



**JÉSSICA ASSAID MARTINS RODRIGUES**

**IMPACTOS ANTRÓPICOS NO REGIME  
HIDROLÓGICO DE TRIBUTÁRIOS DO RIO  
TOCANTINS**

**LAVRAS - MG**

**2017**

**JÉSSICA ASSAID MARTINS RODRIGUES**

**IMPACTOS ANTRÓPICOS NO REGIME HIDROLÓGICO DE  
TRIBUTÁRIOS DO RIO TOCANTINS**

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. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador

Profa. Dra. Lívia Alves Alvarenga  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2017**

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

Rodrigues, Jéssica Assaid Martins.

Impactos antrópicos no regime hidrológico de tributários do Rio  
Tocantins / Jéssica Assaid Martins Rodrigues. - 2017.

128 p. : il.

Orientador: Marcelo Ribeiro Viola.

Coorientadora: Lívia Alves Alvarenga.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Simulação hidrológica. 2. SWAT. 3. Mudanças climáticas. 4.  
Gestão de recursos hídricos. I. Viola, Marcelo Ribeiro. II. Alvarenga,  
Lívia Alves. III. Título.

**JÉSSICA ASSAID MARTINS RODRIGUES**

**IMPACTOS ANTRÓPICOS NO REGIME HIDROLÓGICO DE  
TRIBUTÁRIOS DO RIO TOCANTINS**

***ANTHROPIC IMPACTS IN THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE  
TOCANTINS RIVER TRIBUTARIES***

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 27 de abril de 2017.

Prof. Dr. Carlos Rogério de Mello	UFLA
Prof. Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dra. Chou Sin Chan	CPTEC/INPE

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador

Profª. Dra. Lívia Alves Alvarenga  
Coorientadora

**LAVRAS – MG  
2017**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela estrutura e suporte oferecidos.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo ao longo do mestrado.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro ao projeto nº 482075/2013-9 e pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa ao prof. orientador (processo CNPq 305854/2015-1).

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Ribeiro Viola, pelos ensinamentos, convivência, amizade e constante orientação em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, Dra. Lívia Alves Alvarenga, por toda ajuda, ensinamentos e sugestões para a realização deste trabalho.

À Dra. Sin Chan Chou e sua equipe de pesquisa do CPTEC/INPE, por cederem os resultados das simulações dos cenários climáticos futuros projetados pelos modelos climáticos regionais Eta/HadGEM2-ES e ETA/MIROC5.

Aos membros da banca, Dr. Carlos Rogério de Mello, Dr. Gilberto Coelho e Dra. Chou Sin Chan, pela disponibilidade e presteza.

Ao meu esposo, Maykmilller, pela dedicação, apoio, incentivo, amor e carinho. Por sempre acreditar que eu era capaz de superar os desafios encontrados nesta jornada.

Aos meus pais, Douglas e Sueli, pela educação que me foi transmitida durante toda minha vida. Sem ela eu jamais teria chegado até aqui.

A todos os amigos, funcionários e professores do núcleo didático-científico de Engenharia de Água e Solo da UFLA, pela amizade e convívio ao longo destes anos.

**MUITO OBRIGADA!**

## RESUMO

A interferência antrópica no sistema climático é uma das principais responsáveis pelas alterações no regime hidrológico em uma determinada região. Desta forma, entender e modelar as relações entre o clima, a dinâmica da água e a paisagem apresentam relevante importância ao planejamento e conservação ambiental. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram simular a hidrologia e analisar os possíveis impactos de diferentes cenários climáticos no regime hidrológico das bacias hidrográficas dos Rios Palma (BHP), Manuel Alves da Natividade (BHMA) e Sono (BHS). Para isso, buscou-se calibrar e validar o modelo hidrológico SWAT, para essas bacias hidrográficas e simular os impactos hidrológicos de mudanças climáticas das forçantes de concentração representativas RCP 4.5 e RCP 8.5 simulados pelos modelos regionais Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, ao longo do século XXI. O modelo SWAT apresentou boa performance nas fases de calibração e validação, evidenciando assim a capacidade do modelo em prever adequadamente os impactos hidrológicos decorrentes das mudanças climáticas. As simulações dadas, a partir do modelo SWAT acoplado aos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 para os RCPs 4.5 e 8.5, indicaram redução do escoamento para todas as aplicações, com resultados mais críticos provenientes do RCP 8.5, principalmente no modelo Eta/HadGEM2-ES, para o final do século XXI. Portanto poderão ocorrer sérios problemas futuros em termos de disponibilidade hídrica para a região estudada, afetando assim diversos segmentos da sociedade, como o abastecimento de água para fins de consumo, a agricultura e o aproveitamento hidrelétrico.

**Palavras-chave:** Simulação hidrológica. SWAT. Mudanças climáticas. Gestão de recursos hídricos.

## ABSTRACT

Anthropic interference in the climatic system is one of the main responsible for the changes in hydrological regime in a certain region. Thus, understanding and modeling the relations between climate, water dynamics and landscape is of relevant importance for environmental planning and conservation. In this context, the objectives of this work was to simulate the hydrology and analyze the possible impacts of different climatic scenarios in the hydrological regime of the Palma (BHP), Manuel Alves da Natividade (BHMA) and Sono (BHS) hydrographic basins. For this, the calibration and validation of the SWAT hydrological model was sought over for the hydrographic basins in question and the hydrological impacts of climatic change over the representative concentration forcing RCP 4.5 and RCP 8.5 were simulated by regional models Eta-MIROC5 and Eta-HadGEM2-ES, over the XXI century. The SWAT model presented good performance in the calibration and validation phases, demonstrating the capacity of the model in adequately predicting the hydrological impacts derived of climatic changes. The simulations obtained from the SWAT model coupled with the Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5 for RCPs 4.5 and 8.5 indicated the reduction of runoff for all applications, with more critical results obtained with RCP 8.5, especially in the Eta-HadGEM2-ES model, for the end of the XXI century. Thus, serious issues can occur in the future in terms of water availability for the studied region, affecting many segments of society, such as water supply for consumption, agriculture and hydroelectric use.

**Keywords:** Hydrological simulation. SWAT. Climatic change. Water resource management.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia no território brasileiro (à esquerda) e destaque para as bacias hidrográficas dos Rios Sono, Manuel Alves da Natividade e Palma, objeto deste estudo (à direita). .....	31
Figura 2 - Modelo digital de elevação da BHS (a), BHMA (b) e BHP (c). .....	53
Figura 3 - Mapa de uso do solo referente ao ano de 1990 para a BHS (a), BHMA (b) e BHP (c). .....	55
Figura 4 - Mapas de solos da BHS (a), da BHMA (b) e da BHP (c). .....	57
Figura 5 - Localização das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas. ....	63
Figura 6 - Discretização por sub-bacias geradas pelo modelo SWAT para a BHS (a), BHMA (b) e BHP (c). .....	65
Figura 7 - Pontos do grid dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES (à esquerda) e pontos do grid mais próximos das estações pluviométricas e meteorológicas (à direita). .....	72
Figura 8 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de calibração com passo mensal, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c). .....	82
Figura 9 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de validação com passo mensal, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c). .....	83

Figura 10 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de calibração com passo diário, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c). .....	84
Figura 11 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de validação com passo diário, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c). .....	85
Figura 12 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5 nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	90
Figura 13 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	91
Figura 14 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	92
Figura 15 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	93

Figura 16 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	94
Figura 17 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	95
Figura 18 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHMA, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d).....	97
Figura 19 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHP, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d). .....	98
Figura 20 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHS, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d). .....	99
Figura 21 - Curva de permanência simulada, para o período de 1961 a 2005 (BASELINE) e para os RCPs 4.5 e 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, para as BHMA, BHP e BHS, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES (a), (c), (e) e Eta/MIROC5 (b), (d), (f), respectivamente. ....	102

Figura 22 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	107
Figura 23 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	108
Figura 24 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	109
Figura 25 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	110

Figura 26 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	111
Figura 27 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g). .....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área ocupada por classe de uso do solo, no ano de 1990, nas bacias hidrográficas dos rios Sono, Manuel Alves da Natividade e Palma.....	54
Tabela 2 - Nomenclatura e distribuição percentual das classes de solos nas BHS, BHMA e BHP.....	56
Tabela 3 - Principais informações das estações pluviométricas utilizadas.....	60
Tabela 4 - Principais informações das estações meteorológicas. ....	60
Tabela 5 - Dados estatísticos requeridos pelo gerador climático WXGEN. ....	61
Tabela 6 - Principais informações das estações fluviométricas.....	62
Tabela 7 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade. ....	67
Tabela 8 - Parâmetros sensíveis do modelo SWAT para as simulações diárias e mensais de vazão para a BHP, BHMA e BHS. ....	76
Tabela 9 - Parâmetros calibrados para a BHP, BHMA e BHS nas simulações com passo diário e mensal. ....	77
Tabela 10 - Estatísticas de desempenho resultantes da calibração e validação do modelo SWAT para as simulações hidrológicas da BHMA, BHP e BHS. ....	78
Tabela 11 - Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ET) e balanço hídrico vertical (P-ET), em mm.ano <sup>-1</sup> , simulados por Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para o clima presente (baseline) e para o século XXI, nos RCPs 4.5 e 8.5, para as BHMA, BHP e BHS.....	87

Tabela 12 - Vazões $Q_{95\%}$ , $Q_{90\%}$ , $Q_{80\%}$ , $Q_{20\%}$ , $Q_{10\%}$ e $Q_{5\%}$ para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHMA.....	103
Tabela 13 - Vazões $Q_{95\%}$ , $Q_{90\%}$ , $Q_{80\%}$ , $Q_{20\%}$ , $Q_{10\%}$ e $Q_{5\%}$ para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHP.....	104
Tabela 14 - Vazões $Q_{95\%}$ , $Q_{90\%}$ , $Q_{80\%}$ , $Q_{20\%}$ , $Q_{10\%}$ e $Q_{5\%}$ para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHS.....	105
Tabela 15 - Deflúvio médio anual (D) para o baseline e alterações percentuais do deflúvio anual ( $\Delta_D$ ), em relação ao baseline, para os RCPs 4.5 e 8.5 do Eta/HadGEM e Eta/MIROC5, durante o século XXI, nas BHMA, BHP e BHS. ....	113

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Modelagem hidrológica</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>O modelo <i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT)</b> .....	21
<b>2.3</b>	<b>Modelagem hidrológica na Bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia</b> .....	22
<b>2.4</b>	<b>Mudanças climáticas</b> .....	23
<b>2.5</b>	<b>Modelagem Climática</b> .....	25
<b>2.6</b>	<b>Impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas</b> .....	26
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	29
<b>3.2</b>	<b>O modelo <i>Soil and Water Assessment Tool</i> (SWAT)</b> .....	32
<b>3.3</b>	<b>Dados de entrada do modelo SWAT</b> .....	52
<b>3.3.1</b>	<b>Modelo Digital de Elevação</b> .....	52
<b>3.3.2</b>	<b>Uso do Solo</b> .....	54
<b>3.3.3</b>	<b>Solos</b> .....	56
<b>3.3.4</b>	<b>Dados Meteorológicos</b> .....	58
<b>3.3.5</b>	<b>Dados de vazão</b> .....	62
<b>3.4</b>	<b>Configuração do Modelo SWAT</b> .....	64
<b>3.5</b>	<b>Análise de sensibilidade</b> .....	66
<b>3.6</b>	<b>Calibração, validação e avaliação da performance do modelo SWAT</b> .....	68
<b>3.7</b>	<b>Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas</b> .....	70
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	75
<b>4.1</b>	<b>Simulação hidrológica nas bacias hidrográficas dos rios Palma, Manuel Alves da Natividade e Sono</b> .....	75
<b>4.1.1</b>	<b>Análise de sensibilidade do modelo SWAT</b> .....	75
<b>4.1.2</b>	<b>Calibração e validação do modelo SWAT</b> .....	76
<b>4.2</b>	<b>Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas</b> .....	86
<b>4.2.1</b>	<b>Projeções do modelo Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 para os RCPs 4.5 e 8.5</b> .....	86
<b>4.2.2</b>	<b>Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes dos RCPs 4.5 e 8.5</b> .....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	117
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	119

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico de uma região está relacionado diretamente com a disponibilidade dos recursos naturais. A água é o recurso natural fundamental para a existência da vida, e o desenvolvimento da sociedade depende rigorosamente da disponibilidade desse recurso. A variação da disponibilidade dos recursos hídricos em uma região está relacionada com as alterações das características físicas da superfície, das características climáticas e pelo consumo e poluição exacerbados, ao longo do tempo e do espaço, dados por uma gestão inadequada. Dessa forma, entender os processos que estão relacionados ao comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica constitui uma importante etapa no gerenciamento ambiental da mesma.

Vários estudos mostram que os processos hidrológicos em bacias hidrográficas são muito sensíveis às mudanças dos padrões de temperatura, precipitação e variações na concentração atmosférica dos gases do efeito estufa (ALVARENGA et al., 2016; TAN et al., 2017; ZHANG et al., 2016). Como impacto dessas mudanças, podem-se destacar o aumento na frequência e a severidade dos fenômenos climáticos, tais como extensos períodos secos e precipitações extremas. Nesta temática, destaca-se o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), criado em 1988 pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUMA) com o objetivo de fornecer avaliações com base científica sobre as mudanças climáticas, impactos futuros e propor alternativas de adaptação e mitigação.

A principal ferramenta utilizada pelos centros de pesquisa do clima para projetar os cenários climáticos futuros são os Modelos Climáticos Globais (MCGs). Essa ferramenta é a base dos resultados divulgados pelo IPCC e por tantos outros grupos de estudos sobre o clima. Porém, em virtude da baixa

resolução dos MCGs, são aplicados Modelos Climáticos Regionais (MCRs), com o objetivo de transferência das informações meteorológicas para escalas de maior detalhamento (CHOU et al., 2014a).

Uma questão que necessita ser avaliada com critério científico no Brasil refere-se às implicações decorrentes das mudanças climáticas no âmbito hidrológico. Nesse sentido, visando avaliar os impactos dessas mudanças, em muitos estudos buscaram-se associar os modelos climatológicos aos modelos hidrológicos, como pode ser observado em Arroio Junior e Mauad (2015), Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013), Valério (2014), Viola et al. (2015). Este tipo de pesquisa vem sendo desenvolvida com o intuito de subsidiar medidas futuras de adaptação a condições adversas decorrentes de eventos extremos, tais como chuvas intensas, enchentes e estiagens prolongadas.

Dentre os vários modelos hidrológicos desenvolvidos, destaca-se o modelo *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT) (ARNOLD et al., 1998), por apresentar resultados satisfatórios em diferentes escalas e condições (GASSMAN et al., 2007). Durante a última década, a utilização do SWAT vem crescendo em todo o mundo, sendo este modelo utilizado por várias agências governamentais nos EUA e na União Europeia (EU), para avaliar os impactos de diferentes cenários climáticos e de uso do solo (PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013). O SWAT também tem sido amplamente utilizado no Brasil, tais como nos trabalhos desenvolvidos por Andrade, Mello e Beskow (2013), Arroio Junior e Mauad (2015), Brighenti, Bonuma e Chaffe (2016), Durães, Mello e Naghettini (2011), Monteiro et al. (2015), Oliveira et al. (2015), Perazzoli, Pinheiro e Kaufmann (2013), Pereira et al. (2016), Pontes et al. (2016), Silva et al. (2015), apresentando bons resultados.

No entanto, na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, que é a maior área de drenagem totalmente inserida em território brasileiro, existem poucos trabalhos nos quais se aplicaram modelos hidrológicos para simular a hidrologia

ou além disso, simular os impactos antrópicos sobre a disponibilidade hídrica. Logo, na bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia, encontram-se algumas regiões como as bacias hidrográficas dos rios Palma, Manuel Alves da Natividade e Sono, que ainda não foram estudadas e são algumas das principais bacias do alto e médio curso do rio Tocantins pela sua margem direita.

Essas bacias requerem atenção, pelo fato de constituírem afluentes diretos das usinas hidrelétricas Peixe-Angical, Luís Eduardo Magalhães e Estreito; por estarem inseridas na região de ocorrência do aquífero Urucuaia, que apresenta alta favorabilidade hidrogeológica (LEITE, 2015); englobarem parte do município de Palmas - capital do estado do Tocantins; englobarem importantes regiões ecológicas como o Parque Estadual do Jalapão e o Parque Nacional das Nascentes do rio Parnaíba; além de estarem inseridas totalmente no bioma cerrado.

O bioma cerrado é considerado um dos 25 “hotspots” da Terra para a conservação da biodiversidade, pelo endemismo de espécies e pelo grau de ameaça a que está submetido (MYERS et al., 2000; SILVA; BATES, 2002). O cerrado é a savana tropical mais rica e ameaçada do planeta e vem sendo fortemente comprometido pela expansão agrícola desordenada e pelas mudanças climáticas.

As alterações decorrentes de mudanças climáticas, provenientes de variações na temperatura e precipitação, constituem um importante fator de ameaça à biodiversidade, por acarretarem alterações no regime hidrológico.

Desta forma, os objetivos deste trabalho foram simular a hidrologia e analisar os possíveis impactos de diferentes cenários climáticos no regime hidrológico das bacias hidrográficas dos Rios Palma (BHP), Manuel Alves da Natividade (BHMA) e Sono (BHS). Para isso, buscou-se calibrar e validar o modelo hidrológico SWAT para as bacias hidrográficas e simular os impactos hidrológicos de mudanças climáticas das forçantes de concentração

representativas RCP 4.5 e RCP 8.5 simulados pelos modelos regionais Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, ao longo do século XXI.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Modelagem hidrológica**

O entendimento da forma como os complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico se inter-relacionam possibilitou ao homem desenvolver modelos matemáticos que descrevem o comportamento da água em bacias hidrográficas (VIOLA, 2011). Esses modelos possuem como objetivo compreender melhor o sistema modelado, realizar prognósticos e, em algumas situações, reproduzir o passado, com o intuito de direcionar ações de decisão (MACHADO, 2002).

A utilização de modelos hidrológicos envolve desde escolha do modelo, a seleção e análise dos dados necessários, o ajuste e verificação dos parâmetros, a definição de cenários de aplicação, o prognóstico e a estimativa das incertezas dos resultados. A escolha de um modelo deve levar em conta os objetivos do estudo, as características da bacia e do rio, a disponibilidade de dados e a familiaridade com o modelo (TUCCI, 2005).

De acordo com Rennó (2003) e Tucci (2005), os modelos hidrológicos podem ser classificados, com base em diferentes aspectos, tais como: o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência da dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Um modelo é dito estocástico quando em sua formulação, é considerado o conceito de probabilidade, quando pelo menos uma das variáveis envolvidas apresenta comportamento aleatório; caso contrário, o modelo será determinístico (RENNÓ, 2003).

Quanto ao tipo de relações entre as variáveis envolvidas, os modelos podem ser empíricos ou baseados em processos. Os modelos empíricos são aqueles que ajustam os dados calculados aos observados por meio de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos (PINTO, 2011). Em geral, esses modelos são bastante simples e úteis no dia a dia, no entanto são restritos, uma vez que são específicos para a região e condições para as quais as relações foram determinadas. Os modelos baseados em processos são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado e podem ser subdivididos em modelos físicos e semiconceituais (PEREIRA, 2013). Nos modelos físicos, são utilizadas equações diferenciais na representação dos processos e seus parâmetros determinados com base física, ou seja, os parâmetros são obtidos a partir de medidas reais. Nos modelos semiconceituais, embora sejam utilizadas formulações que objetivem descrever fisicamente os processos, são empregados parâmetros calibráveis que, de certa forma, mantêm o empirismo presente (VIOLA, 2008).

Os modelos são considerados discretos, quando as mudanças de estado ocorrem em intervalos discretos, enquanto nos contínuos os fenômenos são representados continuamente ao longo do tempo. Esta classificação encontra-se fundamentada na disponibilidade dos dados e na precisão dos resultados desejados (TUCCI, 2005).

Quanto à discretização espacial dos dados, os modelos podem ser classificados como concentrados ou distribuídos. Os modelos concentrados consideram que as variáveis de entrada são representativas de toda a área estudada, tornando assim a representação da variabilidade espacial das características da bacia limitada, dada sua natural heterogeneidade (HARTMANN; BALES; SOROOSHIAN, 1999; VIOLA, 2011). Já os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nos diversos fatores

envolvidos no modelo, uma vez que a bacia hidrográfica é subdividida em sub-bacias ou células (COLLISCHONN, 2001).

Quanto à existência de dependência temporal, os modelos podem ser estacionários ou dinâmicos. Os modelos são estacionários, quando um conjunto de dados de entrada produz um único resultado em um único passo, por outro lado, os modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração (RENNÓ, 2003).

## **2.2 O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)**

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo de simulação hidrológica desenvolvido nos Estados Unidos da América pelo *Agricultural Research Service* (ARS) e pela Texas A&M University, no início da década de 90, sendo uma combinação de componentes estruturais de diferentes modelos (ARNOLD et al., 1998). Incorpora fatores de vários modelos desenvolvidos pelo ARS e é uma evolução direta da junção dos modelos SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) com o ROTO (*Routing Outputs to Outlet*). Os modelos específicos que contribuíram significativamente para o desenvolvimento do SWAT foram: USLE (*Universal Soil Loss Equation*), CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*), GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*) (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2005).

O SWAT é um modelo hidrológico de base física, do tipo semidistribuído, que permite que diferentes processos físicos sejam simulados, na escala da bacia hidrográfica, a partir de parâmetros espacialmente distribuídos e em caráter temporal contínuo, operando em um passo de tempo diário. O modelo tem o objetivo de analisar os impactos das alterações no uso e ocupação do solo sobre os componentes do escoamento, produção de sedimentos

e qualidade da água em bacias hidrográficas rurais e urbanas (NEITSCH et al., 2005).

O modelo baseia-se em características físicas da bacia e, desta forma, requer dados diários ou horários de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa, além de três diferentes arquivos geoespaciais: modelo digital de elevação, mapa de solos e de uso do solo (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT possibilita a divisão da bacia hidrográfica em sub-bacias, as quais podem ser parametrizadas, por meio da utilização de uma série de unidades de resposta hidrológica (*Hydrologic Response Units – HRUs*), que são partes da sub-bacia que possuem uma única combinação de classes de uso do solo/solo/relevo. Essa discretização permite ao modelo refletir diferenças na cobertura vegetal, tipos de solo, topografia e uso atual do solo.

### **2.3 Modelagem hidrológica na Bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia**

A bacia hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a maior área de drenagem totalmente inserida em território brasileiro, possuindo 918822 km<sup>2</sup>. Esta bacia hidrográfica é também a terceira maior em potencial hidrelétrico, atrás apenas das bacias hidrográficas dos rios Paraná e Amazonas (CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRAS, 2015). Neste contexto, existem poucos trabalhos que aplicaram modelos hidrológicos para simular os componentes hidrológicos ou, além disso, simular os impactos antrópicos sobre a disponibilidade hídrica nesta região.

Viola et al. (2012) aplicaram o modelo LASH, para simular a hidrologia na sub-bacia hidrográfica do rio Lontra, afluente pela margem direita do rio Araguaia, de 3470 km<sup>2</sup>, obtendo boa performance nas etapas de calibração e validação.

Chiesa (2016) aplicou os modelos MGB-IPH e SAD-IPH para estimar a disponibilidade hídrica e o balanço hídrico entre a demanda e a oferta da água, para diferentes cenários de demanda e lançamento de efluentes, na bacia hidrográfica do Ribeirão Taquaruçu Grande, de 461,39 km<sup>2</sup>, situada no município de Palmas – TO, obtendo resultados satisfatórios em relação aos modelos.

Monteiro et al. (2015) aplicaram o modelo SWAT para comparar os dados de precipitação das projeções CFSR e WFDEI com os dados observados pela Agência Nacional de Águas (ANA), para o período de 1980-2010, na bacia hidrográfica Tocantins, em uma área de drenagem de 803250 km<sup>2</sup>, concluindo que o modelo apresentou bom ajuste na simulação hidrológica e que a projeção WFDEI foi uma representação precisa da precipitação brasileira.

Ho, Thompson e Brierley (2015) aplicaram o modelo STELLA juntamente a 41 MCGs CMIP5 para simular os impactos hidrológicos frente ao cenário RCP 4.5, no o período de 2071-2100, na bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, em uma área de drenagem de 767000 km<sup>2</sup>, obtendo boa performance do modelo, e concluíram que a maioria das projeções sugerem declínio no escoamento médio anual.

## **2.4 Mudanças climáticas**

O clima terrestre é um sistema complexo composto pela interação de cinco componentes principais: a atmosfera, hidrosfera, biosfera, litosfera e a criosfera; esse sistema é vulnerável às modificações dadas a partir de fatores antropogênicos ou de sua própria dinâmica interna (MOSS et al., 2010).

As mudanças climáticas dizem respeito às modificações no estado do clima, persistentes durante longos períodos de tempo, normalmente décadas ou séculos, detectadas a partir de alteração na média e na variação das suas propriedades (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE -

IPCC, 2007). De acordo com Zapata et al. (2011), nas últimas décadas, o mundo vem sendo surpreendido pelo comportamento do clima, dado a partir do aumento da temperatura global, aumento do nível do mar e redução da cobertura de gelo. Esse comportamento é decorrente do aumento da concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, acelerado pelas atividades humanas, provocando assim alterações climáticas (IPCC, 2007).

Os principais gases do efeito estufa de origem antropogênica são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Esses gases aquecem a superfície da Terra devido ao fato de absorverem parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre e dificultarem seu escape para o espaço (HARTMANN, 1994). A compreensão da influência dos GEEs sobre o aquecimento ou resfriamento do clima é expressa por meio de um índice expresso em watts por metro quadrado ( $\text{W m}^{-2}$ ), denominado forçamento radiativo (IPCC, 2007).

O quinto relatório científico divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR5) (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2013) levantou quatro alternativas de cenários climáticos futuros com projeções até 2100. Esses cenários retratam as concentrações atmosféricas e suas forçantes radiativas antropogênicas por meio dos RCPs (*Representative Concentration Pathways*), que consistem no forçamento radiativo total em  $\text{W m}^{-2}$  até o ano de 2100. Esses cenários auxiliam na análise das alterações climáticas e são utilizados como entrada para modelagem climática nos experimentos numéricos do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*).

O RCP 2.6 consiste na projeção mais otimista, em termos de forçante radiativa, pois estabelece uma redução da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera até o final do século 21. Os RCPs 4.5 e 6.0 consistem em projeções médias de estabilização, enquanto que o RCP 8.5 consiste na projeção mais

pessimista, pois implica em um acréscimo das emissões dos gases do efeito estufa até o final do século 21. Os RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5 correspondem, respectivamente, às forçantes radiativas de  $2,6 \text{ W m}^{-2}$ ,  $4,5 \text{ W m}^{-2}$ ,  $6,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  (IPCC, 2013; JONES et al., 2013; VUUREN et al., 2011).

## 2.5 Modelagem Climática

As simulações climáticas de longo prazo são realizadas por Modelos Climáticos de Circulação Global (MCGs), os quais consistem em modelos numéricos capazes de descrever os processos atmosféricos, oceânicos e terrestres, além das interações entre esses processos, simulando assim a resposta do clima às concentrações dos GEE (CAMPOS, 2011; MARENGO et al., 2012; OLIVEIRA, 2014). Essas simulações se dão em escala global e são transpostas para a escala local por meio dos modelos climáticos regionais (MCRs), também denominados de modelos de downscaling (AMBRIZZI et al., 2007).

No quinto relatório do IPCC, foram considerados 47 MCGs, elaborados em diferentes instituições de vários países; esses modelos divergem quanto à dinâmica dos processos climáticos e possuem diferentes resoluções (IPCC, 2013).

Recentemente, Chou et al. (2014a) realizaram simulações climáticas para a América do Sul, a partir do modelo regional ETA/CPTEC/INPE aninhado a três modelos climáticos de circulação global, MIROC5, HadGEM2-ES e BESM, para o clima presente (1961 a 1990). Além disto, o modelo regional foi integrado aos MCGs MIROC5 e HadGEM2-ES, na geração dos RCPs 4.5 e 8.5 divididos em períodos ou “time slices” de aproximadamente 30 anos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099, constatando-se que o Eta/HadGEM2-ES apresenta maior sensibilidade ao aumento dos gases do efeito estufa, desta forma, as mudanças climáticas futuras com maiores impactos foram observadas

com o Eta/HadGEM2-ES quando comparado ao Eta/MIROC5 (CHOU et al., 2014b).

O MIROC é um modelo japonês cooperativamente desenvolvido pela Universidade de Tóquio, NIES e JAMSTEC, e conhecido como Modelo de Investigação Interdisciplinar sobre o Clima (MIROC). O MIROC5 (WATANABE et al., 2011) é uma versão baseada no modelo MIROC3 utilizado no quarto relatório do IPCC (AR4) (IPCC, 2007). Os núcleos dinâmicos do modelo atmosférico e os esquemas de parametrização de radiação, convecção, turbulência e aerossóis foram atualizados na versão MIROC5. Nos modelos oceânicos e de superfície continental do MIROC5, a componente do gelo marinho foi melhorada e uma avançada versão do módulo de rios foi incorporada. Uma descrição mais detalhada do modelo MIROC5 pode ser obtida em Watanabe et al. (2011).

O HadGEM2-ES é um modelo do sistema terrestre desenvolvido pelo Hadley Centre (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011), cujo ciclo do carbono é representado; inclui a química da atmosfera e um modelo de aerossol com a representação do carbono orgânico e da pluma de poeira.

A utilização dos Modelos Climáticos Regionais (MCRs), em conjunto com os MCGs, possibilita o detalhamento dos processos climáticos em nível local, detectando as variações e particularidades de uma determinada região, melhorando assim a compreensão dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia de pequenas bacias (MARENGO et al., 2009, 2012).

## **2.6 Impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas**

A fim de avaliar os impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, muitos estudos têm empregado como variáveis de entrada em modelos hidrológicos, dados simulados a partir da saída de MCGs ou de MCRs, obtendo importantes resultados para a gestão de recursos hídricos.

Viola et al. (2015) avaliaram os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas nas bacias hidrográficas dos rios Aiuruoca, Grande, Sapucaí e Verde, no estado de Minas Gerais, a partir do modelo hidrológico LASH associado ao modelo climático Eta/HadCM3, para o cenário climático A1B (AR4), nos períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e de 2071 a 2098. Os resultados indicaram, para todas as bacias, redução do escoamento anual, no período entre 2011 e 2040, já para os demais períodos os resultados indicaram aumento no escoamento médio anual.

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 (2011 a 2099).

Tan et al. (2017) avaliaram os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas, na bacia hidrográfica do rio Kelantan, na Malásia, a partir do modelo hidrológico SWAT associado às projeções de 5 MCGs sob influência dos RCPs 2.6, 4.5 e 8.5, nos períodos de 2015 a 2044 e 2045 a 2074. Os resultados indicaram aumentos médios nas vazões para os três RCPs de 14,6 e 27,2%, nos períodos de 2015 a 2044 e 2015 a 2074, respectivamente, com aumentos mais significativos no cenário RCP 8.5 quando comparado aos cenários RCP 2.6 e 4.5.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

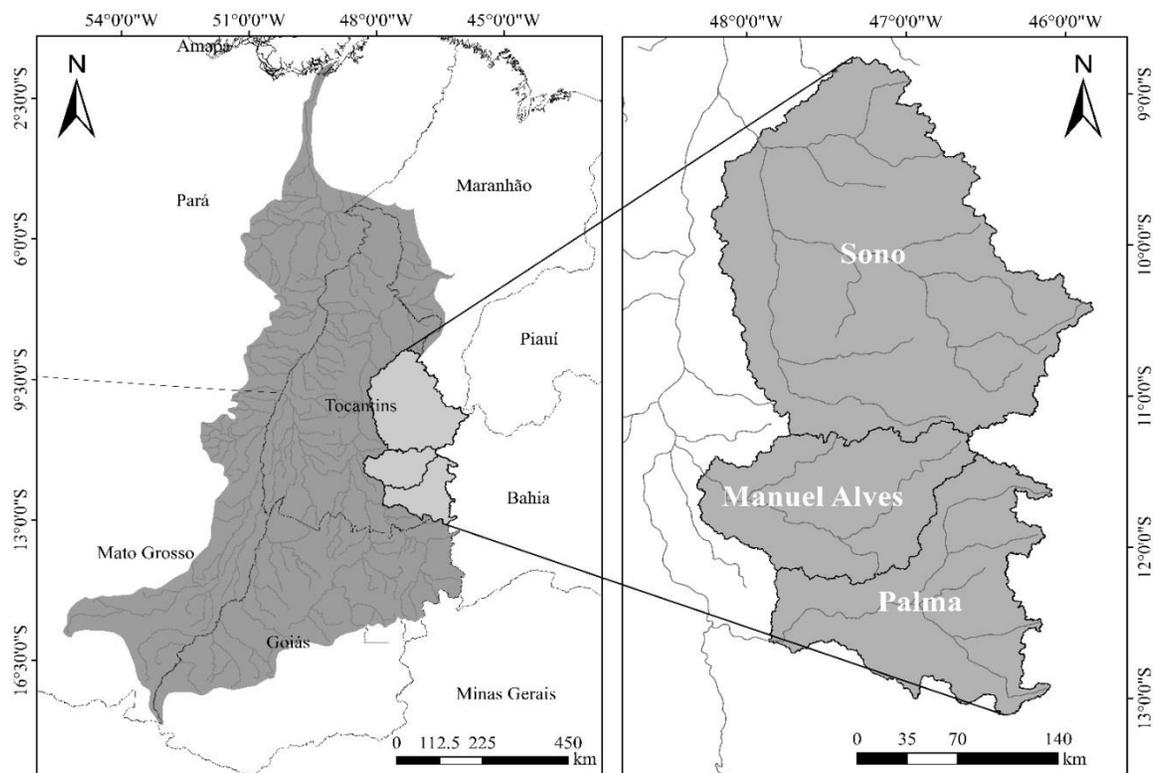
#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo está situada na região Sudeste do estado do Tocantins, sendo composta pelas bacias hidrográficas dos Rios Palma (BHP), Manuel Alves da Natividade (BHMA) e Sono (BHS), com áreas de drenagem de 17468, 14344 e 45042 km<sup>2</sup>, respectivamente. A delimitação das bacias tomou como seção de controle os seguintes postos fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA): a) Barra do Palma, no Rio Palma, localizado no município de Paranã – TO; b) Fazenda Lobeira, no Rio Manuel Alves da Natividade, localizado em São Valério da Natividade – TO, e c) Porto Real, no Rio Sono, localizado em Pedro Afonso – TO. No âmbito hidrográfico, as bacias dos rios Palma e Manuel Alves da Natividade localizam-se no alto curso do rio Tocantins, enquanto que a bacia do rio Sono localiza-se em seu médio curso. O Sistema Hidrográfico do Rio Tocantins é discriminado em 14 Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos em sua porção inserida no Estado do Tocantins, dos quais a BHP engloba a unidade T4 (Bacia do Rio Palma); a BHMA engloba a unidade T5 (Bacia do Rio Manuel Alves da Natividade) e a BHS engloba as unidades T9 (Bacia do Rio das Balsas), T10 (Bacia do Rio Sono) e T12 (Bacia do Rio Perdida). Na Figura 1 está apresentada a localização das bacias em estudo.

De acordo com Souza (2016), o clima da região de estudo, de acordo com a classificação climática de Thornthwaite e Matter, abrange três tipos climáticos distintos. O primeiro é o tipo B1wA'a' - clima úmido, com deficiência de água moderada no inverno, megatérmico, o segundo é o tipo C2wA'a' - clima subúmido, com deficiência de água moderada no inverno, megatérmico, e o terceiro é o tipo C1s2A'a' – clima subúmido seco, com grande excesso de água no verão, megatérmico. Na BHP ocorrem os dois primeiros,

enquanto que na BHMA ocorre apenas o segundo, e na BHS ocorrem os dois últimos.

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia no território brasileiro (à esquerda) e destaque para as bacias hidrográficas dos Rios Sono, Manuel Alves da Natividade e Palma, objeto deste estudo (à direita).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 3.2 O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

O SWAT realiza a simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica, com base no balanço hídrico levando em consideração duas fases: a fase terrestre do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água e aporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas no canal principal de cada sub-bacia; e a fase aquática, que corresponde ao movimento da água, sedimentos, nutrientes e pesticidas pela rede hidrográfica até o exutório da bacia (NEITSCH et al., 2011; PAGLIERO et al., 2014).

O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na seguinte equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^n (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

Em que:

$SW_t$  = quantidade final de água no solo no dia, em mm.

$SW_0$  = quantidade inicial de água no solo no dia, em mm.

$R_{\text{day}}$  = precipitação total no dia, em mm.

$Q_{\text{surf}}$  = escoamento superficial no dia, em mm.

$E_a$  = evapotranspiração no dia, em mm.

$Q_{\text{seep}}$  = quantidade total de água que sai da base do perfil do solo no dia  $i$ , em mm.

$Q_{\text{gw}}$  = escoamento subterrâneo no dia, em mm.

O modelo SWAT simula o volume do escoamento superficial direto para cada sub-bacia, por meio do Método da Curva-Número, desenvolvido pelo Soil Conservation Service – SCS. Nas equações abaixo, encontra-se descrito o Método Curva-Número:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0,2 \cdot S)^2}{R_{\text{day}} + 0,8 \cdot S} \quad R_{\text{day}} > 0,2 \cdot S \quad (2)$$

$$Q_{\text{surf}} = 0 \quad R_{\text{day}} \leq 0,2 \cdot S \quad (3)$$

Em que:

$Q_{\text{surf}}$  = escoamento superficial direto diário (mm).

$R_{\text{day}}$  = precipitação diária (mm).

$S$  = armazenamento potencial de água no solo (mm).

O parâmetro  $S$  varia, de acordo com mudanças no solo, uso e manejo do solo, declividade e conteúdo de água no solo. Sua obtenção é dada por:

$$S = 254 \cdot \left( \frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \quad (4)$$

O valor de CN é definido em função da permeabilidade do solo, uso e manejo do solo e da umidade antecedente. A escala de CN não é linear e varia de 1 a 100. Os extremos correspondem, respectivamente, a uma cobertura totalmente permeável (CN = 1) até uma cobertura impermeável (CN = 100). Para os valores de CN, são consideradas 3 condições de umidade antecedente, conforme o Soil Conservation Service (SCS):

- CN<sub>1</sub>: curva número para a condição 1, situação em que os solos estão com umidade abaixo da capacidade de campo.

- CN<sub>2</sub>: curva número para a condição 2, situação em que os solos se encontram próximos à capacidade de campo.

- CN<sub>3</sub>: curva número para a condição 3, situação em que os solos estão com umidade acima da capacidade de campo.

Para computar os valores corrigidos de  $CN_1$  e  $CN_3$ , estes foram relacionados ao  $CN_2$  por meio das seguintes equações:

$$CN_1 = CN_2 \cdot \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{\{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636 \cdot (100 - CN_2)]\}} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0,00673 \cdot (100 - CN_2)] \quad (6)$$

Em grandes bacias com tempo de concentração superior a um dia, apenas uma fração do escoamento superficial irá atingir o canal principal no dia em que é gerado. O modelo SWAT incorpora um recurso de armazenamento de escoamento superficial de modo a retardar a liberação desse para o canal principal. Após o cálculo do escoamento superficial, a quantidade de escoamento liberada para o canal principal é calculada pela equação 7:

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-surlag}{t_{conc}}\right) \right] \quad (7)$$

Em que:

$Q_{surf}$  = escoamento superficial descarregado no canal principal em um dado dia (mm).

$Q'_{surf}$  = escoamento superficial gerado em uma sub-bacia em um dado dia (mm).

$Q_{stor,i-1}$  = escoamento superficial armazenado no dia anterior (mm).

surlag = coeficiente de atraso do escoamento superficial.

$t_{conc}$  = tempo de concentração para a sub-bacia (h).

As perdas por transmissão reduzem o volume de escoamento à medida que a onda de inundação se propaga a jusante. Assume-se que as perdas por

transmissão do escoamento superficial percolam para aquífero raso. E a sua obtenção é dada por:

$$\begin{aligned} \text{vol}_{Q_{\text{surf},f}} &= 0 & \text{se } \text{vol}_{Q_{\text{surf},i}} &\leq \text{vol}_{\text{thr}} & (8) \\ \text{vol}_{Q_{\text{surf},f}} &= a_X + b_X \cdot \text{vol}_{Q_{\text{surf},i}} & \text{se } \text{vol}_{Q_{\text{surf},i}} &> \text{vol}_{\text{thr}} \end{aligned}$$

Em que:

$\text{vol}_{Q_{\text{surf},f}}$  = volume de escoamento após as perdas por transmissão ( $\text{m}^3$ ).

$a_X$  = regressão de intercepção para um canal de comprimento L e largura W.

$b_X$  = regressão de inclinação para um canal de comprimento L e largura W.

$\text{vol}_{Q_{\text{surf},i}}$  = volume de escoamento antes das perdas por transmissão ( $\text{m}^3$ ).

$\text{vol}_{\text{thr}}$  = volume limite para um canal de comprimento L e largura W ( $\text{m}^3$ ).

A fim de calcular os parâmetros de regressão, para canais de diferentes comprimentos e larguras, utilizam-se as seguintes equações:

$$b_X = \exp[-k_r \cdot L \cdot W] \quad (9)$$

$$a_X = \frac{a_r}{(1-b_r)} \cdot (1-b_X) \quad (10)$$

Em que:

L = comprimento do canal do ponto mais distante até a saída da sub-bacia (km).

W = largura do canal (m).

$a_r$  = regressão de intercepção para um canal unitário.

$b_r$  = regressão de inclinação para um canal unitário.

$k_r$  = fator de decaimento ( $m^{-1} km^{-1}$ ), obtido por:

$$k_r = -2,22 \cdot \ln \left[ 1 - 2,6466 \cdot \frac{K_{ch} \cdot dur_{flw}}{vol_{Q_{surf,i}}} \right] \quad (11)$$

Em que:

$K_{ch}$  = condutividade hidráulica efetiva ( $mm h^{-1}$ ) (CH\_K1).

$dur_{flw}$  = duração do fluxo de escoamento (h).

Ocorrendo o escoamento superficial, o modelo o propaga entre as sub-bacias e calcula a vazão de pico. A vazão de pico é simulada com o SWAT pelo método racional modificado, expresso pela equação 12.

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot Area}{3,6 \cdot t_{conc}} \quad (12)$$

Em que:

$q_{peak}$  = vazão de pico ( $m^3 s^{-1}$ ).

$\alpha_{tc}$  = fração da precipitação diária que ocorre durante o tempo de concentração.

$Q_{surf}$  = escoamento superficial (mm).

Área = área da sub-bacia ( $km^2$ ).

$t_{conc}$  = tempo de concentração da sub-bacia (h).

O tempo de concentração é a quantidade de tempo a partir do início de uma chuva até que a área inteira da sub-bacia esteja contribuindo para o fluxo na saída. O tempo de concentração é calculado somando o tempo de concentração do escoamento superficial (tempo necessário para o fluxo a partir do ponto mais

remoto na sub-bacia chegar ao canal) e o tempo de concentração do escoamento no curso d'água (tempo necessário para o fluxo nos canais a montante alcançar a foz):

$$t_{\text{conc}} = t_{\text{sup}} + t_{\text{canal}} \quad (13)$$

Em que:

$t_{\text{conc}}$  = tempo de concentração da sub-bacia (h).

$t_{\text{sup}}$  = tempo de concentração para o escoamento superficial (h).

$t_{\text{canal}}$  = tempo de concentração para o escoamento no curso d'água (h).

O tempo de concentração do escoamento superficial pode ser calculado pela equação 14.

$$t_{\text{sup}} = \frac{L_{\text{slp}}^{0,6} \cdot n^{0,6}}{18 \cdot \text{slp}^{0,3}} \quad (14)$$

Em que:

$L_{\text{slp}}$  = comprimento da encosta da sub-bacia (m) (SLSUBBSN).

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning para a sub-bacia.

$\text{slp}$  = declividade média da sub-bacia ( $\text{m m}^{-1}$ ) (HRU\_SLP).

O tempo de concentração do escoamento no curso d'água pode ser calculado pela equação 15.

$$t_{\text{canal}} = \frac{0,62 \cdot L \cdot n^{0,75}}{\text{Area}^{0,125} \cdot \text{slp}_{\text{ch}}^{0,375}} \quad (15)$$

Em que:

$L$  = comprimento do canal do ponto mais distante à saída da sub-bacia (km).

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning para o curso d'água (CH\_N1).

$\text{Área}$  = área da sub-bacia (km<sup>2</sup>).

$\text{slp}_{\text{ch}}$  = declividade do canal (m m<sup>-1</sup>).

O escoamento subsuperficial no modelo SWAT é determinado, por meio do modelo de onda cinemática, desenvolvido por Sloan e Moore (1984), o qual é baseado na equação de continuidade de massa, onde o segmento do declive é utilizado como volume controle. O escoamento subsuperficial é determinado pela equação:

$$Q_{\text{lat}} = 0,024 \cdot \left( \frac{2 \cdot \text{SW}_{\text{ly,excess}} \cdot K_{\text{sat}} \cdot \text{slp}}{\phi_d \cdot L_{\text{hill}}} \right) \quad (16)$$

Em que:

$Q_{\text{lat}}$  = escoamento subsuperficial (mm).

$\text{SW}_{\text{ly,excess}}$  = volume drenável de água armazenado na zona saturada da encosta por unidade de área (mm).

$k_{\text{sat}}$  = condutividade hidráulica saturada (mm h<sup>-1</sup>) (SOL\_K).

$\text{slp}$  = declividade média da sub-bacia (m m<sup>-1</sup>) (HRU\_SLP).

$\phi_d$  = porosidade drenável da camada de solo (mm mm<sup>-1</sup>).

$L_{\text{hill}}$  = comprimento da encosta (m) (SLSOIL).

Em grandes bacias com tempo de concentração superior a um dia, apenas uma fração do escoamento subsuperficial irá alcançar o canal principal no dia em que é gerado. O modelo SWAT incorpora um recurso de

armazenamento de escoamento subsuperficial de modo a retardar a sua liberação para o canal principal. Após o cálculo do escoamento subsuperficial, a quantidade de escoamento liberada para o canal principal é calculada pela equação 17:

$$Q_{\text{lat}} = (Q'_{\text{lat}} + Q_{\text{latstor},i-1}) \cdot \left( 1 - \exp \left[ \frac{-1}{TT_{\text{lag}}} \right] \right) \quad (17)$$

Em que:

$Q_{\text{lat}}$  = escoamento subsuperficial descarregado no canal principal em um dado dia (mm).

$Q'_{\text{lat}}$  = escoamento subsuperficial gerado em uma sub-bacia em um dado dia (mm).

$Q_{\text{latstor},i-1}$  = escoamento subsuperficial armazenado no dia anterior (mm).

$TT_{\text{lag}}$  = Tempo de propagação do fluxo lateral (dias) (LAT\_TIME).

O escoamento subterrâneo no modelo é simulado considerando dois tipos de aquíferos: raso e profundo. O aquífero raso contribui para o fluxo de base no canal principal ou em trechos da sub-bacia, já o aquífero profundo não contribui para o fluxo na bacia e assume-se que ele contribui com o fluxo da água em algum ponto fora da bacia hidrográfica. O fluxo de água subterrânea até a recarga é dado pela equação:

$$Q_{\text{gw}} = \frac{8000 \cdot K_{\text{sat}}}{L_{\text{gw}}^2} \cdot h_{\text{wtbl}} \quad (18)$$

Em que:

$Q_{gw}$  = fluxo da água subterrânea ou fluxo de base, para o canal principal no dia  $i$  (mm).

$K_{sat}$  = condutividade hidráulica do aquífero (mm/dia) (SOL\_K).

$L_{gw}$  = distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m).

$h_{wtbl}$  = altura do lençol freático (m).

O escoamento de base somente entra no trecho do canal se a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder um valor limite especificado pelo usuário ( $aq_{shthr,q}$ ). Ocorrendo a recarga do aquífero, o escoamento subterrâneo poderá ser calculado, conforme as equações 19 e 20:

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t) + w_{rchrg,sh} \cdot [1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t)] \quad (19)$$

se  $aq_{sh} > aq_{shthr,q}$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{se } aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (20)$$

Em que:

$Q_{gw,i}$  = fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia  $i$  (mm).

$Q_{gw,i-1}$  = fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia  $i-1$  (mm).

$\alpha_{gw}$  = constante da recessão do escoamento de base (ALPHA\_BF).

$\Delta t$  = intervalo de tempo (1 dia).

$w_{rchrg,sh}$  = quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia  $i$  (mm).

$aq_{sh}$  = quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia  $i$  (mm).

$aq_{shth,q}$  = nível limite de água no aquífero raso para que ocorra contribuição da água subterrânea no canal principal (mm) (GWQMN).

Para o escoamento subterrâneo, quando não ocorre a recarga do aquífero, tem-se:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp(-\alpha_{qw} \cdot t) \quad \text{se } aq_{sh} > aq_{shthr,q} \quad (21)$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad \text{se } aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (22)$$

Em que:

$Q_{gw}$  = fluxo da água subterrânea no canal principal no dia  $i$  (mm).

$Q_{gw,0}$  = fluxo da água subterrânea para o canal principal no início da recessão ( $t=0$ ) (mm).

$\alpha_{qw}$  = constante da recessão do escoamento de base.

$t$  = tempo passado desde o início da recessão (dias).

O equilíbrio da água para o aquífero raso é calculado por:

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (23)$$

Em que:

$aq_{sh,i}$  = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia  $i$  (mm).

$aq_{sh,i-1}$  = quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia  $i-1$  (mm).

$w_{rchrg,sh}$  = quantidade de recarga que entra no aquífero raso no dia  $i$  (mm).

$Q_{gw}$  = fluxo da água subterrânea ou de base no canal principal no dia  $i$  (mm).

$w_{\text{revap}}$  = quantidade de água penetrando a zona do solo em resposta às deficiências hídricas no dia  $i$  (mm).

$w_{\text{pump,sh}}$  = quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia  $i$  (mm).

A recarga do aquífero em um determinado dia é calculada conforme a equação a 24:

$$w_{\text{rchrg},i} = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-1}{\delta_{\text{gw}}}\right) \right] \cdot w_{\text{seep}} + \exp\left(\frac{-1}{\delta_{\text{gw}}}\right) \cdot w_{\text{rchrg},i-1} \quad (24)$$

Em que:

$w_{\text{rchrg},i}$  = quantidade de recarga penetrando o aquífero no dia  $i$  (mm).

$\delta_{\text{gw}}$  = tempo de atraso ou de drenagem das formações geológicas sobrepostas (dias) (GW\_DELAY).

$w_{\text{seep}}$  = quantidade total de água que sai da base do perfil do solo no dia  $i$  (mm).

$w_{\text{rchrg},i-1}$  = quantidade de recarga que entra no aquífero no dia  $i-1$  (mm).

O SWAT modela o movimento de água para as camadas adjacentes não saturadas como uma função da demanda de água para a evapotranspiração. Esse processo é muito importante nas bacias hidrográficas nas quais a zona saturada está muito abaixo da superfície ou, onde plantas com raízes profundas estão crescendo. Para evitar algum equívoco com a evaporação do solo e a transpiração, este processo dentro do SWAT é chamado “revap”. O Revap pode ocorrer somente se a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder ao valor limite especificado pelo usuário,  $aq_{\text{shthr,rvp}}$ . A quantidade máxima de

água que poderá ser removida do aquífero, via revap em um dado dia é expressa, conforme a equação 25.

$$w_{\text{revap,mx}} = \beta_{\text{rev}} \cdot E_0 \quad (25)$$

Em que:

$w_{\text{revap,mx}}$  = quantidade máxima de água movendo para a zona do solo em resposta à deficiência hídrica (mm).

$\beta_{\text{rev}}$  = coeficiente revap (GW\_REVAP).

$E_0$  = evapotranspiração potencial no dia (mm).

A quantidade real de revap que ocorrerá em um determinado dia é calculada conforme as equações 26, 27 e 28.

$$w_{\text{revap}} = 0 \quad \text{se} \quad aq_{\text{sh}} \leq aq_{\text{shthr,rvp}} \quad (26)$$

$$w_{\text{revap}} = w_{\text{revap,mx}} - aq_{\text{shthr,rvp}} \quad (27)$$

$$\text{se} \quad aq_{\text{shthr,rvp}} < aq_{\text{sh}} < (aq_{\text{shthr,rvp}} + w_{\text{revap,mx}})$$

$$w_{\text{revap}} = w_{\text{revap,mx}} \quad \text{se} \quad aq_{\text{sh}} \geq (aq_{\text{shthr,rvp}} + w_{\text{revap,mx}}) \quad (28)$$

Em que:

$w_{\text{revap}}$  = quantidade de água movendo para a zona do solo em resposta à deficiência de água (mm).

$aq_{\text{sh}}$  = quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia i (mm).

$aq_{\text{shthr,rvp}}$  = limite do nível de água no aquífero raso para que seja possível ocorrer o revap (mm) (REVAPMN).

Para o cálculo da evapotranspiração potencial, o modelo oferece como opções os métodos de Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves. Neste trabalho, adotou-se o método de Penman-Monteith por ser considerado o método padrão de estimativa da evapotranspiração potencial. A equação 29 representa o método de Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\rho_{ar} \cdot c_p \cdot \Delta_e}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (29)$$

Em que:

$\lambda E$  = densidade do fluxo de calor latente de evaporação ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

$\Delta$  = declividade da curva de saturação de vapor d'água ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

$R_n$  = radiação líquida ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

$G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

$\rho_{ar}$  = densidade do ar ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

$c_p$  = calor específico do ar ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

$\Delta_e$  = déficit de pressão de vapor d'água ( $\text{kPa}$ ).

$\gamma$  = coeficiente psicométrico ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

$r_c$  = resistência da cultura à difusão do vapor d'água ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

$r_a$  = resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

O dossel de uma planta pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração. Com a queda da precipitação, a interceptação do dossel reduz a energia erosiva das gotas e recolhe uma porção de precipitação dentro do dossel. A influência que o dossel exerce nesses processos é uma função da densidade da cobertura da planta e a morfologia das espécies de planta. O modelo SWAT permite que uma quantidade máxima de água possa ser

mantida armazenada no dossel, variando de um dia para o outro, em função do índice de área foliar, a qual pode ser calculada pela equação 30.

$$\text{can}_{\text{day}} = \text{can}_{\text{mx}} \cdot \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{mx}}} \quad (30)$$

Em que:

$\text{can}_{\text{day}}$  = quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro do dossel em um determinado dia (mm).

$\text{can}_{\text{mx}}$  = quantidade máxima de água que pode ficar retida dentro do dossel quando o dossel está completamente desenvolvido (mm).

LAI = índice de área foliar para a planta.

LAI<sub>mx</sub> = índice de área foliar máximo para a planta.

Quando há precipitação em um dia qualquer, o estoque do dossel é preenchido, antes de qualquer água alcançar o solo, conforme as equações 31 e 32.

$$R_{\text{INT}(f)} = R_{\text{INT}(i)} + R'_{\text{day}} \quad \text{e} \quad R_{\text{day}} = 0 \quad (31)$$

$$\text{quando} \quad R'_{\text{day}} \leq \text{can}_{\text{day}} - R_{\text{INT}(i)}$$

$$R_{\text{INT}(f)} = \text{can}_{\text{day}} \quad \text{e} \quad R_{\text{day}} = R'_{\text{day}} - (\text{can}_{\text{day}} - R_{\text{INT}(i)}) \quad (32)$$

$$\text{quando} \quad R'_{\text{day}} > \text{can}_{\text{day}} - R_{\text{INT}(i)}$$

Em que:

$R_{\text{int}}(i)$  = quantidade inicial de água livre armazenada dentro do dossel em um determinado dia (mm).

$R_{\text{int}}(f)$  = quantidade final de água livre armazenada dentro do dossel em um determinado dia (mm).

$R'_{\text{day}}$  = quantidade de precipitação em um determinado dia antes que a interceptação do dossel seja removida (mm).

$R_{\text{day}}$  = quantidade de precipitação em um determinado dia que alcança a superfície do solo (mm).

$can_{\text{day}}$  = quantidade máxima de água que pode ser armazenada dentro do dossel em um determinado dia (mm).

Determinada a evapotranspiração potencial, o modelo calcula a evapotranspiração real, primeiramente, considerando a evaporação de toda a precipitação interceptada pelo dossel das plantas e, depois, a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de evaporação do solo.

A evaporação é determinada a partir da evapotranspiração potencial separada em duas condições. Se a evapotranspiração potencial ( $E_o$ ) é menor que a quantidade de água livre retida nas copas ( $R_{\text{int}}$ ), então, utiliza-se a equação 33. Se a evapotranspiração potencial ( $E_o$ ) é maior que a quantidade de água livre mantida nas copas ( $R_{\text{int}}$ ) é utilizada a equação 34.

$$E_a = E_{\text{can}} = E_o \rightarrow R_{\text{int}(f)} = R_{\text{int}(i)} - E_{\text{can}} \quad (33)$$

$$E_a = R_{\text{int}(f)} \rightarrow R_{\text{int}(f)} = 0 \quad (34)$$

Em que:

$E_a$  = quantidade de evapotranspiração real que ocorre numa bacia hidrográfica ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$E_{\text{can}}$  = quantidade de evaporação de água livre nas copas ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$E_o$  = evapotranspiração potencial ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$R_{\text{int}(i)}$  = quantidade inicial de água livre mantida dentro do dossel ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$R_{int}(f)$  = quantidade final de água livre mantida dentro do dossel (mm dia<sup>-1</sup>).

A evaporação da água no solo é determinada pela utilização de funções exponenciais conforme a profundidade do solo e da quantidade de água. Portanto o modelo divide a demanda de evaporação entre as diferentes camadas do solo. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água que pode ser evaporada é calculada por:

$$E_{solo,z} = E'_s \cdot \frac{z}{z + \exp(2,374 - 0,00713z)} \quad (35)$$

Em que:

$E_{soil,z}$  = demanda de evaporação na profundidade  $z$  (mm).

$E'_s$ : evaporação máxima da água no solo (mm dia<sup>-1</sup>).

$z$  = profundidade da camada do solo a partir da superfície (mm).

A quantidade de demanda evaporativa, para uma dada camada de solo, é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas, calculadas nos limites superior e inferior da camada do perfil do solo, como segue na equação 36.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad (36)$$

Em que:

$E_{soil,ly}$  = demanda evaporativa para a camada  $ly$  (mm).

$E_{soil,zl}$  = demanda evaporativa na camada inferior do solo (mm).

$E_{soil,zu}$  = demanda evaporativa na camada superior do solo (mm).

Nos casos em que as camadas superiores do solo não conseguem suprir a demanda evaporativa, o SWAT permite que as camadas inferiores compensem essa demanda, o que é feito com base na inserção do coeficiente de compensação denominado  $esco$  na equação 37.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot esco \quad (37)$$

Ao passo que o valor do  $esco$  é reduzido, o modelo extrai uma maior quantidade de água pela demanda evaporativa nas camadas inferiores.

A capacidade de armazenamento de água no solo, também tida como a água disponível para as plantas, pode ser calculada, a partir da subtração entre a umidades na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente, conforme a equação 38.

$$AWC_{ly} = FC_{ly} - WP_{ly} \quad (38)$$

Em que:

$AWC_{ly}$  = umidade disponível para as plantas na camada  $ly$  (SOL\_AWC).

$FC_{ly}$  = umidade na capacidade de campo na camada  $ly$ .

$WP_{ly}$  = umidade no ponto de murcha permanente na camada  $ly$ .

Se as camadas superiores do solo não contiverem água suficiente, para suprir o potencial de absorção de água da planta, o usuário do modelo pode permitir que as camadas inferiores compensem esse déficit, conforme a equação 39.

$$W'_{up,ly} = W_{up,ly} + W_{demand} \cdot epc0 \quad (39)$$

Em que:

$W'_{up,ly}$  = potencial ajustado de absorção de água na camada ly (mm).

$W_{up,ly}$  = potencial de absorção de água na camada ly (mm).

$W_{demand}$  = demanda de absorção de água não atendida pelas camadas do solo (mm).

$epco$  = fator de compensação de absorção da planta.

A propagação do escoamento nos canais é realizada pelo modelo SWAT, por meio do método de propagação de Muskingum, com base na seguinte expressão:

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{in,2} + C_2 \cdot q_{in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad (40)$$

Em que:

$q_{in,1}$  = vazão de entrada no início do passo de tempo ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q_{in,2}$  = vazão de entrada no final do passo de tempo ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q_{out,1}$  = vazão de saída no início do passo de tempo ( $m^3 s^{-1}$ ).

$q_{out,2}$  = vazão de saída no final do passo de tempo ( $m^3 s^{-1}$ ).

$C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  = constantes de propagação, obtidas por:

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (41)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (42)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (43)$$

Em que:

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1.$$

$\Delta t$  = passo de tempo (s).

$K$  = tempo de armazenamento para o trecho (s).

$X$  = fator de ponderação.

Para rios, o fator de ponderação varia entre 0 e 0,3, sendo utilizado o valor 0,2. Para manter a estabilidade numérica e evitar a obtenção de valores negativos, para a vazão de saída, a seguinte condição deve ser atendida:

$$2.K.X < \Delta t < 2.K.(1-X) \quad (44)$$

O tempo de armazenamento para o trecho pode ser calculado pela seguinte equação:

$$K = \text{coef}_1 \cdot K_{\text{bnkfull}} + \text{coef}_2 \cdot K_{0.1\text{bnkfull}} \quad (45)$$

Em que:

$\text{coef}_1$  e  $\text{coef}_2$  = coeficientes de ponderação.

$K_{\text{bnkfull}}$  = tempo de armazenamento para o trecho escoando a plena seção (s).

$K_{0.1\text{bnkfull}}$  = tempo de armazenamento para o trecho escoando com um décimo da plena seção (s).

Para calcular  $K_{\text{bnkfull}}$  e  $K_{0.1\text{bnkfull}}$  é utilizada a equação 46, desenvolvida por Cunge (1969).

$$K = \frac{1000.L_{\text{ch}}}{c_k} \quad (46)$$

Em que:

$L_{ch}$  = comprimento do canal (km).

$C_k$  = celeridade correspondente ao fluxo, para uma dada profundidade ( $m s^{-1}$ ), obtida por:

$$c_k = \frac{5}{3} \cdot \left( \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \right) \quad (47)$$

Em que:

$R_{ch}$  = raio hidráulico do canal (m).

$slp_{ch}$  = declividade do canal ( $m m^{-1}$ ).

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (CH\_N2).

Durante os períodos em que o curso d'água não recebe contribuições de águas subterrâneas, podem ocorrer perdas de água, a partir do canal, por meio da transmissão através dos lados e do fundo do canal. As perdas por transmissão podem ser estimadas pela equação 48:

$$t_{loss} = K_{ch} \cdot TT \cdot P_{ch} \cdot L_{ch} \quad (48)$$

Em que:

$t_{loss}$  = perdas por transmissão do canal ( $m^3$ ).

$K_{ch}$  = condutividade hidráulica efetiva do canal ( $mm h^{-1}$ ) (CH\_K2).

TT = tempo de propagação do fluxo (h).

$P_{ch}$  = perímetro molhado (m).

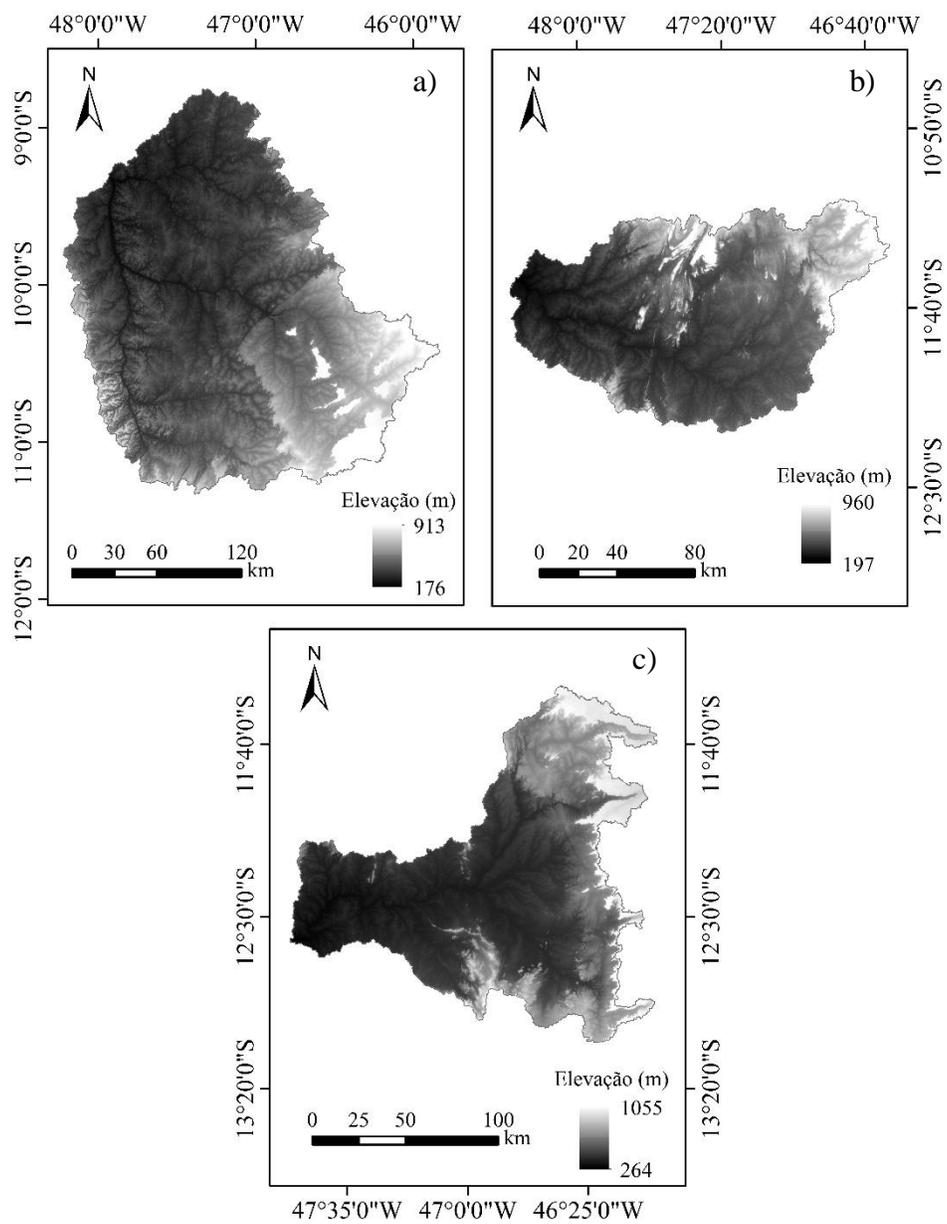
$L_{ch}$  = comprimento do canal (km).

### **3.3 Dados de entrada do modelo SWAT**

#### **3.3.1 Modelo Digital de Elevação**

O modelo digital de elevação (MDE) da região em estudo (Figura 2), com 30 metros de resolução espacial, foi obtido, a partir de imagens ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), disponibilizadas pelo website do USGS (*United States Geological Survey*). O MDE foi utilizado no ArcSWAT, no processo de delimitação das bacias hidrográficas, divisão em sub-bacias, definição dos parâmetros físicos relacionados à topografia e na geração da rede de drenagem. Conforme se pode observar, as elevações variaram de 176 a 913 m, 197 a 960 m e 264 a 1055 m, para as BHS, BHMA e BHP, respectivamente.

Figura 2 - Modelo digital de elevação da BHS (a), BHMA (b) e BHP (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 3.3.2 Uso do Solo

Para caracterizar o uso do solo na região de estudo, foi obtido junto à Secretaria de Planejamento e da Modernização da Gestão Pública do Tocantins (SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DA MODERNIZAÇÃO DA GESTÃO PÚBLICA - SEPLAN, 2012), o mapa de uso do solo referente ao ano de 1990. Este mapa foi produzido, por meio de classificação supervisionada de imagens Landsat 5, com resolução espacial de 30 metros. Após reclassificação, foram obtidas as seguintes classes de uso do solo: agricultura, cerrado, floresta, mata ciliar, pastagem, solo exposto, água e área urbana. Na Tabela 1, estão apresentadas as áreas ocupadas por classe de uso do solo.

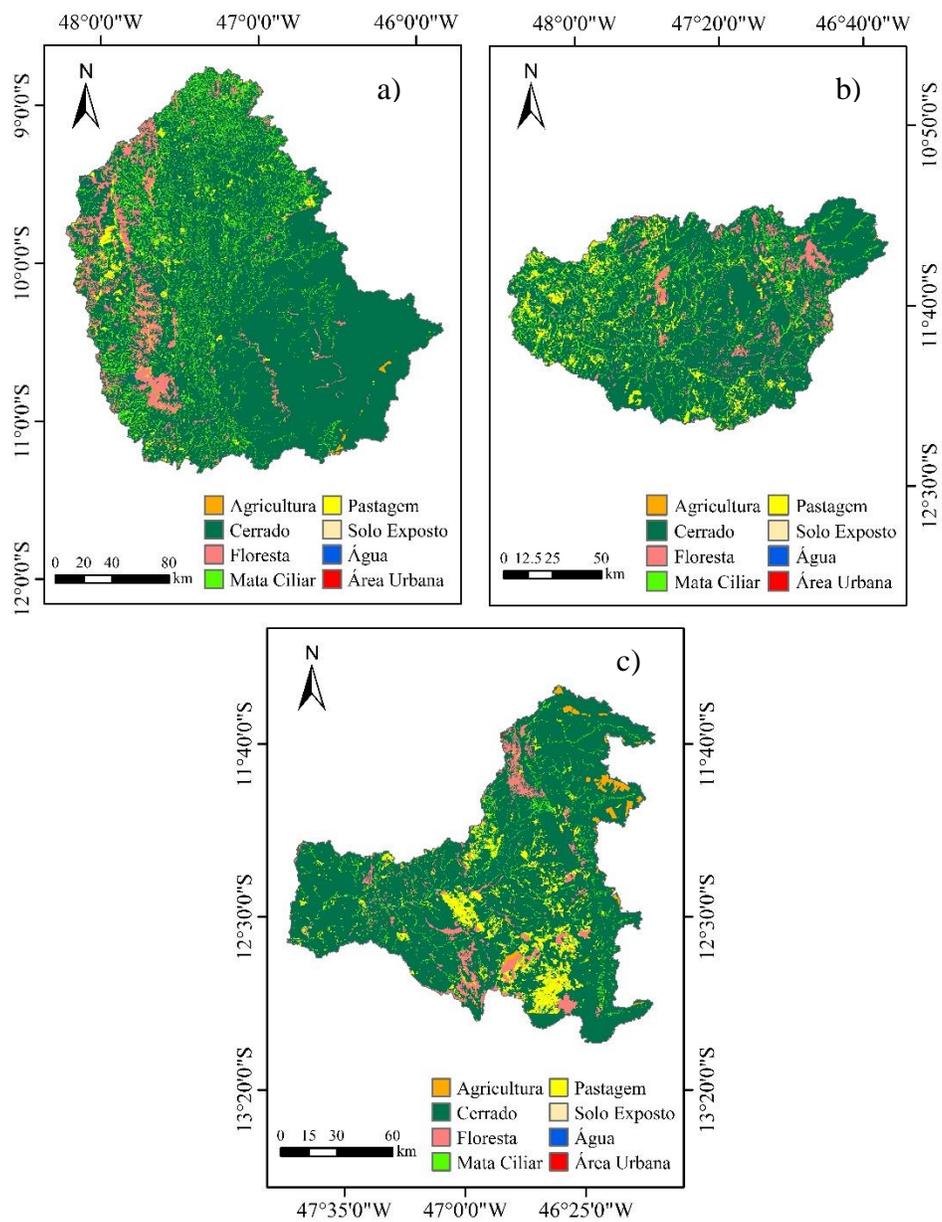
O mapa de uso do solo relativo a 1990 foi utilizado neste trabalho como um dos mapas base para a configuração do modelo SWAT. Esse ano foi selecionado devido ao fato da simulação compreender o período de 1976 a 2005, e sendo assim, 1990 apresenta-se como uma data intermediária. O mapa de uso do solo das BHS, BHMA e BHP estão apresentados na Figura 3.

Tabela 1 - Área ocupada por classe de uso do solo, no ano de 1990, nas bacias hidrográficas dos rios Sono, Manuel Alves da Natividade e Palma.

Uso do Solo	BHS		BHMA		BHP	
	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Pastagem	1162,98	2,58	941,13	6,56	1480,59	8,48
Cerrado	36235,28	80,45	11367,47	79,25	14054,43	80,46
Mata Ciliar	4426,71	9,83	1201,91	8,38	685,10	3,92
Água	51,35	0,11	25,68	0,18	36,33	0,21
Área Urbana	7,66	0,02	5,02	0,04	8,21	0,05
Floresta	3084,02	6,85	797,83	5,56	1009,30	5,78
Solo Exposto	8,11	0,02	2,44	0,02	3,32	0,02
Agricultura	65,76	0,15	2,73	0,02	190,75	1,09

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 3 - Mapa de uso do solo referente ao ano de 1990 para a BHS (a), BHMA (b) e BHP (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 3.3.3 Solos

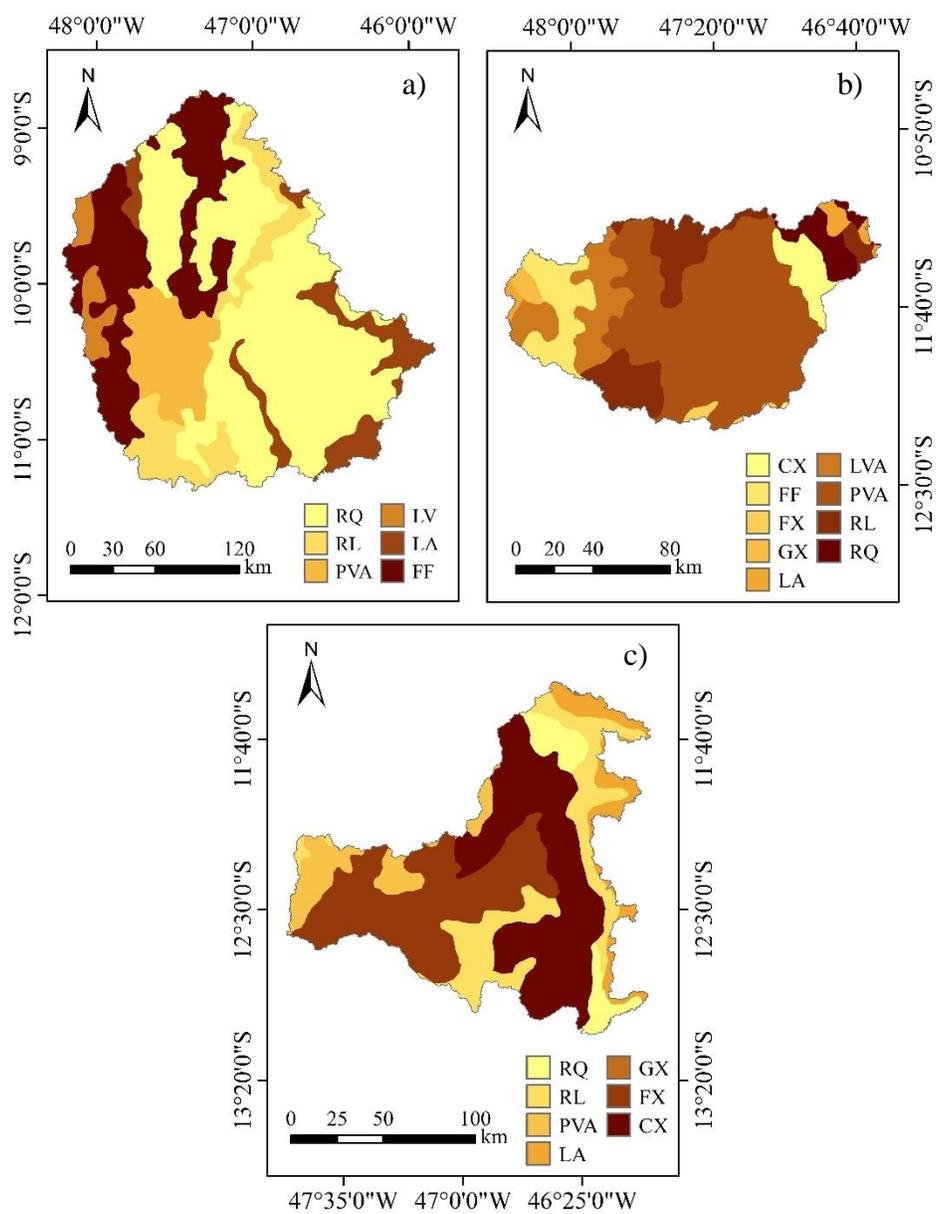
As bacias hidrográficas em estudo contam com o mapeamento de solos realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2011), na escala de 1:5.000.000. Na Tabela 2, encontram-se as nomenclaturas e as distribuições percentuais das classes de solos para as bacias hidrográficas do Rio Sono, Manuel Alves da Natividade e Palma. Na Figura 4, apresentam-se os mapas de solos para as mesmas.

Tabela 2 - Nomenclatura e distribuição percentual das classes de solos nas BHS, BHMA e BHP.

Classe de Solo	Sigla	BHS	BHMA	BHP
		Área (%)	Área (%)	Área (%)
Neossolo Quartzarênico	RQ	48,03	4,73	6,23
Plintossolo Pétrico	FF	20,98	8,46	-
Argilossolo Vermelho-Amarelo	PVA	9,74	52,85	8,12
Neossolo Litólico	RL	9,73	14,08	17,71
Latossolo Amarelo	LA	8,49	2,16	6,53
Latossolo Vermelho	LV	3,03	-	-
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	-	10,69	-
Cambissolo Háplico	CX	-	5,04	31,66
Gleissolo Háplico	GX	-	1,24	0,05
Plintossolo Háplico	FX	-	0,75	29,70

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 4 - Mapas de solos da BHS (a), da BHMA (b) e da BHP (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

O modelo SWAT requer um grande número de parâmetros físico-hídricos, para cada classe de solo, tais como: o número de camadas (NLAYERS); grupo hidrológico do solo (HYDGRP); profundidade máxima das raízes (SOL\_ZMX) (mm); profundidade da camada de solo (SOL\_Z) (mm); densidade aparente do solo (SOL\_BD) ( $\text{g.cm}^{-3}$ ); capacidade de água disponível no solo (SOL\_AWC) ( $\text{mm H}_2\text{O.mm}^{-1}$ ); conteúdo de carbono orgânico (SOL\_CBN) (%); condutividade hidráulica saturada (SOL\_K) ( $\text{mm.h}^{-1}$ ); teor de argila (CLAY) (%); teor de silte (SILT) (%); teor de areia (SAND) (%) e o fator de erodibilidade do solo (USLE\_K) ( $\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ ). Esses parâmetros devem ser inseridos para cada camada de cada classe de solo. Os parâmetros físico-hídricos, utilizados neste trabalho, foram obtidos, a partir dos trabalhos de Baldissera (2005), Carvalho (2014), Herrera (2013), Lima (2013), os quais determinaram os valores médios dos parâmetros para serem utilizados como dados de entrada no modelo SWAT.

### 3.3.4 Dados Meteorológicos

Para simular os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, o modelo SWAT requer diferentes tipos de dados meteorológicos diários ou horários, tais como: precipitação (mm), temperatura do ar máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar ( $\text{MJ/m}^2/\text{dia}$ ), umidade relativa (%) e velocidade do vento (m/s). A quantidade de dados meteorológicos de entrada requeridos varia de acordo com o método escolhido para o cálculo da evapotranspiração.

Para a obtenção da evapotranspiração, encontram-se incorporados no modelo SWAT três diferentes métodos, sendo eles: Hargreaves, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. O método Hargreaves requer somente a temperatura do ar; o método Priestley-Taylor requer a radiação solar, temperatura do ar e a umidade relativa; e o método Penman-Monteith requer a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e a velocidade do vento. Neste trabalho, o

método adotado foi o Penman-Monteith, por ser ele o método considerado padrão para a estimativa da evapotranspiração pela FAO (*Food and Agriculture Organization*).

A base de dados requerida para o cálculo da evapotranspiração para a região de estudo foi constituída de séries históricas diárias de insolação, temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa e velocidade do vento de 5 estações meteorológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio do Banco de Dados para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

A base de dados de precipitação para a região estudada, foi constituída por séries históricas de precipitação diária de 19 estações pluviométricas, obtidas junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA), e por séries históricas de 5 estações meteorológicas, disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nas Tabelas 3 e 4, estão apresentadas as principais informações das estações pluviométricas e meteorológicas utilizadas, respectivamente, e os seus períodos de disponibilidade de dados.

Tabela 3 - Principais informações das estações pluviométricas utilizadas.

Posto Pluviométrico	Código	Latitude	Longitude	Altitude	Período
Almas	1147000	-11,58	-47,17	427	1973-2016
Aurora do Norte	1246001	-12,71	-46,41	464	1973-2016
Conceição do Tocantins	1247000	-12,23	-47,32	407	1973-2016
Dianópolis	1146000	-11,62	-46,81	679	1971-2016
Fazenda Bom Jardim	1145004	-10,99	-45,53	451	1963-2016
Fazenda Lobeira	1148000	-11,53	-48,29	243	1969-2016
Fazenda Santa Rita	1247005	-12,58	-47,49	340	1984-2016
Jatobá	1047000	-9,99	-47,48	201	1973-2016
Lizarda	946003	-9,60	-46,67	620	1973-2016
Mansinha	947001	-9,46	-47,33	320	1983-2016
Natividade	1147001	-11,70	-47,73	308	1973-2016
Novo Acordo	1047001	-9,96	-47,67	300	1971-2016
Pindorama do Tocantins	1147002	-11,14	-47,58	444	1973-2016
Ponte Alta do Bom Jesus	1246000	-12,09	-46,48	519	1973-2016
Ponte Alta do Tocantins	1047004	-10,75	-47,54	300	1984-2016
Porto Alegre	1147003	-11,61	-47,04	372	1975-2016
Porto Gilândia	1047002	-10,75	-47,76	220	1969-2016
Porto Real	948001	-9,31	-47,93	200	1969-2016
Rio da Palma	1247002	-12,42	-47,20	322	1973-2016

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Tabela 4 - Principais informações das estações meteorológicas.

Posto Meteorológico	Código	Latitude	Longitude	Altitude	Período
Alto Parnaíba	82970	-9,10	-45,93	285	1976-2016
Pedro Afonso	82863	-8,96	-48,18	187	1977-2016
Peixe	83228	-12,01	-48,35	242	1975-2016
Porto Nacional	83064	-10,71	-48,41	239	1961-2016
Taguatinga	83235	-12,40	-46,41	603	1961-2016

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Em meio à enorme quantidade de séries históricas das variáveis meteorológicas, a presença de períodos com falhas é inevitável. Com o objetivo de solucionar esse déficit de informação e simular a vazão de forma contínua, o modelo SWAT dispõe de um gerador climático WXGEN (*Weather Generator*), baseado na cadeia de Markov, no qual, para o preenchimento dos vazios nas séries históricas, requer alguns dados estatísticos referentes às variáveis climáticas, que necessitam ser inseridos para cada uma das estações meteorológicas. Na Tabela 5 estão listados os dados requeridos pelo gerador climático. Esses dados estatísticos foram calculados a partir de uma macro para o software Excel (WGN Excel Macro) e pelo software Dewpoint Estimation disponibilizados pelo website do SWAT (<http://swat.tamu.edu/software/links/>).

Tabela 5 - Dados estatísticos requeridos pelo gerador climático WXGEN.

Nome do Campo	Descrição
TMPMX	Média das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPMN	Média das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMX	Desvio padrão das temperaturas máximas do ar para cada mês (°C)
TMPSTDMN	Desvio padrão das temperaturas mínimas do ar para cada mês (°C)
PCPMM	Precipitação média para cada mês (mm)
PCPSTD	Desvio padrão das precipitações diárias para cada mês (mm/dia)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para precipitação de cada mês
PR_W_1	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia seco para cada mês
PR_W_2	Probabilidade de um dia úmido ocorrer após um dia úmido para cada mês
PCPD	Número médio de dias com chuva para cada mês
RAINHHMX	Precipitação máxima de 30 minutos para cada mês (mm)
RAIN_YRS	Número de anos utilizados para determinação da RAINHHMX
SOLARAV	Radiação solar média para cada mês (MJ/m <sup>2</sup> /dia)
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho para cada mês (°C)
WNDVAV	Velocidade média do vento para cada mês (m/s)

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 3.3.5 Dados de vazão

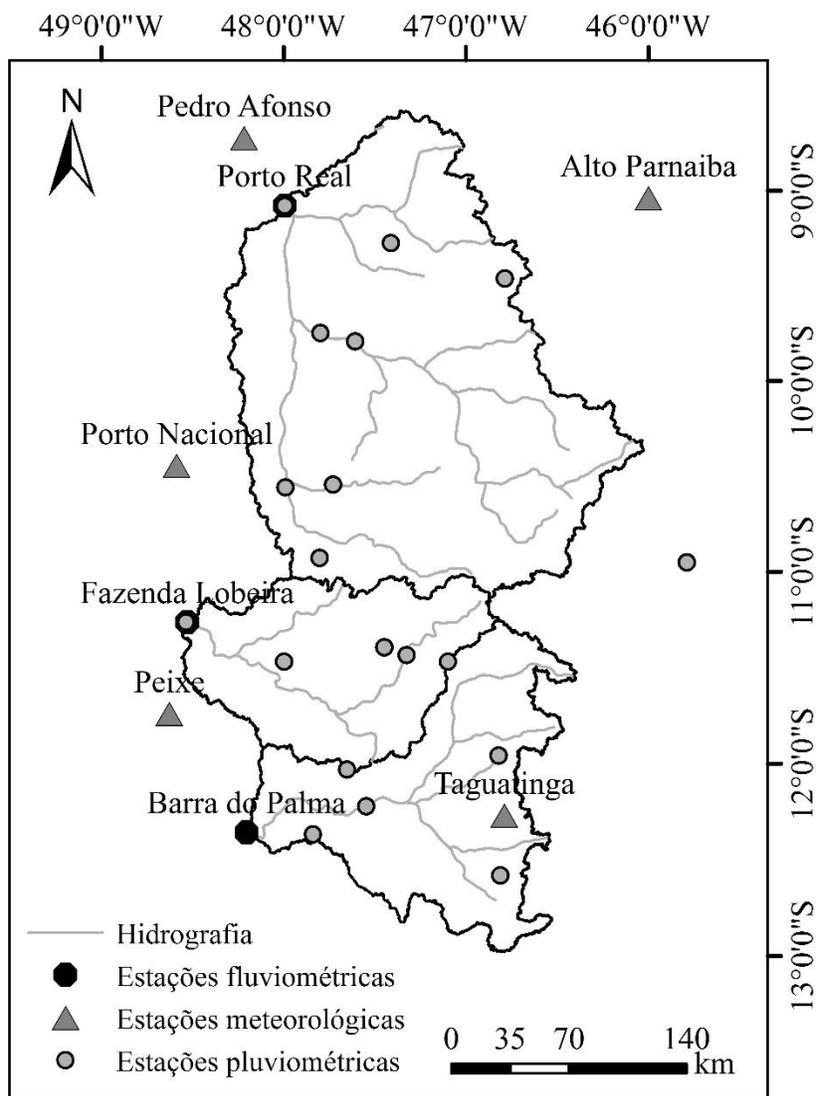
Os dados observados de vazão são imprescindíveis nas etapas de calibração e validação de um modelo hidrológico, pois viabilizam o ajuste dos parâmetros calibráveis à realidade da bacia hidrográfica na qual o modelo está sendo aplicado. O banco de dados de vazão utilizado para calibrar e validar as três bacias hidrográficas em estudo foi consistido de séries históricas de vazões médias diárias de 3 estações fluviométricas, abrangendo o período de 1976 a 2005, obtidas junto ao Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWEB) da Agência Nacional de Águas (ANA). As estações fluviométricas Barra do Palma, Fazenda Lobeira e Porto Real determinaram as seções de controle das BHP, BHMA e BHS, respectivamente. Na Tabela 6, estão apresentadas as principais informações das estações fluviométricas utilizadas e os períodos de disponibilidade de dados. Na Figura 5, estão apresentadas as localizações das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas, utilizadas neste trabalho.

Tabela 6 - Principais informações das estações fluviométricas.

Posto Fluviométrico	Bacia	Código	Latitude	Longitude	Período
Barra do Palma	BHP	21890000	-12,60	-47,86	1971 - 2006
Fazenda Lobeira	BHMA	22250000	-11,53	-48,29	1969 - 2006
Porto Real	BHS	22900000	-9,31	-47,93	1969 - 2013

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 5 - Localização das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas.



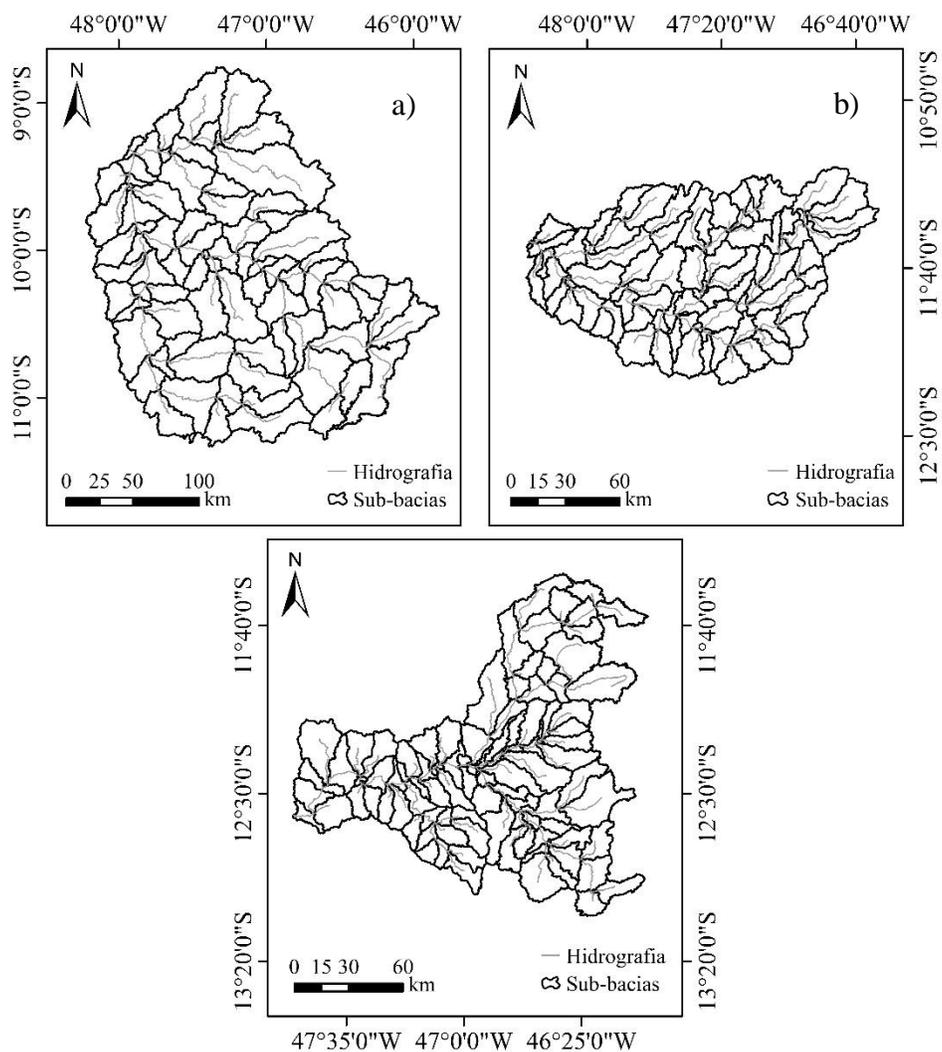
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### 3.4 Configuração do Modelo SWAT

A configuração do modelo SWAT foi realizada em sua interface com o software ArcGIS, denominada ArcSWAT. A configuração do SWAT foi iniciada com a delimitação da bacia hidrográfica. Durante esse processo, foram inseridos o MDE, a seção de controle da bacia hidrográfica e indicada a área de drenagem máxima limite, para a delimitação das sub-bacias, sendo que para esse valor, foi adotado o cálculo apresentado pelo software no *default*. Na BHS a área de drenagem máxima limite utilizada foi de 30000 ha e obtiveram-se 81 sub-bacias; na BHMA foi de 10000 ha e obtiveram-se 87 sub-bacias e na BHP foi de 10000 ha e obtiveram-se 107 sub-bacias; além disso, houve a geração da rede de drenagem e a determinação de parâmetros físicos relacionados com a topografia. Na Figura 6, estão apresentadas as sub-bacias discretizadas para a BHS, BHMA e BHP.

Na sequência, foi realizada a discretização das sub-bacias em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), a partir da sobreposição dos mapas de solos, uso do solo e declividade. As unidades geradas são as menores áreas inseridas na bacia que apresentam uma única classe de solo, uso do solo e declividade (NEITSCH et al., 2011). Todos os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica são modelados a partir das HRUs. Desta forma, o escoamento é calculado para cada HRU e é ponderado para obter o escoamento total da sub-bacia, aumentando assim a precisão das predições e fornecendo uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia (ARNOLD et al., 1998, SHEN et al., 2009).

Figura 6 - Discretização por sub-bacias geradas pelo modelo SWAT para a BHS (a), BHMA (b) e BHP (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

A partir da sobreposição dos mapas, o SWAT permite eliminar as HRUs muito pequenas, agrupando-as em unidades maiores; esse passo visa o ganho de

eficiência nas etapas subsequentes. Visto que as bacias hidrográficas deste estudo são de grande extensão, o elevado número de HRUs gerado inicialmente tornou-se um impasse para os processamentos subsequentes e, desta forma, após a execução do agrupamento, foram obtidas 644 HRUs para a BHS, 736 HRUs para a BHMA e 901 HRUs para a BHP.

### **3.5 Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade é uma etapa realizada para determinar a influência dos parâmetros sobre os resultados modelados. Neste trabalho, foram tomados como parâmetros iniciais para análise de sensibilidade os apresentados na Tabela 7, tidos como os mais sensíveis para a simulação da vazão por diversas literaturas (ABBASPOUR et al., 2007; ANDRADE; MELLO; BESKOW, 2013; DURÃES; MELLO; NAGHETTINI, 2011; EDUARDO et al., 2016; LELIS et al., 2012; MELO NETO et al., 2014; PONTES et al., 2016). Com base nesses parâmetros, foi utilizada a ferramenta One-Factor-At-a-Time (OAT) do algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting Procedure Versão 2*) (ABBASPOUR et al., 2007) do software SWAT-CUP, para analisar os parâmetros mais sensíveis para cada uma das bacias hidrográficas. Essa ferramenta permite analisar a influência de cada parâmetro separadamente sobre a modelagem, a partir da inserção do parâmetro juntamente com a especificação de uma faixa de variação e o número de iterações. Assim, são traçados os hidrogramas gerados para valores dentro dessa faixa, indicando assim, claramente, se o parâmetro influencia ou não na modelagem.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Parâmetros	Descrição	Range Inicial
ESCO.hru	Coefficiente de compensação de evaporação de água do solo	0,4 – 0,95
CN2.mgt	Curva-Número inicial para condições de umidade II	-0,1 – 0,1
ALPHA_BF.gw	Coefficiente de recessão do escoamento de base (dias)	0 – 1
GW_DELAY.gw	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	-30 – 60
GWQMN.gw	Limite de água no aquífero raso para ocorrência de fluxo de base (mm)	-1000 – 1000
CANMX.hru	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação (mm)	0 – 30
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm.h <sup>-1</sup> )	0 – 10
CH_N2.rte	Número de Manning para o canal principal	-0,01 – 0,3
EPCO.bsn	Coefficiente de absorção de água pelas plantas	0,01 – 1
GW_REVAP.gw	Coefficiente de ascensão da água para a zona não saturada	0,02 – 0,2
REVAPMN.gw	Limite de água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)	-1000 – 1000
SOL_AWC.sol	Capacidade de armazenamento de água no solo (mm <sub>água</sub> mm <sub>solo</sub> <sup>-1</sup> )	-0,1 – 0,1
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada (mm.h <sup>-1</sup> )	-0,2 – 0,2
SURLAG.bsn	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial (dias)	0,01 – 24
CH_N1.sub	Número de Manning para o canal secundário	0,01 – 0,2
CH_K1.sub	Condutividade hidráulica efetiva do canal tributário (mm.h <sup>-1</sup> )	0 – 5
SLSOIL.hru	Comprimento da encosta (m)	0 – 150
LAT_TIME.hru	Tempo de propagação do fluxo lateral (dias)	0 – 150
HRU_SLP.hru	Declividade média da sub-bacia (m m <sup>-1</sup> )	-0,25 – 0,25
SLSUBBSN.hru	Comprimento da encosta da sub-bacia (m)	-0,25 – 0,25

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

### **3.6 Calibração, validação e avaliação da performance do modelo SWAT**

A calibração de um modelo hidrológico é uma etapa na qual o usuário visa encontrar os valores dos parâmetros do modelo que melhor representem o comportamento hidrológico do sistema modelado (COLLISCHONN, 2001), ou seja, consiste no ajuste dos parâmetros até que os dados simulados sejam estatisticamente similares aos dados observados em um determinado ponto da bacia. Após a calibração, os mesmos parâmetros são aplicados a outro trecho da série histórica, desconhecido do processo de calibração, visando validar o processo.

Segundo Arnold et al. (2000), o primeiro passo de uma calibração é dividir os dados observados em duas séries temporais, sendo uma para calibração e outra para validação. A calibração deve abranger um período de tempo com ocorrência de grandes cheias e de estiagens prolongadas, de forma a possibilitar ao modelo a simulação adequada das maiores e menores amplitudes possíveis de vazão (VIOLA, 2008).

Mello et al. (2008) relatam que no começo de uma simulação hidrológica há algumas incertezas em relação ao estado do sistema, em virtude do desconhecimento das condições hidrológicas iniciais, principalmente, em relação ao armazenamento de água no solo, justificando, assim, a utilização de um período de aquecimento do modelo, para que, ao iniciar a simulação, as variáveis de estado estejam livres da influência das condições iniciais.

Neste trabalho, buscou-se uma aplicação de longo termo para o modelo hidrológico, tendo sido utilizado o período 1976 a 2005. Neste período, em sua maioria, houve a disponibilidade de dados observados de vazão, precipitação e meteorológicos para as bacias BHS, BHMA e BHP. Os 30 anos de dados foram divididos da seguinte forma: 5 anos para o aquecimento do modelo (1976 a

1980), 15 anos para a calibração (1981 a 1995) e 10 anos para a validação (1996 a 2005).

Para avaliar o ajuste das simulações aos dados observados tanto nas fases de calibração quanto na validação, foram utilizados os coeficientes Nash-Sutcliffe (NSE) e Percentual de viés (Pbias), conforme recomendado por Moriasi et al. (2007).

A calibração foi realizada manualmente, no software SWAT-CUP, por meio do método da tentativa e erro, buscando-se valores aceitáveis dos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) e Percentual de viés (Pbias), conforme também efetuado por Pereira et al. (2016). A calibração manual do modelo foi necessária devido ao fato do procedimento de calibração automática não apresentar resultados aceitáveis dos coeficientes supracitados. Para cada uma das bacias hidrográficas, efetuou-se a calibração tanto no passo de tempo diário quanto no mensal.

Segundo Zhang et al. (2007), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1. Ele traduz a eficiência da aplicação do modelo para previsões mais acertadas das vazões de cheia, podendo variar de  $-\infty$  a 1. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe é obtido com a seguinte equação:

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_{obsi}-Q_{simi})^2}{\sum_{i=1}^n(Q_{obsi}-\overline{Q_{obs}})^2} \quad (32)$$

Em que:

$Q_{obsi}$  = vazão observada;  $Q_{simi}$  = vazão simulada;  $\overline{Q_{obs}}$  = média da vazão observada; e  $n$  = número de eventos.

O percentual de viés (PBIAS) mede a tendência dos dados simulados serem maiores ou menores do que os dados observados. Quanto mais próximo de zero, melhor o modelo representa a realidade. Valores positivos indicam que o modelo subestima a vazão observada, enquanto que valores negativos indicam que o modelo superestima (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999). O PBIAS é calculado pela Equação 2:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{simi})}{\sum_{i=1}^n Q_{obsi}} \cdot 100 \quad (33)$$

Para o passo diário, de acordo com Green et al. (2006), simulações com NSE maiores que 0,4 são classificadas como satisfatórias. Ainda, para esse passo, de acordo com Van Liew et al. (2007), os resultados do PBIAS podem ser enquadrados na seguinte classificação:  $|PBIAS| < 10\%$  - muito bom;  $10\% \leq |PBIAS| \leq 15\%$  - bom;  $15\% \leq |PBIAS| < 25\%$  - satisfatório e  $|PBIAS| \geq 25\%$  - insatisfatório. No passo mensal, por sua vez, serão consideradas as classificações propostas por Moriasi et al. (2007), para o NSE e PBIAS. Especificamente para o PBIAS, observa-se que as classes apresentadas por Moriasi et al. (2007) são semelhantes às de Van Liew et al. (2007) já apresentadas. Já a classificação do NSE, segundo Moriasi et al. (2007), segue a seguinte distribuição:  $0,75 < NSE \leq 1,00$  – muito bom;  $0,65 < NSE \leq 0,75$  – bom;  $0,50 < NSE \leq 0,65$  – satisfatório e  $NSE \leq 0,50$  – insatisfatório.

### **3.7 Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas**

Com o modelo hidrológico devidamente calibrado e validado para as condições atuais, torna-se possível realizar o processo de simulação alterando-se os dados de entrada do modelo de modo a refletir os diferentes cenários de

mudanças climáticas projetados para as próximas décadas (ARROIO JUNIOR; MAUAD, 2015).

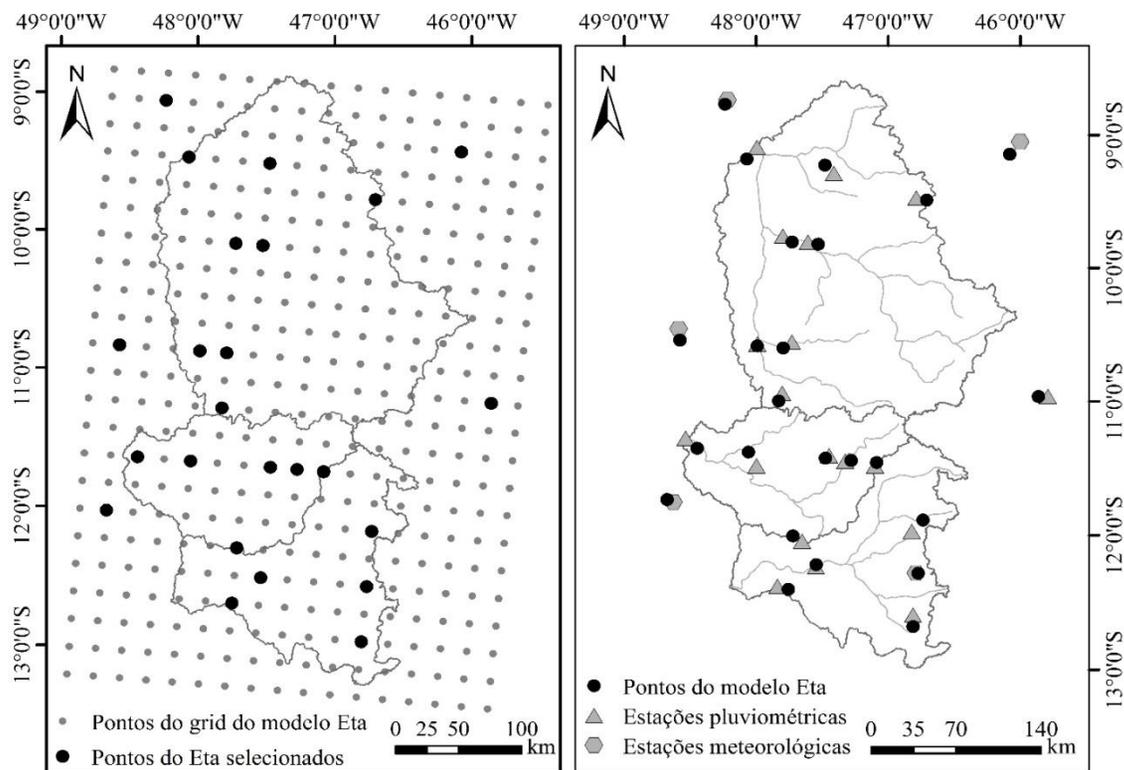
Desta forma, os impactos das mudanças climáticas sobre o escoamento nas BHS, BHMA e BHP foram estimados a partir de simulações hidrológicas baseadas nas projeções climáticas dos modelos Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES. Essas projeções foram produzidas para o clima presente (1961-2005) e para os RCPs 4.5 e 8.5, ao longo do século XXI (2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099) com resolução de 20 km. As simulações climáticas foram produzidas e disponibilizadas para utilização no presente estudo por Chou et al. (2014a, 2014b).

As projeções climáticas obtidas foram referentes às mesmas variáveis meteorológicas utilizadas na configuração atual do modelo SWAT, sendo elas: precipitação, temperaturas do ar máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento; mantendo assim, o método atual de cálculo da evapotranspiração, Penman-Monteith, para o qual o modelo foi ajustado.

Com o objetivo de manter a mesma estrutura de alimentação do modelo calibrado e validado para as condições atuais, os dados dos cenários climáticos provenientes do Eta-HadGEM2-ES e do Eta-MIROC5, para o clima presente e para os RCPs 4.5 e 8.5, foram obtidos junto ao gridbox do modelo climático, nos pontos mais próximos de cada uma das 19 estações pluviométricas e 5 estações meteorológicas atuais utilizadas, conforme recomendado por Cousino, Becker e Zmijewski (2015).

Na Figura 7, estão apresentados os pontos do grid do modelo Eta (Eta-CPTEC/MIROC5 e Eta-CPTEC/HadGEM2-ES) mais próximos das estações pluviométricas e meteorológicas, os quais foram utilizados no presente estudo para a alimentação do modelo hidrológico na avaliação dos cenários climáticos.

Figura 7 - Pontos do grid dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES (à esquerda) e pontos do grid mais próximos das estações pluviométricas e meteorológicas (à direita).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

No entanto, mesmo com o uso de técnicas de *downscaling*, as projeções climáticas dos modelos regionais frequentemente apresentam erros sistemáticos; e quando são utilizadas de forma direta, aumentam as incertezas relacionadas à modelagem hidrológica (ALAM, 2015). Deste modo, a correção dos erros sistemáticos das projeções climáticas é amplamente recomendada (BERG; FELDMANN; PANITZ, 2012; GRAHAM; ANDREASSON; CARLSSON, 2007; TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012). Neste estudo, foi utilizado o método de correção de erros sistemáticos por ajuste linear (LENDERINK; BUISSHAND, DEURSEN, 2007), onde são calculados fatores de correção mensais, a partir da relação entre as médias mensais dos dados observados e as médias mensais das projeções para o clima presente. Valores inferiores a 1 indicam que as projeções estão superestimando os dados observados e valores superiores a 1 indicam que as projeções estão subestimando os dados observados. No presente estudo, efetuou-se a correção mensal de erros sistemáticos de todas as variáveis climáticas utilizadas para alimentação do modelo hidrológico SWAT, conforme também realizado por Hejazi et al. (2014), Oliveira, Pedrollo e Castro (2015) e Shrestha, Dibike e Prowse (2012).

Para a correção das séries meteorológicas futuras, foram calculados 1176 fatores de correção, referentes aos desvios entre os dados mensais observados e os simulados para o clima presente pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Os fatores calculados anteriormente foram utilizados para corrigir toda a extensão das projeções futuras para ambos os RCPs.

A análise dos impactos das mudanças climáticas, no escoamento das BHS, BHMA e BHP, foi realizada, a partir da construção de gráficos do deflúvio acumulado, para todos os “*time slices*” e gráficos com as médias mensais da precipitação média na bacia versus as médias mensais dos períodos simulados; esses gráficos subsidiaram uma comparação entre cenários futuros dos modelos Eta-HadGEM2-ES e do Eta-MIROC5.



## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Simulação hidrológica nas bacias hidrográficas dos rios Palma, Manuel Alves da Natividade e Sono**

#### **4.1.1 Análise de sensibilidade do modelo SWAT**

A partir da análise de sensibilidade dos 20 parâmetros tomados inicialmente na Tabela 7, foram selecionados os parâmetros que apresentaram maior influência sobre as simulações hidrológicas. Para todas as bacias e ambos os passos de tempo, destacaram-se como os parâmetros mais sensíveis, o ALPHA\_BF – coeficiente de recessão do aquífero, o ESCO – fator de compensação da evaporação da água no solo e o GW\_REVAP – parâmetro que controla o fluxo de água da zona saturada para a não saturada. Na Tabela 8 encontram-se os parâmetros sensíveis associados às simulações diárias e mensais da variável vazão para as BHP, BHMA e BHS pelo modelo SWAT.

Ressalta-se que os parâmetros sensíveis encontrados neste trabalho estão de acordo com o manual para a calibração elaborado por Neitsch et al. (2005); e com Eduardo et al. (2016), que constataram que para a bacia do rio das Mortes os parâmetros sensíveis foram ESCO, CN2, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GWQMN, CANMX, CH\_K2, CH\_N2, EPCO, GW\_REVAP, REVAPMN, SOL\_AWC, SOL\_K, SURLAG, CH\_N1, CH\_K1; e com Pontes et al. (2016) que constataram que, para a bacia do rio Camanducaia, os parâmetros sensíveis foram ESCO, CN2, ALPHA\_BF, GW\_DELAY, GWQMN, CANMX, CH\_K2, CH\_N2, EPCO, GW\_REVAP, REVAPMN, SOL\_AWC, SOL\_K, SURLAG, CH\_N1, CH\_K1, SLSOIL, LAT\_TTIME, HRU\_SLP, SLSUBBSN.

As simulações com passo diário apresentaram um maior número de parâmetros sensíveis devido ao fato de que nessas há necessidade de calibrar picos mais acentuados e em maior número, quando comparados às simulações

com passo mensal, que apresentam picos suavizados e em menor frequência. Desta forma, grande parte dos parâmetros que foram sensíveis no passo diário e não foram no mensal são imprescindíveis para a modelagem de vazões de pico.

Tabela 8 - Parâmetros sensíveis do modelo SWAT para as simulações diárias e mensais de vazão para a BHP, BHMA e BHS.

BHP		BHMA		BHS	
DIÁRIA	MENSAL	DIÁRIA	MENSAL	DIÁRIA	MENSAL
ALPHA_BF	ALPHA_BF	ALPHA_BF	ALPHA_BF	ALPHA_BF	ALPHA_BF
CANMX	CANMX	CANMX	CANMX	CANMX	CANMX
CH_K1	CH_K1	CH_K1	CH_K2	CH_K1	CH_K2
CH_K2	CH_K2	CH_K2	CN2	CH_K2	CH_N2
CH_N1	CH_N1	CH_N1	ESCO	CH_N1	CN2
CH_N2	CH_N2	CH_N2	GW_DELAY	CH_N2	ESCO
CN2	CN2	CN2	GW_REVAP	CN2	GW_DELAY
ESCO	ESCO	ESCO	GWQMN	ESCO	GW_REVAP
GW_DELAY	GW_DELAY	GW_DELAY	SOL_AWC	GW_DELAY	GWQMN
GW_REVAP	GW_REVAP	GW_REVAP	SOL_K	GW_REVAP	SOL_AWC
GWQMN	GWQMN	GWQMN		GWQMN	SOL_K
HRU_SLP	LAT_TTIME	HRU_SLP		HRU_SLP	
LAT_TTIME	SOL_AWC	LAT_TTIME		LAT_TTIME	
SLSOIL	SOL_K	SLSOIL		SLSOIL	
SLSUBBSN		SLSUBBSN		SOL_AWC	
SOL_AWC		SOL_AWC		SOL_K	
SOL_K		SOL_K			

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

#### 4.1.2 Calibração e validação do modelo SWAT

Após a análise de sensibilidade do modelo, optou-se por calibrar para cada bacia e para cada passo de tempo, os parâmetros considerados sensíveis, indicados na Tabela 8. Os valores finais dos parâmetros calibrados para a BHS, BHMA e BHP, nas simulações com passo diário e mensal, estão apresentados na Tabela 9. Os prefixos V, R e A correspondem às operações replace, relative e add, respectivamente. Já as extensões .hru, .mgt, .gw, .rte, .sol e .sub correspondem aos módulos do SWAT onde os parâmetros estão inseridos, sendo

eles: HRU, Management, Groundwater, Routing, Soils e Subbasin, respectivamente.

Tabela 9 - Parâmetros calibrados para a BHP, BHMA e BHS nas simulações com passo diário e mensal.

Parâmetros	Passo diário			Passo mensal		
	BHMA	BHP	BHS	BHMA	BHP	BHS
V_ESCO.hru	0,5	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4
R_CN2.mgt	-0,06	-0,1	0,09	-0,1	-0,1	-0,1
V_ALPHA_BF.gw	0,07	0,002	0,001	0,11	0,001	0,007
A_GW_DELAY.gw	60	60	-30	60	60	-30
A_GWQMN.gw	800	1000	380	1000	1000	1000
V_CANMX.hru	28	30	30	30	30	30
V_CH_K2.rte	3,2	0,1	1,27	10	1,5	10
V_CH_N2.rte	0,11	0,3	0,15	-	0,3	0,13
V_GW_REVAP.gw	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R_SOL_AWC().sol	0,04	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1
R_SOL_K().sol	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
V_CH_N1.sub	0,02	0,16	0,16	-	0,1	-
V_CH_K1.sub	1,8	1,35	1	-	5	-
V_SLSOIL.hru	147	140	96	-	-	-
V_LAT_TTIME.hru	5	18	55	-	15	-
R_HRU_SLP.hru	0,18	0,1	-0,07	-	-	-
R_SLSUBBSN.hru	0,25	-0,15	-	-	-	-

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Na Tabela 10, estão apresentados os resultados dos coeficientes estatísticos utilizados na avaliação da performance do modelo SWAT nas simulações com passo diário e mensal, nas etapas de calibração e validação das BHMA, BHP e BHS.

Tabela 10 - Estatísticas de desempenho resultantes da calibração e validação do modelo SWAT para as simulações hidrológicas da BHMA, BHP e BHS.

Bacia	Passo	Aplicação	NSE	PBIAS (%)
BHMA	Diário	Calibração	0,59	-7,0
		Validação	0,63	-21,8
	Mensal	Calibração	0,84	-11,3
		Validação	0,81	-24,7
BHP	Diário	Calibração	0,52	-19,7
		Validação	0,52	-6,7
	Mensal	Calibração	0,56	-24,3
		Validação	0,70	-18,4
BHS	Diário	Calibração	0,68	-2,6
		Validação	0,72	-16,9
	Mensal	Calibração	0,71	-4,7
		Validação	0,73	-18,4

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Analisando o desempenho do modelo baseado nos resultados do PBIAS, pode-se observar, nas simulações com passo diário, tendência de superestimativa da vazão, em todas as bacias estudadas, da ordem de 7,0%, 19,7% e 2,6% no período de calibração e 21,8%, 6,7% e 16,9% no período de validação, para a BHMA, BHP e BHS, respectivamente. Quanto às simulações com passo mensal, também houve tendência de superestimativa da ordem de 11,3%, 24,3% e 4,7% no período de calibração e 24,7%, 18,4% e 18,4% no período de validação, para a BHMA, BHP e BHS, respectivamente. De acordo com as classificações de Van Liew et al. (2007) – passo diário e Moriasi et al. (2007) – passo mensal, verifica-se que o modelo SWAT apresentou desempenho considerado “satisfatório” ( $\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$ ), “bom” ( $\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$ ) e “muito bom” ( $\text{PBIAS} < \pm 10$ ) nas aplicações na BHMA, BHP e BHS. Desta forma, as

séries simuladas não apresentam viés que comprometam a qualidade da simulação, o que caracteriza que os parâmetros foram devidamente ajustados.

Observando-se os resultados do NSE para o passo diário, verifica-se, de acordo com a classificação de Green et al. (2006), que em todas as aplicações, foi obtido desempenho satisfatório do SWAT, o que é evidenciado por  $NSE > 0,4$ . Nesse passo, foram obtidos valores de NSE superiores a 0,59, 0,52 e 0,68 para a BHMA, BHP e BHS, respectivamente. No passo mensal, por sua vez, para a BHMA, os valores foram 0,84 e 0,81 nas etapas de calibração e validação, respectivamente, sendo classificados como “muito bom” ( $NSE > 0,75$ ), conforme a classificação de Moriasi et al. (2007). Para a BHP, os valores do NSE foram 0,56 e 0,70 nas etapas de calibração e validação, respectivamente. Esses valores permitem enquadrar o modelo nas categorias “satisfatório” ( $0,50 < NSE \leq 0,65$ ) e “bom” ( $0,65 < NSE \leq 0,75$ ), conforme Moriasi et al. (2007). Já para a BHS, os valores de NSE foram 0,71 e 0,73 nas etapas de calibração e validação, respectivamente, sendo enquadrados na categoria “bom”, conforme Moriasi et al. (2007).

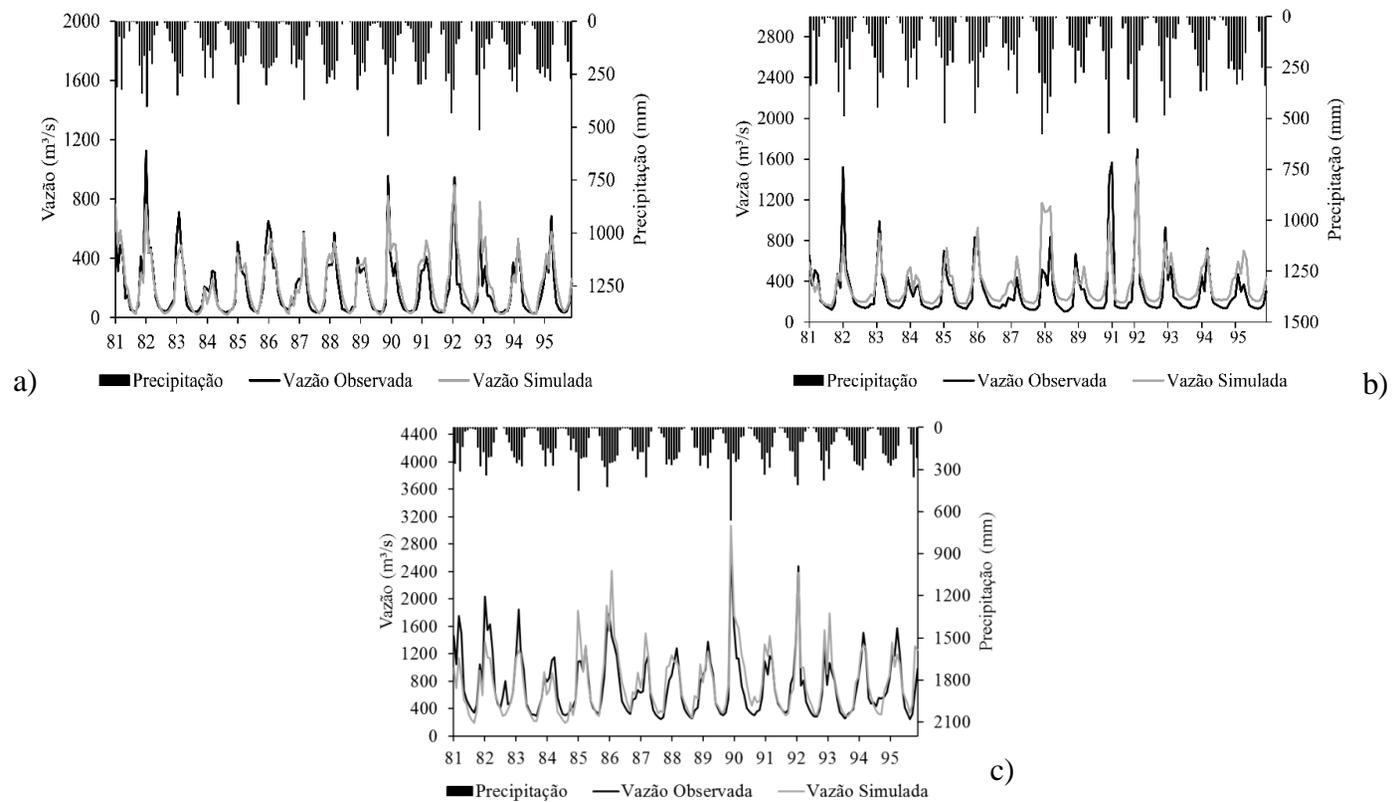
Estudos recentes sobre a aplicação de modelos hidrológicos em diferentes realidades físicas utilizaram o coeficiente de Nash-Sutcliffe para avaliar o desempenho da simulação. Durães, Mello e Naghettini (2011) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia do rio Paraopeba, com área de drenagem de 10200 km<sup>2</sup> e obtiveram valores de NSE iguais a 0,79, tanto na calibração quanto na validação, sendo o modelo enquadrado na categoria muito bom. Viola et al. (2012) avaliaram o desempenho do modelo LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*) na simulação hidrológica da bacia do rio Lontra, com área de drenagem de 3470 km<sup>2</sup> e obtiveram valores de NSE de 0,74 e 0,75 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, sendo o modelo enquadrado nas categorias bom e muito bom. Andrade, Mello e Beskow (2013) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação

hidrológica da bacia do ribeirão Jaguará, com área de drenagem de 32 km<sup>2</sup> e obtiveram valores de NSE de 0,66 e 0,87 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, sendo o modelo enquadrado nas categorias bom e muito bom. Alvarenga et al. (2016) avaliaram o desempenho do modelo DHSVM (*Distributed Hydrology Soil Vegetation Model*) na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, com área de drenagem de 6,76 km<sup>2</sup>. Os autores encontraram valores de NSE de 0,52, tanto na calibração quanto na validação, no passo diário, e valores de 0,63 e 0,77 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, no passo mensal, sendo o modelo enquadrado em satisfatório, bom e muito bom. Pereira et al. (2016) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pomba, com área de drenagem de 8600 km<sup>2</sup>. Os autores encontraram valores de NSE de 0,76, tanto na calibração quanto na validação, o que fornece a base para o modelo ser classificado como muito bom. Eduardo et al. (2016) avaliaram o desempenho do modelo SWAT na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio das Mortes, com área de drenagem de 6070 km<sup>2</sup>. Os autores encontraram valores de NSE de 0,76 e 0,62 para os períodos de calibração e validação, respectivamente, o que fornece a base para o modelo ser classificado como bom e muito bom. Dessa forma, como o NSE é a estatística mais utilizada para a avaliação da qualidade da simulação hidrológica e, diante dos resultados encontrados para a BHS, BHMA e BHP, pode-se afirmar que o modelo SWAT produzirá bons resultados, quando aplicado na simulação de cenários de uso do solo e mudanças climáticas, sendo uma ferramenta importante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos nas bacias em estudo.

Outra ferramenta utilizada na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos consiste na análise visual do ajuste do hidrograma simulado frente ao observado. Nas Figuras 8 e 9, estão apresentados os hidrogramas observados e simulados e respectivos hietogramas observados, nos períodos de calibração e

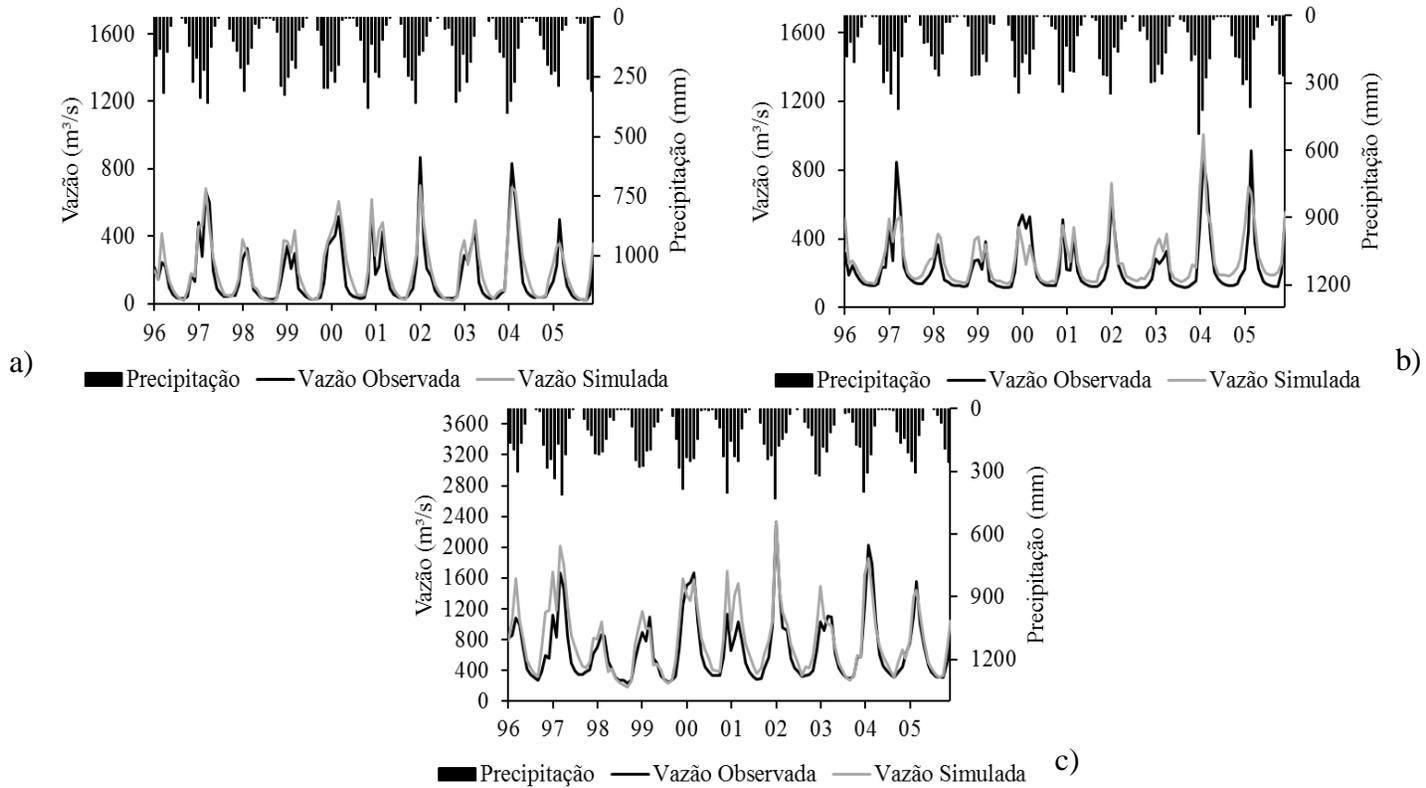
validação, com passo mensal, para a BHMA (a), BHP (b) e BHS (c). Nas Figuras 10 e 11 estão apresentados os resultados obtidos pelas simulações com passo diário. Ao realizar uma análise visual dos hidrogramas, percebe-se que, de modo geral, as vazões simuladas pelo modelo SWAT ajustaram-se bem às observadas, ou seja, o modelo conseguiu capturar as oscilações ocasionadas pela ocorrência de eventos de precipitação, porém com pequena dificuldade em simular picos de vazão. De acordo com Pereira et al. (2014), picos de vazão são naturalmente difíceis de modelar, o que está relacionado com a representação espacial e temporal das chuvas. Essa constatação é relevante, sobretudo, para a BHMA, BHP e BHS, onde prevalece a ocorrência de precipitações convectivas (REBOITA et al., 2010), que apresentam, além de elevada intensidade, alta variabilidade espacial (MELLO; SILVA, 2013). Já nos períodos de recessão dos hidrogramas, visualizam-se ajustes adequados em todas as aplicações, caracterizando o bom desempenho do modelo na simulação de vazões mínimas.

Figura 8 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de calibração com passo mensal, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c).



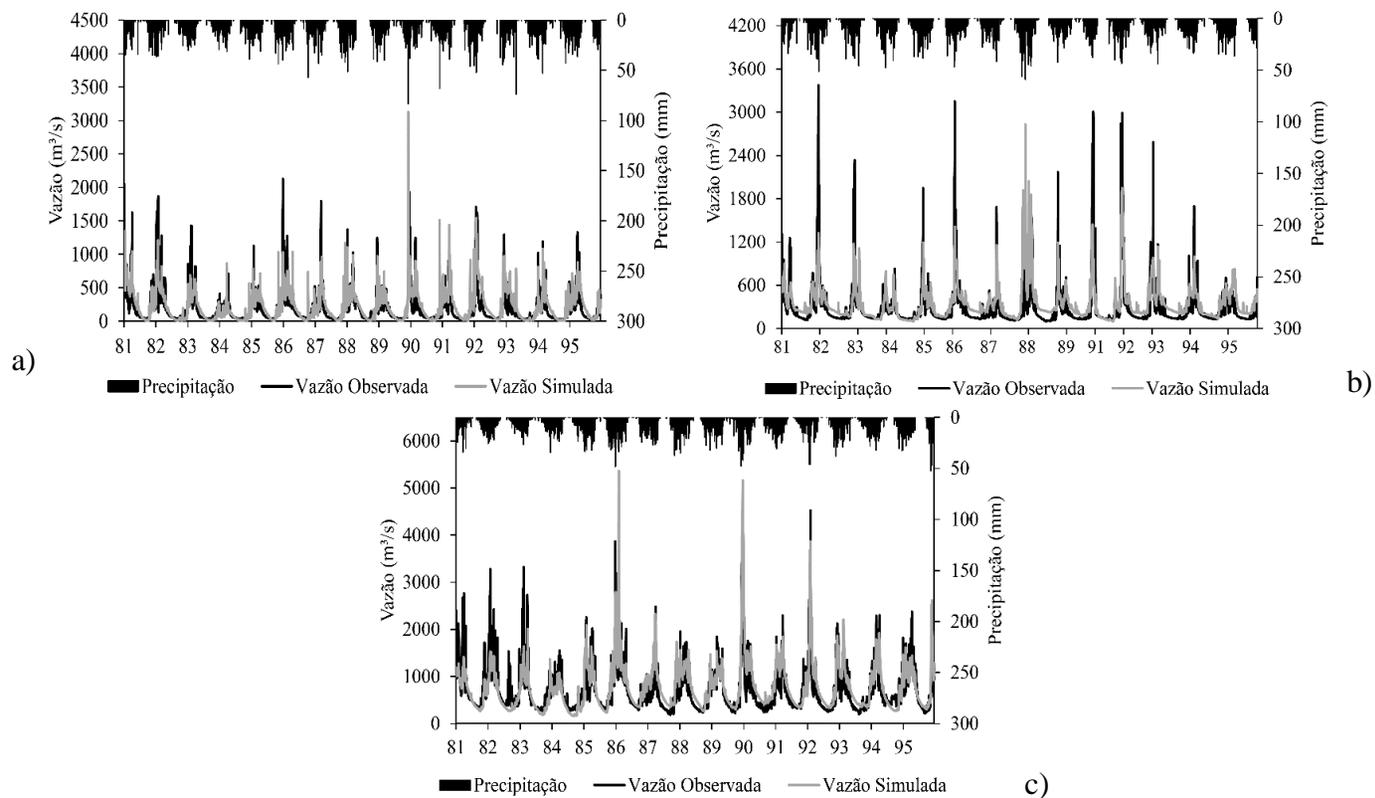
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 9 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de validação com passo mensal, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c).



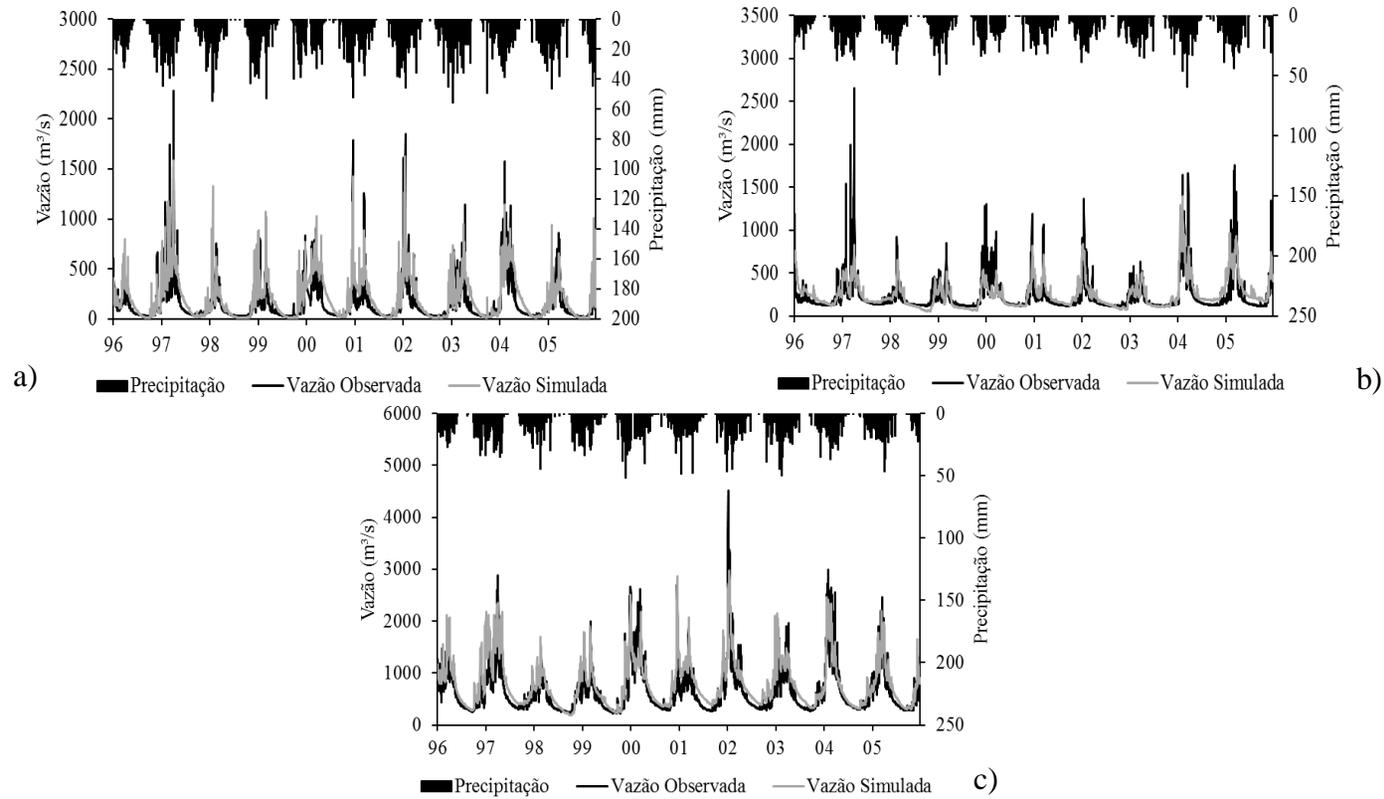
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 10 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de calibração com passo diário, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 11 - Hidrogramas (observado e simulado) e hietograma observado, para o período de validação com passo diário, nas bacias hidrográficas dos rios Manuel Alves da Natividade (a), Palma (b) e Sono (c).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

## **4.2 Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas**

### **4.2.1 Projeções do modelo Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 para os RCPs 4.5 e 8.5**

A análise do comportamento hidrológico futuro de bacias hidrográficas são intensamente dependentes de alterações nas condições meteorológicas (BAUWENS; SOHIER; DEGRÉ, 2011). Sendo assim, as médias do total anual de precipitação (P), de evapotranspiração potencial (ET) e do balanço hídrico vertical (P-ET), após a correção de erros sistemáticos, para o clima atual (baseline) e para as projeções climáticas futuras dos RCPs 4.5 e 8.5, ao longo do século XXI, geradas a partir do modelo regional Eta aninhado aos modelos HadGEM2-ES e MIROC5, estão apresentadas na Tabela 11 para as BHMA, BHP e BHS. As projeções de evapotranspiração (ET) foram obtidas na saída do SWAT, a partir da inserção das projeções corrigidas de temperaturas do ar máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento.

Tabela 11 - Precipitação (P), evapotranspiração potencial (ET) e balanço hídrico vertical (P-ET), em mm.ano<sup>-1</sup>, simulados por Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para o clima presente (baseline) e para o século XXI, nos RCPs 4.5 e 8.5, para as BHMA, BHP e BHS.

	Período	Eta/HADGEM2-ES			Eta/MIROC5		
		P	ET	P-ET	P	ET	P-ET
<b>BHMA</b>							
Baseline	1961 a 2005	1506	1245	262	1512	1249	262
	2007 a 2040	1146	1302	-156	1324	1288	36
RCP 4.5	2041 a 2070	1338	1356	-18	1292	1348	-56
	2071 a 2099	1251	1399	-148	1218	1358	-140
RCP 8.5	2007 a 2040	1055	1387	-331	1246	1290	-45
	2041 a 2070	1090	1494	-404	1219	1390	-171
	2071 a 2099	862	1614	-752	1103	1500	-397
<b>BHP</b>							
Baseline	1961 a 2005	1523	1242	281	1529	1242	286
	2007 a 2040	1100	1300	-200	1317	1276	41
RCP 4.5	2041 a 2070	1338	1355	-17	1299	1338	-39
	2071 a 2099	1244	1398	-154	1206	1349	-143
RCP 8.5	2007 a 2040	1014	1384	-371	1250	1279	-29
	2041 a 2070	1066	1491	-425	1232	1382	-150
	2071 a 2099	830	1606	-776	1087	1492	-405
<b>BHS</b>							
Baseline	1961 a 2005	1526	1250	276	1527	1265	261
	2007 a 2040	1171	1290	-119	1396	1285	111
RCP 4.5	2041 a 2070	1355	1344	12	1325	1343	-18
	2071 a 2099	1245	1384	-140	1261	1344	-83
RCP 8.5	2007 a 2040	1031	1366	-335	1287	1288	-1
	2041 a 2070	1044	1467	-423	1234	1380	-146
	2071 a 2099	814	1584	-770	1096	1469	-373

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Analisando os dados da Tabela 11, pode-se concluir que as projeções do regime pluvial de ambos os modelos e RCPs indicam que poderá ocorrer redução da lâmina média anual precipitada durante o século XXI, podendo-se destacar as simulações mais severas do RCP 8.5 e do modelo Eta/HadGEM. A média de diminuição, em relação ao período de 1961 a 2005, nas 3 bacias hidrográficas, poderá atingir pelo Eta/ HadGEM2-ES a -25,0%, -11,5% e -17,9% no RCP 4.5, e a -31,9%, -29,7% e -45,0% no RCP 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente. Já pelo Eta/MIROC5 a média de diminuição da precipitação é menor e poderá chegar no RCP 4.5 a -11,6%, -14,3% e -19,3%, e no RCP 8.5 a -17,2%, -19,3% e -28,1%, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente. Nota-se, no modelo Eta/MIROC5, uma redução gradual da lâmina precipitada do primeiro período futuro (2007 a 2040) para o terceiro (2071 a 2099). Porém, para o RCP 4.5 simulado pelo modelo Eta/HadGEM2-ES, há uma maior redução simulada para o primeiro período futuro (2007 a 2040), enquanto que para o RCP 8.5 a maior redução ocorrerá para o terceiro período futuro (2071 a 2099).

Projeção com sinal oposto ao da precipitação foi obtida para a evapotranspiração potencial, com projeção de aumento médio no Eta/HadGEM2-ES de 4,1%, 8,5% e 11,9% no RCP 4.5, e 10,7%, 19,1% e 28,6% no RCP 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente. Já para o Eta/MIROC5 para o RCP 4.5, as projeções foram de aumento de 2,5%, 7,2% e 7,8%, e no RCP 8.5 de 2,7%, 10,5% e 18,7%, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, respectivamente. O aumento progressivo simulado para a evapotranspiração acompanha as projeções de temperatura ao longo do século XXI, que acompanha o aumento na concentração de gases de efeito estufa (VUUREN et al., 2011).

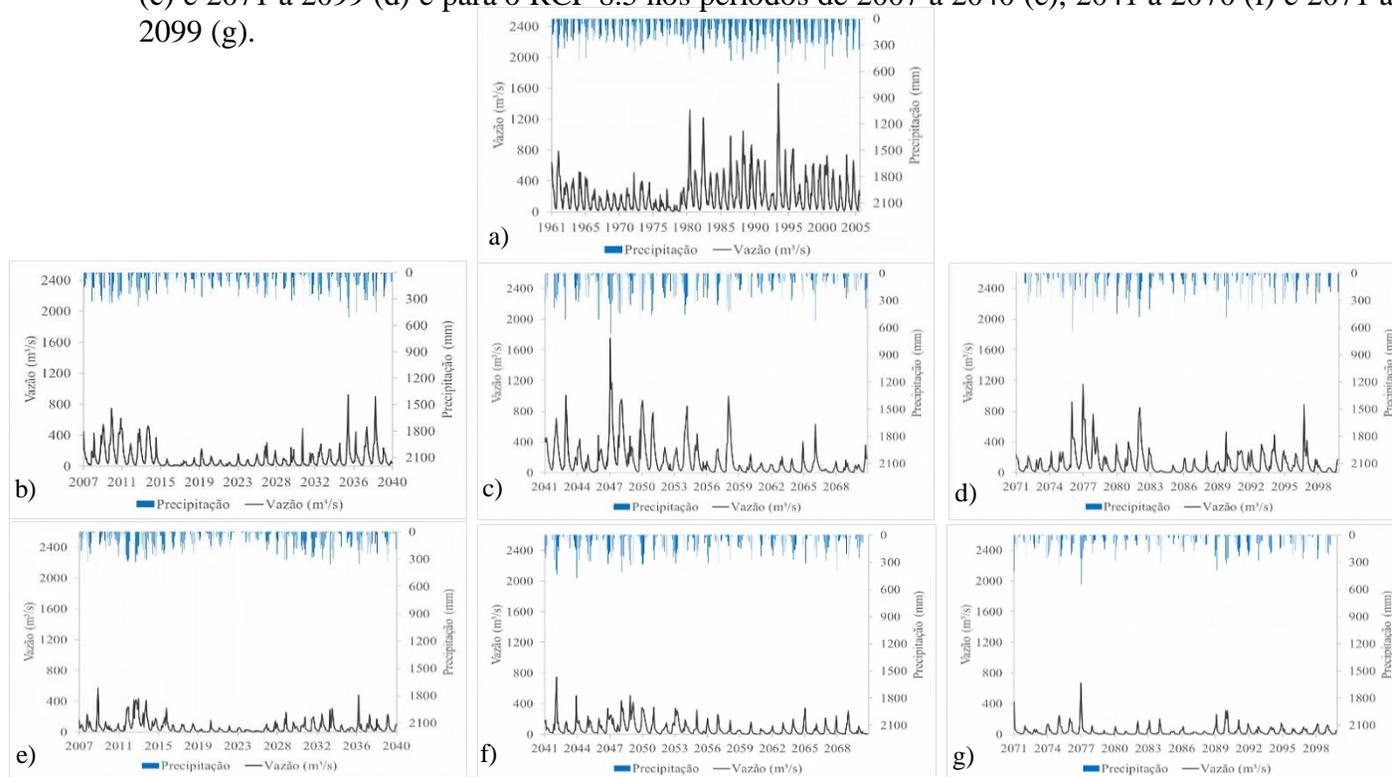
A partir dos resultados do balanço hídrico vertical (P-ET), constata-se, para o Eta/HadGEM2-ES, predomínio de déficit hídrico anual, em todas as

bacias e em ambos RCPs, com ressalva à BHS, no período de 2041 a 2070 no RCP4.5, que apresenta excedente hídrico de 11.5 mm.ano<sup>-1</sup>. Para o Eta/MIROC5, também há predomínio de déficit hídrico, com ressalva ao período de 2007 a 2040 do RCP4.5 em todas as bacias. O déficit hídrico simulado para o fluxo vertical de água nas bacias hidrográficas, tem impactos sobre a disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas. Desta forma, a aplicação da modelagem hidrológica apresentada na sequência visa avaliar os impactos decorrentes das projeções futuras, tendo-se em vista que os recursos hídricos superficiais dos tributários do rio Tocantins são explorados visando à produção de energia elétrica e o abastecimento urbano.

#### **4.2.2 Simulação dos impactos hidrológicos decorrentes dos RCPs 4.5 e 8.5**

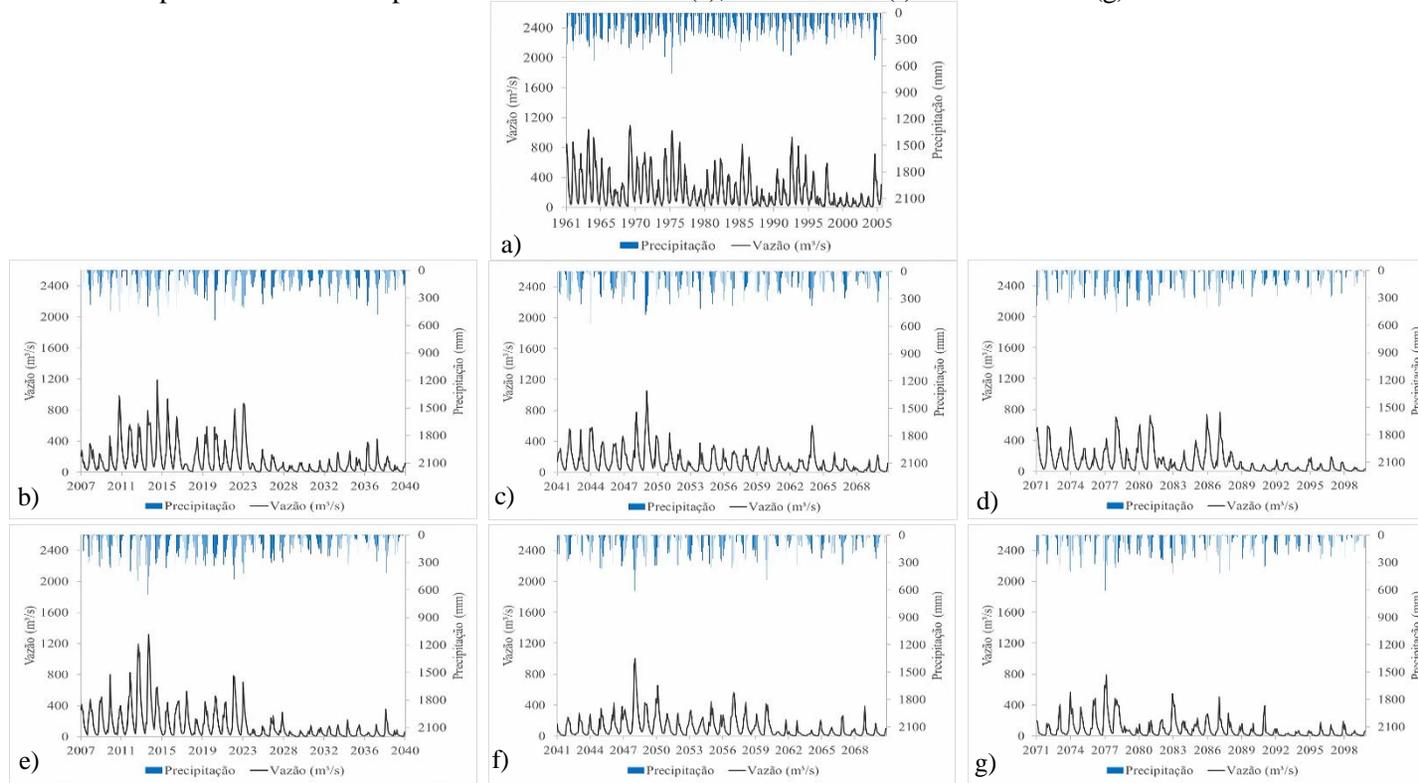
Nas Figuras 12, 13, 14, 15, 16 e 17, apresentam-se os hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelos modelos Eta/HADGEM2-ES e Eta/MIROC5, para o clima presente e para os RCPs 4.5 e 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, para as bacias hidrográficas BHMA, BHP e BHS, respectivamente. Nestas figuras, é possível notar a coerência do modelo SWAT na simulação hidrológica ao longo de todo o período, tendo-se como referência os hietogramas, além disso, notam-se os efeitos das projeções de mudanças climáticas no regime hidrológico das bacias e verifica-se que, apesar da redução das chuvas ao longo do século ainda há eventos extremos.

Figura 12 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5 nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



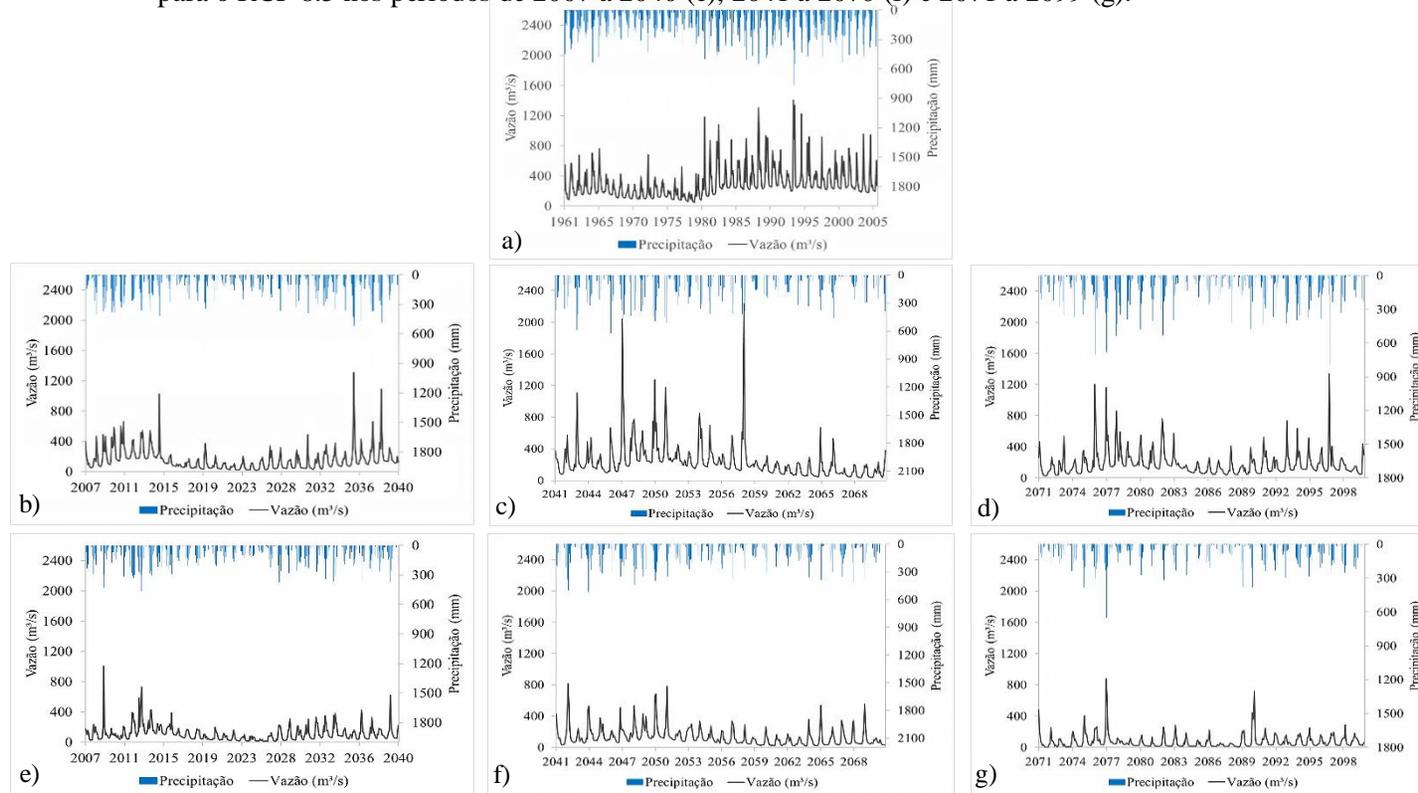
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 13 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



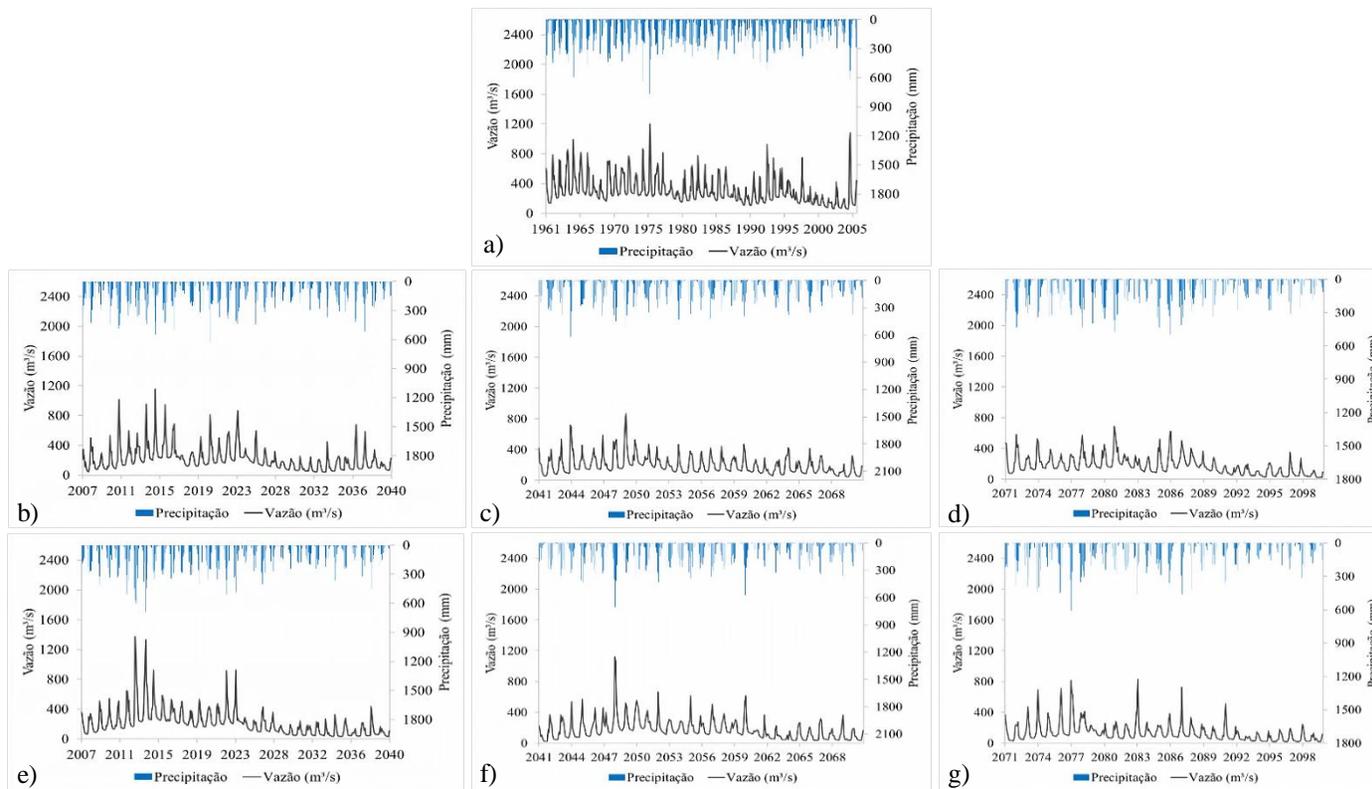
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 14 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



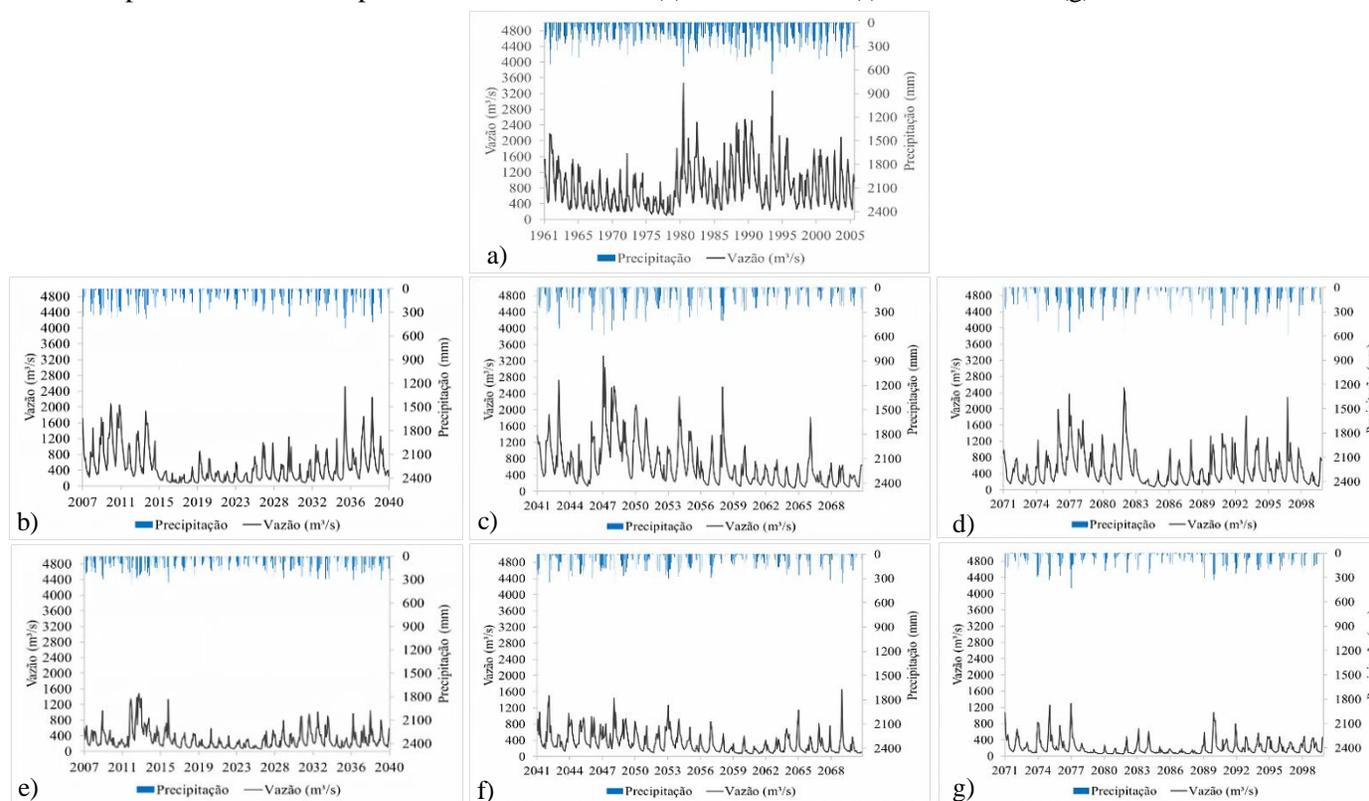
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 15 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



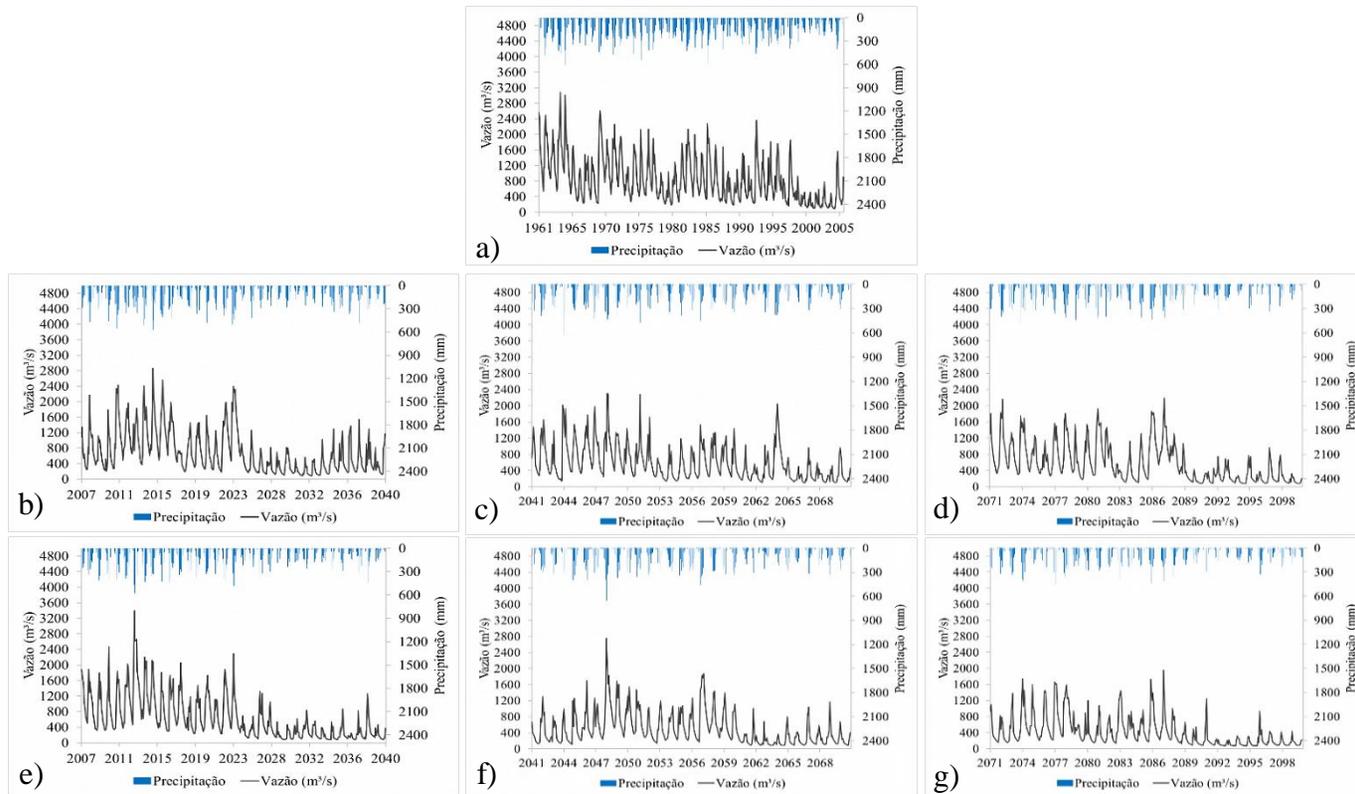
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 16 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/HADGEM na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 17 - Hidrogramas simulados pelo SWAT e hietogramas simulados pelo modelo Eta/MIROC5 na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).

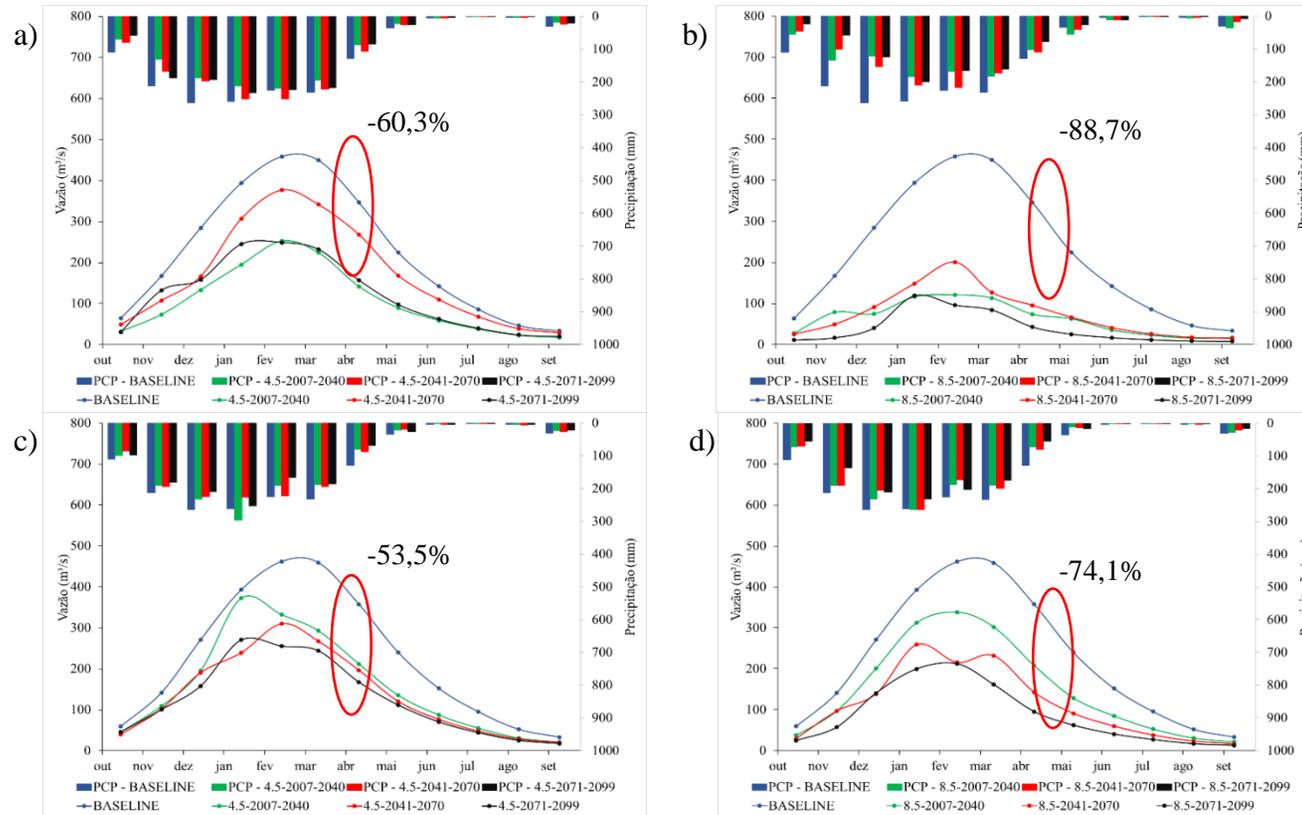


Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Do ponto de vista da gestão de recursos hídricos, que é fortemente alicerçada na utilização dos recursos hídricos superficiais, na bacia do rio Tocantins, as projeções envolvendo secas extremas e prolongadas caracterizam-se como uma forte preocupação e que precisa ser adequadamente tratada visando o planejamento hídrico da região frente aos possíveis impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas projetadas.

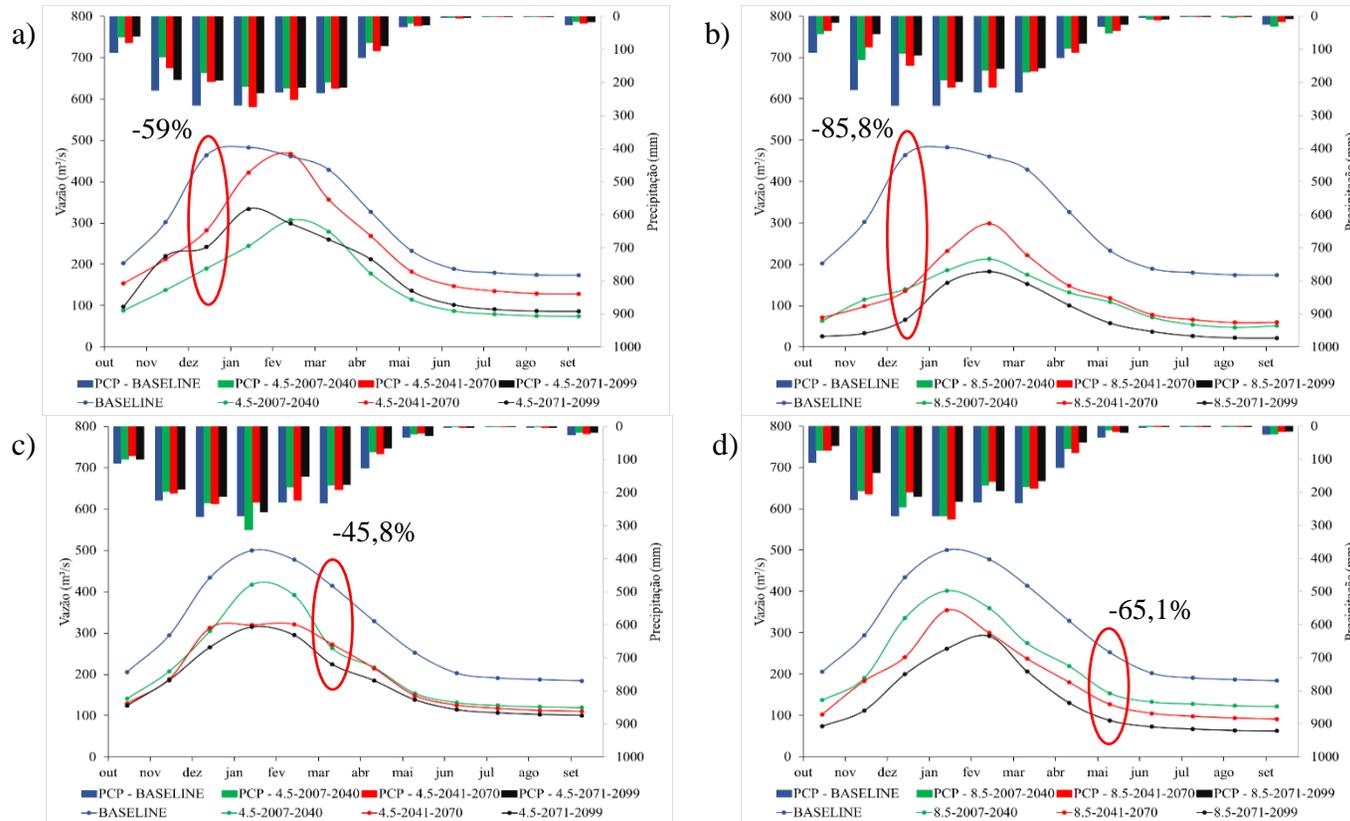
Desta forma, a precipitação média mensal nas bacias hidrográficas e a vazão média mensal simulada pelo SWAT nas BHMA, BHP e BHS, a partir das projeções dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, após a correção de erros sistemáticos, para os RCPs 4.5 e 8.5, no período de 1961 a 2005 (*baseline*) e para o século XXI, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, estão apresentadas nas Figura 18, 19 e 20. Os resultados indicam que, de maneira geral, as vazões médias mensais mantiveram-se coerentes com as precipitações médias mensais projetadas e que poderão ocorrer reduções nas médias mensais, para todos os “*time slices*” de ambos os modelos e de ambos os RCPs, principalmente no verão (DJF) e no outono (MAM). As reduções mais acentuadas, em relação ao *baseline*, poderão ocorrer, principalmente, no período de 2071 a 2099; e os maiores percentuais de redução nas aplicações dos modelos Eta/HadGEM2-ES – 4.5, Eta/HadGEM2-ES – 8.5, Eta/MIROC5 – 4.5 e Eta/MIROC5 - 8.5 poderão ser na BHMA de 60,3% (maio), 88,7% (maio), 53,5% (maio) e 74,4% (maio), respectivamente; na BHP de 59% (dezembro), 85,8% (dezembro), 45,8% (março) e 65,1% (maio), respectivamente e, na BHS, de 48,4% (maio), 78,7% (abril), 41,1% (abril) e 62,6% (abril), respectivamente.

Figura 18 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHMA, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d).



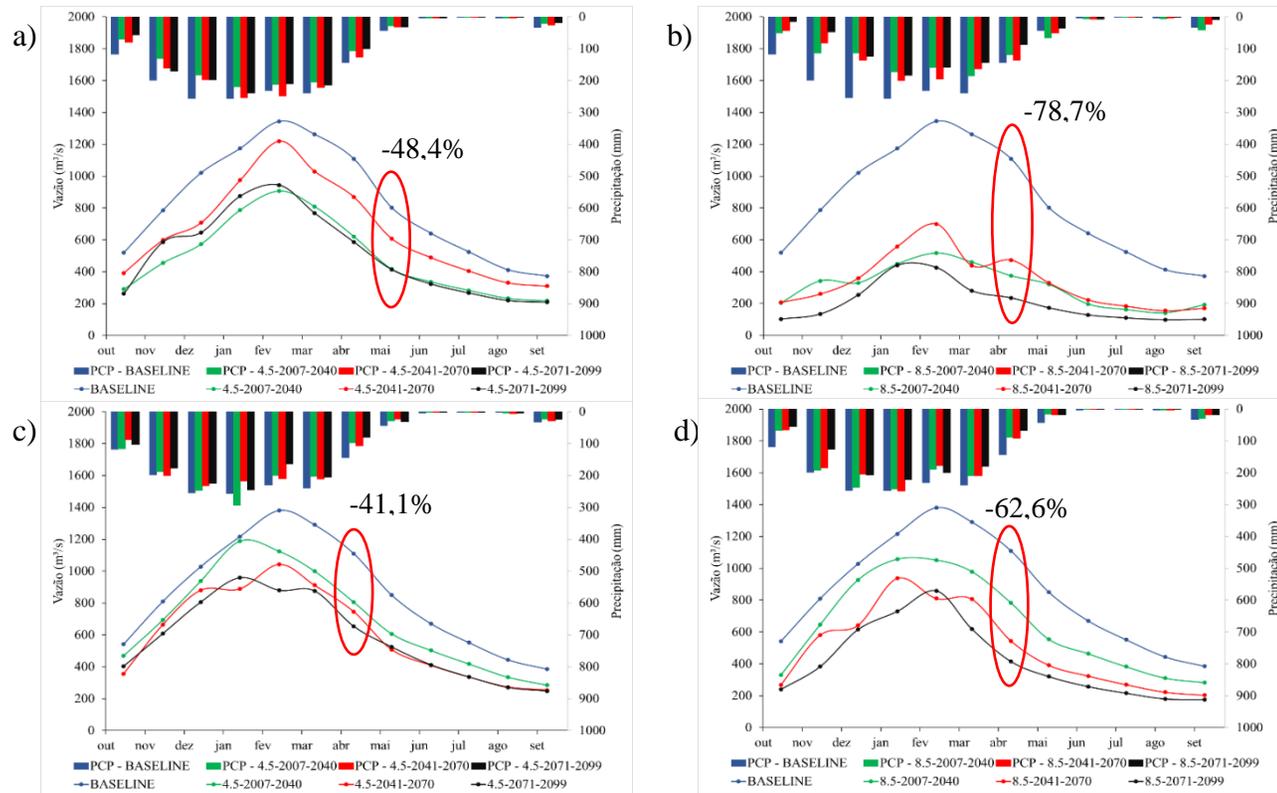
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 19 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHP, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 20 - Médias mensais de precipitação (PCP) e vazão simuladas para a BHS, a partir dos modelos Eta/HADGEM, frente aos RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b), e Eta/MIROC5, frente aos RCPs 4.5 (c) e 8.5 (d).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Alterações em outros aspectos da vazão simulada, incluindo as máximas e mínimas, também foram avaliadas por serem de grande importância ecológica. As vazões mínimas são importantes na avaliação dos impactos sobre os reservatórios hidrelétricos, vazões outorgáveis, entre outros. As vazões máximas, por sua vez, são importantes para avaliar a magnitude das enchentes e inundações.

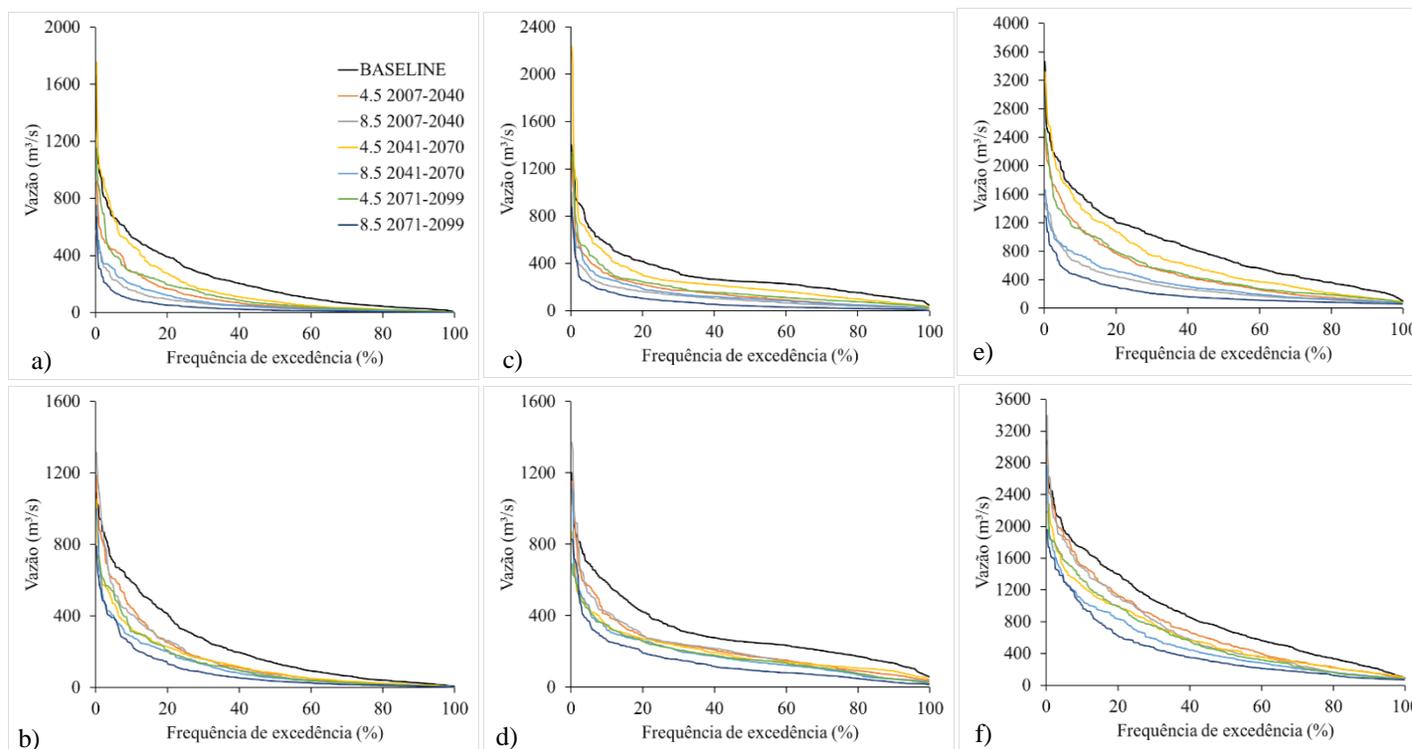
Na Figura 21, apresentam-se as curvas de permanência simuladas para o período de 1961 a 2005 (BASELINE) e para os RCPs 4.5 e 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, para as BHMA, BHP e BHS, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5. Os impactos sobre as vazões mínimas e máximas foram verificados, a partir das vazões com permanência de 95% (Q95%), 90% (Q90%), 80% (Q80%), 20% (Q20%), 10% (Q10%) e 5% (Q5%), que estão apresentadas nas Tabelas 12, 13 e 14.

Analisando os dados das Tabelas 12, 13 e 14, pode-se observar que, para as simulações realizadas a partir do modelo Eta/HadGEM2-ES, no primeiro “*time slice*” (2007 a 2040), as projeções mostraram redução abrupta tanto das vazões mínimas quanto das máximas. Entretanto, no “*time slice*” posterior, nota-se um ligeiro aumento das vazões quando comparadas ao período de 2007 a 2040. Já no último “*time slice*”, nota-se uma diminuição das vazões quando comparadas ao período anterior. Para as projeções derivadas do modelo Eta/MIROC5, nota-se, na maioria das aplicações, reduções graduais do primeiro para o terceiro período futuro, tanto nas vazões mínimas quanto nas máximas. Em todas as aplicações do Eta/HadGEM2-ES e do Eta/MIROC5 os resultados mais críticos para todas as vazões de permanência analisadas se deram a partir do RCP 8.5, com as maiores reduções estimadas no período de 2071 a 2099.

Desta maneira, foram projetadas reduções, para todas as vazões analisadas, para todos os “*time slices*” de ambos os modelos e de ambos os RCPs, quando comparadas ao baseline, com projeções de reduções mais

acentuadas no tocante das vazões mínimas, em destaque para a  $Q_{90\%}$ , que corresponde à vazão de referência para a outorga no estado do Tocantins.

Figura 21 - Curva de permanência simulada, para o período de 1961 a 2005 (BASELINE) e para os RCPs 4.5 e 8.5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, para as BHMA, BHP e BHS, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES (a), (c), (e) e Eta/MIROC5 (b), (d), (f), respectivamente.



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Tabela 12 - Vazões  $Q_{95\%}$ ,  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{80\%}$ ,  $Q_{20\%}$ ,  $Q_{10\%}$  e  $Q_{5\%}$  para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHMA.

Permanência	BASELINE	4.5			8.5		
		2007-2040	2041-2070	2071-2099	2007-2040	2041-2070	2071-2099
	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta_Q$ (%)					
Eta/HadGEM2-ES							
$Q_{95\%}$	20,8	-63,3	-52,8	-59,2	-73,9	-66,0	-83,4
$Q_{90\%}$	28,8	-63,7	-53,6	-55,8	-70,6	-68,4	-81,6
$Q_{80\%}$	44,8	-66,6	-51,7	-56,7	-72,3	-71,2	-82,6
$Q_{20\%}$	389,6	-56,9	-28,9	-50,4	-75,9	-69,1	-86,1
$Q_{10\%}$	530,2	-45,2	-10,0	-46,0	-70,5	-62,3	-82,2
$Q_{5\%}$	679,2	-34,8	-1,5	-41,0	-66,5	-54,9	-78,7
Eta/MIROC5							
$Q_{95\%}$	16,8	-47,3	-25,3	-65,1	-61,6	-56,2	-67,8
$Q_{90\%}$	26,1	-48,6	-39,4	-64,8	-62,2	-57,8	-68,7
$Q_{80\%}$	42,0	-44,6	-42,8	-59,9	-56,0	-59,5	-69,7
$Q_{20\%}$	410,7	-38,0	-44,3	-49,1	-36,1	-51,0	-67,3
$Q_{10\%}$	594,4	-24,9	-44,3	-47,3	-31,3	-51,8	-59,1
$Q_{5\%}$	720,1	-15,1	-34,7	-28,4	-26,9	-44,1	-45,7

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Tabela 13 - Vazões  $Q_{95\%}$ ,  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{80\%}$ ,  $Q_{20\%}$ ,  $Q_{10\%}$  e  $Q_{5\%}$  para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHP.

Permanência	BASELINE	4.5			8.5		
		2007-2040	2041-2070	2071-2099	2007-2040	2041-2070	2071-2099
	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta_Q$ (%)					
Eta/HadGEM2-ES							
$Q_{95\%}$	94,2	-72,6	-45,2	-50,4	-79,2	-70,3	-88,5
$Q_{90\%}$	112,8	-67,6	-44,1	-50,0	-75,6	-69,2	-87,0
$Q_{80\%}$	154,1	-68,4	-36,2	-49,6	-73,0	-68,6	-88,1
$Q_{20\%}$	416,5	-46,6	-28,1	-41,4	-60,9	-55,0	-74,8
$Q_{10\%}$	568,5	-44,2	-16,6	-38,5	-61,7	-51,8	-70,2
$Q_{5\%}$	744,9	-42,7	-11,7	-36,0	-61,4	-51,5	-68,5
Eta/MIROC5							
$Q_{95\%}$	106,6	-49,1	-36,5	-65,8	-61,7	-65,0	-79,2
$Q_{90\%}$	135,0	-48,0	-33,5	-64,6	-64,9	-67,1	-77,8
$Q_{80\%}$	173,5	-45,7	-38,9	-54,7	-58,4	-60,6	-71,2
$Q_{20\%}$	421,1	-31,1	-35,3	-38,9	-31,9	-37,8	-54,1
$Q_{10\%}$	589,0	-30,4	-42,0	-40,5	-28,7	-45,7	-55,1
$Q_{5\%}$	703,1	-19,5	-37,6	-39,3	-24,9	-34,8	-47,5

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

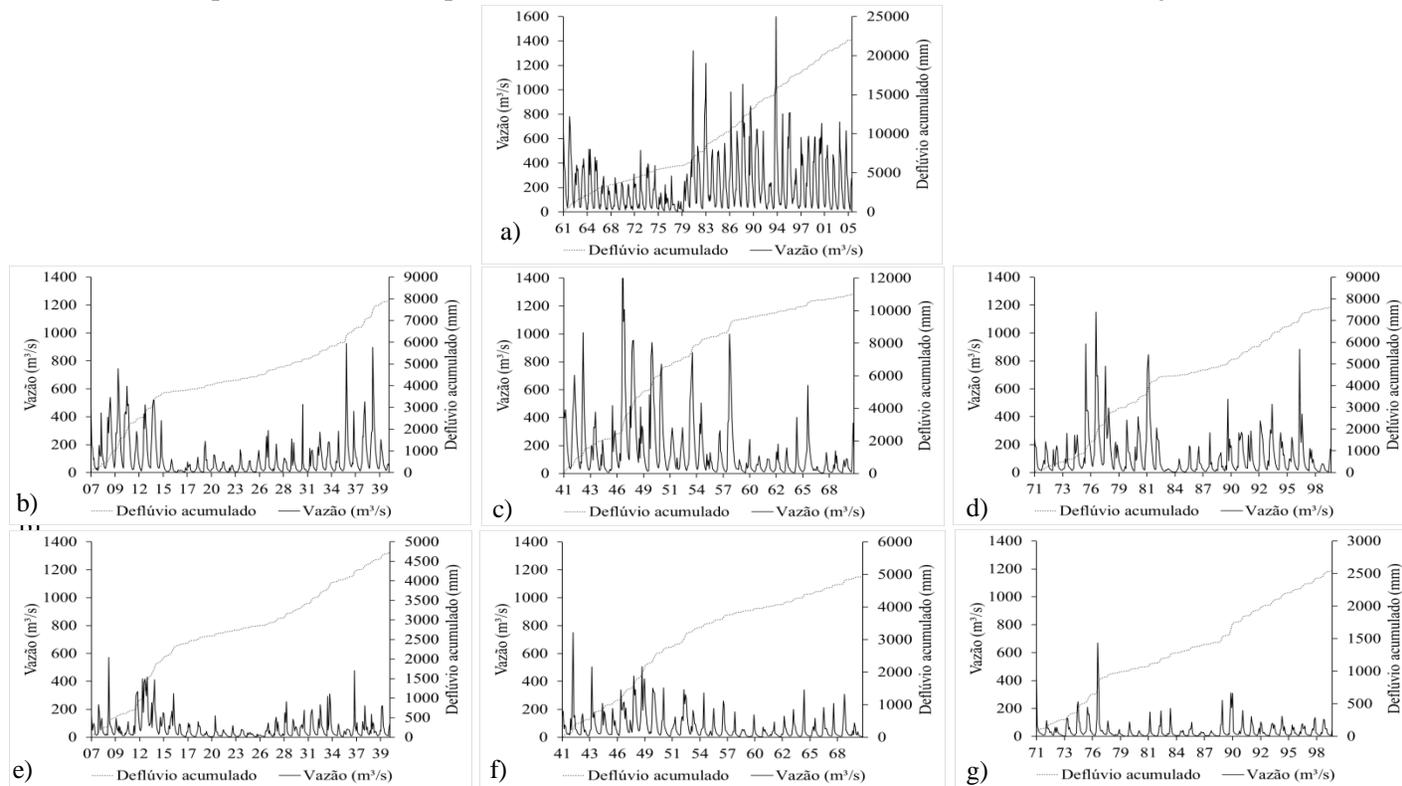
Tabela 14 - Vazões  $Q_{95\%}$ ,  $Q_{90\%}$ ,  $Q_{80\%}$ ,  $Q_{20\%}$ ,  $Q_{10\%}$  e  $Q_{5\%}$  para o clima presente (BASELINE) e alterações percentuais das vazões ( $\Delta_Q$ ), para os RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, durante o século XXI, na BHS.

Permanência	BASELINE	4.5			8.5		
		2007-2040	2041-2070	2071-2099	2007-2040	2041-2070	2071-2099
	Q (m <sup>3</sup> /s)	$\Delta_Q$ (%)					
Eta/HadGEM2-ES							
$Q_{95\%}$	215,1	-57,6	-43,8	-46,8	-59,4	-57,8	-69,5
$Q_{90\%}$	262,1	-57,5	-42,5	-47,7	-63,0	-60,7	-73,1
$Q_{80\%}$	366,5	-58,2	-41,8	-48,4	-67,4	-65,0	-77,1
$Q_{20\%}$	1203,0	-36,1	-10,4	-34,0	-62,9	-56,5	-75,2
$Q_{10\%}$	1604,0	-29,1	-8,5	-30,2	-60,9	-53,4	-71,9
$Q_{5\%}$	2062,0	-28,7	-12,6	-35,4	-58,6	-57,0	-72,4
Eta/MIROC5							
$Q_{95\%}$	166,2	-25,9	-16,7	-43,5	-42,6	-38,8	-52,9
$Q_{90\%}$	236,1	-29,7	-31,1	-51,4	-51,5	-49,7	-61,6
$Q_{80\%}$	334,7	-32,5	-34,3	-50,5	-51,4	-50,3	-62,1
$Q_{20\%}$	1400,0	-19,5	-28,2	-29,0	-20,7	-40,2	-55,5
$Q_{10\%}$	1735,0	-13,4	-27,6	-23,1	-14,9	-37,9	-42,1
$Q_{5\%}$	2029,0	-7,9	-27,2	-22,8	-10,7	-35,5	-36,0

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

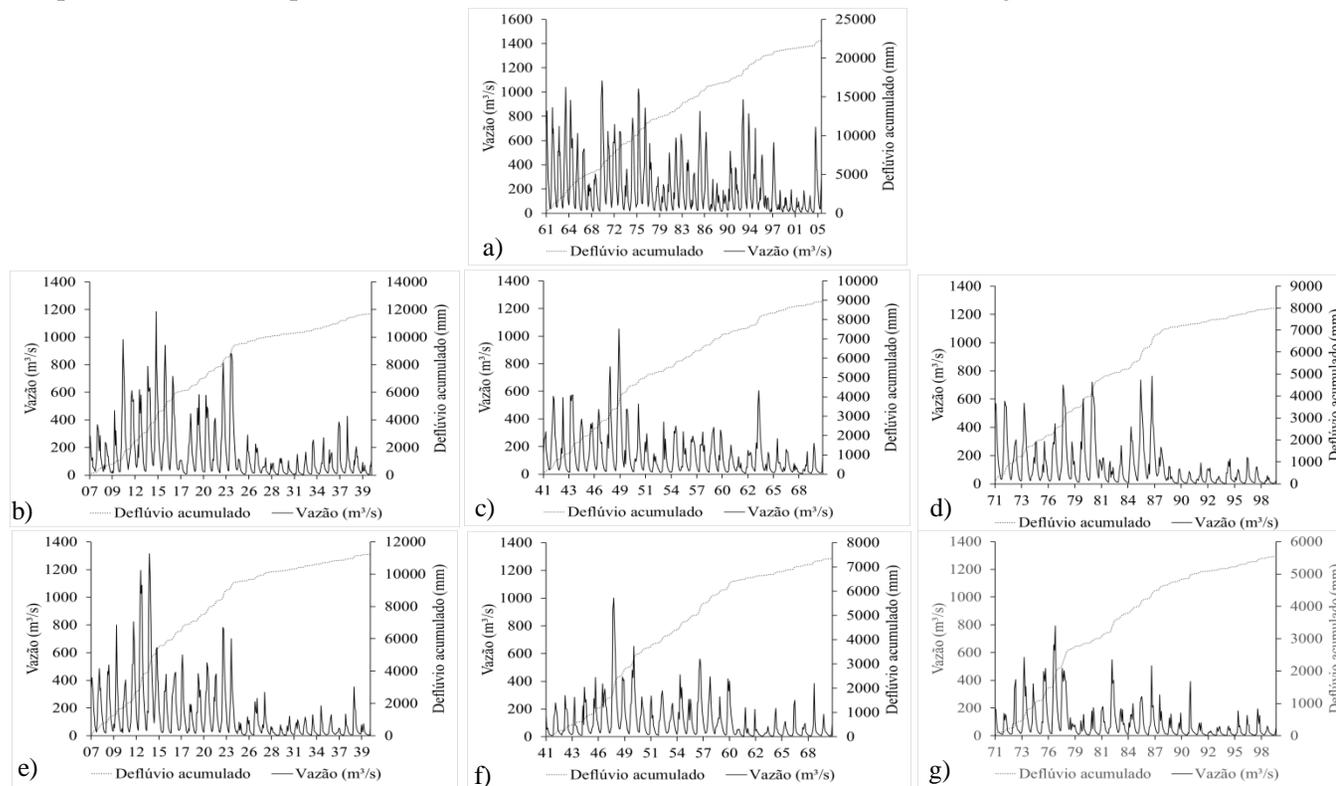
Nas Figuras 22, 23, 24, 25, 26 e 27, apresentam-se os hidrogramas simulados, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5 e o deflúvio acumulado (mm), nas BHMA, BHP e BHS, respectivamente, para o clima presente e para os RCPs 4.5 e 8.5 nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099. A partir dessas, pode-se verificar as diferenças entre as projeções do escoamento inerentes aos diferentes modelos climáticos e RCPs, para cada período do século XXI. O modelo Eta/HadGEM2-ES, na maioria das aplicações, resultou em um deflúvio acumulado menor que o do modelo Eta/MIROC5. Já em relação às forçantes de concentração representativas, o RCP 8.5 em todas as aplicações resultou em um deflúvio acumulado inferior ao do RCP 4.5, quando comparado o mesmo período, para ambos os modelos climáticos regionais.

Figura 22 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



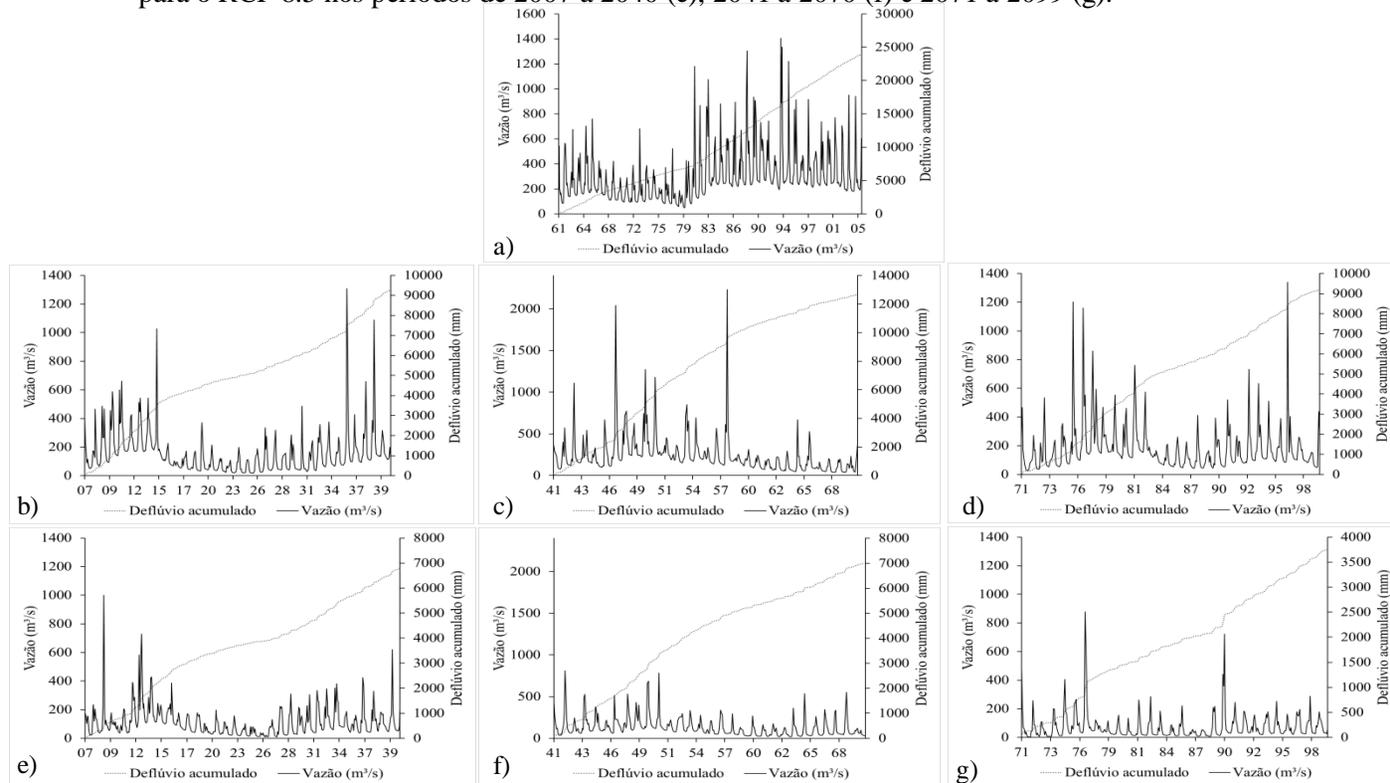
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 23 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHMA, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



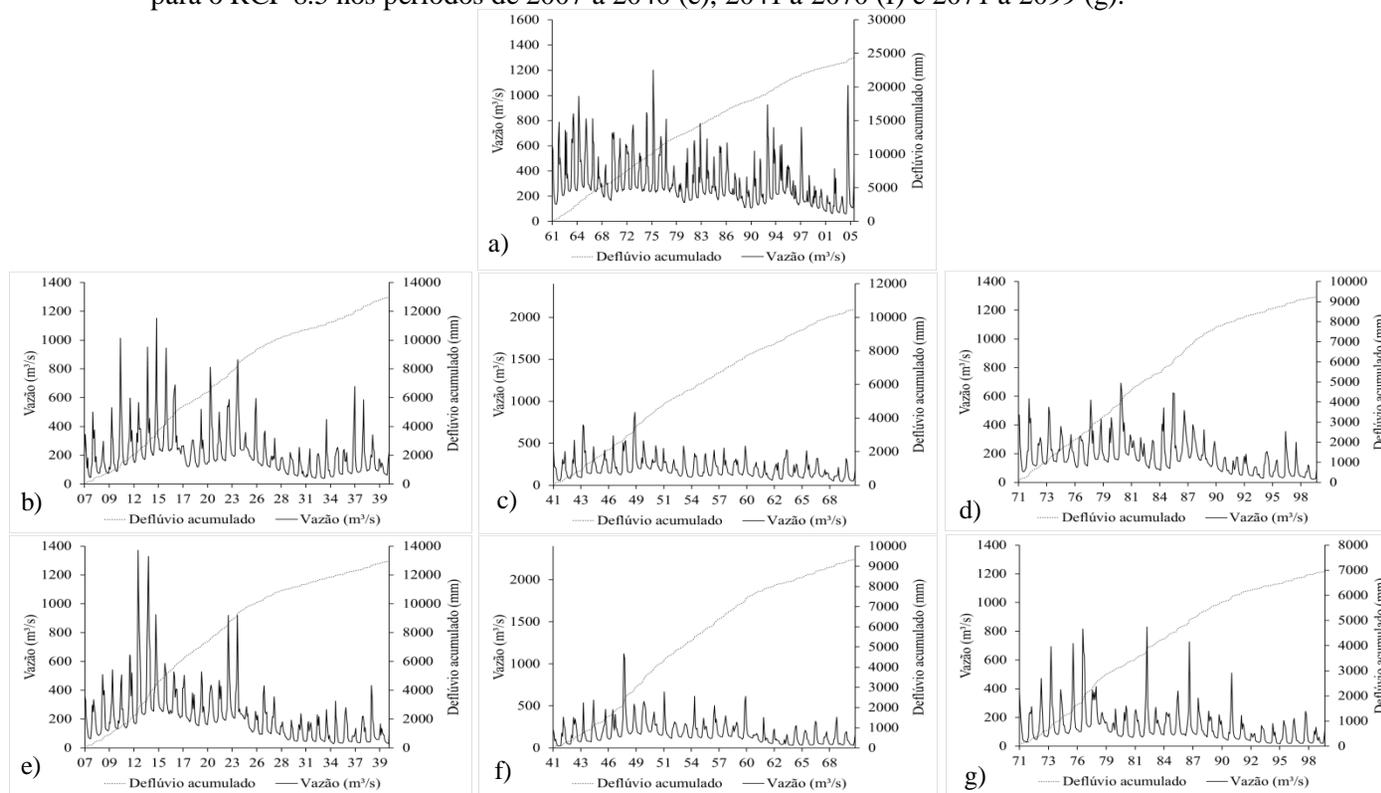
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 24 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



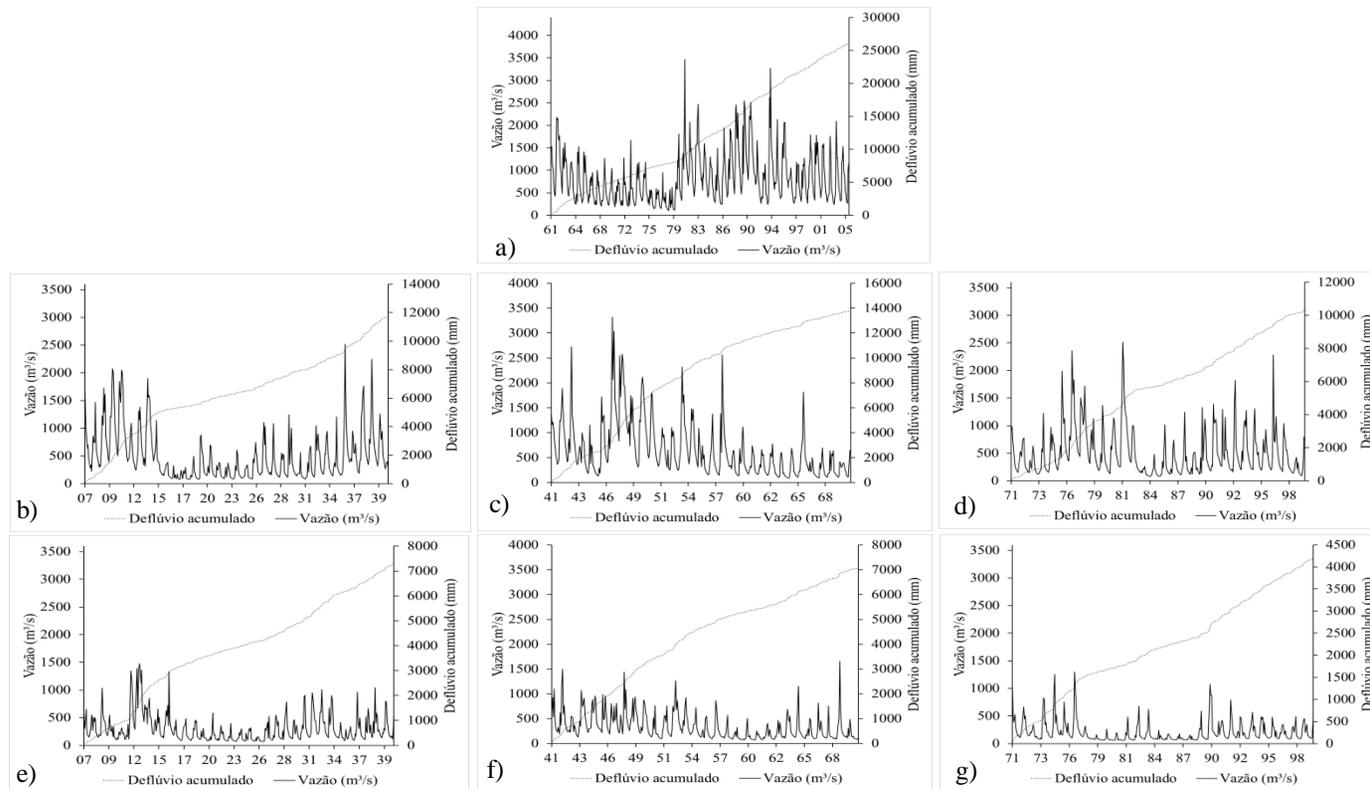
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 25 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHP, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



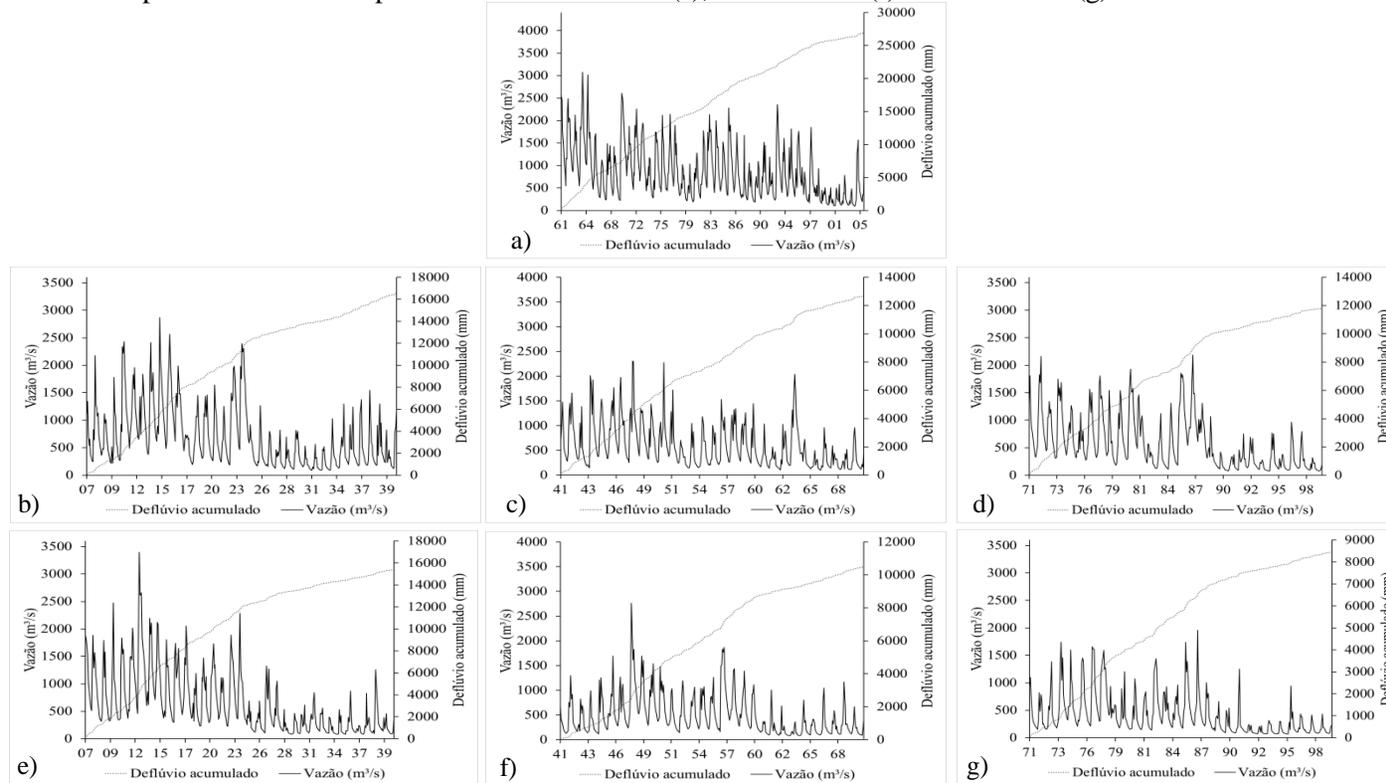
Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 26 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/HADGEM e deflúvio acumulado na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Figura 27 - Hidrogramas simulados pelo SWAT, a partir do modelo Eta/MIROC5 e deflúvio acumulado na BHS, para o clima presente (a), para o RCP 4.5, nos períodos de 2007 a 2040 (b), 2041 a 2070 (c) e 2071 a 2099 (d) e para o RCP 8.5 nos períodos de 2007 a 2040 (e), 2041 a 2070 (f) e 2071 a 2099 (g).



Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Na Tabela 15 apresenta-se o deflúvio médio anual (D) para o clima presente (BASELINE) e as alterações percentuais do deflúvio anual ( $\Delta_D$ ), em relação ao baseline, simuladas pelo SWAT para os RCPs 4.5 e 8.5 do Eta/HadGEM e Eta/MIROC5, nos períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, nas BHMA, BHP e BHS.

Tabela 15 - Deflúvio médio anual (D) para o baseline e alterações percentuais do deflúvio anual ( $\Delta_D$ ), em relação ao baseline, para os RCPs 4.5 e 8.5 do Eta/HadGEM e Eta/MIROC5, durante o século XXI, nas BHMA, BHP e BHS.

Bacia	BASELINE	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2007-2040	2041-2070	2071-2099	2007-2040	2041-2070	2071-2099
	D (mm.ano-1)	$\Delta_D$ (%)					
Eta/MIROC5							
BHMA	506.8	-29.9	-39.1	-43.7	-32.8	-49.9	-60.9
BHP	553.9	-28.9	-34.7	-40.5	-29.2	-41.8	-55.1
BHS	611.9	-17.9	-28.5	-31.2	-23.8	-40.9	-50.7
Média	557.5	-25.5	-34.1	-38.4	-28.6	-44.2	-55.6
Eta/HadGEM2-ES							
BHMA	503.1	-52.4	-24.1	-45.7	-71.5	-66.2	-81.9
BHP	545.6	-48.4	-19.6	-39.4	-62.3	-55.8	-75.4
BHS	593.3	-40.1	-19.6	-38.0	-62.7	-58.9	-74.7
Média	547.3	-46.9	-21.1	-41.1	-65.5	-60.3	-77.4

Fonte: Elaborada pela autora (2017).

Analisando-se os dados da Tabela 15, pode-se notar que todas as alterações percentuais do deflúvio anual indicaram redução do escoamento nas bacias hidrográficas. Em termos médios, para o período de 2007 a 2040, as projeções são de redução de 25,5%, 28,6%, 46,9% e 65,5%, a partir dos modelos Eta/MIROC5-4.5, Eta/MIROC5-8.5, Eta/HadGEM2-ES-4.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente; entre 2040 a 2070, as projeções foram de redução de 21,1%, 34,1%, 44,2% e 60,3%, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES-4.5, Eta/MIROC5-4.5, Eta/MIROC5-8.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente; e entre 2071 a 2100, reduções médias de 38,4%, 41,1%, 55,6% e 77,4%, a partir dos modelos Eta/MIROC5-4.5, Eta/HadGEM2-ES-4.5, Eta/MIROC5-8.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente. Portanto os maiores impactos hidrológicos projetados, para as bacias em estudo, foram simulados pelo modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, principalmente, no final do século XXI (2071 a 2099).

As maiores reduções no escoamento foram projetadas para a BHMA, para todos os cenários climáticos. Essa resposta hidrológica pode ser reflexo do elevado percentual de Argilossolo Vermelho-Amarelo presente na BHMA, o qual possui como principal característica a presença do horizonte B textural, que diminui a capacidade de regularização da bacia, além disso, reflete os resultados do balanço hídrico vertical, apresentado na Tabela 11, de maneira que os menores saldos projetados para o balanço hídrico vertical resultaram nos maiores déficits hídricos projetados.

Tomasella et al. (2008) avaliaram os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas na bacia hidrográfica do rio Tocantins, a partir do modelo hidrológico MGB-IPH acoplado ao modelo Eta-CPTEC/HadCM3 sob influência do cenário de emissão A1B, no período de 2080 a 2099, tendo sido projetada uma redução de 20% no escoamento em comparação ao Baseline.

Oliveira et al. (2015), utilizando o modelo SWAT, simularam os possíveis impactos hidrológicos projetados pelo modelo Eta/HadGEM2-ES para os RCPs 4.5 e 8.5, no período de 2011 a 2099, na região de cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande. Os resultados indicaram redução do escoamento, em todo o período analisado em ambos os RCPs, sendo que para os períodos de 2007 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, foram projetadas reduções de 26,4% e 19,9%; 14,6% e 16,2%; e 12,6% e 31,6%, para os RCPs 4.5 e 8.5 respectivamente.

Ho, Thompson e Brierley (2015) avaliaram os possíveis impactos decorrentes de mudanças climáticas na bacia hidrográfica dos rios Tocantins-Araguaia, a partir do modelo hidrológico STELLA associado às projeções de 41 MCGs sob influência do RCP 4.5, no final do século XXI (2071-2100). Foi verificado que a maioria dos MCGs indicaram redução na vazão média anual, sendo que a projeção média dos 41 MCGs foi de redução de 10,4% da vazão em relação ao Baseline.

Margulis (2015) simulou as possíveis mudanças na vazão afluente a 24 usinas hidrelétricas espalhadas pelo Brasil, a partir do modelo hidrológico SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) associado às projeções dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os RCPs 4.5 e 8.5, no período de 2011 a 2100. Dentre as 24 usinas hidrelétricas encontra-se a usina Luís Eduardo Magalhães (Lajeado), situada no rio Tocantins a jusante da região deste estudo, para a qual foi projetado, para o período de 2011 a 2040, redução da vazão em torno de 25%, 30%, 50% e 60%, a partir dos modelos Eta/MIROC5-4.5, Eta/MIROC5-8.5, Eta/HadGEM2-ES-4.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente; entre 2040 a 2070, projetaram-se reduções em torno de 30%, 30%, 40% e 60%, a partir dos modelos Eta/HadGEM2-ES-4.5, Eta/MIROC5-4.5, Eta/MIROC5-8.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente; e entre 2071 a 2100, reduções de 30%, 40%, 50% e 80%, a partir dos modelos Eta/MIROC5-

4.5, Eta/HadGEM2-ES-4.5, Eta/MIROC5-8.5 e Eta/HadGEM2-ES-8.5, respectivamente.

Os resultados obtidos no presente trabalho são coerentes aos apresentados por Margulis (2015), para a usina hidrelétrica de Lajeado tanto no âmbito de magnitudes quanto no que tange ao comportamento dos modelos Eta/MIROC5 e Eta/HadGEM2-ES e RCPs 4.5 e 8.5. Destaca-se, também, coerência com os resultados apresentados por Ho, Thompson e Brierley (2015) e Tomasella et al. (2008), que projetam reduções na disponibilidade hídrica para a região estudada. Portanto, utilizando diferentes modelos hidrológicos, diferentes modelos globais e diferentes cenários de emissão, há indicação de redução da disponibilidade hídrica.

Desta forma, em geral, os resultados apresentados indicam que poderão ocorrer sérios problemas futuros em termos disponibilidade hídrica para a região estudada, principalmente no final do século XXI, afetando assim diversos segmentos da sociedade, como o abastecimento de água para fins de consumo, a agricultura e o aproveitamento hidrelétrico.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados dos coeficientes estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo hidrológico SWAT nas simulações com passos diário e mensal, para as bacias hidrográficas BHMA, BHP e BHS, demonstraram uma boa performance nas etapas de calibração e validação. Evidencia-se assim a capacidade do modelo em prever as vazões adequadamente e a sua aplicabilidade como ferramenta de gestão e planejamento dos recursos hídricos nessas bacias.

As projeções dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, para os RCPs 4.5 e 8.5, demonstraram que, durante o século XXI, poderão ocorrer importantes alterações climáticas na região estudada, como redução da precipitação e aumento da evapotranspiração potencial.

Em relação às simulações geradas a partir do modelo SWAT forçado pelas simulações dos modelos Eta/HadGEM2-ES e Eta/MIROC5, após a correção de erros sistemáticos, para os RCPs 4.5 e 8.5 nas BHMA, BHP e BHS, as projeções mostraram tendências de redução do escoamento para todos os períodos de tempo e cenários, quando comparadas ao clima presente.

Os maiores impactos hidrológicos projetados para as bacias em estudo foram verificados a partir do modelo Eta/HadGEM2-ES para o RCP 8.5, sendo que a redução mais severa poderá ocorrer no período de 2071-2099.

Desta forma, os resultados indicam que poderão ocorrer sérios problemas futuros em termos de disponibilidade hídrica para a região estudada. Portanto, deve-se destacar que a mitigação da emissão dos gases do efeito estufa é uma importante meta a ser considerada, para o futuro dos recursos hídricos nas BHMA, BHP e BHS e que, apesar das incertezas associadas às projeções simuladas, este estudo pioneiro, para as bacias hidrográficas estudadas, forneceu valiosas informações sobre o comportamento hidrológico futuro nas mesmas.



## REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, n. 2/4, p. 413-430, Feb. 2007.

ALAM, S. **Impact of climate change on future flow of Brahmaputra river basin using SWAT model**. 2015. 240 p. Dissertação (Mestrado em Science in Water Resources Engineering) - Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka, 2015.

ALVARENGA, L. A. et al. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 6, p. 647-657, nov./dez. 2016.

AMBRIZZI, T. et al. **Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 108 p.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 69-76, jan. 2013.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 34, n. 1, p. 73-89, Feb. 1998.

\_\_\_\_\_. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 227, n. 1/4, p. 21-40, Jan. 2000.

ARROIO JUNIOR, P. P. A.; MAUAD, F. F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da Bacia do Ribeirão do Feijão – SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, p. 741-751, jul./set. 2015.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá, MT**. 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado em Física do Meio Ambiente) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BAUWENS, A.; SOHIER, C.; DEGRÉ, A. Hydrological response to climate change in the Lesse and the Vesdre catchments: contribution of a physically based model (Wallonia, Belgium). **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 15, n. 6, p. 1745-1756, June 2011.

BERG, P.; FELDMANN, H.; PANITZ, H. J. Bias correction of high resolution regional climate model data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 448/449, p. 80-92, July 2012.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53-64, jan./mar. 2016.

CAMPOS, C. G. C. **Padrões climáticos atuais e futuros de temperatura do ar na região sul do Brasil e seus impactos nos cultivos de pêssego e de nectarina em Santa Catarina**. 2011. 165 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 2014. 154 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS – ELETROBRAS. Potencial hidrelétrico brasileiro (SIPOT). **Relatório Técnico**, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/elb/data/Pages/LUMIS21D128D3PTBRIE.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

CHIESA, V. B. **Aplicabilidade de modelos matemáticos na análise de processos de outorga: o caso da bacia do ribeirão Taquaruçu**. 2016. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, 2016.

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**, Bethesda, v. 3, n. 5, p. 512-525, Dec. 2014b.

\_\_\_\_\_. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, Bethesda, v. 3, n. 5, p. 438-454, Dec. 2014a.

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

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COUSINO, L. K.; BECKER, R. H.; ZMIJEWSKI, K. A. Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 4, p. 762-775, Sept. 2015.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, Delft, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, p. 481-488, out./dez. 2011.

EDUARDO, E. N. et al. Hydrological simulation as subsidence for management of surface water resources at the Mortes River Basin. **Ciência e Agrotecnologia** Lavras, v. 40, n. 4, p. 390-404, jul./ago. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Mapa de solos do Brasil**. Brasília: Embrapa, 2011. Disponível em: <[http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det\\_mapa.aspx](http://mapoteca.cnps.embrapa.br/geoacervo/det_mapa.aspx)>. Acesso em: 15 mar. 2017.

GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GRAHAM, L. P.; ANDRÉASSON, J.; CARLSSON, B. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods: a case study on the Lule River basin. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 81, n. 1, p. 293-307, May 2007.

GREEN, C. H. et al. Hydrologic evaluation of the soil and water assessment tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 49, n. 2, p. 413-422, Apr. 2006.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 4, n. 2, p. 135-143, Apr. 1999.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. San Diego: Academic, 1994. 134 p.

HARTMANN, H. C.; BALES, R.; SOROOSHIAN, S. **Weather, climate, and hydrologic forecasting for the southwest U.S.** Tucson: The University of Arizona, 1999. 172 p.

HEJAZI, M. I. et al. Incorporating reanalysis-based short-term forecasts from a regional climate model in an irrigation scheduling optimization problem. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v. 140, n. 5, p. 699–713, May 2014.

HERRERA, D. J. **Integração de modelos de quantidade e qualidade da água para avaliação de cargas contaminantes em afluentes de mananciais de abastecimento**. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

HO, J. T.; THOMPSON, J. R.; BRIERLEY, C. Projections of hydrology in the Tocantins-Araguaia Basin, Brazil: uncertainty assessment using the CMIP5 ensemble. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 61, n. 3, p. 551-567, June 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Emissions scenarios for the IPCC: an update**. Cambridge: Cambridge University, 2007. 28 p.

\_\_\_\_\_. **Climate change 2013: the physical science basis: IPCC Working Group I contribution to AR5**. Geneva: IPCC, 2013. 1535 p.

JONES, C. et al. Twenty-first-century compatible CO<sub>2</sub> emissions and airborne fraction simulated by CMIP5 earth system models under four representative concentration pathways. **Journal of Climate**, Boston, v. 26, n. 13, p. 4398-4413, July 2013.

LEITE, O. C. **Disponibilidade hídrica nos sistemas hidrográficos dos rios Tocantins e Araguaia no estado do Tocantins**. 2015. 73 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2015.

LELIS, T. A. et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 623-634, mar./abr. 2012.

LENDERINK, G.; BUIHAND, A.; DEURSEN, W. V. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 11, n. 3, p. 1145–1159, May 2007.

LIMA, L. A. S. **Aplicação dos métodos semiautomático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi**. 2013. 124 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

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

\_\_\_\_\_. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 29, n. 15, p. 2241-2255, Dec. 2009.

MARGULIS, S. Riscos climáticos e ambientais. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE SEGURANÇA HÍDRICA, 2015, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: [s.n.], 2015. p. 1-68.

MARTIN, G. M. et al. The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, New York, v. 4, n. 4, p. 723-757, Nov. 2011.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, n. 3, p. 235-247, Nov. 2008.

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

MELO NETO, J. O. et al. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 177-188, jan./mar. 2014.

MONTEIRO, J. A. et al. Accuracy of grid precipitation data for Brazil: application in river discharge modelling of the Tocantins catchment. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 30, n. 9, p. 1419-1430, Apr. 2015.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, n. 7282, p. 747-756, Feb. 2010.

MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, n. 6772, p. 853-858, Feb. 2000.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2005**. Temple: Blackland Research Center, 2005. 541 p.

\_\_\_\_\_. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation: version 2009**. Texas: Texas A&M University, 2011. 647 p.

OLIVEIRA, G. G. **Abordagem estocástica para análise da relação entre a disponibilidade e a demanda hídrica no futuro**. 2014. 197 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

OLIVEIRA, G. G.; PEDROLLO, O. C.; CASTRO, N. M. R. As incertezas associadas às condições climáticas obtidas pelo modelo ETA CPTEC/HADCM3: avaliação comparativa entre os dados simulados e observados de precipitação, evapotranspiração e vazão na bacia hidrográfica do rio Ijuí, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 101-121, 2015.

OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in a headwater of the Grande River Basin, Southeastern Brazil. In: SWAT CONFERENCE PURDUE UNIVERSITY, 2015, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2015. 23 Slides. Disponível em: <[http://swat.tamu.edu/media/115040/e2\\_3\\_srinivasan.pdf](http://swat.tamu.edu/media/115040/e2_3_srinivasan.pdf)>. Acesso em: 8 mar. 2017.

PAGLIERO, L. et al. Large-scale hydrological simulations using the soil water assessment tool, protocol development, and application in the Danube Basin. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 43, n. 1, p. 145–154, Jan. 2014.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Assessing the impact of climate change scenarios on water resources in southern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 58, n. 1, p. 77-87, 2013.

PEREIRA, D. R. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 7, p. 14–37, Sept. 2016.

\_\_\_\_\_. Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in Southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 789–799, jul./ago. 2014.

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. 2013.** 2013. 126 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG. 2011.** 2011. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PONTES, L. M. et al. Hydrological modeling of tributaries of cantareira system, Southeast Brazil, with the Swat Model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 6, p. 1037-1049, nov./dez. 2016.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 185-204, jun. 2010.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica**: aplicação a bacias hidrográficas. 2003. 148 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DA MODERNIZAÇÃO DA GESTÃO PÚBLICA - SEPLAN. **Estudo da dinâmica da cobertura e uso da terra do estado do Tocantins**: dinâmica do Tocantins: volume 1. Escala 1:100.000. Palmas: Seplan, 2012. 264 p.

SHEN, Z. Y. et al. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 10, p. 1435-1442, Oct. 2009.

SHRESTHA, R. R.; DIBIKE, Y. B.; PROWSE, T. D. Modelling of climate-induced hydrologic changes in the Lake Winnipeg watershed. **Journal of Great Lakes Research**, Toronto, v. 38, n. 3, p. 83-94, 2012.

SILVA, J. M. C.; BATES, J. M. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical Savanna Hotspot. **Bioscience**, Washington, v. 52, n. 3, p. 225-233, Mar. 2002.

SILVA, M. G. et al. Sensitivity analysis and calibration of hydrological modeling of the watershed northeast Brazil. **Journal of Environmental Protection**, Oxford, v. 6, n. 8, p. 837-850, Aug. 2015.

SLOAN, P. G.; MOORE, I. D. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 20, n. 12, p. 1815-1822, Dec. 1984.

SOUZA, F. H. M. **Regionalização climática de Thornthwaite e Mather para o Estado do Tocantins**. 2016. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) - Universidade Federal do Tocantins, Gurupi, 2016.

TAN, M. L. et al. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 189, p. 1-10, June 2017.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 456/457, p. 12-29, Aug. 2012.

TOMASELLA, J. et al. **Study of the climate change impacts on surface water resources and groundwater levels in the Tocantins river basin**. São Paulo: CCST/INPE, 2008. 71 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005. 678 p.

VALERIO, E. L. S. **Avaliação dos efeitos de alterações na precipitação devido a mudanças climáticas no regime hidrológico da bacia do rio Paraguaçu, BA**. 2014. 62 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 12, n. 2, p. 173-189, Mar. 2007.

VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River basin hydrology, southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 35, n. 6, p. 1054-1068, May 2015.

\_\_\_\_\_. Modelagem hidrológica em uma sub-bacia hidrográfica do baixo rio Araguaia, TO. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Oxford, v. 3, n. 3, p. 38-47, Sept. 2012.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. 2011. 286 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

\_\_\_\_\_. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG.** 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VUUREN, D. P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 109, n. 5, p. 5-31, Nov. 2011.

WATANABE, S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**, New York, v. 4, n. 4, p. 845, Nov. 2011.

ZAPATA, C. E. et al. **Impacto del cambio climático en cultivos andinos.** Lima: CONDESAN, 2011. 69 p.

ZHANG, H. G. et al. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 50, n. 3, p. 911-918, 2007.

ZHANG, Y. et al. Impacts of climate change on streamflows under RCP scenarios: a case study in Xin River Basin, China. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 178/179, p. 521-534, Sept. 2016.