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M.; Cenários de Mudanças Climáticas e Agricultura no Brasil: Impactos Econômicos na Região Nordeste. **Documentos Técnico-Científico**, v. 42, n. 2, 2011.

FERREIRA, D. F. **Estatística Básica**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2009. 664 p.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson ( $r$ ). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

GARDIMAN JUNIOR, B. S. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 8, n. 1, p. 61-71, 2012.

GAUDARD, L. Long-term uncertainty of hydropower revenue due to climate change and electricity prices. **Water Resources Management**, v. 30, n.4, p. 1325-1343, 2014.

GONDIM, R. S. et al. Impactos das mudanças climáticas na demanda de irrigação da bananeira na Bacia do Jaguaribe. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 594 - 600, 2011.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H.; EVANGELISTA, S. R. M.; TEIXEIRA, A. S.; FUCK JÚNIOR, S. C. F. Mudanças climáticas e impactos na necessidade hídrica das culturas perenes na bacia do Jaguaribe, no Estado do Ceará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n.12, p. 1657-1664, 2008.

GOLDING, N.; BETTS, R. Fire risk in Amazonia due to climate change in the HadCM3 climate model: Potential interactions with deforestation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 22, n. 4, p. GB4007, 2008.

HORIKOSHI, A. S.; FISCH, G. Balanço hídrico atual e simulações para cenários climáticos futuros no Município de Taubaté, SP, Brasil. **Ambiente e Água**, v. 2, n. 2, p. 33-46, 2007.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Tempo e clima**. 2018. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=tempo\\_clima](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=tempo_clima)>. Acesso em: 15 out. 2018.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **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. In: PACHAURI, R. K.; MEYER, L. et al. Genebra, Suíça: IPCC, 2014. 151 p.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2013: The physical science basis**. Cambridge University Press: Cambridge, UK e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. 582 p.

\_\_\_\_\_. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK e New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: con uno estudio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

KÖPPEN, W.; GEIGER, G. C. **Das geographische system der klimate**. Berlin: Gebruder, 1936. 44 p.

LIMA, J. W. M. Introdução. In: LIMA, J. W. M.; COLLISCHONN, W. et al. (Ed.). **Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: AES Tietê, 2016. p. 423.

LIU, Y.; FAN, K. A new statistical downscaling model for autumn precipitation in China. **Int. J. Climatol**, v. 33, p. 1321–1336, 2013.

LIU, J. et al. China's rising hydropower demand challenges water sector. **Scientific Reports**, **Science**, v. 5, n. 11446, 2015.

LYRA, A. et al. Projections of climate change impacts on central America tropical rainforest. **Climatic Change**, v. 141, p. 93-105, 2017.

MALHI, Y. et al. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. **PNAS**, v. 106, n. 49, p. 20610-20615, 2009.

MARCOTT, S. et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. **Science**, v. 39, p. 1198–1201, 2013.

MARENGO, J. A. Cenários de Mudanças Climáticas para o Brasil em 2100. **Ciência e Ambiente**, v. 34, p. 100-125, 2007.

\_\_\_\_\_. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade:** caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2006. 212 p.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; ALVES, L. M. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Revista Climanalise**, v. 3, p. 1-6, 2016

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. **Crise Hídrica em São Paulo em 2014: Seca e Desmatamento**. São Paulo: GEOUSP, USP, 2015.

MARENGO, J. A. et al. Development of regional future climate changes cenários in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 9-10, p. 1829-1848, 2012.

\_\_\_\_\_. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 35, n. 6, p. 1073-1097, 2010.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima** – Sumário Executivo. Brasília, 2016a.

\_\_\_\_\_. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, 2016b. V. II.

MEKONNEN, M. M. et al. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. Environmental Science. **Water Research & Technology**, v. 1, n. 3, p. 285-297, 2015.

MELLO, C. R. D. et al. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, southeast Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 36, p. 53-59, 2012.

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

MELLO, E. L. et al. Efeito das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Paracatu. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 635-644, 2008.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1-4, p. 195-202, 1984.

MISHRA, V.; LILHARE, R. Hydrologic sensitivity of Indian sub-continental river basins to climate change. **Global and Planetary Change**, v. 139, p. 78-96, 2016.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília, 2016. V. I: Estratégia Geral.

MOHOR, G. S. et al. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology. Reg. Stud.**, v. 4B, p. 41–59, 2015.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756, 2010.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES. **Attribution of extreme weather events in the context of climate change**. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. 200 p.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do País. **Parcerias Estratégicas**, Brasília, n. 12, p. 238-258, 2001.

NOBRE, C. A. et al. **Riscos de Mudanças Climáticas do Brasil e Limites à Adaptação**. Brasília: Embaixada do Reino Unido no Brasil, 2016.

NÓBREGA, M. T. et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. **Hydrol. Earth Syst**, v. 15, p. 585–595, 2011.

OLIVEIRA, V. O. et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brasil. **International jornal of climatoly**, 2017.

OUYANG, F.; ZHU, Y.; FU, G.; LÜ, H.; ZHANG, A.; YU, Z.; CHEN, X. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 29, p. 1781-1795, 2015.

PBMC. Peripheral Blood Mononuclear Cells. Sumário Executivo do Volume 1 - Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o 1º Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **PBMC**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 34. 2012.

PEREIRA, A. R. et al. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, 2009.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206 -226, 2015.

REBOITA, M. S. et al. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

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. **Impacto de Mudanças Climáticas sobre o Regime de Vazões e a Geração Hidrelétrica de Energia**. 2013. 135 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, MG, 2013.

SANTOS, A. M. dos. et al. Mudanças climáticas e o escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Goiana - Pernambuco - Brasil. **Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto De Geografía**, v. 81, p. 51-65, 2013.

SILVA, B. C. **Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do rio São Francisco**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

SILVA, K. R. et al. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 417-427, 2011.

SILVEIRA, C. da. S. et al. Mudanças Climáticas na Bacia do Rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, v. 129, p. 117-129, 2015.

SOUSA, R. M. de. **Mudanças Climáticas futuras simuladas pelos modelos regionais eta-hadgem2-es e eta-miroc5 para o estado do Tocantins**. 2017. 92 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Tocantins, Tocantins, 2017.

SUN, S.; CHEN, H.; JU, W.; YU, M.; HUA, W.; YIN, Y. On the attribution of the changing hydrological cycle in Poyang Lake Basin, China. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 514, p. 214-225, 2014.

TATEBE, H. et al. The Initialization of the MIROC Climate Models with Hydrographic Data Assimilation for Decadal Prediction. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 90A, p. 275-294, 2012.

TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J. C.; MARENGO, J. **Estudo de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos superficiais e sobre os níveis dos aquíferos na bacia do rio Tocantins**. Convênio de Cooperação Técnico-Científica INPE-VALE, 2009. 70 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

UNITED NATIONS. **Framework convention on climate change**. 2015. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2017.

VAN VLIET, M. T. H. et al. Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. **Nature Clim. Change**, v. 6, n. 4, p. 375-380, 2016.

VAN VUUREN, D. P. et al. Representative Concentration Pathways: An overview. **Climatic Change**, v. 109, p. 5-31, 2011.

VERA, C. et al. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. **Geophysical Research Letters**, v. 33, p. 2-5, 2006.

VIANELLO L. R.; ALVES A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. p. 446,

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of climatology**, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, 2015.

WATANABE, M. et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.