



**LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR**

**SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS NOS  
RECURSOS HÍDRICOS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA  
ANDINO AMAZÔNICA, PERU**

**LAVRAS - MG**

**2023**

**LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR**

**SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS NOS RECURSOS HÍDRICOS  
DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA ANDINO AMAZÔNICA, PERU**

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

Dr. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

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

Baltazar, Leonidas Alejandro Arias.

Simulação de mudanças climáticas futuras nos recursos  
hídricos de uma bacia hidrográfica andino amazônica, Peru /  
Leonidas Alejandro Arias Baltazar. - 2023.

86 p.

Orientador(a): Marcelo Ribeiro Viola.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.  
Bibliografia.

1. Modelagem hidrológica. 2. Mudanças climáticas. 3. Bacia  
andino amazônica. I. Viola, Marcelo Ribeiro. II. Título.

**LEONIDAS ALEJANDRO ARIAS BALTAZAR**

**SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS NOS RECURSOS HÍDRICOS  
DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA ANDINO AMAZÔNICA, PERU**

**SIMULATION OF FUTURE CLIMATE CHANGE ON THE WATER RESOURCES OF  
AN ANDEAN-AMAZONIAN BASIN, PERU**

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

APROVADA em 03 de março de 2023

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dr. Donizete dos Reis Pereira UFV

Dr. Samuel Beskow UFPel

Dr. Vinícius Oliveira Silva UFLA



Dr. Marcelo Ribeiro Viola  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

À minha companheira Miriam e aos meus filhos Angie, Kevin e Jimmy, pelo seu amor, apoio e paciência,

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus todo poderoso, por me dar a vida, saúde e forças para superar barreiras e dar um passo à frente.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos pela oportunidade de me abrir as portas do conhecimento.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Ribeiro Viola, por sua ajuda constante, pelos ensinamentos e sugestões para a conclusão desse trabalho.

Aos membros da banca, Dr. Carlos Rogério de Mello, Dr. Donizete dos Reis Pereira, Dr. Samuel Beskow, Dr. Vinícius Oliveira Silva, pela disponibilidade e sugestões.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos (processo 88882.446869/2019-01 e 88882.446854/2019-01), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa ao orientador (processo 311191/2021-5).

Muito obrigado!

## RESUMO

A avaliação dos impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos de bacias hidrográficas nos Andes do Perú, região de cabeceira da bacia amazônica, é essencial para a gestão de recursos hídricos na mitigação dos possíveis impactos prognosticados. A presente tese aborda a Bacia Hidrográfica do Rio Chicllarazo (BHRC), que é a principal fonte hídrica do Sistema Hidráulico Cachi, responsável pelo atendimento à múltiplos usos de água na região de Ayacucho, incluindo irrigação, abastecimento público e geração hidrelétrica. Na região da BHRC ocorre escassez de dados hidroclimatológicos observados, constituindo em uma limitação para o desenvolvimento de estudos hidrológicos. Neste contexto, objetivou-se a modelagem hidrológica da BHRC com o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), avaliando a aplicabilidade da precipitação por satélite IMERG. Especificamente, objetivou-se analisar os impactos hidrológicos associados aos cenários de mudanças climáticas RCP (*Representative Concentration Pathways*) 4.5 e 8.5 para o século XXI, simulados por quatro modelos climáticos globais, com *downscaling* pelo modelo regional Eta (Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5). Foram obtidos resultados satisfatórios nas etapas de calibração (2009 a 2012) e validação (2013 a 2016) do SWAT a partir de dados observacionais de uma única estação meteorológica (Choccoro) e posto fluviométrico (Chicllarazo). O modelo calibrado foi então alimentado com dados IMERG, tendo sido obtidos resultados satisfatórios apenas após a remoção de viés dos dados IMERG. Os resultados concluíram que é relevante expandir a rede de monitoramento hidrometeorológico ao longo dos Andes do Peru, visando aprimorar os estudos hidrológicos. Para a avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, a baixa disponibilidade de dados observados foi uma limitação para a remoção de viés dos dados climáticos simulados, impondo o caráter de primeira aproximação a esta etapa do presente estudo. Analisando-se as projeções de precipitação para o século XXI foram verificadas divergências, havendo, de maneira geral, projeções de aumento da precipitação pelos modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2 e de redução pelos modelos Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5. Para as mudanças climáticas de temperatura as projeções do conjunto médio dos quatro modelos tiveram mesmo sinal, sendo de aquecimento. Para o conjunto médio foi projetado para o século XXI, respectivamente para os RCPs 4.5 e 8.5, incremento das temperaturas máximas em 2,3 e 3,1°C, respectivamente, e das mínimas em 1,2 e 1,8°C, respectivamente. Os impactos hidrológicos simulados com o modelo SWAT para século XXI com o conjunto médio foram de redução do escoamento em 12,3 e 20,4% para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente, sendo que, individualmente para cada modelo, os sinais das projeções hidrológicas foram semelhantes aos da precipitação. No entanto, as projeções de redução da disponibilidade hídrica futura na BHRC obtidas para o conjunto médio dos quatro modelos podem impactar o Sistema Hidráulico Cachi. Contudo ressalta-se que a utilização dos resultados requer cautela em razão das incertezas presentes na modelagem dos cenários climáticos futuros, sendo recomendado o desenvolvimento de estudos futuros abordando as incertezas da modelagem e os novos cenários climáticos do IPCC.

**Palavras-chave:** Sistema Hidráulico Cachi. SWAT. Precipitação por satélite IMERG. RCP 4.5. RCP 8.5.

## ABSTRACT

Assessing the impacts of climate change on water available in the Peruvian Andes, the headwater of the Amazon River basin, is essential for water resources management in mitigating possible predicted impacts. This thesis addresses the Chicllarazo River Basin (BHRC), the main water source for the Cachi Hydraulic System, responsible for meeting the multiple uses of water in the Ayacucho region, including irrigation, public supply, and hydroelectric generation. In the BHRC region, observed hydro climatological data are scarce, constituting a limitation for developing hydrological studies. In this context, the objective was the hydrological modeling of the BHRC with the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model, evaluating the applicability of the IMERG satellite precipitation. Specifically, the objective was to analyze the hydrological impacts associated with the RCP (Representative Concentration Pathways) 4.5 and 8.5 climate change scenarios for the 21st century, simulated by four global climate models, with downscaling by the Eta model (Eta-BESM, Eta -CanESM2, Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5). Satisfactory results were obtained in the steps of calibration (2009-2012) and validation (2013-2016) of the SWAT from observational data from a single meteorological station (Choccoro) and fluviometric gauge station (Chicllarazo). The IMERG was then used as input in the calibrated model, and satisfactory results were obtained only after bias correction from the IMERG. The results concluded that expanding the hydrometeorological monitoring network along the Andes of Peru is relevant, intending to improve hydrological studies. For assessing hydrological impacts resulting from climate change, the low availability of observed data was a limitation to bias correction of climate forecasting, imposing the character of a first approximation to this stage of the present study. Divergences in the precipitation projections for the 21st century were observed, with increased precipitation by the Eta-BESM and Eta-CanESM2 models and reduction by the Eta-HadGEM2 and Eta-MIROC5 models. For the temperature, the four models projected warming. For the mean ensemble of the models for the RCPs 4.5 and 8.5 in the XXI century, an increase in maximum temperatures of 2.3 and 3.1°C, respectively, and in minimum temperatures of 1.2 and 1.8°C, respectively, were obtained. The hydrological impacts simulated with the SWAT model for the 21st century for the mean ensemble were a reduction in annual runoff of 12.3 and 20.4% for RCPs 4.5 and 8.5, respectively, and, individually for each model, the runoff projections signal was similar to those of precipitation. However, the projections of reduction in the future water availability in the BHRC obtained for the mean ensemble can impact the Cachi Hydraulic System. However, it is emphasized that the use of the results requires caution due to the uncertainties present in the modeling of future climatic scenarios, being recommended to develop future studies addressing modeling uncertainties and the IPCC climate scenarios.

**Keywords:** Cachi Hydraulic System. SWAT. IMERG satellite precipitation. RCP 4.5. RCP 8.5.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE – INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
2.1 A bacia hidrográfica amazônica e os andes peruanos.....	12
2.2 Modelagem hidrológica.....	13
2.2.1 Modelo hidrológico SWAT e suas aplicações.....	14
2.3 Precipitação por satélite.....	17
2.3.1 Grade de precipitação PISCOP .....	18
2.4 Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Regionais (MCRs) .....	19
2.4.1 Cenários de mudanças climáticas futuras.....	20
2.5 Impactos hidrológicos associados a cenários de mudanças climáticas .....	22
<b>3. CONSIDERACOES GERAIS</b> .....	<b>24</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>25</b>
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....	<b>29</b>
<b>ARTIGO 1 - Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru, Amazon</b> .....	<b>29</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>30</b>
<b>2. DATA AND METHODS</b> .....	<b>32</b>
2.1. Study area .....	32
2.2. Precipitation data .....	33
2.2.1 Satellite precipitation evaluation using observational data.....	34
2.2.2 Bias correction of IMERG data .....	35
2.3. Hydrological modeling.....	35
2.3.1 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) .....	35
2.3.2 Data for hydrological modeling .....	36
2.3.3 Model setup, calibration and validation.....	38
<b>3. RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	<b>40</b>
3.1. Evaluation of precipitation data estimated by IMERG .....	40
3.2 Evaluation through hydrological modeling .....	42
3.3 Analysis of water budget components .....	46
<b>4. CONCLUSIONS</b> .....	<b>48</b>
<b>REFERENCES</b> .....	<b>49</b>
<b>ARTIGO 2 - Simulação de mudanças climáticas futuras nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica andino-amazônica, Peru</b> .....	<b>58</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>59</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>61</b>
2.1. Área de estudo .....	61
2.2 Modelo hidrológico e base de dados observacional.....	63
2.3. Projeções climáticas futuras.....	63
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>64</b>
3.1. Avaliação das projeções de mudanças climáticas futuras de precipitação e temperatura .....	64
3.2. Avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas.....	67
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	<b>74</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>76</b>
<b>ANEXO I – Correção de viés dos dados simulados pelos modelos climáticos</b> .....	<b>78</b>
<b>CONSIDERACOES FINAIS</b> .....	<b>85</b>

## PRIMEIRA PARTE – INTRODUÇÃO GERAL

### 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e o desenvolvimento das sociedades. Com o crescimento populacional e a maior demanda por alimentos, madeira, fibras e outros insumos, a gestão dos recursos hídricos em bacias hidrográficas requer o desenvolvimento de estudos hidrológicos que subsidiem a tomada de decisão. Na cabeceira da bacia hidrográfica amazônica, onde as águas se originam nos Andes peruanos, há a presença de inúmeras zonas de vida ecológica, cuja hidrologia ainda é pouco estudada, caracterizando uma demanda para o melhor entendimento hidrológico da bacia Amazônica.

As bacias hidrográficas são objeto de estudos de modelos hidrológicos para simular, analisar, explicar e realizar previsões sobre seu comportamento hidrológico. Tais modelos possibilitam estudar o ciclo hidrológico e, também, desenvolver estudos prognósticos abordando cenários exploratórios de mudanças climáticas, os quais auxiliam a tomada de decisões pela gestão dos recursos hídricos. O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem formulação semiconceitual, discretização espacial por sub-bacias, e possibilita a simulação contínua dos processos que ocorrem nas bacias hidrográficas. O SWAT tem sido aplicado em diversos estudos na América do Sul e em algumas bacias do Peru com resultados satisfatórios, o que destaca o seu potencial para modelar processos hidrológicos de superfície.

O rio Chicllarazo, está localizado na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Amazonas, no leste dos Andes centrais do Peru, na Cordilheira Ocidental, que faz parte dos andes tropicais. As águas do rio Chicllarazo seguem a jusante pelo curso dos rios Cachi, Mantaro, Apurimac, Ene, Tambo e Ucayali. Ainda no território do Peru, a partir da confluência entre os rios Ucayali e Marañon, é chamado de rio Amazonas. O rio Chicllarazo fornece água ao Sistema Hidráulico Cachi (SHC), que foi construído entre 1987 e 2002, e que possui estruturas de captação, condução, regulação e de geração de energia hidrelétrica. O SHC distribui água para múltiplas finalidades: irrigação de 14.500 hectares, abastecimento público da cidade de Ayacucho com população de 224 mil habitantes, vazão ecológica para o rio Alameda na cidade de Ayacucho e geração de 1,8 MW de energia elétrica para a população da zona alta do projeto.

Na área do SHC, a rede de monitoramento hidrometeorológico é limitada pela reduzida densidade de postos de monitoramento, o que restringe o desenvolvimento de estudos hidrológicos. Dessa maneira, a procura por fontes de dados alternativas ao monitoramento de superfície se faz necessário. Nesse contexto, ganham destaque os produtos de monitoramento

hidrológico por satélite orbital, como o produto de precipitação por satélite *Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement* (IMERG).

A Bacia Hidrográfica do Rio Chicllarazo (BHRC) é uma importante fonte hídrica para o SHC, que pode ser afetada, entre outros fatores, por mudanças antrópicas e climáticas. Alterações do clima e dos sistemas físicos e biológicos podem ser provocadas pela emissão de gases de efeito estufa, aerossóis, mudanças no uso do solo, variabilidade climática natural, entre outros. Os modelos climáticos de circulação global (MCGs) modelam os sistemas climáticos globais, resolvem matematicamente a dinâmica da atmosfera e possibilitam a simulação de cenários de mudanças climáticas, com destaque para os cenários de forçamento radiativo RCP (*Representative Concentration Pathways*) projetados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). No que concerne a análise dos impactos de mudanças climáticas em pequenas bacias hidrográficas, os MCGs geram resultados com reduzido nível de detalhamento, demandando, dessa maneira, o detalhamento dos resultados ao nível local, por meio de modelos climáticos regionais (MCRs) ou de *downscaling* (redução de escala). Para a América do Sul, cabe destaque para o modelo Eta, que foi adaptado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A presente tese encontra-se dividida em duas partes. Na primeira é apresentada uma revisão de literatura. Na segunda constam dois artigos, com os seguintes objetivos: artigo 1) calibrar e validar o modelo hidrológico SWAT para a BHRC a partir de dados observacionais, e validar o produto de precipitação por satélite IMERG para a simulação hidrológica; artigo 2) analisar os possíveis impactos sobre os recursos hídricos dos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5 simulados por quatro MCGs e regionalizados pelo modelo Eta (Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) para a BHRC, disponibilizando informação para o planejamento e gestão de recursos hídricos de um importante manancial localizado na cabeceira da bacia amazônica nos Andes do Peru.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A bacia hidrográfica amazônica e os andes peruanos

Com área de 6 milhões de km<sup>2</sup>, a bacia Amazônica é a maior do mundo e abrange principalmente o Brasil (63%), Peru (16%), Bolívia (12%) e Colômbia (6%). Além de influenciar o clima global e manter serviços ambientais importantes, a bacia também escoar 15-20% da água doce mundial (SINGH, 2017). Como a bacia abrange vários países, as águas do rio Amazonas são um bem ambiental, econômico e social de importância internacional que requer estudos para sua conservação e uso adequado (VAL et al., 2010).

No Peru, o rio Amazonas é formado pela união dos rios Ucayali e Marañón, cuja bacia na América do Sul tem 3 unidades geomorfológicas: os Andes, com declives acentuados; o Amazonas guianense, com declives moderados; e as planícies amazônicas, com declives baixos (SINGH, 2017). O Peru, com território de 1.285.215,60 km<sup>2</sup>, está dividido em 3 regiões hidrográficas: Pacífico (278.482,44 km<sup>2</sup>), Amazônia (957.822,52 km<sup>2</sup>) e Titicaca (48.910,64 km<sup>2</sup>), com disponibilidade de água superficial de 2,0 %, 97,4 % e 0,56 % respectivamente.

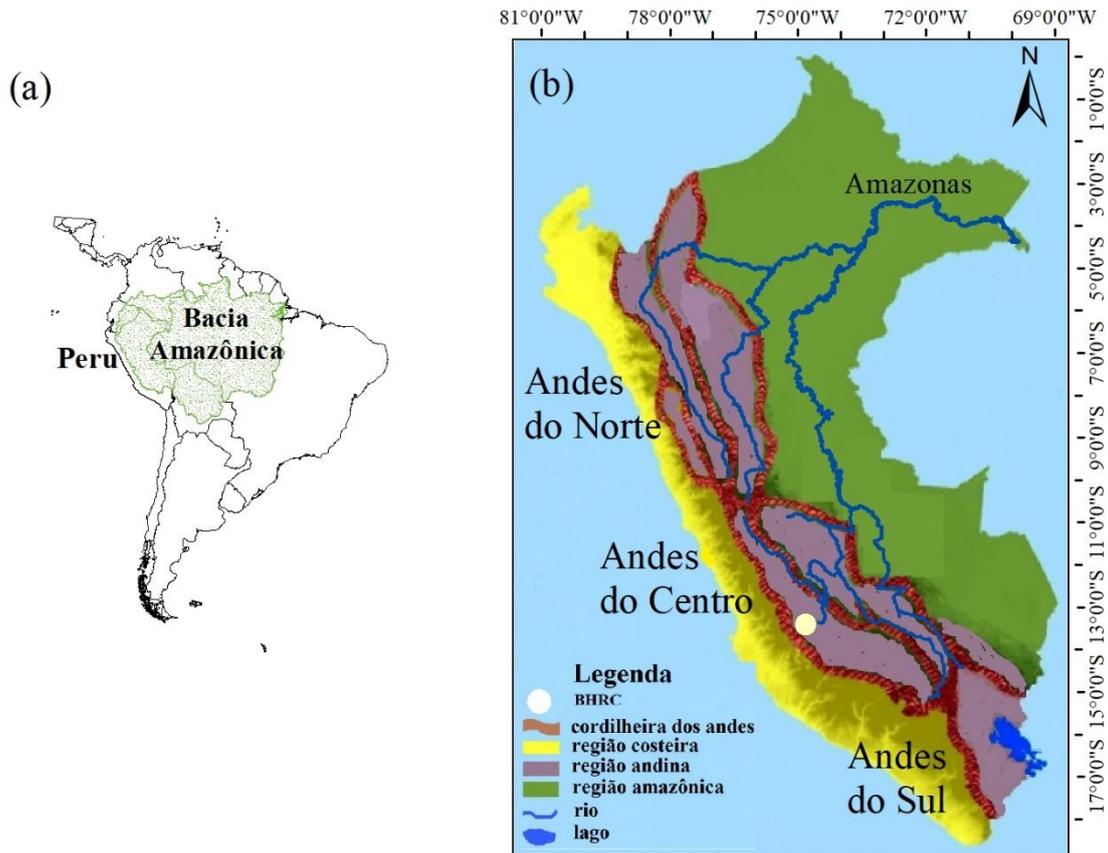
Com 7.000 km de extensão, a Cordilheira dos Andes é a maior cordilheira do mundo e atravessa sete países: Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Bolívia, Chile e Argentina, com altitudes superiores a 6.000 m (SINGH, 2017). A cordilheira divide a América do Sul em duas regiões: uma estreita e abrupta em direção ao Pacífico e uma ampla em direção ao Atlântico, onde há grande quantidade de chuva transportada pelos ventos atlânticos em direção aos Andes (FERNÁNDEZ, 2009).

Os Andes tropicais da América do Sul, com topografia montanhosa e complexa, fazem parte da cordilheira dos Andes até a parte Norte dos andes do Chile e da Argentina e são considerados *hotspot* de biodiversidade (CEPF et al., 2021). A referida região do ecossistema Tropical dos Andes cobre uma área de 1.542.644 km<sup>2</sup>, com altitude variando do nível do mar até mais de 6000 m, e abriga mais de 100 ecossistemas heterogêneos e uma alta diversidade biológica (45.000 plantas vasculares e 3.400 espécies de vertebrados, sendo 45% endêmicas) em apenas 1 % da área continental do mundo. Ocorre na região ocupação populacional de diversas culturas pré-hispânicas há mais de 8.000 anos, com disponibilidade de terras para sistemas produtivos agropecuários. Outro aspecto relevante é a importância dos recursos hídricos, abastecendo cidades populosas como Bogotá (Colômbia), Quito (Equador) e La Paz (Bolívia), onde estão localizadas também outras cidades com riqueza histórica como Cuzco (Peru) (CEPF et al., 2021; COMUNIDAD ANDINA, 2009).

No Peru, as cordilheiras formam os Andes do Norte, do Centro e do Sul (Figura 1). Nos Andes centrais está localizada a bacia hidrográfica do rio Chicllarazo (BHRC), que é um

afluente do rio Cachi e segue à jusante os rios Mantaro, Apurímac, Ene, Tambo e Ucayali, e, em seguida, com o rio Marañón juntos em direção ao rio Amazonas (ANA, 2014).

**Figura 1.** Localização do Peru e da bacia hidrográfica amazônica na América do Sul (a), localização dos Andes e hidrografia no Peru (b).



Fonte: Adaptado de ANA (2014).

## 2.2 Modelagem hidrológica

Um modelo hidrológico é a representação matemática do fluxo de água e seus constituintes que ocorrem na bacia hidrográfica, composto por variáveis e parâmetros. O modelo hidrológico possibilita entender os processos do ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, obtendo respostas e antecipando eventos futuros diante de diferentes condições de entrada, impulsos ou alternativas propostas pelo hidrólogo (SINGH, 2017; SOROOSHIAN et al., 2008; TUCCI, 2005).

Nesses modelos, os *inputs* meteorológicos são impulsos forçantes ou de entrada que afetam o sistema dependendo das variáveis (quantidades do fenômeno) e parâmetros (que caracterizam o sistema), onde diferentes equações de transferência representam os processos hidrológicos (escoamento, infiltração, entre outros) que ocorrem no sistema a ser modelado (CAMPOS, 2009).

Os modelos hidrológicos são classificados de acordo com a escala temporal: de simulação contínua (de longos períodos) ou discreta (de eventos isolados); discretização espacial: concentrado (bacia única, sem descrição da variabilidade espacial) ou distribuído (o qual subdivide a bacia em sub-bacias ou células); de acordo com o tipo de variável: estocástico (probabilístico) ou determinístico (não considera a probabilidade de ocorrência, sempre produzindo uma mesma saída para uma mesma entrada); e formulação: conceitual (que busca a descrição dos processos físicos) ou empírico (“caixa preta”, sem levar em consideração os processos físicos) (DEVI; GANASRI; DWARAKISH, 2015; SOROOSHIAN et al., 2008).

Um modelo envolve o planejamento de várias etapas: ideia do sistema, construção, calibração ou estimativa dos parâmetros do modelo, validação ou verificação do modelo, análise de sensibilidade e previsão ou aplicação mediante diferentes entradas (CAMPOS, 2009; TUCCI, 2005).

### **2.2.1 Modelo hidrológico SWAT e suas aplicações**

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrológico semi-conceitual, semidistribuído, discretizado por sub-bacias, de tempo contínuo, que possibilita a simulação hidrológica de longo prazo. Foi desenvolvido por Jeff Arnold no início de 1990 para o *Agricultural Research Service* (ARS) do *United States Department of Agriculture* (USDA) (ARNOLD et al., 1998; Neitsch et al., 2011).

O SWAT requer dados espacializados de entrada sobre topografia, vegetação e solos para a estruturação do modelo por sub-bacias e unidades de resposta hidrológica (URH), que são áreas com o mesmo comportamento hidrológico ao ter o mesmo relevo, uso e tipo de solo. Além de inserir dados climáticos no modelo, opções de cálculo dos processos hidrológicos (escoamento, infiltração e evapotranspiração) e aqueles relacionados com as práticas de gestão do solo (plantas, nutrientes, pesticidas, erosão e sedimentos), o SWAT permite a obtenção de relatórios da quantidade e qualidade da água em pontos de interesse da bacia, com avaliação de cenários de previsão (ARNOLD et al., 2012a; NEITSCH et al., 2011).

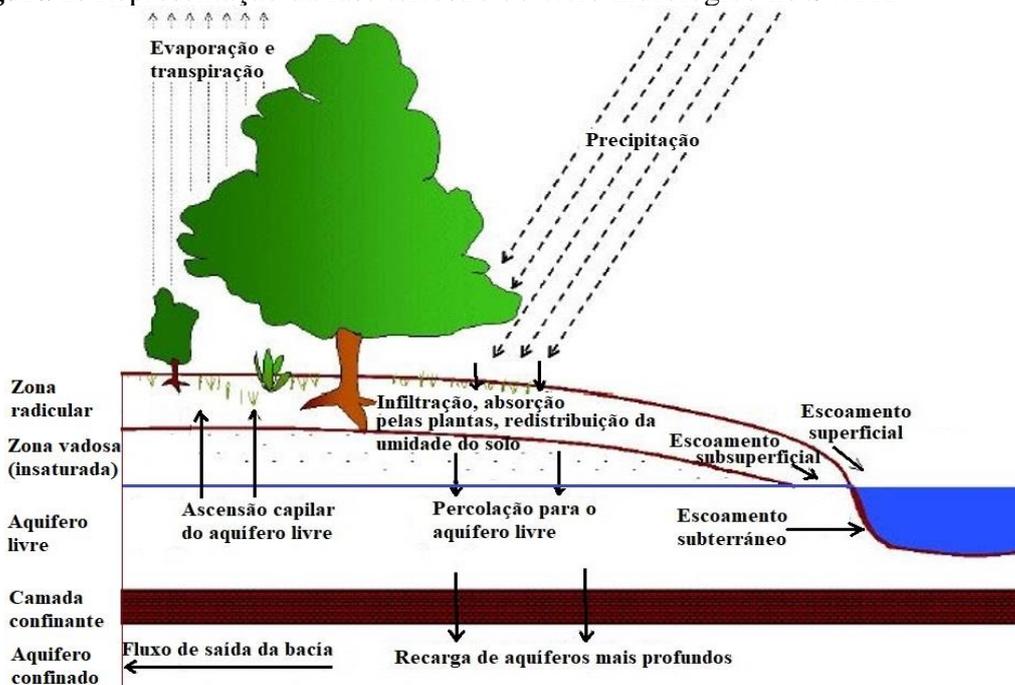
O desenvolvimento do SWAT se fundamentou na fusão dos modelos SWRRB1 (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) e ROTO (*Routing Outputs to Outlet*). Da mesma forma, o SWRRB1 vem da melhoria e combinação dos modelos CREAMS2 (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*), GLEAMS3 (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*) e EPIC4 (*Erosion-Productivity Impact Calculator*). O SWAT passou por diversos aperfeiçoamentos ao longo do tempo, originando diversas versões: SWAT 94.2, SWAT 96.2, SWAT 98.1, SWAT 99.2,

SWAT 2000, SWAT 2005, SWAT 2009 e SWAT 2012 (ARNOLD et al., 1998; ARNOLD et al., 2012b; GASSMAN et al., 2007; NEITSCH et al., 2011).

Na versão SWAT 2012, com sua interface ArcSWAT para Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), disponível para ArcGIS e QGIS, o seu módulo hidrológico apresenta eficiência computacional para a simulação dos processos hidrológicos em sua fase terrestre e propagação do escoamento (WINCHEL et al., 2013).

A simulação hidrológica com o modelo SWAT na bacia apresenta duas fases: terrestre e de propagação da água pela rede de canais até sua descarga na saída da bacia. Na fase terrestre (Figura 2), as chuvas são interceptadas nas árvores ou podem cair diretamente na superfície do solo e descer como escoamento, geram vazoes com sedimentos, nutrientes e pesticidas. A água infiltrada retida no solo pode ser utilizada pelas plantas, evapotranspirar, ser redistribuídas no solo e percolar (NEITSCH et al., 2011).

**Figura 2.** Representação da fase terrestre do ciclo hidrológico no SWAT.



Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2011).

O componente hidrológico do modelo realiza o balanço hídrico no nível de-URH, conforme a Equação 1 (Neitsch et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day,i} - Q_{surf,i} - E_{a,i} - W_{seep,i} - Q_{gw,i}) \quad (1)$$

Onde:  $SW_t$  é o conteúdo final de água no solo (mm);  $SW_o$  é o conteúdo inicial de água no dia  $i$  (mm);  $t$  é o tempo (dias);  $R_{day,i}$  é a lâmina precipitada no dia  $i$  (mm);  $Q_{surf,i}$  é o escoamento superficial direto no dia  $i$  (mm);  $E_{a,i}$  é a evapotranspiração no dia  $i$  (mm);  $W_{seep,i}$  é a lâmina que sai da camada inferior do perfil do solo no dia  $i$  (mm) e  $Q_{gw,i}$  é o escoamento subterrâneo no dia  $i$  (mm).

No SWAT, o escoamento superficial direto pode ser calculado pelos métodos Curva Número (CN) do *United States Soil Conservation Service* (SCS) (MCKEEVER, 1972), ou de infiltração de Green & Ampt (GREEN; AMPT, 1911) que precisa dados de precipitação subsidiários. A evapotranspiração é calculada separadamente para o solo e as plantas em função da evapotranspiração potencial, calculada pelo método de Penman-Monteith (PENMAN, 1956; MONTEITH, 1965), Hargreaves (HARGREAVES et al. 1985) ou Priestley-Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972). A propagação de vazões nos canais pode ser realizada pelos métodos do coeficiente de armazenamento variável (WILLIAMS, 1969) ou método de Muskingum-Cunge (BRAKENSIEK, 1967; OVERTON, 1966). A erosão é obtida pela Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS, 1975), cujos sedimentos podem ser transportados por meio do escoamento superficial e subsuperficial. Por fim, os pesticidas são modelados pela equação de GLEAMS (LEONARD et al., 1987; NEITSCH et al., 2011).

Inúmeros estudos têm aplicado o SWAT em pesquisas na América do Sul. Fernandez et al. (2020) propuseram uma modelagem ecohidrológica por meio de calibração multi-objetivo para a bacia andina do rio Vilcanota, no leste dos Andes centrais do Peru, tendo concluído que da precipitação na bacia (748 mm), o equivalente a 50 % é evapotranspirado e os 50 % restante originam o escoamento, que é predominantemente subterrâneo (índice de fluxo de base BFI = 0,77). Daneshvar et al. (2021) desenvolveram uma estratégia para modelagem hidrológica com o SWAT em regiões dos Andes peruanos, obtendo desempenho satisfatório do modelo, sendo o fluxo de base o principal componente do escoamento, e a evapotranspiração equivalente a 62 % da precipitação. Amorim et al. (2020), aplicaram os produtos de precipitação por satélite *Multi-satellite Precipitation Analysis* (TMPA) e *Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement* (IMERG) em uma bacia hidrográfica do bioma Cerrado brasileiro, com bom desempenho dos produtos de precipitação por satélite quando comparado a resultados obtidos a partir de dados monitorados em superfície. De Oliveira et al. (2019) avaliaram os impactos de mudanças climáticas simuladas por quatro modelos climáticos regionais (Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5, Eta-BESM e Eta-CANESM2) com cenários RCPs 4.5 e 8.5, na hidrologia (vazão e sedimentos) de uma bacia de cabeceira do bioma Cerrado brasileiro no Sudeste do Brasil, tendo prognosticado redução do escoamento, para o conjunto

médio dos modelos de 27,6 até 75% nos períodos (2007-2040, 2041-2070 e 2071-2099) ao longo do século XXI. Rodriguez et al. (2020), usando dois modelos climáticos regionais (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) sob os cenários RCPs 4.5 e 8.5, investigaram os impactos das mudanças climáticas durante o século XXI na hidrologia (vazões e secas) de três sub-bacias da bacia do rio Tocantins-Araguaia, localizada no bioma Cerrado brasileiro usando o modelo hidrológico SWAT, tendo prognosticado aumento da severidade das secas no século XXI.

### **2.3 Precipitação por satélite**

A precipitação é a variável chave que liga a atmosfera aos processos hidrológicos de superfície, com medições espaço-temporais baseadas em pluviômetros, radar ou satélite. Este último considerado emergente com estimativas por algoritmos, que requerem observações com maior frequência e detalhamento (HUFFMAN et al., 2007; TEEVAGARAPU et al., 2019).

O projeto TRMM (*Tropical Rainfall Measurement Mission*) foi concebido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e JAXA (*Japan's National Space Development Agency*). Operou entre 1997 e 2015 com o objetivo de monitoramento das chuvas nos trópicos. O projeto (TRMM) disponibiliza o produto de precipitação TMPA (*TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis*), com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  com cobertura dentro das latitudes  $37^\circ\text{N-S}$  (HOU et al., 2014; HUFFMAN et al., 2017).

Na etapa de finalização do TRMM houve o lançamento do projeto *Global Precipitation Measurement* (GPM), em fevereiro de 2014. O observatório *GPM Core Observatory* está implementado com sistemas avançados de radar de dupla frequência (DPR) e radiômetro gerador de imagens de micro-ondas (GMI) para observar com detalhamento a física da chuva e neve (HOU et al., 2014; HUFFMAN et al., 2020). O GPM foi desenvolvido pela NASA e JAXA, como continuação do TRMM, e possibilitou a melhoria das estimativas de precipitação com seus quatro componentes: o observatório central (*core observatory*), a constelação de satélites GPM, o sistema de processamento de precipitação e a equipe de validação de dados terrestres. O produto IMERG (HUFFMAN et al., 2015, 2017) consiste da unificação de três algoritmos: 1) TMPA, da NASA; 2) CPC Morphing – Kalman Filter (CMORPH-KF), da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*); e 3) *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Cloud Classification System* (PERSIANN-CCS), da Universidade da Califórnia. O algoritmo propicia a calibração, união e interpolação dos dados de precipitação estimada em diferentes comprimentos de onda por sensores a bordo de uma constelação internacional de satélites. São disponibilizadas as seguintes versões do produto IMERG: Multi satélite “antecipado” (IMERG - E), “tardio”

(IMERG - L) e “final” (IMERG - F), com atraso de 4 h, 14 h e 3,5 meses, respectivamente. Estão disponíveis dados horários, diários e mensais, com resolução espacial de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  dentro das latitudes  $68^\circ\text{N-S}$  (HUFFMAN et al., 2015, 2017, 2019).

Manz et al. (2016) avaliaram nos andes tropicais o produto de precipitação por satélite TRMM 2A25 em grade de 5 km no período 1998-2014 com pluviômetros em superfície. Os autores concluíram que o produto apresenta os mesmos padrões espaciais e sazonais orográficos das chuvas e subestima a precipitação mensal. Também compararam nos andes tropicais do Equador e Peru os produtos de precipitação IMERG e TMPA no período de 2014-2015 em duas escalas temporais (horárias e diárias) e espaciais ( $0,1^\circ$ ,  $0,25^\circ$ ), tendo concluído que o IMERG tem melhores resultados para as partes altas dos Andes.

Zubieta et al. (2017) constataram que na bacia Amazônica peruana-equatoriana no período 2014-2015 os produtos de precipitação IMERG, TMPA/V7 e TMPA/RT, superestimaram (bacia Ucayali) e subestimaram (bacia Huallaga) a precipitação mensal observada.

Derin et al. (2019) avaliaram para dez regiões montanhosas do mundo cinco produtos de precipitação por satélite (PPS): IMERG (versões 05B e 06B), *Climate Prediction Center Morphing Method* (CMORPH), *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) e *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* (MSWEP), no período 2014-2015. Em quase todas as regiões, os produtos IMERGV06B e GSMaPV07 mostraram maior aproximação com a precipitação anual dos pluviômetros. Nos andes peruanos, em elevações mais baixas ( $<1500$  m), todos os PPS superestimaram os pluviômetros (exceto GSMaPV07); em maiores elevações (1500-5000m) os produtos IMERG (V05 Final e V06B Final) mostraram maior aproximação com a precipitação anual dos pluviômetros.

### **2.3.1 Grade de precipitação PISCOp**

O produto grade de precipitação diário e mensal PISCOp V2.1 (*Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations*) foi desenvolvido pelo Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia do Peru - SENAMHI. O PISCOp tem disponível dados com resolução espacial de  $0,1^\circ$  nos formatos NetCDF no período de 1981 a 2016 e GeoTIFF de 1981 até o presente. Foi estruturado baseado em interpolação geoestatística e determinística, a partir de dados diários observados, dados de satélite TRMM 2A25 e CHIRP (*Climate Hazards Group Infrared Precipitation*) (AYBAR et al., 2020).

Pino-Vargas et al. (2022) avaliaram os dados do produto PISCO v2.0 (1981-2016) em uma bacia hidrográfica localizada no Peru, tendo encontrado subestimativa de 31% na

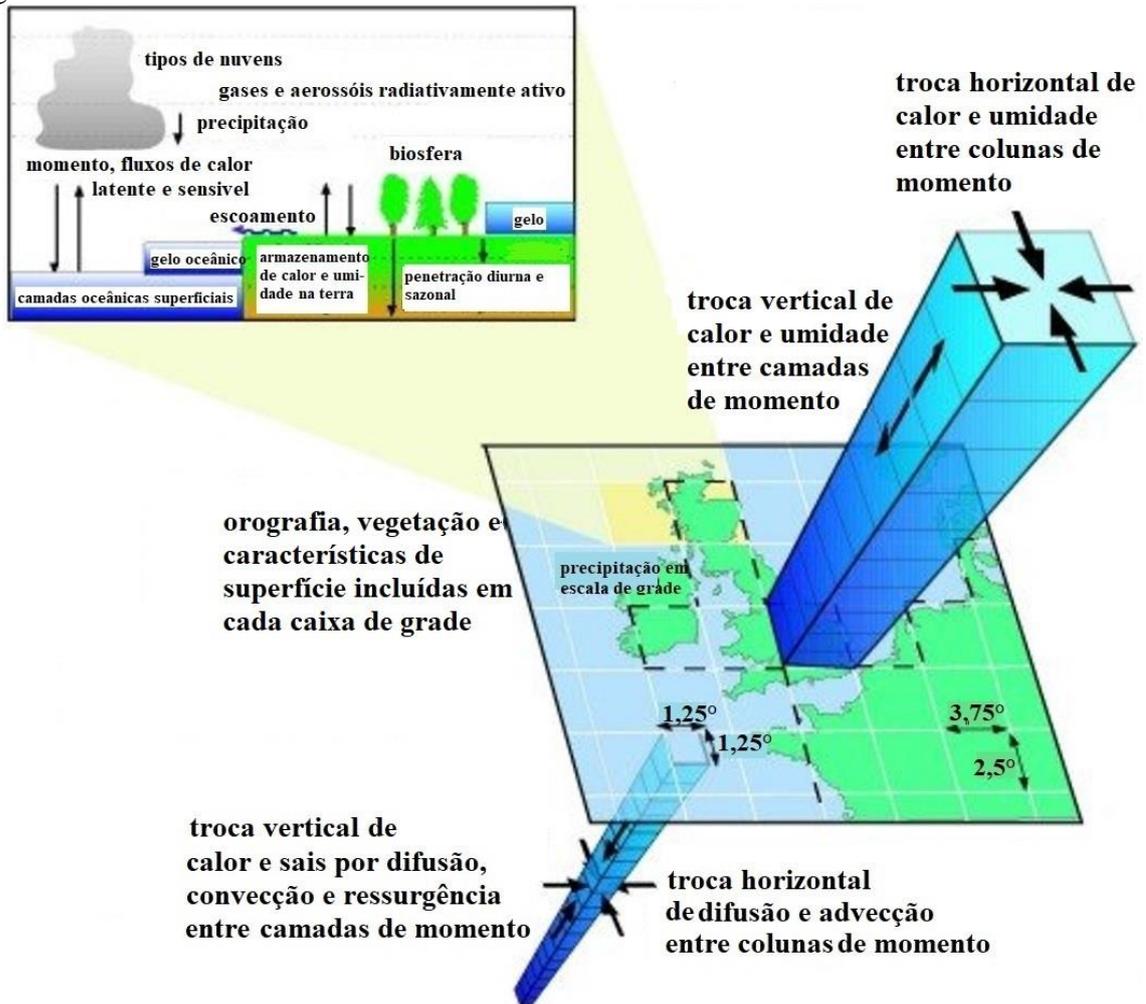
comparação com dados observacionais. Fernandez-Palomino et al. (2020) propuseram uma modelagem ecohidrológica com o SWAT para a bacia do rio Vilcanota-Cuzco, no sul dos Andes do Peru, utilizando dados de precipitação diários PISCOp do período de 1981 a 2016, obtendo resultados adequados para a modelagem.

#### **2.4 Modelos Climáticos Globais (MCGs) e Regionais (MCRs)**

Os Modelos Climáticos Globais (MCG) são ferramentas para simular a resposta do sistema climático global ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa, como consequência de cenários futuros de mudanças climáticas. O impacto das mudanças climáticas devido à influência antrópica pode afetar os componentes do ciclo hidrológico: evapotranspiração, precipitação, calotas polares, geleiras, nível da água nos oceanos, entre outros. (DE OLIVEIRA et al., 2017; SINGH, 2017).

Um modelo climático é uma representação em grade tridimensional do sistema climático terrestre, que resolve matematicamente por métodos numéricos a dinâmica da atmosfera, sendo utilizados para estudar a resposta do clima às mudanças naturais e antropogênicas. Os MCGs geralmente têm resolução horizontal de 100 - 300 km e resolução vertical de 20 - 40 camadas na atmosfera (Figura 3). Com essa resolução tão ampla, características locais como a topografia podem não ser capturadas adequadamente para a avaliação de mudanças climáticas e seus impactos na escala local (CEDEX 2010; CHU et al., 2014b; MOSS et al., 2010; VINER, 2002). Segundo Chou et al. (2014a), nesta situação podem ser adotados Modelos Climáticos Regionais (MCRs) para realizar a regionalização (*downscaling*) dos dados gerados pelos MCGs, possibilitando estudos de impactos climáticos em áreas menores.

Figura 3. Características de um MCG.



Fonte: Adaptado de Viner (2002).

#### 2.4.1 Cenários de mudanças climáticas futuras

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram o IPCC em 1988 para abordar as mudanças climáticas e suas consequências, tendo avaliado e produzido informações científicas em relatórios (1990, 1995, 2001, 2007, 2013 e 2021) (IPCC, 2007, 2013, 2021).

No Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, em 2013, confirma-se com 95% de certeza que o aquecimento global desde meados do século XX é produto de atividades antropogênicas. Também no AR5, de acordo com modelos econômicos, são avaliadas as projeções de quatro cenários de forçamento radiativo (*Representative Concentration Pathways* - RCPs), para fins de modelagem climática futura com modelos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) até o ano

2100. Os cenários são: RCPs 2.6, 4.5, 6.0 e 8.5, correspondendo a uma projeção de aumento do efeito estufa (do mais otimista ao mais pessimista) de 2,6, 4,5, 6 e 8,5  $W.m^{-2}$ , respectivamente (IPCC, 2013; CHOU et al., 2014b).

Os cenários futuros de forçamento radiativo ajudam a avaliar as incertezas sobre as contribuições humanas para as mudanças climáticas, a resposta do sistema terrestre às atividades humanas, os impactos de uma série de climas futuros e as implicações de diferentes abordagens para a mitigação e adaptação (MOSS et al., 2010).

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, o aumento da temperatura global devido às mudanças climáticas por ações antrópicas está se intensificando rapidamente, tendo ocorrido na última década (2010-2019) as maiores emissões de carbono registradas. De acordo com o referido relatório, antes de 2040 a temperatura global pode atingir aquecimento de 1,5°C, cabendo o desenvolvimento de políticas públicas que limitem as emissões de gases de efeito estufa com o objetivo de se buscar um cenário climático menos adverso (IPCC, 2021).

Chou et al. (2014a) avaliaram o clima presente (1961-1990) para a América do Sul, América Central e Caribe, simulado pelo MCR Eta acoplado aos MCGs HadGEM2-ES, BESM e MIROC5 em comparação com o banco de dados interpolado a partir de dados observados denominado *Climatic Research Unit* (CRU), com resolução 0,5° (Mitchell & Jones, 2005). Foi verificado subestimativa de temperaturas, mostrando o modelo Eta-MIROC5 melhor simulação e correlação espacial. Para a precipitação foram obtidas subestimativas em grandes áreas do continente no verão austral (dezembro-janeiro-fevereiro). Os autores concluíram, que em geral as simulações do modelo Eta reproduzem o clima da América do Sul.

Chou et al. (2014b) avaliaram as mudanças climáticas para a América do Sul em três períodos de tempo do século XXI (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100), a partir dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Os autores concluíram que o modelo Eta/HadGEM2-ES apresentou maior sensibilidade ao aumento dos gases do efeito estufa, tendo simulado impactos mais severos comparado ao Eta-MIROC5, sobretudo para o cenário RCP 8.5. Foi prognosticado no continente maior aquecimento para o século XXI e redução da precipitação para o final do século com os dois modelos climáticos.

Urrutia e Vuille (2009) estudaram, para o final do século XXI (2071-2100), a variabilidade espaço-temporal da precipitação e temperatura nos andes da América do Sul. Os autores utilizaram o MCR PRECIS (*Providing REgional Climate for Impact Studies*), associado ao HadAM3 (*Hadley Center Atmospheric Model* versão 3), nos cenários de emissão A2 (cenário pessimista) e B2 (cenário otimista). As projeções indicaram aquecimento entre 2 e 7 °C segundo a localização e cenário considerado nos andes da América do Sul. Para o cenário A2 foi

projetado maior aquecimento que para o cenário B2. Nos Andes com altitudes mais elevadas a precipitação foi simulada com aumento ao norte da latitude 12 °S e redução ao sul da latitude 12° S.

Andrés et al. (2014) avaliaram as mudanças climáticas futuras (2010-2100) na bacia hidrográfica do rio Vilcanota, localizada nos andes do sul do Peru. Foram utilizados três modelos climáticos: BCM2 (*Bjerkness Center for Climate Research, Noruega*), CSMK3 (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO, Atmospheric Research, Australia*) e MIHR (*Center for Climate System Research, University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change, JAMSTEC, Japan*) com uma resolução inferior a 2,0° e os cenários futuros A1B e B1 do IPCC AR4. De acordo com os resultados, foi constatado que poderá haver redução da precipitação e aumento das temperaturas no século XXI, com resultados mais severos para o cenário A1B, quando comparado ao cenário B1.

## **2.5 Impactos hidrológicos associados a cenários de mudanças climáticas**

No contexto da simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, na fase de previsão, o modelo hidrológico é alimentado com cenários simulados por modelos climáticos, possibilitando prognosticar os possíveis impactos dos cenários climáticos nos recursos hídricos (ALVARENGA et al., 2018; DE OLIVEIRA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2020).

Alvarenga et al. (2018) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na hidrologia de uma pequena bacia em Minas Gerais, Brasil, no período 2011-2099, nos cenários RCP 4.5 e 8.5, projetados pelo modelo Eta-HadGEM2-ES, com resolução espacial de 5 km. Os resultados indicaram reduções mais severas nas vazões para o cenário RCP 4.5 no período de 2011-2040, e para o RCP 8.5 no período de 2071-2099, com impactos sobre a disponibilidade de água.

De Oliveira et al. (2019) avaliaram os impactos de mudanças climáticas para o século XXI na hidrologia da bacia do rio Alto Paranaíba, localizada no sudeste do Brasil. Foram abordados os cenários RCPs 4.5 e 8.5 projetados pelos modelos HadGEM2-ES, MIROC5, BESM e CANESM2 com *downscaling* com o MCR Eta. Os resultados do conjunto médio dos modelos foram de aumento das temperaturas máxima e mínima de 2 °C para o RCP 4.5. Para o RCP 8.5 foi projetado aumento de 3 e 3,1 °C nas temperaturas máxima e mínima, respectivamente. Com relação à precipitação, foram projetadas reduções de 13,5 e 14,5 % para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Os impactos hidrológicos futuros para o conjunto médio

dos modelos foram de redução das vazões, com variações mensais de -27,6 a -75 %, podendo afetar a disponibilidade de água no bioma Cerrado brasileiro.

Rodrigues et al. (2020) investigaram os impactos das mudanças climáticas futuras na hidrologia de três sub-bacias do rio Tocantins-Araguaia, no Cerrado brasileiro. Foram utilizados os modelos climáticos HadGEM2-ES e MIROC5 com *downscaling* pelo MCR Eta para os cenários RCPs 4.5 e 8.5. Os resultados indicaram que a vazão mensal no século XXI poderá diminuir em ambos os cenários, com resultados mais severos para o cenário RCP 8.5 e para o modelo Eta/MIROC5.

### 3. CONSIDERACOES GERAIS

A presente tese objetiva a modelagem hidrológica e a avaliação dos possíveis impactos de mudanças climáticas futuras nos recursos hídricos superficiais de uma bacia hidrográfica localizada nos Andes do Peru, cabeceira da bacia amazônica, região considerada *hotspot* de biodiversidade dos Andes Tropicais. Especificamente, é estudada a Bacia Hidrográfica do Rio Chicllarazo (BHRC), que é a principal fonte hídrica do Sistema Hidráulico Cachi e fornece água para o abastecimento público da cidade de Ayacucho, irrigação, produção de energia, entre outras finalidades.

O desenvolvimento de pesquisas hidrológicas na BHRC tem por limitação a escassez de dados hidrometeorológicos observacionais, motivando a pesquisa por fontes alternativas, tais como a precipitação por satélite. Ademais, a presente tese objetiva analisar os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 e seus possíveis impactos sobre os recursos hídricos. Essa análise visa disponibilizar informação para a gestão de recursos hídricos na região de cabeceira da bacia amazônica e identificar prioridades para o desenvolvimento de pesquisas futuras na região.

## REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 07, n. 02, p. 355–366, 2018.
- AMORIM, J. S. et al. Evaluation of Satellite Precipitation Products for Hydrological Modeling in the Brazilian Cerrado Biome. **Water**, p. 1–19, 2020.
- ANA - AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (Perú). **Inventario de Glaciares del Peru**. Huaraz; 397p, 2014.
- ARNOLD, J. et al. **Soil & Water Assessment Tool**, Texas Water Resources Institute-TR-439. 2012a.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. **American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.
- ARNOLD, J. G. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012b.
- AYBAR, C. et al. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. **Hydrological Sciences Journal**, 65(5), 770–785.
- BRAKENSIEK, D. L. Kinematic Flood Routing. **Transactions of the ASABE**, v. 10, n. 3, p. 340–343, 1967.
- CAMPOS, N. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. ASTEF, Fortaleza, 169p, 2009.
- CEDEX, **Centro de Estudios y Experimentación de Obras Publicas. Estudio de los impactos del cambio climatico en los recursos hidricos y las masas de agua. Ficha 1: Evaluacion del impacto del cambio climatico en los recursos hidricos en regimen natural**, 42-207-1-001, Madrid, 714p, 2010.
- CEPF, **Pronaturaleza, Fundación Ecológica Arcoiris, & RIT. Perfil de Ecosistema del Hotspot de Biodiversidad de los Andes Tropicales**. 60p, 2021.
- CHOU, S. C. et al. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 438–454, 2014a.
- CHOU, S. C. et al. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 03, n. 05, p. 512–527, 2014b.
- COMUNIDAD ANDINA. **Ecosistemas del Norte y del Centro**. Lima, 100p, 2009.
- DE OLIVEIRA, V. A. et al. Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 15, p. 5005–5023, 2017.
- DE OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment

load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, n. October 2018, p. 20–31, 2019.

DERIN, Y. et al. Evaluation of GPM-era Global Satellite Precipitation Products over Multiple Complex Terrain Regions. **Remote Sensing**, v. 11, n. 24, 2019.

DEVI, G. K. et al. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, p. 1001–1007. 2015.

FERNANDEZ-PALOMINO, C. A. et al. Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. **Hydrological Sciences Journal**, v. 00, n. 00, p. 1–16, 2020.

FERNÁNDEZ, T. **Los Andes y América**. Arq, n. 71, p. 16–19, 2009.

GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

HARGREAVES, G. L. et al. Agricultural Benefits for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, n. 2, p. 113–124, 1985.

HOU, A. Y. et al. The global precipitation measurement mission. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 5, p. 701–722, 2014.

HUFFMAN, G. J. et al. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, 2007.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. **Day 1 IMERG Final Run Release Notes**. n. January, p. 1–9, 2015.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J. **March 2017**. v. 1, n. 1, p. 1–54, 2017.

HUFFMAN, G. J. et al. **Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG)**, 2019.

HUFFMAN, G. J. et al. Integrated Multi-satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG). **Advances in Global Change Research**, v. 67, p. 343–353, 2020.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>, 2013.

IPCC INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2021.

LEONARD, R. A.; KNISEL, W. G.; STILL, D. A. GLEAMS: Groundwater Loading Effects

of Agricultural Management Systems. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1403–1418, 1987.

MANZ, B. et al. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2016.

MITCHELL, T. D., JONES, P. D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. **International Journal of Climatology**, v. 25, n. 6, p. 693–712. 2005.

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

NEITSCH, S. et al. **Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation** Version 2009. Texas Water Resources Institute. 2011.

OVERTON, D. E. Muskingum flood routing of upland streamflow. **Journal of Hydrology**, v. 4, p. 185–200, 1966.

PINO-VARGAS, E. et al. Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. **Hydrology**, v. 9, n. 1, p. 1–36, 2022.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, n. 2, p. 81–92, 1972.

RODRIGUES, J. A. M. et al. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2511–2526, 2020.

SINGH, V.P. **Handbook of Applied Hydrology**. Second Edition. McGraw-Hill Education; p. 370, 873, 2017.

SOROOSHIAN, S. et al. Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas: An introduction to the workshop. **Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas**, 9780521869(2000), p. 1–20, 2008.

TEEGAVARAPU, R. S. V.; SALAS, J. D.; STEDINGER, J. R. **Statistical Analysis of Hydrologic Variables** (EWRI ASCE American Society of Civil Engineers, ed.). 2019.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. Ed. Porto Alegre; ABRH, 678 p., 2005.

URRUTIA, R.; VUILLE, M. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 114, n. 2, p. 1–15. 2009.

VAL, A. L. **Amazônia: recursos hídricos e sustentabilidade**. São Paulo, Instituto de Botânica, 224 p., 2010.

VINER, D. **Technical guidelines, fact sheets and other supporting material**.

**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).** Disponível em: <[http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)>, 2002

WINCHELL, M. et al. **ArcSwat Interface for Swat 2012 User's Guide.** Texas Agrilife Research, United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 2013.

WILLIAMS, J.R. **Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients.** Transactions of the ASAE, v. 12, n. 1, p. 100–103. 1969.

WILLIAMS, J. R. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor.** ARS-S, 1975.

## SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

### **ARTIGO 1 - Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru, Amazon**

Leonidas Arias Baltazar, Marcelo Ribeiro Viola, Carlos Rogério de Mello, Rubens Junqueira,

Jhones da Silva Amorim

Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brazil. ORCID: 0000-0001-6258-250X, 0000-0002-3910-0987, 0000-0002-6033-5342, 0000-0002-6104-5507, 0000-0001-7012-9465. E-mail: leonidas.arias@unsch.edu.pe (corresponding author), marcelo.viola@ufla.br, crmello@ufla.br, rubensjunqueira@live.com, jhonesamorim@gmail.com.

Artigo publicado no periódico “*Journal of South American Earth Sciences*” – ISSN: 0895-9811, sendo apresentado segundo normas de publicação do mesmo.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104151>

#### **ABSTRACT**

The Amazon basin is presented in eight South American countries. It is a shelter of great biodiversity from its source in the Andes to its mouth in the Atlantic Ocean. Hydrological research in its headwater region in the Peruvian Andes is affected by the low availability of observed data. In this context, evaluating the applicability of remote sensing hydrological data is an essential alternative for providing background for water resource management. The objectives of this study were i) to evaluate the quality of the Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) satellite precipitation, ii) to perform

hydrological modeling of the Chicllarazo River Basin (CRB) using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model based in three precipitation data (observed (OP), satellite (IMERG) and satellite with bias correction (IMERG\*)), and iii) to study the hydrological processes in the CRB's sub-basins. The evaluation results of the IMERG dataset based on observed precipitation data showed an underestimation of 25.1%. Comparing the IMERG and IMERG\* datasets, correlation coefficients ( $r$ ) of 0.79 and 0.80, root means square errors (RMSEs) of 55.4 and 49.3 mm, and Kling-Gupta efficiency coefficients (KGEs) of 0.66 and 0.76 were observed, respectively. These results indicate that bias correction in the IMERG data before performing hydrological modeling at the CRB is relevant. In the hydrological modeling, better results were obtained with IMERG\*, according to NSE, Pbias, and KGE. The evaluation of the hydrological modeling results in sub-basins was found to be feasible for the study of the hydrological behavior in scarcely monitored regions, like Andes Cordillera.

**Keywords:** Amazon river basin, Chicllarazo River, SWAT, IMERG

## 1. INTRODUCTION

The Amazon basin is the largest in the world. It drains more than 6 million km<sup>2</sup>, flows equivalent to 15-20% of the global surface freshwater that reaches the oceans, and is strategic for mitigating global climate change (SINGH, 2017). The waters of the Amazon River, from the Andes to the Atlantic Ocean, are under international environmental law since the basin covers eight countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, Ecuador, Venezuela, Guyana, and Suriname), requiring adequate research regarding water use and conservation (VAL et al., 2010).

The tropical Andes of South America, a region with mountainous and complex topography, is part of the Andes Cordillera, sheltering the Amazon River springs. This region covers an area of 1,542,644 km<sup>2</sup> and encompasses more than 100 heterogeneous ecosystems with high biological diversity (45,000 vascular plants and 3,400 vertebrate species, 45% of

which are endemic) in only 1% of the continental area of the Earth (JOSSE et al., 2009). Occupation by several pre-Hispanic cultures has occurred in the region for more than 8,000 years. Another relevant aspect is the importance of water resources, which supply cities like Bogotá (Colombia), Quito (Ecuador), and La Paz (Bolivia) and others with rich historical heritage such as Cuzco (Peru) (JOSSE et al., 2009).

The Chicllarazo River is located at the head of the Amazon River basin in the eastern Central Andes of Peru in the Western Cordillera. The Chicllarazo River flows along with the Cachi, Mantaro, Apurimac, Ene, Tambo, and Ucayali rivers. The Amazon River originates from the confluence between the Ucayali and Marañon rivers in Peru. The Chicllarazo River is part of the Cachi Hydraulic System (CHS), built between 1987 and 2002, which contains hydraulic structures for water uptake, transportation, hydrological regulation, and hydroelectricity. The CHS provides water for multiple purposes: irrigation of 14,500 hectares, supply the instream flow and the city of Ayacucho, with a population of 224,000 inhabitants, and generation of 1.8 MW of hydropower for rural electrification in the higher zone of the system.

Basin scale hydrological models can simulate, analyze, explain, and predict hydrological behavior and related processes (TUCCI, 2005; CALDEIRA et al., 2019). For the application of the model, the steps of sensitivity analysis, calibration, and validation are applied (HER & CHAUBEY, 2015; CALDEIRA et al., 2019). These models make it possible to study the hydrological cycle and develop predictive studies addressing forecast and frequency of floods, hydraulic structures design, exploratory scenarios of land use and climate change (BESKOW et al., 2016), analysis of regions with a low density of gauging stations (LLAUCA et al., 2021; DANESHVAR et al., 2021), water balance (AYIVI and JHA, 2018), and others, which assist in decision-making for water resource management (BESKOW et al., 2016).

Precipitation is the meteorological variable that connects the atmosphere to the surface hydrological processes, with spatiotemporal measurements based on rain gauges, radar, or

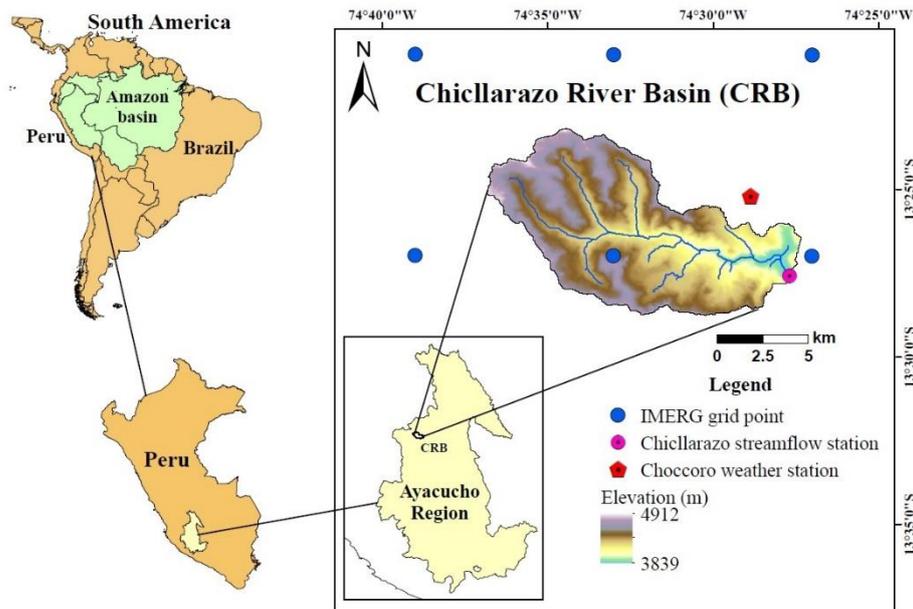
satellites (TEEGAVARAPU et al., 2019). In the Chicllarazo River Basin (CRB), the density of surface rain gauges is low, which affects the quality of hydrological research in the region. Thus, hydrometeorological variables estimated by orbital satellites are an alternative to calibrating semi conceptual hydrological models. With the launch of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission in February 2014, continuing the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), there were significant advances in satellite precipitation estimates. The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) result from an improved algorithm that mainly uses GPM data and enhances several other satellites. Additionally, IMERG has high spatial ( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ) and temporal (30') resolution (HUFFMAN et al., 2015, 2017,2019).

In this context, the objective of this study was to i) evaluate the quality of the IMERG satellite precipitation product based on observational data, ii) perform hydrological modeling of the CRB using the SWAT hydrological model based in three precipitation data (OP, IMERG and IMERG\*), and iii) to study the hydrological processes of the CRB's sub-basins based on distributed hydrological simulation. We expect to provide guiding technical developments for the CRB and water resources management in the headwater region of the Amazon basin in the tropical Andes.

## **2. DATA AND METHODS**

### **2.1. Study area**

The CRB is located in the Andes Cordillera, in the headwater region of the Amazon basin, in Ayacucho, Peru. Considering the Chicllarazo gauging station, CRB accounts for an area of 98.84 km<sup>2</sup> (Figure 1).



**Fig. 1.** Location of the CRB, Choccoro weather station, Chicllarazo streamflow station, ALOS PALSAR Digital Elevation Model (<https://search.asf.alaska.edu/>), and grid point of the IMERG satellite precipitation product.

The climate of the CRB is Cwb according to the Köppen classification, characterized as a subtropical highland climate with dry winters (KOTTEK et al., 2006), with mean maximum monthly temperature in November ( $14.6^{\circ}$ ) and mean minimum monthly temperature in July and August ( $-1.9^{\circ}\text{C}$ ). The mean annual precipitation is 1,039 mm, with 80% concentrated between October and March. The altitude varies between 3,839 and 4,912 m, with a mean of 4,429 m.

## 2.2. Precipitation data

Considering the low availability of observed rainfall data in CRB, since only the Choccoro meteorological station exists, and it is located far 4,061m, data from the IMERG satellite precipitation product was obtained (<https://disc.gsfc.nasa.gov>). The IMERG product (HUFFMAN et al., 2015, 2017) is obtained by a unified algorithm that considers data from an international satellite constellation. The final product for research purposes is validated with

monthly measurements from rain gauges. Daily data from the GPM IMERG Final Precipitation L3 version 6 product, with a  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  spatial resolution, were used in the present study.

### 2.2.1 Satellite precipitation evaluation using observational data

To validate the IMERG product for application in the CRB, the precipitation was analyzed following the point-to-pixel method (NOGUEIRA et al., 2018), taking as reference the data observed at the Choccoro weather station. The Pearson linear correlation coefficient ( $r$ ), percentage bias (Pbias), root mean square error (RMSE), and Kling-Gupta efficiency coefficient (KGE) were calculated according to Equations 1, 2, 3, and 4, respectively. The correlation coefficient shows the magnitude and direction of the linear correlation between the observed and estimated values. The closer it is to 1 (in absolute value), the stronger the correlation. A Pbias and RMSE close to zero indicate reasonable quality estimates. The KGE, in turn, is considered a rigorous statistic because it takes into account the correlation, variability, and bias, and the closer it is to 1, the better the result of the simulation (GUPTA et al., 2009; KNOBEN et al., 2019).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \times (E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \times \sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}} \quad (1)$$

$$\text{Pbias} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (Y - 1)^2} \quad (4)$$

where  $O$  and  $E$  are the observed and estimated data, respectively;  $\bar{O}$  and  $\bar{E}$  are the means of the observed and estimated data, respectively;  $i$  refers to the position of the data in the series;  $n$  is the size of the series;  $\beta = \bar{E}/\bar{O}$ ; and  $Y = (\sigma_e/\bar{E})/(\sigma_o/\bar{O})$ , in which  $\sigma_e$  and  $\sigma_o$  refer to the standard deviation of the estimated and observed variables, respectively.

### 2.2.2 Bias correction of IMERG data

Satellite precipitation products can be corrected based on rain gauge measurements by bias correction methods. This approach improves the performance of the satellite precipitation data (WEI et al., 2022), contributing to the quality of streamflow simulation in data-scarce basins (ZHOU et al., 2022).

The bias correction of the IMERG daily precipitation data was performed using the linear scaling method according to Lenderink et al. (2007) and Teutschbein and Seibert (2012). The technique consists of removing the bias from the data estimated from monthly correction factors (Equation 5). The data observed at the Choccoro weather station were used as a reference, and the product with bias correction was called IMERG\*.

$$\text{IMERG}^* = \text{IMERG} \cdot \frac{\overline{\text{OP}}_{\text{ref}}}{\overline{\text{IMERG}}_{\text{ref}}} \quad (5)$$

where IMERG\* is the daily satellite precipitation data with bias correction, IMERG is the daily satellite precipitation data,  $\overline{\text{OP}}_{\text{ref}}$  is the mean monthly precipitation data observed at the Choccoro weather station in the reference period, and  $\overline{\text{IMERG}}_{\text{ref}}$  is the mean monthly satellite precipitation data for the reference period.

## 2.3. Hydrological modeling

### 2.3.1 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

One of the main rainfall-runoff hydrological models used is the SWAT, which consists of a semi-conceptual hydrological model distributed by sub-basins using the concept of hydrological response units (HRUs) (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011). SWAT has been applied in several global studies, including watersheds in different ecosystems in South America, with satisfactory results (FERNANDEZ-PALOMINO et al., 2020).

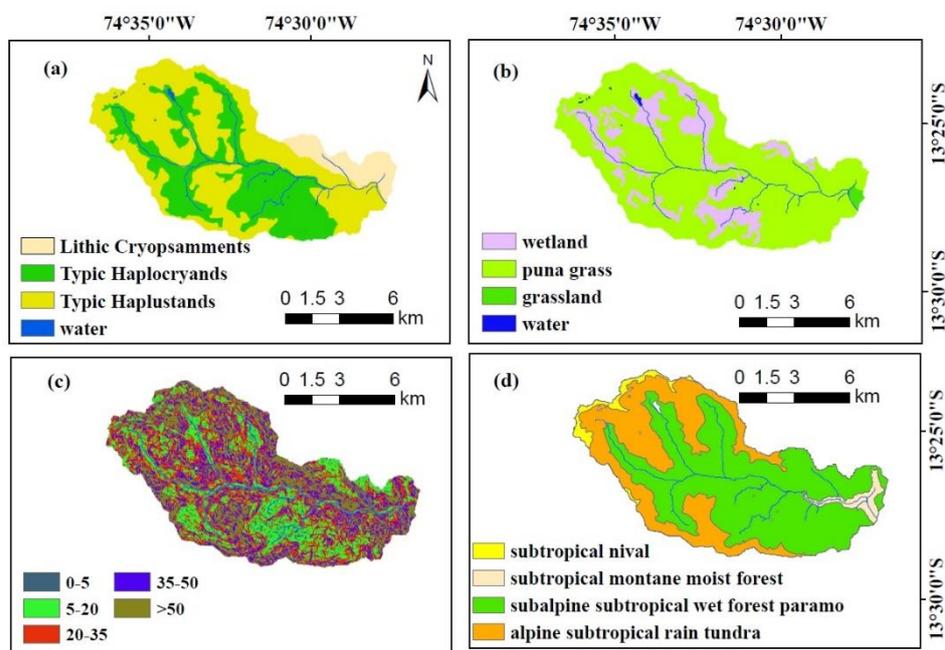
The hydrological component of the model performs water balancing at the HRU level according to Equation 6:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day},i} - Q_{\text{surf},i} - E_{a,i} - W_{\text{seep},i} - Q_{\text{gw},i}) \quad (6)$$

where  $SW_t$  is the final soil water content (mm);  $SW_0$  is the initial water content on day  $i$  (mm);  $t$  is the time interval (days);  $R_{\text{day},i}$  is the amount of precipitation on day  $i$  (mm);  $Q_{\text{surf},i}$  is the direct surface runoff on day  $i$  (mm);  $E_{a,i}$  is the evapotranspiration on day  $i$  (mm);  $W_{\text{seep},i}$  is the total amount of water exiting the bottom of the soil profile on day  $i$  (mm); and  $Q_{\text{gw},i}$  is the amount of groundwater on day  $i$  (mm).

### 2.3.2 Data for hydrological modeling

The Advanced Land Observing Satellite-1 Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (ALOS PALSAR) Digital Elevation Model (DEM) was used for basin delineation and relief characterization, with a spatial resolution of 12.5 m (<https://search.asf.alaska.edu/>) (Figure 1). From the DEM, a slope map with classes of 0-5%, 5-20%, 20-35%, 35-50%, and >50% was generated (Figure 2c).



**Fig. 2.** Soil types (a), land use (b), slope (%) (c), and ecological life zones (d) maps for the Chicllarazo River Basin.

The descriptions of the soil types, land uses, and ecological life zones were obtained from the Ministry of the Environment of Peru (<https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>). According to the Physiography, Soil, and Major Use Capacity Thematic Report (GRA, 2012a) and the Soil Taxonomy classification, the predominant soil classes in CRB are Entisols (sub-order Psamments, main group Cryopsamments, and sub-group Lithic Cryopsamments, 8%), Andisols (sub-order Cryands, main group Haplocryands, and sub-group Typic Haplocryands, 38%), and Andisols (sub-order Ustands, main group Haplustands, and sub-group Typic Haplustands, 54%) (Figure 2a). Andisols are from volcanic parent material (SOIL SURVEY STAFF, 1999) and have properties that allow great water storage (TOBON et al., 2010). Entisols have little horizon development (SOIL SURVEY STAFF, 1999). The parameterization of the soils was extracted from studies available for the region (GRA, 2012a) and the Soil Water Characteristics-Hydraulic Properties Calculator platform (SAXTON and RAWLS, 2006).

According to the Vegetation Cover Thematic Report (GRA, 2012b), the land use map for the CRB has the following classes: 19% wetland, 80% “puna” grass, and 1% grassland (Figure 2b). Regarding the ecological life zones, there are four zones in the CRB: subtropical nival, subtropical montane rainforest, subalpine subtropical wet forest paramo, and alpine subtropical rain tundra, which occupy 3, 3, 62, and 32% of the total area of the basin, respectively (Figure 2d).

The meteorological datasets consist of daily data from 2007 to 2016 from the Chocorro weather station (precipitation, maximum temperature, minimum temperature, insolation, relative humidity, and wind speed). The daily streamflow data were obtained from the Chicllarazo fluviometric gauging station. The aforementioned hydrometeorological data are from the Cachi River Irrigation hydrometeorological network (GRA, 2019) (Figure 1). The datasets used for hydrological modeling is summarized in Table 1.

Table 1. Data type, resolution, and description source for hydrological modeling

Data type	Resolution	Description/source
<i>Topography</i>	<i>12,5m</i>	<i>ALOS PALSAR Digital Elevation Model/ <a href="https://search.asf.alaska.edu/">https://search.asf.alaska.edu/</a></i>
<i>Land cover</i>	<i>1:100 000</i>	<i>Ministry of the Environment of Peru/ <a href="https://geoservidor.minam.gob.pe/zee133aprobadas/Ayacucho">https://geoservidor.minam.gob.pe/zee133aprobadas/Ayacucho</a></i>
<i>Soil types</i>	<i>1:100 000</i>	<i>Ministry of the Environment of Peru/ <a href="https://geoservidor.minam.gob.pe/zee133aprobadas/ayacucho/">https://geoservidor.minam.gob.pe/zee133aprobadas/ayacucho/</a></i>
<i>Soil properties</i>	<i>1:100 000</i>	<i>Physiography, soil and greater use capacity- Soil/GRA, 2012a and Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator /Saxton e Rawls, 2006</i>
<i>Precipitation, maximum temperature, minimum temperature, insolation, relative humidity, and wind speed</i>	<i>Daily (2007-2016)</i>	<i>Choccoro Weather Station/GRA, 2019</i>
<i>IMERG precipitation</i>	<i>0,1°</i>	<i>IMERG satellite precipitation product/<a href="https://disc.gsfc.nasa.gov">https://disc.gsfc.nasa.gov</a></i>
<i>Streamflow</i>	<i>Daily (2007-2016)</i>	<i>Chicllarazo Streamflow Station/GRA, 2019</i>

### 2.3.3 Model setup, calibration and validation

The direct surface runoff was calculated by the curve number (CN) method from the United States Soil Conservation Service (SCS) (MCKEEVER, 1972), the evapotranspiration was calculated by the Penman-Monteith method (PENMAN, 1956; MONTEITH, 1965), and the flow routed through the channels was calculated by the variable storage coefficient method

(WILLIAMS, 1969). The spatial discretization of the CRB and the structuring of the SWAT hydrological model were performed with the software ArcSWAT 2012 (<https://swat.tamu.edu/software/arcsbat>). The calibration and validation were performed using SWAT-CUP 2019 v 5.2.1.1 (<https://www.2w2e.com/home/SwatCup>).

The evaluated parameters and the range of variation (Table 2) were defined based on the studies of Fernandez-Palomino et al. (2022) and Daneshvar et al. (2021), which applied the SWAT model to analyze the hydrology of headwaters in the Andes of southern Peru. The calibration procedure was performed with one iteration, with 500 simulations, using the Sequential Uncertainty Fitting version 2 (SUFI2) algorithm and the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) coefficient as the objective function. Due to uncertainties about the initial conditions of the hydrological variables, a period between 2007 and 2008 was adopted for the model's warm-up. For model calibration, observed precipitation data (OP) from the period between 2009 and 2012 was used, while the period between 2013 and 2016 was adopted for validation. The calibrated model was then used to validate the performance of IMERG and IMERG\* precipitation products for hydrological modeling from 2009 to 2016 (JUNQUEIRA et al. 2022). Further details regarding SWAT parameters calibration, see Neitsch et al. (2011), Abbaspour (2015), and Daggupati et al. (2015).

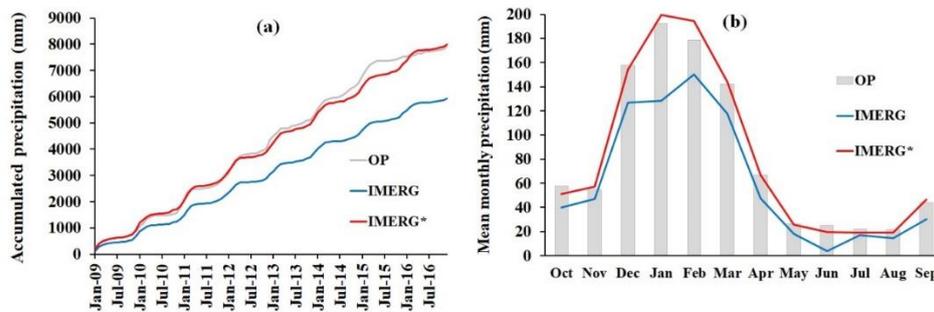
The results of the hydrological simulation were analyzed using the following accuracy statistics: Pbias, KGE and NSE, according to Equations 2, 4 and 7, respectively. The NSE is a relative measure of the residual variance between the observed and simulated values about the variance of the observed data (with an excellent fit value equal to 1). According to Moriasi et al. (2007), the performance of the simulated monthly streamflow is classified as “very good” if  $0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$  and  $\text{Pbias} < \pm 10\%$ ; “good” if  $0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$  and  $\pm 10\% \leq \text{Pbias} < \pm 15\%$ ; “satisfactory” if  $0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$  and  $\pm 15\% \leq \text{Pbias} < \pm 25\%$ ; and “unsatisfactory” if  $\text{NSE} \leq 0.50$  and  $\text{Pbias} \geq \pm 25\%$ .

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (7)$$

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Evaluation of precipitation data estimated by IMERG

Figure 3 shows the cumulative rainfall and the monthly mean rainfall for the CRB in the period 2009 - 2016. IMERG underestimates the observed data by 25.1% (Figure 3a). Zubieta et al. (2017) found that in the Huallaga River sub-basin in Chazuta (Andean-Amazon basin), the IMERG, TMPA/3B42/V7, and TMPA/RT precipitation products underestimated the observed rainfall by 30.7, 28.2, and 26.2%, respectively. Espinoza et al. (2015) and Chavez and Takahashi (2017) found for the central Andes that the TRMM/PR 2A25 and 2A23 satellite precipitation products underestimated the observed precipitation by 40 and 50%, respectively. The results above agree with those obtained in the present study, showing a trend of underestimation of satellite precipitation products for the Andean-Amazon region.



**Fig. 3.** Cumulative rainfall (a) and average monthly rainfall (b) for the period from 2009 to 2016 based on observed precipitation at the Choccoro weather station (OP), IMERG satellite precipitation, and IMERG satellite precipitation after bias correction (IMERG\*).

Regarding the temporal representation of monthly precipitation, it is observed that although IMERG reproduces the seasonality, there is an underestimation of up to 36% in the dry months (April - September) and up to 22% in the wet months (October - March) (Figure 3b). According to Derin et al. (2016), satellite precipitation products in terrains with complex relief of the Peruvian Andes, underestimate in the wet season and overestimate in the dry

season. Additionally, according to these authors, the performance of these products in altitudes above 2,000 m, depends on the orographic effects on rainfall, which tends to increase uncertainties.

Observing the results obtained for satellite precipitation after bias removal (IMERG\*), there is a significant improvement in the cumulative estimates (Figure 3a) and monthly average values (Figure 3b). This performance is confirmed by the statistical coefficients, which are 0.79 and 0.80 ( $R^2$ ), 55.4 and 49.3 mm (RMSE), and 0.66 and 0.76 (KGE) for IMERG and IMERG\*, respectively. These results are consistent with those of other studies conducted for the tropical Andes region and indicate improvements after bias correction. For a Peruvian-Ecuadorian Amazon basin, Zubieta et al. (2017) found a correlation coefficient of 0.6 for IMERG compared to observed data from 181 rain gauges. Dinku et al. (2010), in a study of the Colombian Andes with the TRMM 3B42RT, TRMM 3B42, and CMORPH satellite precipitation products, obtained correlation coefficients of 0.46, 0.57, and 0.60, respectively, meaning an inferior performance regarding the present study.

Precipitation is the primary input variable for hydrological simulation. In the eastern Central Andes of Peru, there is a low density of rainfall stations and irregular distribution, which worsens in areas that are difficult to access and strongly affected by orographic effects. As a result, representing the spatial variability of precipitation from observed data is a challenge in these locations (VILLARINI et al., 2008; HOBOUCHIAN et al., 2017; ROZANTE et al., 2018; LLAUCA et al., 2021). Specifically, concerning the CRB, which encompasses a region of a large altitudinal range (3,839-4,912 m), the low availability of rain gauges is a limiting factor for the representation of the spatial variability of precipitation for hydrological modeling. In this context, although satellite precipitation estimates have uncertainties, which decrease with increasing accumulation over time and with increasing spatial grid resolution (VILLARINI et al., 2008), IMERG data, which make six grid points available over the studied basin, are a

relevant alternative for hydrological modeling. The mean annual precipitation values of these six IMERG\* grid points covering the CRB from 2009 to 2016 ranged from 986.1 mm (lowest altitude) to 1016.9 mm (highest altitude). Derin et al. (2019) conducted a study on IMERG for complex terrains in 10 mountainous regions of the world and found that for the Peruvian Andes (2,000-4,000 m) and Colombian Andes (1,000-3,000 m), precipitation decreases with elevation; however, for the Peruvian Andes (4,000-5,000 m), precipitation increases with elevation, corroborating the results identified in the present study.

### 3.2 Evaluation through hydrological modeling

The best set of parameters (best fit) obtained for SWAT calibration with OP are in Table 2, and the precision metrics (NSE, Pbias and KGE) are in Table 3.

**Table 2.** SWAT hydrological model parameters adopted in the calibration step (Adapted from Fernandez-Palomino et al., 2022 and Daneshvar et al., 2021), and best fit of values.

Parameter	Description	Range	Best fit
ALPHA_BF.gw <sup>(v)</sup>	Baseflow recession constant (day <sup>-1</sup> )	0 – 1	0.903
GW_DELAY.gw <sup>(v)</sup>	Groundwater delay time (days)	0 – 100	15.1
GWQMN.gw <sup>(v)</sup>	Threshold depth of water in shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	500 – 1000	989.5
RCHRG_DP.gw <sup>(v)</sup>	Deep aquifer percolation fraction	0 – 0.5	0.414
GW_REVAP.gw <sup>(v)</sup>	Groundwater “revap” coefficient	0.02 – 0.2	0.191
SOL_AWC.sol <sup>(r)</sup>	Soil available water capacity (mm H <sub>2</sub> O/mm soil)	-0.8 – 0.8	0.418

<sup>(v)</sup> <sup>(r)</sup> correspond to the replacement changes and relative, respectively

In the calibration and validation steps with OP, the performance of the model for streamflow simulation was adequate. Pbias could be classified as “very good” and “satisfactory”, respectively, and NSE classified as “satisfactory” for both steps (MORIASI et al. 2007). In the validation of the satellite products for hydrological simulation, the model’s

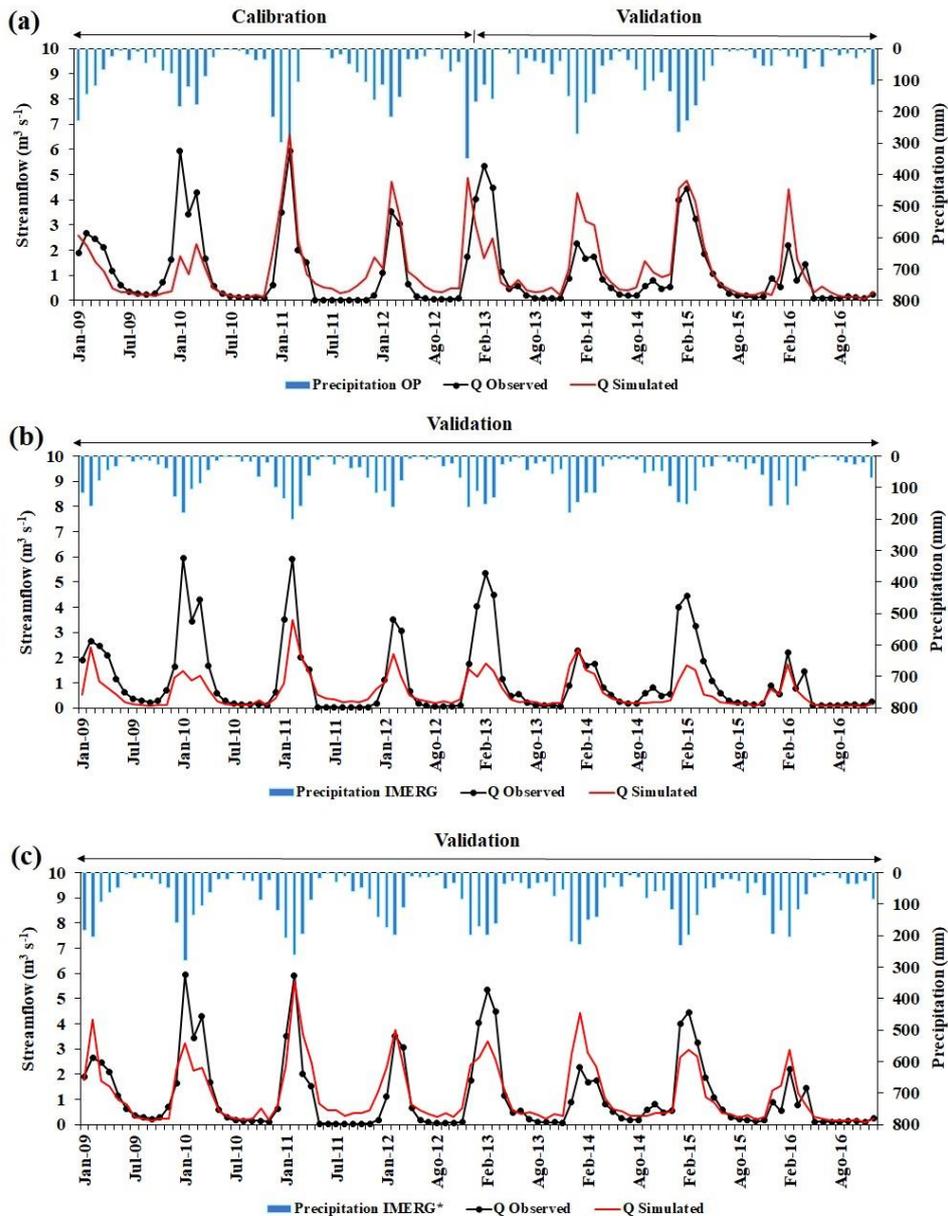
performance, measured by the NSE and Pbias was “unsatisfactory” for IMERG, whereas based on the bias correction of IMERG\*, it was “good” and “very good”, respectively. These results show that after bias correction, the performance on the streamflow simulation was significantly improved. This is confirmed by the KGE results, which are also indicative of superior IMERG\* regarding OP setup. Thus, the IMERG bias corrected has provided the best modeling of the CRB. As the observational database used for bias correction consists of a single rain gauge station (Figure 1), it is inferred that increasing the density of stations would be an the best alternative to improve bias correction and reduce modeling uncertainties.

Studies on hydrological modeling are scarce for the Andean portion of the Amazon basin. Zulkafli et al. (2014) evaluated the TRMM 3B42 (TMPA) precipitation products versions 6 and 7 in nine basins of Andean-Amazonian rivers. They found a lower underestimation behavior for the latter version of this product than using observed data. Additionally, according to these authors, in the hydrological simulation of the Chazuta basin near the central Andes of Peru, an NSE of 0.43 and an underestimation of 18.7% were obtained. Zubieta et al. (2017) found that the IMERG, TMPA/3B42/V7, and TMPA/RT precipitation products underestimated the observed streamflows in the Chazuta station (near the Central Andes of Peru) by 31.96, 33.51, and 29.55%, respectively, and in the Mejorada station (in the eastern Central Andes of Peru) by 18.5, 17.01, and 6.49%, respectively. These results agree with those found in the present study using the IMERG satellite precipitation dataset and show the importance of the bias correction of satellite precipitation products before application in hydrological modeling.

**Table 3.** Statistical metrics of SWAT streamflow simulation in CRB.

Index	Observed		IMERG	IMERG*
	precipitation (OP)			
	Calibration	Validation	Validation	Validation
	(2009 – 2012)	(2013-2016)	(2009 – 2016)	(2009 – 2016)
NSE	0.52	0.58	0.42	0.71
Pbias	-3.6	-17.6	77.6	-8.8
KGE	0.72	0.68	0.49	0.73

Figure 4 depicts the simulated and observed streamflows and the respective precipitation data for the calibration (2009 - 2012) and validation (2013 - 2016). The simulated hydrograph can capture the seasonality of the CRB's flow regime. In the analysis of the recession periods, overestimates are observed mainly in 2011 and 2012, and the superior performance of the IMERG\* is clear. However, the maximum streamflows were underestimated in 2010 and 2013, extending to 2015.

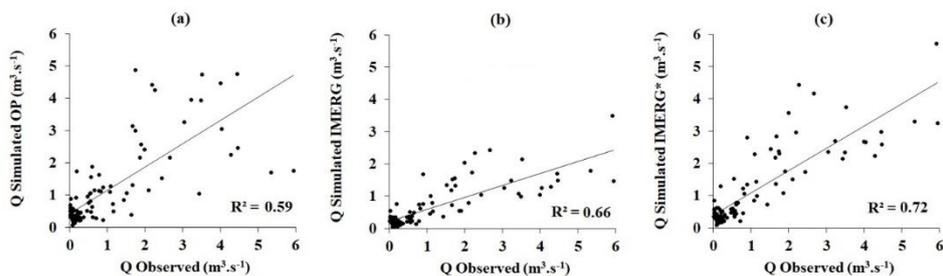


**Fig. 4.** Calibration and validation of the SWAT model for the CRB with the observed precipitation (a) and validation of the IMERG satellite precipitation (b) and IMERG\* satellite precipitation with bias correction (c) for streamflow simulation.

In other regions of South America, promising results with satellite precipitation have been obtained for hydrological modeling on a basin scale. Zulkafli et al. (2013) conducted hydrological modeling of the Marañón River basin in the Peruvian Ecuadorian Amazon. They used the Joint UK Land Environment Simulator (JULES) hydrological model with precipitation data from climate reanalysis of the National Center for Environmental Prediction (NCEP) and TRMM 3B42 satellite precipitation data. The streamflows were underestimated, and better

results were obtained with the TRMM 3B42 dataset. In the Brazilian Cerrado biome, Amorim et al. (2020) obtained better results using IMERG than observed precipitation, with a “very good” performance of the SWAT model.

Figure 5 shows scatter plots of the monthly simulated versus observed streamflow for the calibration and validation steps. Satisfactory performance was found for the three precipitation sources, according to Moriasi et al. (2007) ( $R^2 > 0.5$ ). In the Tocantins-Araguaia basin in the Brazilian Cerrado, Amorim et al. (2020) obtained  $R^2 = 0.86$ , showing the applicability of IMERG for hydrological modeling in basins under the Brazilian savanna. Therefore, under the topography and elevation of the Andes region, precipitation products tend to generate an inferior performance because of the problems associated with orographic effects that are not relevant to Brazilian Savanna.

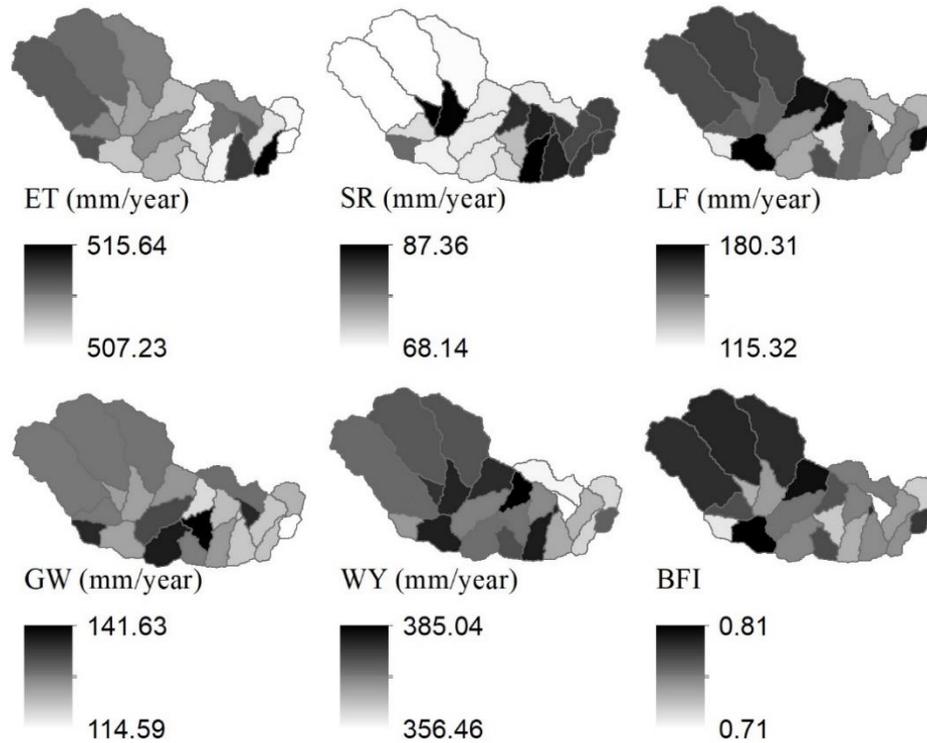


**Fig. 5.** Scatter plots of the simulated versus observed streamflows for observed precipitation (a), IMERG satellite precipitation (b), and IMERG\* satellite precipitation with bias correction (c).

### 3.3 Analysis of water budget components

To analyze of the water budget components, the model with IMERG\* precipitation data was used. Figure 6 shows the simulated results of evapotranspiration, surface runoff, lateral flow, groundwater, total water yield, and SWAT baseflow index. The mean evapotranspiration is  $510.3 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$ , consistent with the results of other studies available for the Andes region. Mosquera et al. (2015) estimated evapotranspiration between  $413$  and  $580 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  in the Páramo of Ecuador, located between altitudes of  $3,505$  and  $3,900$  m. The spatial variability of the evapotranspiration in the basin (Figure 6) shows that the highest values were simulated

mainly in subbasins with wetlands (as shown in Figure 2b). This is explained by the water amount on the surface readily available for evaporation and the presence of Andisols Typic Haplocryands and Typic Haplustands (Figure 2a), which are deeper and have greater water storage capacity, compared to Entisol Lithic Cryopsammets (SOIL SURVEY STAFF, 1999; GRA, 2012a), allowing the plants uptake water for transpiration.



**Fig. 6.** Evapotranspiration (ET), surface runoff (SR), lateral flow (LF), groundwater (GW), total water yield (WY), and baseflow index (BFI) simulated for the CRB by the SWAT model.

The total water yield in the CRB is  $373.4 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  or  $11.8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ . This value is consistent with the results obtained by the National Water Authority of Peru (ANA PERU, 2010) for the Alto Pampa River basin, contiguous to the CRB ( $9.6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ), and with the Tambo Ccaracocha Special Project ( $13.6 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) (ATA-INADE, 2002). Between the subbasins of the CRB, the total water yield ranges from  $356.5 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  ( $11.3 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) to  $385.0 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  ( $12.2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) (Figure 6).

Streamflow components simulated by the SWAT model for the CRB are divided into surface runoff (20.8%), lateral flow (42.5%), and groundwater (36.7%). The surface runoff

varies between  $68.1 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  ( $2.2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ) and  $87.4 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$  ( $2.8 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ), with the lowest values in the subbasins in the middle and upper course, in locations with wetlands (Figure 2b). According to Fonkén (2015), wetlands are environments able to store water, regulating the downstream runoff.

The lateral flow corresponds to 42.5% of the total water yield in the CRB and is explained by the shallow soils (GRA, 2012a) and the predominance of high-slope areas (Figure 2c). This result agrees with Fernandez-Palomino et al. (2020), who applied SWAT in the Andean Vilcanota River basin, Peru, and obtained a lateral flow of 37%. The groundwater, in turn, is the second-largest component of the total water yield in the CRB (36.7%), also close to that obtained by Fernandez-Palomino et al. (2020), which was 41%.

The SWAT BFI is 0.77, showing a consistent contribution from the groundwater and lateral flow in the basin. In the Andean basin of the Vilcanota River, Peru, Fernandez-Palomino et al. (2020) found a BFI of 0.78, corroborating the results of the hydrological cycle simulated by the SWAT model in the present study.

#### **4. CONCLUSIONS**

Modeling of the CRB with the SWAT hydrological model was performed based on three databases: observed precipitation (OP), satellite precipitation (IMERG) and satellite precipitation with bias correction (IMERG<sup>\*</sup>). The evaluation of the modeling was based on statistical metrics. The NSE, Pbias and KGE results indicated better performance with IMERG<sup>\*</sup>.

The IMERG satellite precipitation product for the CRB was evaluated based on the precipitation data observed at the Choccoro weather station. It was found that IMERG adequately reproduced the seasonality of precipitation. However, there was an average underestimation of 25.1%, varying up to 22 and 36% in the wet and dry months, respectively. These results show the importance of the IMERG bias correction for its application in hydrological research on the CRB.

The results showed that observational precipitation data are essential for the bias correction of the precipitation satellite IMERG and the hydrological modeling of the CRB. Considering that the removal of bias was performed from observed data from a single rain gauge station, it is inferred that an increase in the rain gauges density in the CRB can be indicated as an alternative to improve the hydrological modeling.

The model results calibrated with IMERG\* were evaluated in a distributed manner. The total water yield in the CRB was 373.4 mm.year<sup>-1</sup> (11.8 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>), ranging between 356.5 mm.year<sup>-1</sup> (11.3 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>) and 385.0 mm.year<sup>-1</sup> (12.2 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup>). In mean terms for the CRB, the surface runoff, lateral flow, and groundwater were equivalent to 20.8, 42.5, and 36.7% of the total water yield, allowing to conclude that distributed hydrological modeling is an important alternative for the study of hydrological behavior in regions with a lack of monitored data.

It is recommended for the following hydrological modeling studies in the Peruvian Andes to assess local gridded precipitation PISCO - Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations (AYBAR et al., 2020) and RAIN4PE - Rain for Peru and Ecuador (FERNANDEZ-PALOMINO *et al.*, 2022) as these datasets were interpolated for the Peruvian Andes region.

## REFERENCES

- ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs. A User Manual**. Available online: [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf) (accessed on 20 December 2019)., p. 100, 2015.
- AMORIM, J.S., VIOLA, M.R., JUNQUEIRA, R., OLIVEIRA, V. A. DE, MELLO, C. R. De. Evaluation Of Satellite Precipitation Products For Hydrological Modeling In the Brazilian Cerrado Biome. **Water** 1–19. <https://doi.org/10.3390/w12092571>, 2020.

ANA, Peru. In: **Estudio evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del río pampas** (Minag-ANA-ALA Ayacucho). Lima Peru, 2010.

ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R., MUTTIAH, R.S., WILLIAMS, J.R. **LARGE area hydrologic modeling and assessment part I : MODEL DEVELOPMENT ' basin scale model called SWAT (Soil and Water speed and storage. advanced software debugging policy to meet the needs , and the management to the tank model** (Sugawara et al 34 (1), 73–89, 1, 1998.

ATA-INADE. **Proyecto Especial Tambo Ccaracocha** (Lima Peru), 2002.

AYBAR, C., FERNANDEZ, C., HUERTA, A., LAVADO, W., VEGA, F., FELIPE-OBANDO, O. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. **Hydrol. Sci. J.** 65 (5), 770–785.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>, 2020.

AYIVI, F., JHA, M.K. Estimation of water balance and water yield in the Reedy Fork-Buffalo Creek Watershed in North Carolina using SWAT. **International Soil and Water Conservation Research** 6 (3), 203–213. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>, 2018.

<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.03.007>, 2018.

BESKOW, S., TIMM, L.C., TAVARES, V.E.Q., CALDEIRA, T.L., AQUINO, L.S. Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. **Hydrol. Sci. J.** 61 (14), 2567–2578.

<https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1133912>, 2016.

CALDEIRA, T.L., MELLO, C.R., BESKOW, S., TIMM, L.C., VIOLA, M.R. LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena** 173, 183–193.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.009>, 2019.

CHAVEZ, S.P., TAKAHASHI, K. Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. **J. Geophys. Res.** 122

(11), 5870–5882. <https://doi.org/10.1002/2016JD026282>, 2017.

DANESHVAR, F., FRANKENBERGER, J.R., BOWLING, L.C., CHERKAUER, K.A., MORAES, A.G. de L. Development of strategy for SWAT hydrologic modeling in data-scarce regions of Peru. *J. Hydrol. Eng.* 26 (7), 1–13.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002086](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002086), 2021.

DAGGUPATI, P., PAI, N., ALE, S., DOUGLAS-MANKIN, K.R., ZECKOSKI, R.W., JEONG, J., et al. A recommended calibration and validation strategy for hydrologic and water quality models. *Transactions of the ASABE* 58 (6), 1705–1719.

<https://doi.org/10.13031/trans.58.10712>, 2015.

DERIN, Y., ANAGNOSTOU, E., BERNE, A., BORGA, M., BOUDEVILLAIN, B., BUYTAERT, W., et al. Multiregional satellite precipitation products evaluation over complex terrain. *J. Hydrometeorol.* 17 (6), 1817–1836. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0197.1>, 2016.

DERIN, Y., ANAGNOSTOU, E., BERNE, A., BORGA, M., BOUDEVILLAIN, B., BUYTAERT, W. Evaluation of GPM-era global satellite precipitation products over multiple complex terrain regions. *Rem. Sens.* 11 (24) <https://doi.org/10.3390/rs11242936>, 2019.

DINKU, T., CONNOR, STEPHEN J., P. C. Comparison of CMORPH and TRMM-3B42 over mountainous regions of Africa and south America. *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* 1–327. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7>, 2010.

ESPINOZA, J.C., CHAVEZ, S., RONCHAIL, J., JUNQUAS, C., TAKAHASHI, K., LAVADO, W. Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resour. Res.* 51, 3459–3475. <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>, 2015.

FERNANDEZ-PALOMINO, C.A., HATTERMANN, F.F., KRYSANOVA, V.,

LOBANOVA, A., VEGA-J´ACOME, F., LAVADO, W., et al. A novel high-resolution gridded precipitation dataset for Peruvian and Ecuadorian watersheds: development and hydrological evaluation. **J. Hydrometeorol.** 23 (3), 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>, 2022.

FERNANDEZ-PALOMINO, C.A., HATTERMANN, F.F., KRYSANOVA, V., VEGA-J´ACOME, F., BRONSTERT, A. Towards a more consistent eco-hydrological modelling through multi-objective calibration: a case study in the Andean Vilcanota River basin, Peru. **Hydrol. Sci. J.** 1–16. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1846740>, 00(00), 2020.

FONKEN, M.S.M. **An introduction to the bofedales of the Peruvian High Andes.** Mires Peat 15, 1–13, 2015.

GRA Gobierno Regional Ayacucho. **Red hidrometeorologica de la Irrigacion Río Cachi (OPEMAN operacion y mantenimiento.** In: Ayacucho Perú, 2019.

GRA Gobierno Regional de Ayacucho (a). **Fisiografia, suelo y capacidad de uso mayor (Gerencia de Recursos Naturales y Gestion del Medio Ambiente.** In: Ayacucho Perú, 2012a.

GRA Gobierno Regional de Ayacucho (b). **Cobertura vegetal (Gerencia de Recursos Naturales y Gestí'on del Medio Ambiente.** In: Ayacucho Perú, 2012b.

GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., MARTINEZ, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. **J. Hydrol.** 377 (1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>, 2009.

HER, Y., CHAUBEY, I. Impact of the numbers of observations and calibration parameters on equifinality, model performance, and output and parameter uncertainty. **Hydrol. Process.** 29 (19), 4220–4237. <https://doi.org/10.1002/>

hyp.10487, 2015.

HOBOUCHIAN, M.P., SALIO, P., GARCÍA SKABAR, Y., VILA, D., GARREAUD, R. Assessment of satellite precipitation estimates over the slopes of the subtropical Andes. **Atmos. Res.** 190, 43–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.006>, 2017.

HUFFMAN, G.J., BOLVIN, D.T., BRAITHWAITE, D., HSU, K.-L., Joyce, R.J., Kidd, C., et al. **Integrated Multi-Satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (GPM) Mission (IMERG)**. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_19), 2019.

HUFFMAN, G.J., BOLVIN, D.T., NELKIN, E.J. **Day 1 IMERG Final Run Release Notes. (January), 1–9. Retrieved from.** [https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document\\_files/IMERG\\_FinalRun\\_Day1\\_release\\_notes.pdf](https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_FinalRun_Day1_release_notes.pdf), 2015.

HUFFMAN, G.J., BOLVIN, D.T., NELKIN, E.J. **Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation**, pp. 1–54. <https://doi.org/10.36263/nijest.2017.01>, 1(1), 2017.

JOSSE, C., CUESTA, F., NAVARRO, G., BARRENA, V., , C. E., CHACÓN-MORENO, E., FERREIRA, W., PERALVO, M., SAITO, J., T. A. In: **Andina, Comunidad (Ed.), Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro**, Lima Peru, 2009.

JUNQUEIRA, R., VIOLA, M.R., AMORIM, J. DA S., CAMARGOS, C., DE MELLO, C.R. Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin. **J. S. Am. Earth Sci.** 115 (February), 103773 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103773>, 2022.

KNOBEN, W.J.M., FREER, J.E., WOODS, R.A. Technical note: inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 23 (10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019>, 2019.

KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorol. Z.** 15 (3), 259–263.

<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>, 2006.

LENDERINK, G., BUISSHAND, A., VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach.

**Hydrol. Earth Syst. Sci.** 11 (3), 1145–1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>, 2007.

LLAUCA, H., LAVADO CASIMIRO, W., LEON, K., JIMENEZ, J., TRAVERSO, K., RAU, P. Assessing near real-time satellite precipitation products for flood simulations at subdaily scales in a sparsely gauged watershed in Peruvian andes. **Rem. Sens.** 13 (4), 1–18.

<https://doi.org/10.3390/rs13040826>, 2021.

MCKEEVER, V. **National Engineering Handbook (Chapter 21). Design Hydrographs** 1972.

MONTEITH, J.L. **Evaporation and Environment, vol. 19. Symposia of the Society for Experimental Biology**, pp. 205–234, 1965.

MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., LIEW, M. W. VAN, BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**, vol. 50, pp. 885–900, 2007.

MOSQUERA, G.M., LAZO, P.X., CELLERI, R., WILCOX, B.P., CRESPO, P. Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. **Catena** 125, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>, 2015.

NEITSCH, S., ARNOLD, J., KINIRY, J., WILLIAMS, J. **Soil & water assessment Tool theoretical documentation version 2009**. In: Texas Water Resources Institute.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>, 2011.

NOGUEIRA, S.M.C., MOREIRA, M.A., VOLPATO, M.M.L. Evaluating

precipitation estimates from Eta, TRMM and CHRIPS data in the south-southeast region of Minas Gerais state-Brazil. **Rem. Sens.** 10 (2) <https://doi.org/10.3390/rs10020313>, 2018.

PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. *Neth. J. Agric. Sci.* 4 (1), 9–29. <https://doi.org/10.18174/njas.v4i1.17768>, 1956.

ROZANTE, J.R., VILA, D.A., CHIQUETTO, J.B., FERNANDES, A. DE A., ALVIM, D.S. Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. **Rem. Sens.** 10 (6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs10060882>, 2018.

SAXTON, K.E., RAWLS, W.J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 70 (5), 1569–1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>, 2006.

SINGH, V. **Handbook of Applied Hydrology**, second ed. McGraw-Hill Education books (United States of America), 2017.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**. In: *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 45. <https://doi.org/10.1007/BF01574372>, 1999.

TEEGAVARAPU, R.S.V., SALAS, J.D., STEDINGER, J.R. Statistical Analysis of Hydrologic Variables. EWRI ASCE **American Society of Civil Engineers**. <https://doi.org/10.1061/9780784415177>. Retrieved from, 2019.

TEUTSCHBEIN, C., SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods. **J. Hydrol.** 456 (457), 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>, 2012.

TOBON. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. **Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management** 502–515. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384.054>, 2010.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**, 2 ed. Editora da Universidade UFRGS/ABRH, Porto Alegre, p. 678p, 2005.

VAL, A., FEARNSIDE, P., ALMEIDA, V., FERNANDEZ, M., SANTOS, G., PIEDADE, M., JUNK, W., NOZAWA, S.S.S. **Amazonia: recursos hídricos e sustentabilidade. Instituto de Botanica** Sao Paulo, p. 224. Retrieved from. <https://www.researchgate.net/publication/278964916%0Aamazonia>, 2010.

VILLARINI, G., MANDAPAKA, P.V., KRAJEWSKI, W.F., MOORE, R.J. Rainfall and sampling uncertainties: a rain gauge perspective. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113 (11), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2007JD009214>, 2008.

WEI, L., JIANG, S., REN, L., ZHANG, L., WANG, M., LIU, Y., DUAN, Z. Bias correction of GPM IMERG Early Run daily precipitation product using near real-time CPC global measurements. *Atmos. Res.* 279 (August), 106403 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106403>, 2022.

WILLIAMS, J.R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE* 12 (1), 100–103. <https://doi.org/10.13031/2013.38772>, 1969.

ZHOU, L., KOIKE, T., TAKEUCHI, K., RASMY, M., ONUMA, K., ITO, H., et al. A study on availability of ground observations and its impacts on bias correction of satellite precipitation products and hydrologic simulation efficiency. *J. Hydrol.* 610 (24), 127595 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127595>, 2022.

ZUBIETA, R., GETIRANA, A., ESPINOZA, J.C., LAVADO-CASIMIRO, W., ARAGON, L. Hydrological modeling of the Peruvian-Ecuadorian Amazon basin using GPM-IMERG satellite-based precipitation dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 1–21. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-656>, 2017.

ZULKAFI, Z., BUYTAERT, W., ONOF, C., LAVADO, W., GUYOT, J.L. A

critical assessment of the JULES land surface model hydrology for humid tropical environments. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 17 (3), 1113–1132. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1113-2013>, 2013.

ZULKAFI, ZED, BUYTAERT, W., ONOF, C., MANZ, B., TARNAVSKY, E., LAVADO, W., GUYOT, J.L. A comparative performance analysis of TRMM 3B42 (TMPA) versions 6 and 7 for hydrological applications over Andean-Amazon river basins. **J. Hydrometeorol.** 15 (2), 581–592. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-094.1>, 2014.

## **ARTIGO 2 - Simulação de mudanças climáticas futuras nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica andino-amazônica, Peru**

### **RESUMO**

A avaliação dos impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos das bacias hidrográficas localizadas nos Andes do Peru, cabeceira da bacia Amazônica, é importante para subsidiar a gestão de recursos hídricos. O presente estudo foi desenvolvido com o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) previamente calibrado, conforme apresentado no Artigo 1. Objetivou-se analisar os cenários de mudanças climáticas *Representative Concentration Pathway* (RCP) 4.5 e 8.5 simulados por quatro modelos climáticos globais regionalizados pelo modelo Eta (Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5) para o século XXI e seus possíveis impactos sobre os recursos hídricos da Bacia Hidrográfica Chicllarazo (BHRC). Considerando-se o conjunto médio dos quatro modelos climáticos para o século XXI, os resultados mostraram projeções de redução da precipitação de 6,7 e 11,7 %, aumento das temperaturas máxima de 2,3 e 3,1 °C e mínima de 1,2 e 1,8 °C, para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Contudo, especificamente para as projeções de precipitação, observam-se diferenças entre os resultados dos quatro modelos climáticos, havendo projeção de aumento para os modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2 e de redução para Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5. Considerando o conjunto médio dos quatro modelos, os resultados da simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas para o século XXI foram de redução da vazão em 12,3 e 20,4 %, para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. As projeções de redução do escoamento ao longo do século XXI para os RCPs 4.5 e 8.5 foram, respectivamente, de 6,9 e 1,4 % (2011-2040), 18,9 e 16,3 % (2041-2070) e 11,1 e 43,6 % (2071-2099), indicando resultados mais severos a partir de meados do século XXI. Entende-se que a redução da disponibilidade hídrica simuladas a partir do conjunto médio dos quatro modelos para a BHRC no século XXI pode impactar o Sistema Hidráulico Cachi (SHC), o qual fornece água para múltiplos usos. Ressalta-se que, a utilização dos resultados requer cautela e recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas que abordem especificamente as incertezas da modelagem e os cenários climáticos do Sexto Relatório de Avaliação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

**Palavras-chave:** Bacia hidrográfica Chicllarazo, SWAT, RCPs 4.5 e 8.5, Sistema Hidráulico Cachi.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e o desenvolvimento das sociedades. Com o crescimento populacional e consequente aumento da demanda por água, o desenvolvimento de estudos sobre os possíveis impactos de mudanças climáticas é essencial para nortear a tomada de decisão para gestão de recursos hídricos.

As bacias hidrográficas podem ser estudadas por modelos hidrológicos para simular, analisar, explicar e realizar previsões sobre o comportamento dos processos hidrológicos. Os modelos hidrológicos de bacias hidrográficas são representações matemáticas que simulam o movimento da água na bacia (Singh, 2017). Tais modelos possibilitam estudar o ciclo hidrológico, além de desenvolver estudos prognósticos abordando cenários exploratórios de mudanças climáticas.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), em 1988 para abordar as mudanças climáticas e suas consequências, tendo avaliado e produzido informações científicas em relatórios periódicos (IPCC, 2007, 2013, 2021). No Quarto Relatório de Avaliação (AR4), as mudanças climáticas são definidas como a variação do clima ou das propriedades da atmosfera em décadas, ou períodos maiores, devido às emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, ozônio, entre outros), adicionado à variabilidade climática natural (radiação solar, forçante vulcânica, metano natural, entre outros), conforme o contexto econômico e ambiental adotados e com impactos nos sistemas naturais e humanos (IPCC, 2007; CHOU et al., 2014b).

No Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC, confirma-se com 95% de certeza que o aquecimento global desde meados do século XX é produto de atividades antropogênicas. Também no AR5, de acordo com modelos econômicos, são avaliadas as projeções de quatro cenários de forçamento radiativo (*Representative Concentration Pathways - RCPs*), para fins de modelagem climática futura com modelos do CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) até o ano 2100, sendo: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, correspondendo a uma projeção de aumento do efeito estufa (do mais otimista ao mais pessimista) de 2,6, 4,5, 6 e 8,5  $W.m^{-2}$ , respectivamente (IPCC, 2013; Chou et al., 2014b). No Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, são projetadas mudanças climáticas mais severas, com impactos nos Andes e outras partes do mundo, e que poderão impactar na infraestrutura, energia e turismo (IPCC, 2021).

A avaliação de cenários de mudanças climáticas é relevante para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. É tipicamente realizada por modelos hidrológicos, com destaque para o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O SWAT tem sido utilizado satisfatoriamente em estudos de modelagem hidrológica e avaliação futura dos impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos na América do Sul (ALVARENGA et al., 2018; de OLIVEIRA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2020).

No contexto da simulação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas, o modelo hidrológico é alimentado com cenários simulados por modelos climáticos, possibilitando prognosticar os possíveis impactos dos cenários climáticos nos recursos hídricos (ALVARENGA et al., 2018; de OLIVEIRA et al., 2019; RODRIGUES et al., 2020).

Chou et al. (2014a) avaliaram o clima presente para a América do Sul, América Central e Caribe, por meio do modelo regional Eta aninhado com os MCGs HadGEM2-ES, BESM e MIROC5. Chou et al. (2014b) avaliaram as mudanças climáticas no século XXI a partir dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 para os cenários RCP 4.5 e 8.5. Os autores concluíram que o modelo Eta-HadGEM2-ES apresentou impactos mais severos comparado ao Eta-MIROC5, para o cenário RCP 8.5. Foi prognosticado na América do Sul maior aquecimento para o século XXI e redução da precipitação para o final do século com os dois modelos climáticos (CHOU et al. 2014b).

Alvarenga et al. (2018) avaliaram os impactos das mudanças climáticas na hidrologia de uma pequena bacia hidrográfica em Minas Gerais, Brasil, no período 2011-2099, obtendo os resultados mais severos de redução do escoamento nos cenários RCP 4.5 (2011-2040) e RCP 8.5 (2071-2099). De Oliveira et al. (2019), avaliaram os impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba, localizada no sudeste do Brasil, para o século XXI nos cenários RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos climáticos HadGEM2-ES, MIROC5, BESM e CANESM2 com *downscaling* pelo modelo Eta/CPTEC, tendo sido simulado redução do escoamento de 27,6 a 75 %. Rodrigues et al. (2020), investigaram os impactos das mudanças climáticas futuras utilizando os RCPs 4.5 e 8.5 projetados pelos modelos HadGEM2-ES e MIROC5 com *downscaling* pelo modelo Eta/CPTEC, para afluentes do rio Tocantins-Araguaia, tendo sido prognosticado redução do escoamento, indicando riscos ecológicos e para a produção de energia elétrica.

O rio Chicllarazo está localizado na cabeceira da bacia hidrográfica amazônica, no leste dos Andes centrais do Peru, na Cordilheira Ocidental dos Andes Centrais. O rio Chicllarazo segue o curso dos rios Cachi, Mantaro, Apurimac, Ene, Tambo e Ucayali. Ainda no território peruano, a partir da confluência entre os rios Ucayali e Marañon, é chamado rio Amazonas.

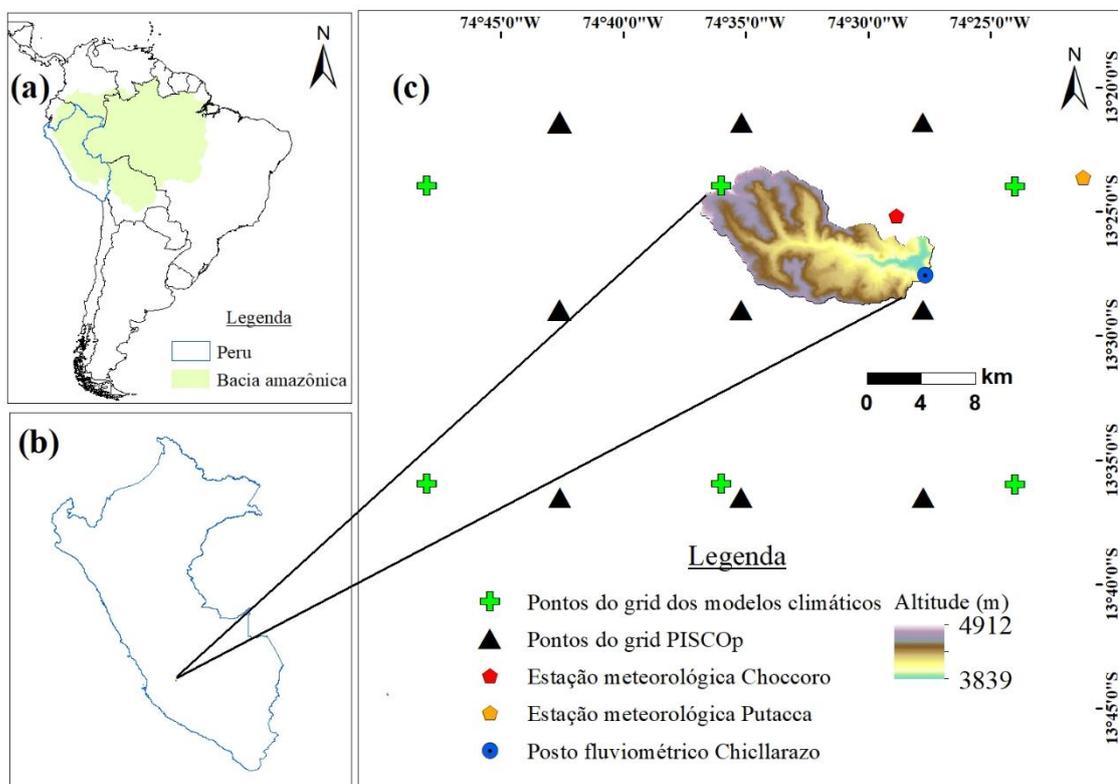
Junto a outras fontes hídricas, o rio Chiclarazo compõe o Sistema Hidráulico Cachi (SHC), construído entre 1987 e 2002, o qual fornece água para múltiplas finalidades, incluindo a irrigação de 14.500 hectares, abastecimento da cidade de Ayacucho e geração hidrelétrica de 1,8 MW (BALTAZAR et al., 2023).

Neste contexto, objetivou-se simular os impactos hidrológicos decorrentes dos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5 simulados por quatro modelos climáticos globais (BESM, CanESM2, HadGEM2 e MIROC5) regionalizados pelo modelo Eta, para a bacia hidrográfica do rio Chiclarazo, visando disponibilizar resultados para subsidiar a tomada de decisão pela gestão de recursos hídricos frente às mudanças climáticas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Rio Chiclarazo (BHRC), localizada nos Andes centrais peruanos, na cabeceira da bacia Amazônica. A BHRC está situada entre as coordenadas de latitude  $13^{\circ}23'20''\text{S}$  e  $13^{\circ}28'45''\text{S}$  e de longitude  $74^{\circ}27'25''\text{W}$  e  $74^{\circ}36'50''\text{W}$ , tendo sido delimitada com seção de controle no posto fluviométrico Chiclarazo, com área de drenagem de 98,84 km<sup>2</sup> (Figura 1).



**Figura 1.** Localização do Peru e da bacia hidrográfica Amazônica na América do Sul (a), localização da BHRC no Peru (b), localização das estações meteorológicas de Choccoro (4.061

m) e Putacca (3.550 m), posto fluviométrico de Chicllarazo (3.839 m), pontos do grid dos modelos climáticos com resolução espacial de 20km, pontos do grid de precipitação PISCOp com resolução espacial de 0,1° e Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS-Palsar (<https://search.asf.alaska.edu/>) (c).

A BHRC, juntamente com as bacias hidrográficas Choccoro (BHRCh) e Apacheta (BHRA), localizadas na zona alta, alimentam o SHC que, conforme visto, desempenha importante finalidade de abastecimento público, irrigação e produção de energia (Figura 2).



**Figura 2.** Sistema Hidráulico Cachi (SHC), mostrando as três bacias hidrográficas que o fornecem água (BHRA, BHRCh e BHRC), sistema de adução constituído por um canal, que atravessa a cordilheira por um túnel com extensão de 7,6 km, usina hidrelétrica, barragem de acumulação, áreas irrigadas e cidade de Ayacucho.

O clima na BHRC, segundo a classificação de Köppen, é Cwb, caracterizado como clima subtropical de terras altas com inverno seco (Kottek et al., 2006). As temperaturas máxima e mínima mensal são de 14,6 °C (novembro) e de -1,9 °C (entre julho e agosto), respectivamente. A precipitação média anual é de 1.039 mm na estação meteorológica Choccoro. A altitude varia entre 3.839 e 4.912 m.

A BHRC, juntamente com as Bacias Hidrográficas dos Rios Apacheta (BHRA) e Choccoro (BHRCh), fornecem água para o SHC, que possui estruturas de captação, condução, regulação e de geração de energia hidrelétrica. O SHC distribui água para múltiplas finalidades: irrigação de 14.500 hectares, abastecimento da cidade de Ayacucho com população atual de

224 mil habitantes, transposição de vazão para o rio Alameda, que passa pela cidade de Ayacucho com finalidade de vazão ecológica e geração de 1,8 MW de energia elétrica para atendimento da demanda energética da zona alta do projeto (Figura 2).

## 2.2 Modelo hidrológico e base de dados observacional

O presente estudo foi desenvolvido a partir do modelo hidrológico SWAT, previamente calibrado e validado por Baltazar et al. (2023), descrito na Segunda Parte – Artigo 1 desta tese. Para realizar a calibração e validação dos processos hidrológicos do modelo, foram utilizados dados meteorológicos (precipitação, temperaturas máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento) do período de 2007 a 2016 da estação meteorológica de Choccoro e dados de vazão do posto fluviométrico de Chicllarazo (Figura 1c).

Os mapas de uso do solo e de solos foram obtidos do geoservidor do Ministério do Meio Ambiente do Peru (<https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/ayacucho/>) e o Modelo Digital de Elevação ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m foi obtido junto ao EARTH DATA UAF Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/>). Maiores detalhamentos sobre a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para BHRC podem ser consultados no capítulo 2.

## 2.3. Projeções climáticas futuras

Para avaliar as mudanças climáticas e seus possíveis impactos nos recursos hídricos da BHRC, foram utilizados dados disponibilizados por Chou et al. (2014a) referentes a quatro modelos climáticos globais (BESM - *Brazilian Earth System Model*, CanESM2 - *Canadian Earth System Model*, HadGEM2-ES - *Hadley Global Environment Model* e MIROC5 - *Model for Interdisciplinary Research on Climate*) com regionalização para a resolução espacial de 20 km pelo modelo Eta. Foram analisados os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 para o século XXI, que correspondem a projeções de aumento do saldo radiativo referente ao efeito estufa em 4,5 e 8,5  $W.m^{-2}$ , respectivamente (IPCC, 2013).

De acordo com Luo et al. (2018) a presença de viés nos resultados dos modelos climáticos regionais pode levar a erros na avaliação dos impactos hidrológicos associados às mudanças climáticas e, neste sentido, a remoção de viés previamente à utilização dos dados é recomendada. A remoção de viés dos cenários climáticos foi considerada uma limitação para o desenvolvimento do presente estudo. Tal limitação relaciona-se com a reduzida disponibilidade de dados observados para a BHRC no período de referência (*baseline*) da simulação climática,

entre 1960 a 2005. O procedimento adotado na remoção de viés está apresentado detalhadamente no Anexo I.

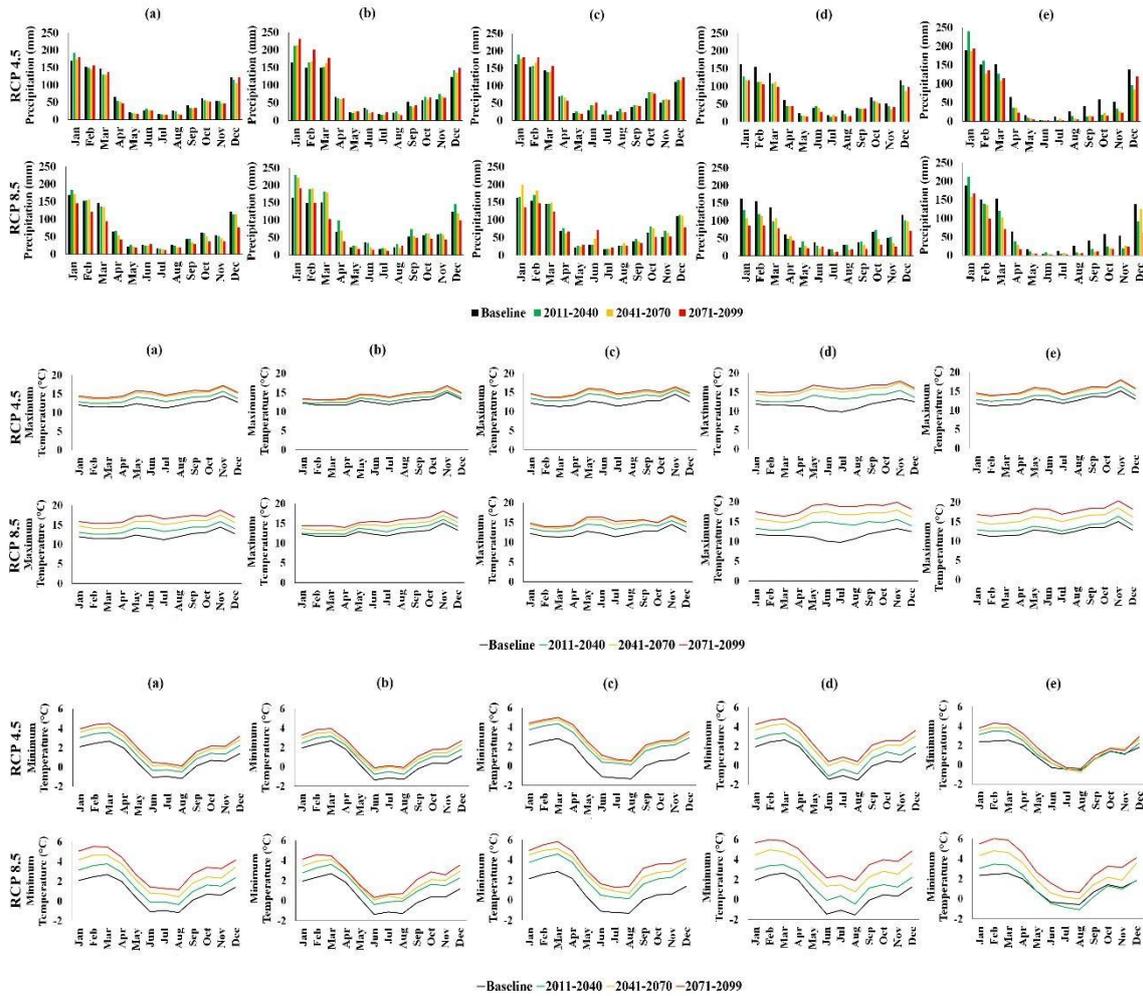
Após a correção de viés dos modelos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5, para os cenários RCPs 4.5 e 8.5, foram analisadas as mudanças climáticas na precipitação e temperaturas pela comparação do clima presente simulado pelos modelos (1960 a 2005) com os cenários futuros subdivididos em três períodos: início (2011-2040), meados (2041-2070) e final do século XXI (2071-2099).

Posteriormente, o modelo hidrológico SWAT foi abastecido com os dados corrigidos dos modelos climáticos para o clima presente (1960-2005) e períodos futuros: início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071-2099) do século XXI. A análise das projeções de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos foi então obtida comparando-se as vazões simuladas para cada período futuro às vazões simuladas para o clima presente.

### **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1. Avaliação das projeções de mudanças climáticas futuras de precipitação e temperatura**

A Figura 3 apresenta a precipitação e temperaturas máxima e mínima mensais para o clima presente e século XXI na BHRC, simuladas pelos modelos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, nos cenários RCPs 4.5 e 8.5. Na Tabela 1 são mostradas as projeções de alteração percentuais, tomando-se como referência o clima presente.



**Figura 3.** Médias mensais de precipitação (mm) e temperaturas máxima e mínima (°C), nos cenários RCPs 4.5 e 8.5, para o conjunto médio dos quatro modelos (a), Eta-BESM (b), Eta-CanESM2 (c), Eta-HadGEM2-ES (d) e Eta-MIROC5 (e).

**Tabela 1.** Projeções de mudanças climáticas futuras de precipitação (%) e temperaturas máxima e mínima (°C), nos cenários RCPs 4.5 e 8.5, pelos modelos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5, e o conjunto médio dos quatro modelos.

Modelo	$\Delta$ Precipitação (%)					
	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2011-2040	2041-2070	2071-2099	2011-2040	2041-2070	2071-2099
Conjunto médio	-3,9	-9,9	-6,4	-0,5	-7,5	-27,2
Eta-BESM	9,6	6,8	17,4	25,6	13,1	-13,6
Eta-CanESM2	11,3	7,3	11,1	9,1	13,6	-5,6
Eta-HadGEM2	-19,8	-23,8	-26,4	-13,6	-25,9	-42,9
Eta-MIROC5	-16,6	-29,8	-27,9	-23,3	-30,8	-46,8
$\Delta$ Temperatura máxima (°C)						
Conjunto médio	1,3	2,5	2,9	1,5	3,2	4,5
Eta-BESM	0,6	1,4	1,7	0,9	1,9	2,9
Eta-CanESM2	1,5	2,4	2,7	1,5	2,6	2,9
Eta-HadGEM2	2,0	3,8	4,5	2,7	5,0	6,9
Eta-MIROC5	1,1	2,5	2,8	1,1	3,3	5,3
$\Delta$ Temperatura mínima (°C)						
Conjunto médio	0,8	1,3	1,6	1,0	1,9	2,6
Eta-BESM	0,6	1,0	1,3	1,0	1,5	2,0
Eta-CanESM2	1,5	1,9	2,1	1,6	2,3	2,8
Eta-HadGEM2	0,7	1,6	2,1	1,1	2,4	3,5
Eta-MIROC5	0,3	0,6	0,9	0,1	1,3	2,2

As projeções de mudanças climáticas de precipitação média anual para o conjunto médio dos quatro modelos são de redução para o século XXI de 6,7 e 11,7 % para os cenários RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Entretanto, analisando-se individualmente os resultados dos quatro modelos, observam-se diferenças. Para o RCP 4.5, enquanto os modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2 projetaram aumentos médios de 11,3 e 9,9 %, respectivamente, os modelos Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5 projetaram reduções de 23,3 e 24,8 %, respectivamente. Para o RCP 8.5, os sinais das projeções se mantiveram, com aumentos médios para o Eta-BESM (8,4 %) e Eta-CanESM2 (5,7 %), e reduções médias para o Eta-HadGEM2 (27,5 %) e Eta-MIROC5 (33,6 %). Na Tabela 1 podem ser observadas as projeções detalhadas para o início (2011-2040), meados (2041-2070) e final (2071-2099) do século XXI.

Em relação às temperaturas máxima e mínima da BHRC, foram projetados incrementos por todos os modelos e períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099) (Tabela 1 e Figura 3). O aumento médio anual para a temperatura máxima do século XXI considerando o conjunto médios dos modelos para os RCPs 4.5 e 8.5 foi de 2,2 e 3,1 °C, respectivamente. As projeções individuais foram de aumento médio para todos os modelos nos RCPs 4.5 (Eta-BESM = 1,2

°C, Eta-CanESM2 = 2,2 °C, Eta-HadGEM2 = 3,4 °C e Eta-MIROC5 = 2,1 °C) e RCP 8.5 (Eta-BESM = 1,9 °C, Eta-CanESM2 = 2,3 °C, Eta-HadGEM2 = 4,9 °C e Eta-MIROC5 = 3,2 °C). Para a temperatura mínima projetada no século XXI pelo conjunto médio, as projeções foram de aumento de 1,2 e 1,8 °C para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. As projeções individuais de temperatura mínima foram de aumento para todos os modelos nos RCPs 4.5 (Eta-BESM = 1,0 °C, Eta-CanESM2 = 1,8 °C, Eta-HadGEM2 = 1,5 °C e Eta-MIROC5 = 0,6 °C) e 8.5 (Eta-BESM = 1,5 °C, Eta-CanESM2 = 2,2 °C, Eta-HadGEM2 = 2,3 °C e Eta-MIROC5 = 1,2 °C).

Analisando-se as projeções do conjunto médio de precipitação e temperaturas ao longo do século XXI na Tabela 1, observam-se as projeções mais severas para o último período (2071-2099), com exceção da precipitação no RCP 4.5, para a qual a projeção mais severa se dá para meados do século (2041-2070). As projeções mais severas para o final do século XXI coincidem com os resultados de Urrutia e Vuille (2009) para a região ao sul da latitude de 12 °S, onde está localizada a BHRC. Nesse estudo foi utilizado o MCG HadAM3 aninhado ao modelo regional PRECIS, sendo simulado aumento da temperatura e redução da precipitação para o período 2071-2100. De acordo com SENAMHI (2010), para o final do século XXI na bacia hidrográfica Mantaro (BHM), localizada próxima à BHRC, são projetados incrementos nas temperaturas máximas e mínimas de 2,7 e 2,3 °C, respectivamente, resultado este obtido a partir de simulações do modelo MIROC baseado no cenário de emissão A1B do IPCC AR4.

Corroborando com as projeções de redução da precipitação na região da BHRC nos cenários de mudanças climáticas futuras, Correa et al. (2016) e SENAMHI (2010) obtiveram resultados de redução da precipitação na BHM, nos Andes centrais peruanos. Andres et al. (2014), em estudo na bacia hidrográfica do rio Vilcanota, nos andes do Sul do Peru, projetaram redução da precipitação e incremento das temperaturas a partir dos modelos climáticos BCM2 (*Bjerkness Center for Climate Research, Noruega*), CSMK3 (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO, Atmospheric Research, Australia*) e MIHR (*Center for Climate System Research, University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change, JAMSTEC, Japan*), para os cenários futuros A1B e B1 do IPCC AR4.

### **3.2. Avaliação dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas**

Na Tabela 2 estão apresentadas as projeções futuras para a vazão nos cenários RCPs 4.5 e 8.5, obtidas com o modelo hidrológico SWAT. Para o conjunto médio dos quatro modelos climáticos, os resultados para o século XXI (2011-2099) foram de redução da vazão em 12,3% e 20,4%, para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente.

Ainda com base na Tabela 2, se observa que os resultados das simulações hidrológicas com os modelos Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5 foram de redução do escoamento em todos os períodos do século XXI e cenários, sendo os resultados mais severos projetados para o final do século no RCP 8.5. Por outro lado, as simulações hidrológicas com o Eta-BESM e Eta-CanESM2 projetaram aumento do escoamento, cabendo exceção para o final do século XXI no RCP 8.5, sendo este o único período analisado no qual os quatro modelos apresentaram o mesmo sinal para as projeções. Observa-se que as projeções de alteração do escoamento podem ser explicadas pelas mudanças climáticas de precipitação (Tabela 1).

**Tabela 2.** Projeções de alterações da vazão, em %, nos cenários RCPs 4.5 e 8.5, pelos modelos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5, e o conjunto médio dos quatro modelos.

Modelo	RCP 4.5			RCP 8.5				
	2011-2040	2041-2070	2071-2099	2011-2099	2011-2040	2041-2070	2071-2099	2011-2099
Conjunto médio	-6,9	-18,9	-11,1	-12,3	-1,4	-16,3	-43,6	-20,4
Eta-BESM	21,4	14,5	35,2	23,7	53,1	25,2	-17,7	20,2
Eta-CanESM2	10,1	2,8	15,8	9,6	1,5	17,7	-11,3	2,6
Eta-HadGEM2	-40,1	-52,5	-59,7	-50,8	-40,1	-62,5	-75,1	-59,2
Eta-MIROC5	-18,8	-40,4	-35,6	-31,6	-20,1	-45,8	-70,2	-45,4

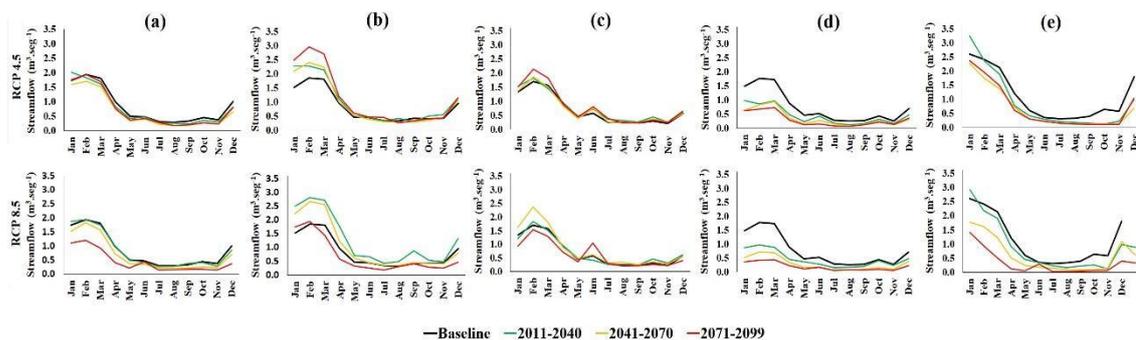
A Figura 4 apresenta a vazão média mensal simulada para os cenários futuros. Observando-se o conjunto médio dos quatro modelos para os RCPs 4.5 e 8.5, verifica-se, de maneira geral, comportamento de redução do escoamento ao longo do ano para os 3 períodos do século XXI. Contudo, para a simulação de redução mais severa (RCP 8.5 entre 2071 e 2099), observam-se maiores reduções, sobretudo entre os meses de dezembro e maio.

Com relação aos modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2, as projeções de aumento da vazão ocorrem principalmente para os meses de janeiro a março, com exceção para o período de 2071 a 2099 no RCP 8.5, para o qual foi simulada redução do escoamento. Para os modelos Eta-HadGEM2 e Eta-MIROC5, para os quais predominaram projeções de redução do escoamento, observa-se que, para o primeiro, as reduções se concentraram entre os meses de janeiro a maio, enquanto que para o segundo, de forma geral, se distribuíram ao longo do ano, com exceção para o mês de janeiro no período de 2011 a 2040, para o qual houve projeção de aumento.

Com base nas projeções obtidas para o conjunto médio dos quatro modelos climáticos, considera-se que reduções na disponibilidade de água no século XXI podem impactar o Sistema

Hídrico Cachi, que é dependente, dentre outras, dos recursos hídricos da BHRC. Dentre os possíveis impactos, cita-se a redução da produção agrícola na área irrigada, assim como restrições ao fornecimento de água potável para a cidade de Ayacucho e de produção de energia para a zona alta do projeto Cachi.

Andres et al. (2014) avaliaram os impactos das mudanças climáticas futuras (2010-2100) nos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Vilcanota, localizada nos andes do Sul do Peru. Foi utilizado o modelo hidrológico semidistribuído PREVAH (*Precipitation-Runoff-EVApotranspiration Hydrotope*) e três MCGs (BCM2, CSMK3 e MIHR) com resolução inferior a 2°, nos cenários futuros A1B e B1 do IPCC AR4. Os resultados para o conjunto médio dos modelos foram de aumento do escoamento nos meses de janeiro a março, com picos de cheia mais elevados para o cenário A1B. Para o período de estiagem, por sua vez, foi projetado redução do escoamento. Assim como no presente estudo, os autores verificaram resultados diferentes para os distintos modelos climáticos, indicando incertezas nas projeções de mudanças climáticas futuras para os Andes.



**Figura 4.** Vazão média mensal simulada para os cenários RCPs 4.5 e 8.5, para o conjunto médio dos quatro modelos (a), Eta-BESM (b), Eta-CanESM2 (c), Eta-HadGEM2-ES (d) e Eta-MIROC5 (e).

A partir do computo da diferença entre a precipitação (P) simulada pelos modelos climáticos e a evapotranspiração (ET) simulada pelo modelo hidrológico SWAT, analisou-se um balanço hídrico vertical ( $P - ET$ ). Para o conjunto médio dos quatro modelos climáticos foram quantificadas reduções do balanço hídrico vertical da ordem de -15,2 % e -24,6 % para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Estes resultados corroboram com as alterações simuladas para o escoamento vistas anteriormente, que foram de -12,3 % e -20,4 % para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente.

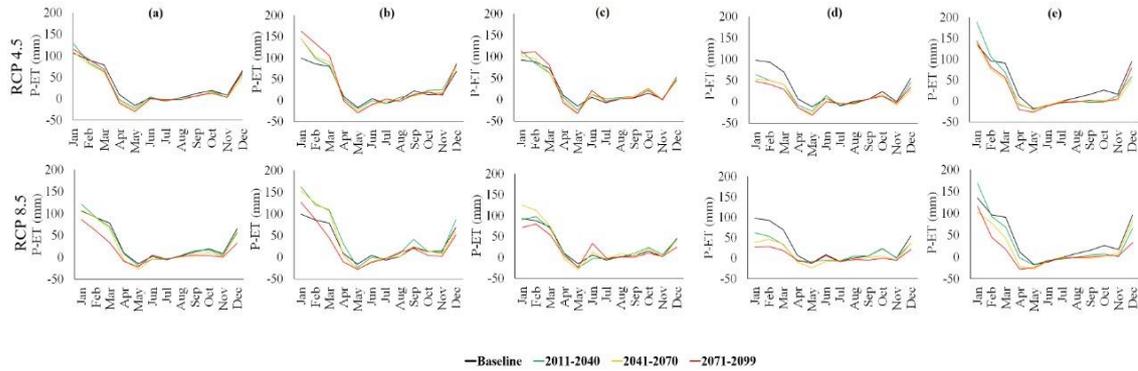
A Tabela 3 apresenta o balanço hídrico vertical para o clima presente (1960-2005) e cenários futuros RCPs 4.5 e 8.5 subdivididos em três períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Analisando-se os resultados para o conjunto médio dos modelos, observam-se, respectivamente, para os RCPs 4.5 e 8.5, projeções de redução de 8,1 e 3,6 % (2011-2040), 22,5

e 21,4 % (2041-2070) e de 14,9 e 48,8 % (2071-2099). Analisando-se individualmente os resultados dos modelos, observa-se que as projeções do balanço hídrico vertical acompanham o sinal das projeções obtidas para as vazões. Os modelos Eta- HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 apresentaram projeções negativas para todos os períodos futuros e cenários. Os modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2 apresentaram projeções positivas, com exceção do último período do século XXI no RCP 8.5.

Na Figura 5 está representada a média mensal do balanço hídrico vertical. Pode-se observar que as maiores projeções de alteração são para os meses do verão e que, especificamente para o Eta-MIROC5, são projetados déficits para a primavera.

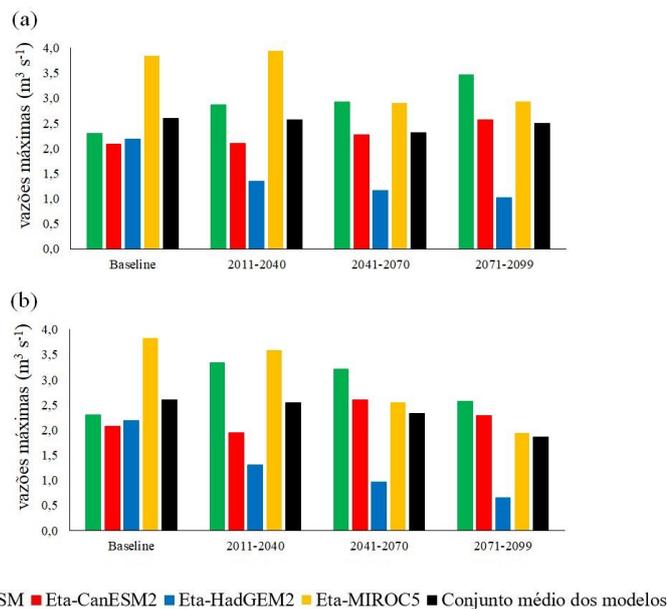
**Tabela 3.** Precipitação média anual (P), mm.ano<sup>-1</sup>, simulada pelos modelos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta- HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e conjunto médio dos quatro modelos; evapotranspiração (ET) simulada pelo modelo hidrológico SWAT, mm.ano<sup>-1</sup>; e balanço hídrico vertical (P-ET), mm.ano<sup>-1</sup>, para o clima presente (1960-2005) e cenários futuros RCPs 4.5 e 8.5 subdivididos em três períodos (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099).

Modelo climático	1960-2005			RCP	2011-2040			2041-2070			2071-2099		
	P	ET	P-ET		P	ET	P-ET	P	ET	P-ET	P	ET	P-ET
Conjunto médio	901,7	527,5	374,2	4.5	866,9	522,8	344,0	812,7	522,6	290,0	843,9	525,6	318,3
Eta-BESM	918,0	544,4	373,6	4.5	1005,7	553,7	452,0	980,7	558,2	422,5	1077,4	582,0	495,4
Eta-CanESM2	886,8	571,3	315,5	4.5	987,1	643,5	343,6	951,4	635,1	316,3	985,4	626,9	358,5
Eta- HadGEM2-ES	900,6	558,0	342,6	4.5	722,6	529,6	193,0	686,1	540,7	145,4	662,5	546,3	116,2
Eta-MIROC5	901,4	436,3	465,1	4.5	752,0	364,5	387,5	632,4	356,5	275,9	650,2	347,1	303,1
Modelo climático	1960-2005			RCP	2011-2040			2041-2070			2071-2098		
	P	ET	P-ET		P	ET	P-ET	P	ET	P-ET	P	ET	P-ET
Conjunto médio	901,7	527,5	374,2	8.5	897,6	537,0	360,6	834,2	540,2	294,0	656,1	464,4	191,7
Eta-BESM	918,0	544,4	373,6	8.5	1153,3	597,2	556,1	1038,2	581,8	500,6	793,6	500,6	293,0
Eta-CanESM2	886,8	571,3	315,5	8.5	967,2	646,8	320,4	1007,3	643,5	363,8	837,4	581,3	256,1
Eta- HadGEM2-ES	900,6	558,0	342,6	8.5	778,4	585,3	193,1	667,1	561,8	105,3	514,1	449,2	64,9
Eta-MIROC5	901,4	436,3	465,1	8.5	691,3	318,7	372,6	624,2	373,6	250,6	479,2	326,4	152,8



**Figura 5.** Balanço hídrico vertical (P-ET) médio mensal para os cenários RCPs 4.5 e 8.5 para o conjunto médio dos quatro modelos (a), Eta-BESM (b), Eta-CanESM2 (c), Eta-HadGEM2-ES (d) e Eta-MIROC5 (e).

A Figura 6 apresenta a média das vazões máximas mensais simuladas para o clima presente e cenários futuros. Observando-se o resultado para o conjunto médio dos quatro modelos, observam-se reduções de até 11 % para meados do século XXI no RCP 4.5, e de até 28,3 % no final do século para o RCP 8.5.

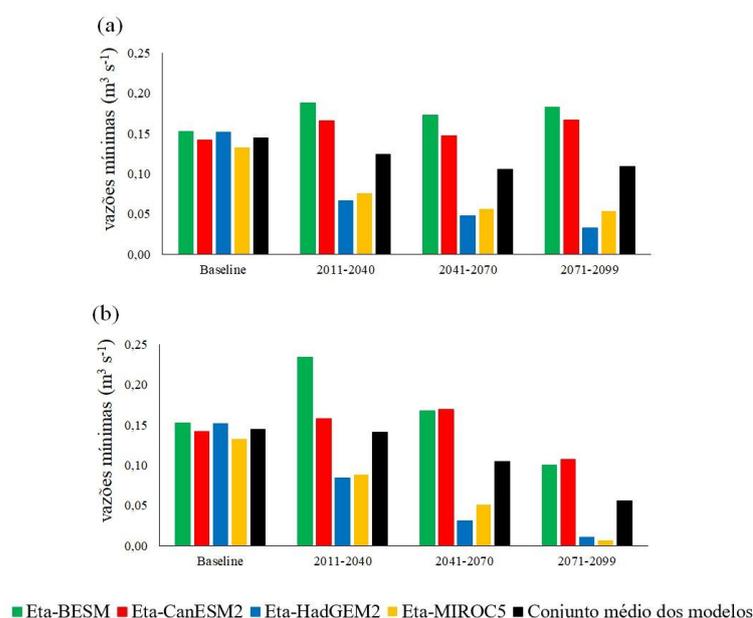


**Figura 6.** Média das vazões máximas mensais para o clima presente (*baseline*, 1961 a 2005) e períodos futuros do século XXI simuladas pelo modelo hidrológico SWAT a partir das projeções dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e conjunto médio dos quatro modelos, para os RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b).

Para o Eta-MIROC5 no clima presente, além da projeção de redução do escoamento discutida anteriormente, as maiores vazões máximas simuladas para alguns períodos sinalizam um possível aumento da concentração do escoamento, que pode ser explicado pela elevada concentração das chuvas simuladas para os meses do verão.

Para o Eta-HadGEM2, a partir do qual também foram projetadas reduções do escoamento, foram obtidos resultados diferentes para as vazões máximas, sendo de redução para todos os períodos e cenários estudados. Os modelos Eta-BESM e Eta-CanESM2, que por sua vez geraram simulações de aumento do escoamento, de maneira geral, simularam aumento das vazões máximas.

A Figura 7 apresenta a média das vazões mínimas mensais simuladas para o clima presente e cenários futuros. Observando-se o resultado para o conjunto médio dos quatro modelos observam-se reduções de até 26,8 % para meados do século XXI no RCP 4.5 e de até 61,2 % no final do século para o RCP 8.5. Observa-se que as projeções para a vazão mínima acompanharam o sinal das projeções para o escoamento na BHRC. Tais reduções simuladas para as vazões mínimas, as quais ocorrem no período crítico de suprimento hídrico para o Sistema Hidráulico Cachi, são preocupantes do ponto de vista dos múltiplos usos ali presentes e merecem atenção da gestão de recursos hídricos local.



**Figura 7.** Média das vazões mínimas mensais para o clima presente (*baseline*, 1961 a 2005) e períodos futuros do século XXI simuladas pelo modelo hidrológico SWAT a partir das projeções dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e conjunto médio dos quatro modelos, para os cenários RCPs 4.5 (a) e 8.5 (b).

#### 4. CONCLUSÕES

A remoção de viés dos modelos climáticos foi realizada a partir de um escasso banco de dados observado disponível para a BHRC e proximidades, sendo considerada uma limitação do presente estudo. Diante desta constatação, consideram-se os resultados obtidos como uma primeira aproximação e conclui-se, em concordância com Baltazar et al. (2023), que existe necessidade de melhoria da rede de monitoramento hidrometeorológico nos Andes do Peru, especificamente na região da BHRC.

As projeções de mudanças climáticas de temperatura foram de aquecimento para os quatro modelos climáticos analisados (Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5), nos dois cenários (RCPs 4.5 e 8.5) e nos três períodos futuros (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099). Entretanto, para a precipitação, as projeções divergiram, sendo de redução para os modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 e de aumento para o Eta-BESM e Eta-CanESM2, com exceção do último período do século XXI no RCP 8.5, para o qual todos os modelos projetaram redução da precipitação. Tais divergências para as mudanças climáticas futuras de precipitação pelos distintos modelos indicam incertezas, conforme também verificado por Andres et al. (2014), e que precisam ser melhor avaliadas em estudos futuros no contexto dos cenários do IPCC AR6.

A análise dos impactos hidrológicos decorrentes de mudanças climáticas com o modelo SWAT mostrou, para o conjunto médio dos quatro modelos climáticos, projeções de redução do escoamento da BHRC para o século XXI da ordem de 12,3 e 20,4 %, para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. As projeções mais severas para os RCPs 4.5 e 8.5 foram de -18,9 % (2041-2070) e -43,6 % (2071-2099), respectivamente. A análise das projeções, individualmente por modelo, mostrou divergências, sendo o sinal (positivo ou negativo) semelhante aos obtidos para as projeções de precipitação. A análise do balanço hídrico vertical corroborou com os resultados obtidos para a vazão, tendo sido verificado déficit no balanço hídrico vertical para as situações de projeção de redução do escoamento e de excedente para as situações de projeção de aumento da vazão.

Com base nas projeções obtidas para o conjunto médio, considera-se que reduções na disponibilidade de água futura podem impactar o Sistema Hídrico Cachi, com possíveis impactos na área irrigada, fornecimento de água potável para a cidade de Ayacucho e de produção de energia para a zona alta do projeto Cachi. Contudo, entende-se que, diante das incertezas presentes na modelagem dos cenários climáticos futuros, a utilização dos resultados requer cautela. Recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas que abordem

especificamente as incertezas da modelagem e os cenários climáticos do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC.

## 5. REFERÊNCIAS

ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of Climate Change on the Hydrology of a Small Brazilian Headwater Catchment Using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **American Journal of Climate Change**, v. 07, n. 02, p. 355–366, 2018.

ANDRES, N. et al. Modélisation de ressources en eau et impact du changement climatique sur une échelle de temps journalier dans les Andes péruviennes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 59, n. 11, p. 2043–2059. 2014.

AYBAR, C. et al. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 5, p. 770–785, 2020.

BALTAZAR, L. A. et al. Hydrological modeling in a region with sparsely observed data in the eastern Central Andes of Peru, Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**. 2023.

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

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

CORREA, S. W. et al. Soil erosion risk associated with climate change at Mantaro River basin, Peruvian Andes. **Catena**, v. 147, p. 110–124, 2016.

DE OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20–31, 2019.

HADDELAND, I. et al. Effects of climate model radiation, humidity and wind estimates on hydrological simulations. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 2, p. 305–318, 2012.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fourth Assessment Report**. Geneva, Switzerland: Inter Governmental Panel on Climate Change. Cambridge; UK: Cambridge University Press; p. 103, 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>>, 2013.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2021.

KOTTEK, M. et al. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

LUO, M. et al. Comparing bias correction methods used in downscaling precipitation and

temperature from regional climate models: A case study from the Kaidu River Basin in Western China. **Water**, v. 10, n. 8, 2018.

RODRIGUES, J. A. M. et al. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2511–2526, 2020.

SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Peru. **Escenarios de Cambio Climático en la cuenca del río Mantaro para el año 2100**. Disponible em: <<http://www.minam.gob.pe>>, 2010.

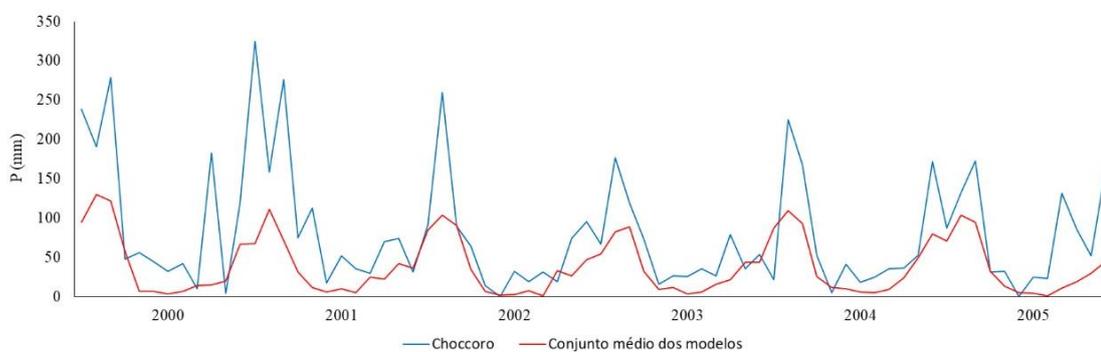
SINGH, V. **Handbook of Applied Hydrology** (Second Edi; McGraw-Hill Education books, ed.). Estados Unidos, 2017.

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**, 456–457, p. 12–29. 2012.

URRUTIA, R.; VUILLE, M. Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 114, n. 2, p. 1–15, 2009.

## ANEXO I – Correção de viés dos dados simulados pelos modelos climáticos

Especificamente para os dados de precipitação da estação de Choccoro, estes estão disponíveis para o período de 2000 a 2016, ou seja, havendo apenas seis anos de dados coincidentes com o baseline dos modelos climáticos (2000 a 2005). A Figura 1 mostra o conjunto médio da precipitação dos quatro modelos climáticos e da estação de Choccoro para o período de 2000 a 2005. A correlação entre os dados foi de 0,74 e houve tendência de subestimativa de -52,1 %, tendo sido esse banco de dados inadequado para a remoção de viés, o que foi atribuído à elevada variabilidade da precipitação na BHRC diante da reduzida extensão do período de dados coincidentes.



**Figura 1.** Precipitação mensal (P), para o período coincidente entre o banco de dados observado (Choccoro) e o conjunto médio dos quatro modelos climáticos.

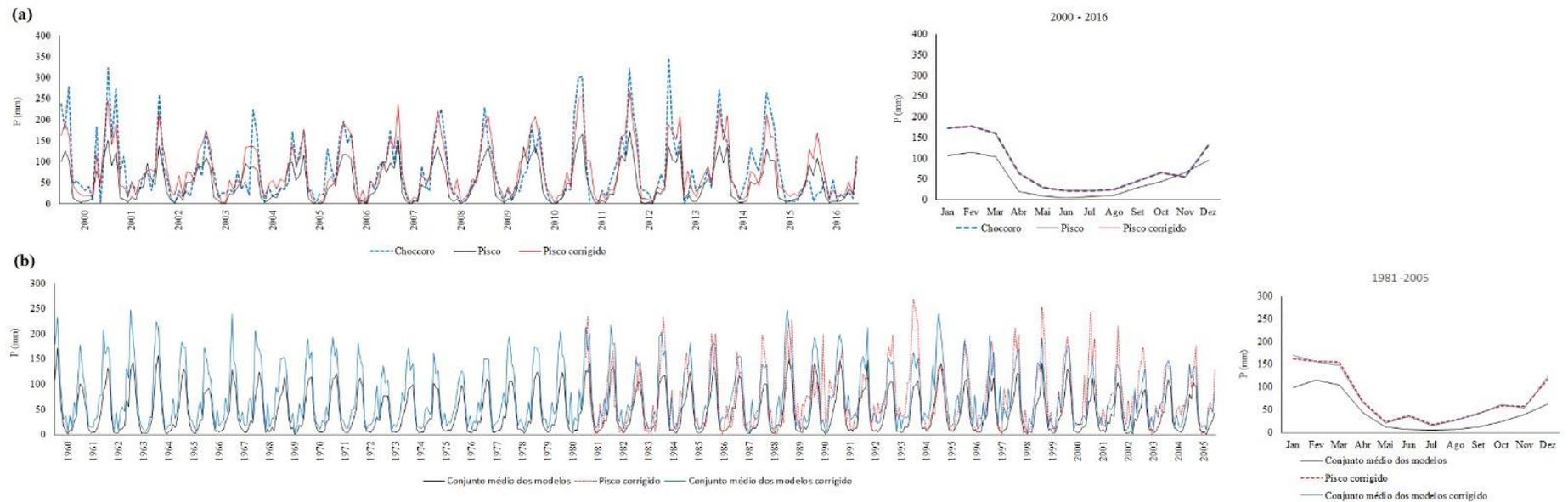
Diante da elevada subestimativa constatada para o período de 2000 a 2005, e visando uma primeira aproximação para a remoção do viés dos modelos climáticos para a BHRC, foi selecionado a grade meteorológica PISCOp V2.1- *Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and hydrological Observations*. O produto PISCOp tem resolução espacial de  $0,1^\circ$  e dispõe de dados no formato NetCDF entre 1981 e 2016 (AYBAR et al., 2020). A avaliação dos dados de precipitação PISCOp com base no ponto da grade mais próximo da estação de Choccoro, para o período coincidente entre os dois bancos de dados (2000 a 2016), mostrou coeficiente de correlação igual a 0,83 e subestimativa de -36,9 %. Em razão do maior período coincidente de dados (2000 a 2016), totalizando 17 anos, procedeu-se a remoção de viés dos dados PISCOp a partir dos dados observados em Choccoro pelo método do escalonamento linear (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012), conforme as Equações 1 e 2. Após a correção o coeficiente de correlação foi 0,86 e o viés foi anulado. A Figura 2a mostra os dados PISCOp antes e após a correção, juntamente aos dados observados em Choccoro.

$$P^*_{contr}(d) = P_{contr}(d) \cdot \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right] \quad (1)$$

$$P^*_{scen}(d) = P_{scen}(d) \cdot \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{contr}(d))} \right] \quad (2)$$

Onde:  $P(d)$  e  $P^*(d)$  referem-se à precipitação diária do modelo climático original e corrigida de viés, respectivamente;  $\mu_m$  é o valor médio mensal da variável; “*contr*”, “*scen*” e “*obs*” referem-se ao período controle (*baseline*), cenários futuros e dados observados, respectivamente.

Por fim procedeu-se a remoção de viés dos cenários climáticos de precipitação pelo método do escalonamento linear (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012) a partir do banco de dados PISCOp corrigido, conforme as Equações 1 e 2. Para o cálculo dos fatores de correção foi utilizado o período de dados coincidentes entre o banco de dados PISCOp corrigido e o *baseline* dos modelos climáticos (1981 a 2005). A correção foi realizada individualmente para cada um dos quatro modelos climáticos, e considerou o ponto da grade do modelo climático mais próximo da estação meteorológica com dados observados (Choccoro). Os fatores foram aplicados para a correção de toda a extensão dos cenários climáticos. A correlação entre os dados PISCOp corrigidos e o conjunto médio dos quatro modelos climáticos foi 0,80, com subestimativa de -41,4 %. Após a correção a correlação foi de 0,78 e o viés foi removido. A Figura 2b mostra os dados PISCOp corrigidos e o conjunto médio dos quatro modelos climáticos antes e após a correção.



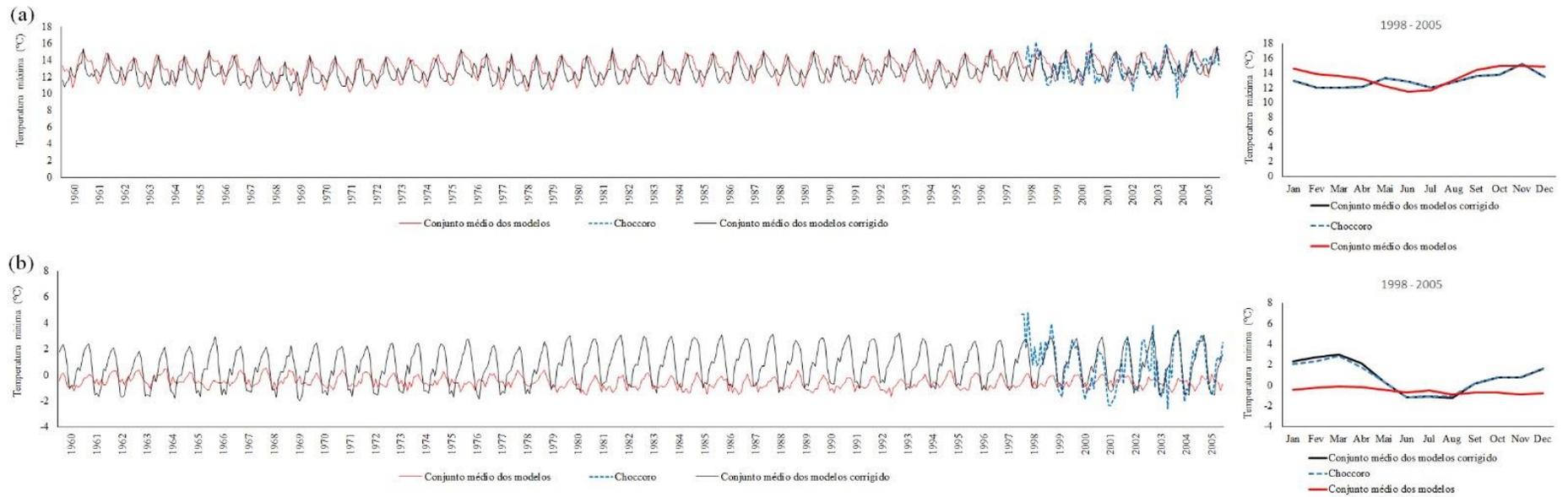
**Figura 2.** (a) Precipitação observada na estação de Choccoro e dados PISCOp antes e após a remoção de viés (esquerda) e médias mensais (direita); (b) dados PISCOp corrigidos junto ao conjunto médio dos quatro modelos climáticos antes e após a remoção de viés (esquerda) e médias mensais para o período de dados coincidentes (direita).

A remoção de viés dos dados de temperaturas máxima e mínima foi realizada pelo método do escalonamento linear (TEUTSCHBEIN; SEIBERT, 2012), de acordo com as Equações 3 e 4. Para a correção, foi considerado o período coincidente de dados disponíveis de temperatura para a estação de Choccoro e o *baseline* dos modelos climáticos (1998 a 2005). A Figura 3 mostra os dados observados e a média dos quatro modelos climáticos antes e após a correção.

$$T^*_{contr}(d) = T_{contr}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad (3)$$

$$T^*_{scen}(d) = T_{scen}(d) + \mu_m(T_{obs}(d)) - \mu_m(T_{contr}(d)) \quad (4)$$

Onde:  $T(d)$  e  $T^*(d)$  referem-se às temperaturas diárias do modelo climático original e corrigidas de viés, respectivamente;  $\mu_m$  é o valor médio mensal da variável; “*contr*”, “*scen*” e “*obs*” referem-se ao período controle (*baseline*), cenários futuros e dados observados, respectivamente.

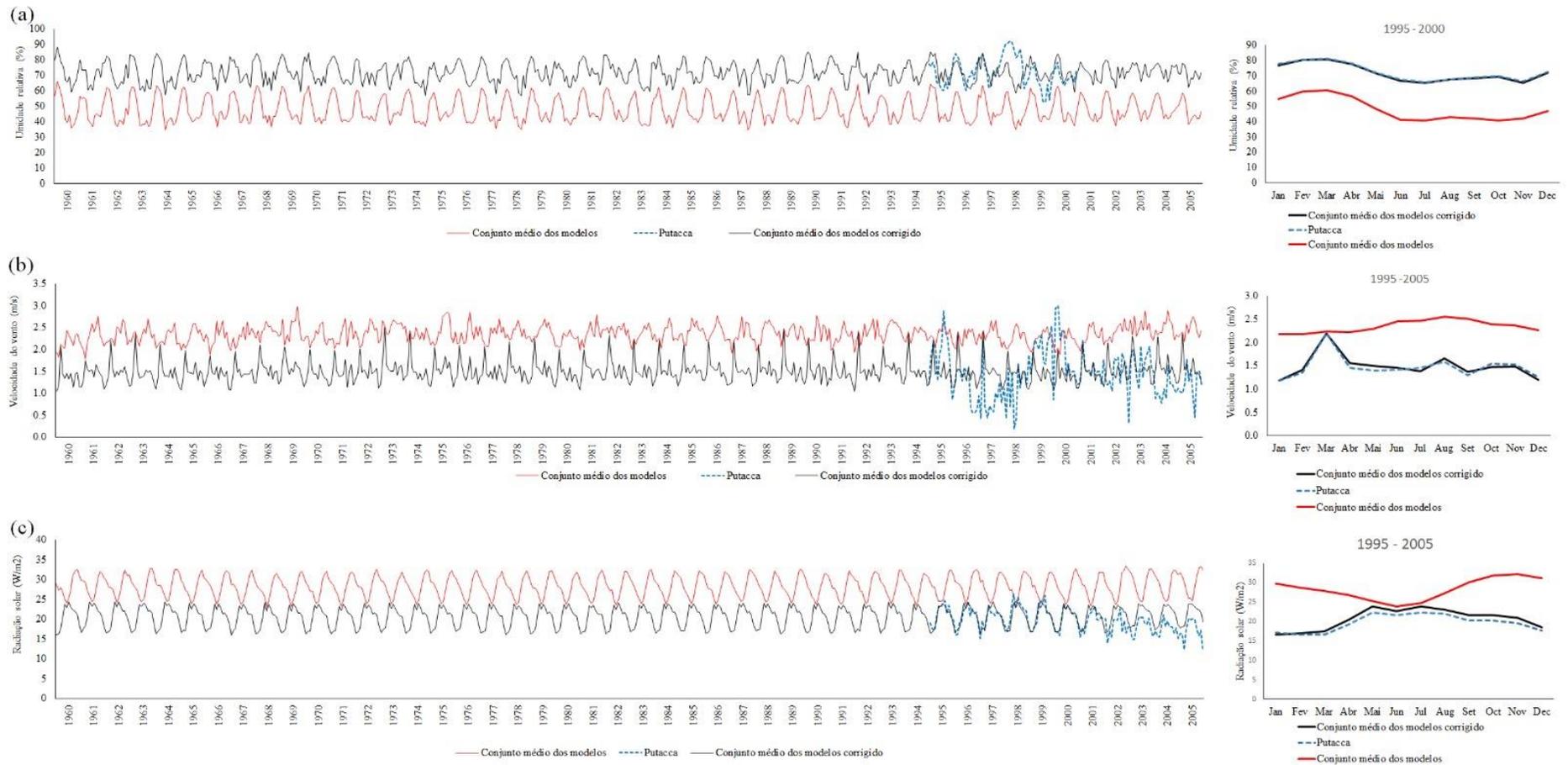


**Figura 3.** Nos gráficos da esquerda estão apresentados os dados observados na estação de Choccoro e o conjunto médio dos modelos climáticos antes e após a remoção de viés, e do lado direito as médias mensais para o período com disponibilidade de dados observados; sendo a) temperatura máxima e b) temperatura mínima.

Para correção de viés da umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, foi utilizado o método recomendado por Haddeland et al. (2012), conforme a Equação 5. Foi considerado o período de dados coincidente entre os modelos climáticos e a estação meteorológica de Putacca, sendo: radiação solar (1995 a 2005), umidade relativa (2000 a 2005) e velocidade do vento (1995 a 2005). A Figura 4 mostra os dados observados para o período controle e a média dos quatro modelos climáticos antes e após a correção, para a radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, respectivamente.

$$V_{bc} = V_{wdd} \cdot \left[ \frac{V_{wfd}(m)}{V_{wdd}(m)} \right] \quad (5)$$

Onde:  $V_{bc}$  e  $V_{wdd}$  são as variáveis diárias (umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento) com correção de viés e do modelo climático original, respectivamente;  $V_{wfd}(m)$  e  $V_{wdd}(m)$  são a média mensal de longo prazo para os dados observados e modelo climático, para o período controle.



**Figura 4.** Nos gráficos da esquerda estão apresentados os dados observados na estação de Putacca e o conjunto médio dos modelos climáticos antes e após a remoção de viés, e do lado direito as médias mensais para o período de dados observados; sendo a) umidade relativa, b) velocidade do vento e c) radiação solar.

## CONSIDERACOES FINAIS

Os Andes tropicais na América do Sul abrangem territórios da Venezuela, Colômbia, Equador, Peru, Bolívia, Argentina e Chile. Esta região é considerada *hotspot* da biodiversidade, com mais de 100 ecossistemas de alta diversidade biológica de plantas e animais. No que tange aos recursos hídricos, ainda há poucos estudos, contexto no qual se insere a presente pesquisa na BHRC, localizada no leste da Cordilheira Ocidental nos Andes centrais do Peru, cabeceira da bacia Amazônica.

A presente tese foi subdividida em duas partes, sendo apresentado na primeira uma revisão de literatura, e na segunda, dois artigos. No Artigo 1, foi realizada a calibração e validação do modelo hidrológico SWAT para a BHRC a partir de dados meteorológicos e de vazão observados em uma estação meteorológica e um posto fluviométrico, tendo sido obtidos resultados satisfatórios. O modelo calibrado foi então alimentado com dados de precipitação por satélite (IMERG), tendo sido obtidos resultados satisfatórios apenas após a remoção de viés dos dados do IMERG. Tais resultados mostraram que é necessária a ampliação da rede de postos de monitoramento hidrometeorológico na região visando subsidiar pesquisas hidrológicas. Os processos hidrológicos simulados foram então analisados na escala de sub-bacias. A produção média anual de água foi de 373,4 mm.ano<sup>-1</sup>, variando entre 356,5 e 385,0 mm.ano<sup>-1</sup> nas sub-bacias. Em termos médios, os componentes escoamento superficial direto, subsuperficial e subterrâneo representaram 20,8, 42,5 e 36,7 % do escoamento anual, respectivamente. Concluiu-se que a modelagem hidrológica distribuída é uma alternativa para o estudo do comportamento hidrológico em regiões com falta de dados monitorados. Recomenda-se para pesquisas hidrológicas futuras nos Andes peruanos a avaliação dos produtos de precipitação em grade PISCOp (AYBAR et al., 2020) e RAIN4PE (FERNANDEZ-PALOMINO et al., 2022).

No Artigo 2, foram avaliados os impactos hidrológicos decorrentes dos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5 simulados por quatro modelos climáticos globais e regionalizados pelo modelo Eta: Eta-BESM, Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5. A remoção de viés dos dados dos modelos climáticos foi dificultada em razão da baixa disponibilidade de dados observados, consistindo em uma limitação no presente estudo.

Considerando o conjunto médio dos quatro modelos no século XXI para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente, foram obtidas projeções de redução da precipitação de 6,7 e 11,7 %, aumento da temperatura máxima de 2,3 e 3,1 °C e aumento da temperatura mínima de 1,2 e 1,8 °C. Analisando individualmente as projeções de precipitação dos modelos, verificaram-se grandes incertezas para o início do século XXI (2011-2040) e meados (2041-2070), períodos estes em que dois modelos projetaram redução (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) e dois projetaram aumento (Eta-BESM e Eta-CanESM2). Entretanto, para o final do século (2071-2099) os quatro modelos projetaram redução da precipitação, indicando menores incertezas nas projeções. Na simulação dos impactos hidrológicos com o SWAT, considerando o conjunto médio dos quatro modelos, foram projetadas reduções nas vazões do século XXI da ordem de 12,3 e 20,4 % para os RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente. Entende-se que a redução da disponibilidade hídrica deve ser analisada com cautela em virtude das inúmeras fontes de incertezas presentes na modelagem de cenários climáticos futuros. Neste contexto, recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas que abordem especificamente as incertezas da modelagem e os cenários climáticos do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC.