

**JULIETE DE PAULO CATEIN**

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO  
COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO JUCU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio

Coorientador: Gabrielle Ferreira Pires

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**

**2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C357e  
2024 Catein, Juliete de Paulo, 1989-  
Efeitos das mudanças climáticas globais no comportamento  
hidrológico da bacia do rio Jucu / Juliete de Paulo Catein. –  
Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (74 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.

Referências bibliográficas: f. 62-69.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.262>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Desenvolvimento de recursos hídricos. 2. Bacias  
hidrográficas. 3. Jucu, Rio, Bacia (ES). 4. Mudanças climáticas.  
5. Precipitação (Meteorologia). I. Cecílio, Roberto Avelino,  
1976-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em  
Meteorologia Aplicada. III. Título.

CDD 22. ed. 630.25148

**JULIETE DE PAULO CATEIN**

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO  
COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO JUCU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Aplicada, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2024.



Documento assinado digitalmente

**JULIETE DE PAULO CATEIN**

Data: 29/07/2024 07:46:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Juliete de Paulo Catein**  
Autora



Documento assinado digitalmente

**ROBERTO AVELINO CECILIO**

Data: 29/07/2024 08:11:52-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Roberto Avelino Cecílio**  
Orientador

*À Deus, que guia meus passos e me fortalece a cada dia, à minha querida família, fonte de amor e inspiração, e aos amigos que são como anjos enviados para compartilhar risos, lágrimas e sonhos.*

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por responder às minhas orações e me consentir paciência, instrução e principalmente perseverança nos momentos difíceis e improváveis, na minha jornada até aqui, definitivamente sem Ele e Suas instruções chegar a um mestrado e terminá-lo não seria possível.

A minha família, em especial aos meus queridos pais, Genaro Catein Barcellos, Laureci de Paulo Catein por todo apoio fornecido. Por desde cedo não medirem esforços para proporcionar uma educação de qualidade e acreditarem sempre nos meus sonhos e sonhá-los junto comigo.

Agradeço especialmente ao meu orientador Doutor Roberto Avelino Cecílio pela confiança e apoio. Por ser uma pessoa incrível, principalmente com sua paciência e compreensão em me ajudar resolver os problemas a qualquer momento, algo difícil de encontrar hoje. Uma grande satisfação por ter me apoiado rumo ao complexo conhecido em uma área com grande potencial, falo que não me veria trabalhando em outra linha de pesquisa, pois tenho um amor especial pela modelagem hidrológica de uma forma geral.

À Doutora Tamíres Partélli Correia, que tanto me ajudou para o desenvolvimento e conclusão do trabalho, sem ela literalmente eu não estaria aqui, agradeço pelo incentivo, paciência e ensinamento.

À Doutora Francielle Rodrigues de Oliveira, que com sua generosidade em compartilhar conhecimento e paciência foram cruciais para o sucesso desta jornada, agradeço sinceramente pela sua ajuda inspiradora e pelo apoio constante.

Aos doutorandos Caio Pagani, Iulo Pessotti Moro, Letícia Prechesniuki Alves e Lormido Ernesto Zita, pela grande ajuda com o programa SWAT, os mapas utilizados e utilização do CDO, além de boas conversas e ideias para conclusão deste trabalho.

À melhor secretária do mundo, nossa amada e preciosa Graça, que é sempre tão solícita e eficiente.

Ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em especial à equipe GEPAF do Laboratório de Modelagem Hidrológica DCFM/UFES.

A todos os meus amigos e companheiros de jornada da pós-graduação em Meteorologia Aplicada da UFV e da pós-graduação em Ciências Florestais da UFES, que me apoiaram, ensinaram e incentivaram, além de me fazer sorrir e tornar minha jornada mais leve.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro durante o primeiro mês de curso, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos 23 meses de apoio.

*“Em seu coração o homem planeja seu caminho, mas o Senhor determina os seus passos.”*

(Provérbios 16:9)

## RESUMO

CATEIN, Juliete de Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Efeitos das mudanças climáticas globais no comportamento hidrológico da bacia do rio Jucu.** Orientador: Roberto Avelino Cecílio. Coorientador: Gabrielle Ferreira Pires.

A gestão eficiente dos recursos hídricos em bacias hidrográficas requer uma compreensão abrangente dos padrões climáticos atuais e futuros. A modelagem hidrológica desempenha um papel crucial nesse processo, e a precisão dos resultados depende da qualidade dos dados climáticos utilizados. Nesta dissertação, foi realizada uma avaliação com bases de dados meteorológicos e sua influência na modelagem hidrológica da bacia do rio Jucu em cenários passados para aplicação em projeções futuras, utilizando as bases de dados do protocolo CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) e XAVIER como referência. O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi empregado para realizar estas modelagens hidrológica da bacia. Os resultados evidenciaram diferenças nos padrões de vazões e precipitação entre as bases de dados, afetando os resultados da modelagem hidrológica. Na comparação dos resultados, os dados XAVIER, mostraram-se mais apropriados para a modelagem. Essas comparações ressaltam a importância de selecionar adequadamente as bases de dados climáticos para uma gestão sustentável dos recursos hídricos em cenários futuros. A abordagem adotada consistiu em realizar 5 fases distintas para o desenvolvimento da metodologia: i) Elaboração de um banco de dados que inclui informações sobre o tipo e uso do solo, topografia e clima, essenciais para a implementação do Soil and Water Assessment Tool (SWAT) na simulação do ciclo hidrológico Bacia do Rio Jucu utilizando o SWAT; ii) Calibração e validação do SWAT; iii) Compreensão e análise dos resultados históricos de calibração XAVIER e CMIP6\_HISTÓRICO; iv) Execução das simulações dos cenários de mudanças climáticas futuras, com os dados CMIP6\_FUTURO SSP2-4.5 e SSP5-8.5; v) Análise dos resultados obtidos nas simulações, proporcionando uma avaliação crítica dos impactos hidrológicos em condições futuras. Averiguou-se que i) O modelo hidrológico realiza uma simulação precisa das condições da bacia durante o período histórico, sugerindo que possui robustez para realizar previsões hidrológicas com os dados XAVIER; ii) A tendência no geral em relação as mudanças climáticas é de redução das vazões, mesmo tendo uma aumento nas vazões durante os meses chuvosos dezembro a março, e não tendo mudanças no uso e ocupação do solo.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Modelagem. Rio Jucu. SWAT. CMIP6.

## ABSTRACT

CATEIN, Juliete de Paulo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february de 2024.  
**Effects of global climate change on the hydrological conduct of the Jucu River basin.**  
Advisor: Roberto Avelino Cecílio. Co-advisor: Gabrielle Ferreira Pires.

The efficient management of water resources in river basins requires a comprehensive understanding of current and future climate patterns. Hydrological modeling plays a crucial role in this process, and the accuracy of the results depends on the quality of the climate data used. In this dissertation, an evaluation was carried out with meteorological databases and their influence on hydrological modeling of the Jucu River basin in past scenarios for application in future projections, using the CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) and XAVIER protocol databases as a reference. The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model was used to carry out this hydrological modeling of the basin. The results showed differences in the patterns of flows and precipitation between the databases, affecting the results of the hydrological modeling. When comparing the results, the XAVIER data proved to be more appropriate for modeling. These comparisons highlight the importance of properly selecting climate databases for sustainable water resource management in future scenarios. The approach adopted consisted of five distinct phases for the development of the methodology: i) Preparation of a database including information on land type and use, topography and climate, essential for implementing the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) in simulating the hydrological cycle of the Jucu River Basin using SWAT; ii) Calibration and validation of SWAT; iii) Understanding and analyzing the historical calibration results XAVIER and CMIP6\_HISTORICAL; iv) Running the simulations of future climate change scenarios, with the CMIP6\_FUTURE data SSP2-4.5 and SSP5-8.5 data; v) Analysis of the results obtained in the simulations, providing a critical assessment of the hydrological impacts under future conditions. It was found that i) the hydrological model accurately simulates the conditions in the basin during the historical period, suggesting that it is robust enough to make hydrological forecasts with the XAVIER data; ii) the general trend in relation to climate change is a reduction in flows, even though there is an increase in flows during the rainy months from December to March, and there are no changes in land use and occupation.

Keywords: Hydrographic basin. Modeling. Jucu River. SWAT. CMIP6.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Classes de usos do solo utilizadas .....	36
Quadro 2 - Classes de solos utilizadas e respectivas fontes dos parâmetros .....	37
Quadro 3 - Filtros aplicados para obter dados climáticos do CMIP6 do site do WCRP .....	38
Quadro 4 - Características e fatores de conversão das variáveis de interesse do modelo climático global.....	39
Quadro 5 - Parâmetros e pesos ingressados na ferramenta GCMeval .....	40
Quadro 6 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo .....	42
Quadro 7 - Nomeação dos cenários futuros de mudanças climáticas.....	45
Figura 1 – Fluxograma com a etapas de criação do projeto desenvolvido .....	34
Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Jucu (BHRJ).....	35
Figura 3 - Hidrograma comparativo dos dados observados e os simulados, e correlações das vazões mensais Pré-calibração .....	51
Figura 4 - Hidrograma comparativo dos dados observados e os simulados, e correlações das vazões mensais Calibração e Validação. ....	52
Figura 5 - Gráfico Comparativo das vazões obtidas dos dados XAVIER e CMIP6_HISTÓRICO .....	54
Figura 6 - Gráfico Comparativo das precipitações obtidas dos dados XAVIER e CMIP6_HISTÓRICO .....	55
Figura 7 - Gráfico Comparativo da evapotranspiração potencial obtida dos dados XAVIER e CMIP6_HISTÓRICO .....	55
Figura 8 - Gráfico Comparativo da evapotranspiração real obtida dos dados XAVIER e CMIP6_HISTÓRICO .....	56
Figura 9 - Gráfico Projeções do caminho SSP2-4.5. ....	57

Figura 10 - Gráfico Projeções do caminho SSP5-8.5.....	58
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos coeficientes para avaliação dos resultados do modelo SWAT .....	45
Tabela 2 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo .....	46
Tabela 3 - Comparação de parâmetros utilizados por outros autores .....	47
Tabela 4 - Índices estatísticos da pré-calibração, calibração e validação do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Jucu .....	49
<b>A1</b> - Parâmetros físicos e químicos do solo para cada tipo específico de solo.....	70

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AGRL	Agricultural Land-Generic
AGRR	Agricultural Land-Row Crops
ANA	Agência Nacional de Águas
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaços vazios)
APA	Área de Proteção Ambiental
AR6	Sexto Relatório de Avaliação
BANA	Bananas
BANA	Bananas
BARR	Barren
BHRJ	Bacia Hidrográfica do Rio Jucu
CANMX	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)
CH_N2	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm/h)
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
COCO	Coconut
COCO	Coconut
COFF	Coffee
COFF	Coffee
EPCO	Fator de compensação de absorção de plantas
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
ESGF	Earth System Grid Federation
ET	Evapotranspiração Real
EUCA	Eucalyptus
FRSE	Forest-Evergreen

FRST	Forest mix
GCM	Global Climate Model
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEOBASES	Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GRAR	Grarigue
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)
GW_REVAP	Coeficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer (mm)
IEMA	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do ES
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAT_TIME	Tempo do fluxo lateral (dias)
MCGs	Modelos Climáticos Globais
NS	Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe
ORCD	Orchard
PAST	Pasture
PET	Evapotranspiração Potencial
PINE	Pine
PREC	Precipitação
QM	Mapeamento de Quantis
R <sup>2</sup>	Coeficiente de Determinação
RCM	Regional Climate Model
RCM	Modelos Climáticos Regionais
RNGB	Range-brush

RNGE	Range-grasses
RNGE	Range-grasses
RUBR	Rubber Trees
SOL_ALB	Albedo do solo (fração)
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm/h)
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SSP	Shared Socio-economic Pathways
SUGC	Sugarcane
SUGC	Sugarcane
SURLAG	Coefficiente de retardo do escoamento superficial nas HRUs
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWRN	South Western Range
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins
UNEP	United Nations Environment Programme
URLD	Residential-Low Density
USDA-ARS	USDA Agricultural Research Service
WATR	Water
WCRP	Programa Mundial de Pesquisa do Clima
WETN	Wetlands-Non-Forested
WMO	World Meteorological Organization

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Mudanças Climáticas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Modelos Climáticos.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Modelos Climáticos Globais: CMIP6 .....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Redução de Escala de Modelos Climáticos.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2</b>	<b>Bacias Hidrográficas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelagem Hidrológica .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Modelo SWAT.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.1.1</b>	<b>Fundamentação Matemática do SWAT .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Calibração e Validação de Modelos Hidrológicos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.4</b>	<b>Associação de Mudanças Climáticas e Estudos Hidrológicos .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de Estudo.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelagem Hidrológica com o SWAT: Bases de Dados de Entrada .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Dados Topográficos .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Uso e Ocupação do Solo .....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Tipos de Solo .....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Dados Meteorológicos.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.4.1</b>	<b>Seleção do Modelo Climático.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.4.2</b>	<b>Correção de Viés.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Séries de Vazão .....</b>	<b>41</b>

3.2.4.2	Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação do SWAT .....	41
3.4	Cenários Simulados para Contemplar as Mudanças Climáticas .....	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
4.1	Calibração e Validação do SWAT .....	46
4.2	Comparação dos Resultados Históricos .....	53
4.3	Simulação de cenários .....	56
5.	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
	APÊNDICE A.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais referem-se a modificações no clima ao longo de um extenso período de tempo, evidenciadas pela variabilidade nas médias e propriedades estatísticas dos elementos do clima (IPCC, 2014). A influência humana tem contribuído para o aumento na temperatura global nos últimos dois milênios, resultando em ramificações nas mudanças climáticas que impactam ecossistemas, comunidades humanas, infraestruturas e assentamentos (IPCC, 2022).

Projeções a nível global indicam que a incidência de eventos de precipitação extrema aumentará em cerca de 7% para cada aumento de 1°C na temperatura média global (IPCC, 2021). O incremento na ocorrência e magnitude de fenômenos climáticos extremos, tais como períodos de seca prolongada, chuvas intensas e incêndios, são exemplos dos efeitos já evidentes das alterações climáticas (IPCC, 2022). Dessa forma, sua compreensão é essencial para antecipar, adaptar e mitigar seus impactos, proporcionando uma base sólida para a formulação de estratégias e políticas relacionadas ao aquecimento global.

Particularmente, a compreensão da influência das mudanças climáticas globais sobre o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas é crucial para prever as variações no comportamento sazonal das vazões. Diversos estudos têm investigado essa relação, buscando estabelecer vínculos entre as projeções climáticas geradas pelos modelos climáticos globais (MCG) e as respostas hidrológicas nas bacias (BEDNAR; MARTON, 2022; BLEIDORN *et al.*, 2019; EL JEITANY; PACETTI; CAPORALI, 2023; FLINT; TORREGROSA, 2020; GAUR *et al.*, 2023; PRASAD; YOUSUF; SANDHU, 2022; SHRESTHA, S. *et al.*, 2019). Essa abordagem é essencial para entender e antecipar as possíveis mudanças nos regimes de vazão e seus impactos na disponibilidade hídrica regional. Assim como as simulações do clima futuro, propiciadas pelos MCG, são periodicamente refinadas e atualizadas, as previsões hidrológicas também devem ser revisadas e ajustadas à medida que novos dados e conhecimentos são incorporados (ANA, 2016).

A gestão sustentável dos recursos hídricos em bacias hidrográficas depende da compreensão da influência dos padrões climáticos (atuais e futuros) sobre seu regime hidrológico. Para tanto, a modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial, pois simula o comportamento do sistema hidrológico em resposta à variabilidade/mudança climática, fornecendo informações essenciais para tomadas de decisão relacionadas à gestão dos recursos

hídricos (DAS *et al.*, 2022). A modelagem hidrológica desempenha um papel fundamental na compreensão e previsão do comportamento das vazões, especialmente diante das transformações no uso da terra e das mudanças climáticas. A capacidade de antecipar os impactos dessas alterações é crucial para o planejamento sustentável e a gestão eficaz dos recursos hídricos.

Nesse contexto, o Soil and Water Assessment Tool (SWAT) destaca-se como um dos modelos mais confiáveis. O SWAT é reconhecido por sua capacidade de simular processos complexos, como a interação solo-planta-atmosfera, o que permite uma representação mais precisa dos fenômenos hidrológicos (NEITSCH; ARNOLD; WILLIAMS, 2011). Dessa forma, a modelagem hidrológica, com ênfase no uso do SWAT, emerge como uma ferramenta indispensável para a tomada de decisões informadas e sustentáveis na gestão dos recursos hídricos, como bacias hidrográficas.

A bacia hidrográfica do rio Jucu (BHRJ), localizada no Espírito Santo, destaca-se por sua importância regional. Juntamente com a bacia do rio Santa Maria da Vitória, responsável pelo abastecimento de água de mais de 1,5 milhão de pessoas, que vivem na Região Metropolitana da Grande Vitória e em alguns municípios da região serrana do estado (BLEIDORN *et al.*, 2019; SOPRANI *et al.*, 2007). Dentre suas atividades econômicas destaca-se a geração de energia elétrica, sendo responsável por cerca de 11% da produção de energia do estado, além da agricultura, pesca e turismo (CORREIA, 2016). Sob o ponto de vista ecológico, a BHRJ abriga uma rica biodiversidade, incluindo remanescentes florestais, manguezais e restingas. Todavia, enfrenta diversos desafios, como a poluição das águas, a ocupação desordenada da terra e o desmatamento (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019). Embora alguns trabalhos já avaliaram mudanças no comportamento hidrológico da BHRJ em resposta a modificações no uso da terra (CECÍLIO *et al.*, 2020; CORREIA, 2016), ainda faz-se necessário a avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre o comportamento sazonal das suas vazões.

Do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o impacto das mudanças climáticas no comportamento sazonal das vazões da bacia hidrográfica do rio Jucu.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas referem-se a um conjunto de modificações nas condições climáticas que perduram ao longo de um extenso período, abrangendo décadas ou mais. Essas alterações podem ser discernidas por meio das variações nas médias e na variabilidade das propriedades climáticas. Essas transformações podem ser iniciadas por processos naturais intrínsecos ou por influências externas, como erupções vulcânicas, variações nos ciclos solares e mudanças contínuas resultantes das atividades humanas, que impactam a composição da atmosfera e a utilização do solo (CASTRO, 2022; IPCC, 2014).

Com o objetivo de fornecer análises científicas sobre os impactos, potenciais riscos futuros e sugerir alternativas para mitigação e adaptação às mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) foi estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme, UNEP) (IPCC, 2023b). O IPCC desempenha um papel crucial na divulgação de uma série de relatórios que sintetizam o conhecimento científico atual sobre as mudanças climáticas, oferecendo orientações fundamentais para formuladores de políticas e a comunidade global.

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6), concluído em março de 2023, abrangente sintetiza as contribuições de três Grupos de Trabalho distintos do IPCC, bem como de relatórios especiais, oferecendo uma visão ampla e atualizada do estado das mudanças climáticas e seus impactos, além de fornecer insights sobre possíveis estratégias de mitigação e adaptação. Os Grupos de Trabalhos têm a responsabilidade de abordar diferentes áreas: bases físicas das mudanças climáticas; impactos, adaptabilidade e vulnerabilidade associados às mudanças climáticas; e na mitigação dessas alterações ambientais (IPCC, 2023a).

É importante ressaltar que desde 1970, a temperatura da superfície global experimentou um aumento notável, quando analisada em qualquer período de 50 anos nos últimos dois milênios (IPCC, 2021).

### 2.1.1 Modelos Climáticos

Os modelos climáticos são representações dos processos físicos da atmosfera, superfície terrestre, oceano e gelo marinho, fundamentados nos princípios físicos, biológicos e químicos, incluindo suas interações. Esses modelos têm como objetivo aprimorar a compreensão e a previsibilidade do comportamento do clima em escalas anuais, decadais e centenas (FIELD *et al.*, 2012). Eles examinam o impacto da variabilidade natural, da atividade humana ou da interação entre ambas nas mudanças climáticas que estão sendo observadas. As conclusões desses modelos desempenham um papel fundamental na formulação de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos, agricultura, transporte e planejamento urbano (GFDL, 2023).

O modelo climático global, também referido como Global Climate Model (GCM) ou General Circulation Model, é uma representação matemática dos principais elementos do sistema climático em escala global, usando uma grade tridimensional de células. Por contraste, um modelo climático regional, chamado de Regional Climate Model (RCM), é um modelo numérico que simula os processos atmosféricos e de superfície terrestre em escalas menores em comparação com os MCGs (FIELD *et al.*, 2012; GARIANO; GUZZETTI, 2022; IPCC, 2014).

Os vieses nos Modelos Climáticos Globais decorrem da resolução grosseira desses modelos, incapazes de fornecer informações em escalas regionais ou locais. Assim, é essencial reduzir a escala dos MCGs para obter informações em nível local, permitindo a obtenção de resultados confiáveis e adaptados às condições específicas da área de estudo (POGGIO; GIMONA, 2015; SHRESTHA, A. *et al.*, 2020). As incertezas nos MCGs, particularmente em escalas regionais, surgem de diversas fontes, incluindo variações nos cenários de forçamento climático, a utilização de diferentes MCGs e as previsões decorrentes de múltiplas realizações para um mesmo cenário e MCG. (FU *et al.*, 2009; TOUMA *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2019).

### 2.1.2 Modelos Climáticos Globais: CMIP6

O Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) é um empreendimento experimental padronizado destinado a investigar modelos climáticos globais, com o objetivo de aprimorar a compreensão das mudanças climáticas passadas, presentes e futuras. Além disso, o CMIP conduz experimentos para avaliar a previsibilidade do sistema climático em diferentes escalas temporais e espaciais, e para realizar projeções do estado climático observado. A primeira fase do CMIP foi iniciada em 1995 (WCRP, 2023). O CMIP realiza experimentos para avaliar a

previsibilidade do sistema climático em diversas escalas de tempo e espaço, proporcionando previsões do estado do clima observado.

O CMIP6 representa a mais recente iteração de uma iniciativa global padrão para intercomparação de modelos climáticos acoplados, conduzida pelo Programa Mundial de Pesquisa do Clima (WCRP). Lançado em 2016, o CMIP6 visa avançar na compreensão das complexidades climáticas, proporcionando uma plataforma crucial para avaliação da previsibilidade do sistema climático em múltiplas escalas temporais e espaciais, além de gerar projeções robustas sobre as mudanças climáticas passadas, presentes e futuras (GAUR *et al.*, 2023).

Comparada às fases anteriores, essa etapa demonstra uma representação mais refinada dos processos físicos, químicos e biológicos, acompanhada de uma resolução superior. Notavelmente, houve aprimoramentos na simulação de uma gama diversificada de indicadores de mudanças climáticas e em outros aspectos do sistema climático em grande escala (IPCC, 2021). No CMIP6, uma nova estrutura de cenários foi estabelecida para avaliar as mudanças climáticas, combinando trajetórias de força radiativa futura com caminhos de desenvolvimento socioeconômico (IPCC, 2021; O'NEILL *et al.*, 2014), sendo observadas a partir dos relatórios desenvolvidos pelos Grupos de Trabalhos.

O relatório do Grupo de Trabalho I aborda a compreensão física mais atualizada do sistema climático e das alterações climáticas, reunindo os mais recentes avanços na ciência climática e combinando múltiplas linhas de evidência do paleoclima, observações, compreensão de processos, simulações climáticas globais e regionais. Mostra como e por que o clima mudou até à data e a melhor compreensão da influência humana numa gama mais ampla de características climáticas, incluindo eventos extremos. Dentro desse grupo, as informações regionais ganharam maior destaque, sendo cruciais para avaliar os riscos climáticos. É inegável que as mudanças climáticas têm um impacto significativo no clima e eventos extremos, como secas, ondas de calor, chuvas intensas e ciclones tropicais, em todas as partes do mundo. Nos últimos dois milênios, devido à influência humana, tem sido registrado um aumento na temperatura superficial global a uma taxa sem precedentes (CASTRO, 2022; IPCC, 2023a).

O Grupo de Trabalho II, avalia os impactos das alterações climáticas, desde uma visão mundial até uma visão regional dos ecossistemas e da biodiversidade, e dos seres humanos e das suas diversas sociedades, culturas e povoações. Considera as suas vulnerabilidades e as capacidades e limites destes sistemas naturais e humanos para se adaptarem às alterações

climáticas e, assim, reduzirem os riscos associados ao clima, juntamente com opções para criar um futuro sustentável para todos através de uma abordagem equitativa e integrada aos esforços de mitigação e adaptação em todos os aspectos.

O Grupo de Trabalho III, em seu relatório sobre a mitigação das mudanças climáticas, enfatiza que os caminhos e cenários de emissões são projeções quantitativas que consideram a trajetória das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Essas projeções são baseadas em várias suposições relacionadas às condições socioeconômicas e medidas de mitigação. Esses cenários podem ser agrupados em abordagens econômicas, que contemplam opções de redução de emissões de baixo custo, e outras abordagens que refletem políticas e ações atuais. No entanto, a maioria desses cenários não leva em conta suposições sobre justiça ambiental, equidade global ou distribuição de renda intrarregional (PRASAD; YOUSUF; SANDHU, 2022).

Estes cenários são denominados Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (Shared Socio-economic Pathways, SSP). Eles representam projeções de mudanças socioeconômicas globais até o ano 2100 e oferecem descrições de possíveis evoluções futuras da sociedade, considerando mudanças climáticas ou políticas climáticas (IPCC, 2023a). Ao estabelecer a estrutura de cenários para a avaliação das mudanças climáticas, os SSP foram desenvolvidos com base em uma série de narrativas que descrevem diferentes trajetórias de desenvolvimento e os desafios associados a cada um dos cinco SSP definidos posteriormente.

- SSP1 (Sustentável): Representa um mundo com altas taxas de crescimento econômico, menor desigualdade, investimentos significativos em educação, saúde e eficiência energética, além de uma rápida transição para fontes de energia de baixo carbono.
- SSP2 (Intermediário): Reflete um cenário moderado, com taxas de crescimento econômico mais equilibradas, progresso socioeconômico gradual e um equilíbrio entre prioridades de desenvolvimento e sustentabilidade ambiental.
- SSP3 (Desigual): Descreve um mundo com desigualdades econômicas e sociais persistentes, crescimento econômico lento ou estagnado em muitas regiões, governança fraca e falta de investimentos em inovação e infraestrutura verde.
- SSP4 (Desgovernado): Caracteriza um futuro em que as instituições globais e regionais são fracas, resultando em altos níveis de conflito, instabilidade política, migração em massa e um enfoque limitado na sustentabilidade ambiental.

- SSP5 (Fossil-fueled Development): Descreve um mundo em que o crescimento econômico é impulsionado principalmente pela queima contínua de combustíveis fósseis, resultando em altas emissões de gases de efeito estufa, mudanças climáticas significativas e impactos ambientais adversos (O'NEILL *et al.*, 2014; RIAHI *et al.*, 2017).

O IPCC (2023b) ainda destaca cenários de nível 1 para o século XXI, definidos como:

- SSP1-2.6: Este cenário representa o limite inferior do conjunto de trajetórias futuras e é uma atualização do cenário RCP2.6 do CMIP5. Prevê um aquecimento médio inferior a 2°C até 2100. Caracteriza-se por desafios de mitigação e vulnerabilidade baixos, resultando em baixas emissões de gases de efeito estufa. Além disso, considera o aumento das áreas florestais em escala global.
- SSP2-4.5: Atualização do cenário RCP4.5 do CMIP5, este cenário representa uma posição intermediária entre as trajetórias futuras. Combina vulnerabilidade social com emissões intermediárias de gases de efeito estufa, simulando um forçamento radiativo de 4.5 W/m<sup>2</sup>.
- SSP5-8.5: Atualizando o cenário RCP8.5 do CMIP5, este cenário representa o limite superior das trajetórias futuras. Caracteriza-se por emissões elevadas, o suficiente para resultar em um forçamento radiativo de 8.5 W/m<sup>2</sup> em 2100.

De acordo com o AR6, há uma variedade de mais de 40 MCGs. No entanto, neste estudo, foi baseado no modelo GFDL-ESM4, desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), amplamente conhecido por seu acrônimo GFDL (GUO *et al.*, 2020). O laboratório tem desenvolvido diversos modelos numéricos dinâmicos para simular o comportamento da atmosfera, dos oceanos e do clima. Seu objetivo é facilitar a compreensão dos processos físicos e biogeoquímicos que influenciam o clima da Terra, com o intuito de distinguir se as causas das mudanças climáticas são de origem antropogênica ou natural. A segunda parte do nome do modelo climático global, ESM4, indica a abordagem do modelo, focalizada na compreensão das interações do sistema terrestre (CASTRO, 2022).

### 2.1.3 Redução de Escala de Modelos Climáticos

A redução de escala, também conhecida como downscaling, refere-se ao processo de transferência de informações climáticas de um Modelo Climático Global, que tem resolução

grosseira em escala global, para uma resolução mais detalhada em escala regional ou local. Isso é especialmente necessário ao utilizar essas informações como entrada em modelos hidrológicos que lidam com o clima em uma escala mais específica. É destacado na literatura que a escolha dos modelos climáticos globais e a abordagem de downscaling influenciam as projeções obtidas (CIABATTA *et al.*, 2016; GARIANO; GUZZETTI, 2022; SHRESTHA, A. *et al.*, 2020). O processo de redução de escala, ou downscaling, engloba procedimentos complexos, como a correção de vieses e a desagregação espacial (POGGIO; GIMONA, 2015).

Existem dois tipos principais de downscaling: o dinâmico e o estatístico. O downscaling dinâmico envolve a utilização de modelos climáticos de alta resolução, frequentemente empregados para gerar Modelos Climáticos Regionais (RCM). Contudo, uma desvantagem associada ao downscaling dinâmico é a considerável capacidade computacional exigida para sua implementação (POGGIO; GIMONA, 2015).

Por outro lado, o downscaling estatístico é um método que converte variáveis atmosféricas de grande escala, obtidas de um MCG, em variáveis de escala local. Esse procedimento utiliza geradores climáticos, esquemas de classificação climática e funções de transferência. As funções de transferência são implementadas por meio de técnicas como redes neurais artificiais, regressões lineares e não lineares, fatores de mudança e mínimos quadrados (BARATTO *et al.*, 2022a; SRINIVASA RAJU; NAGESH KUMAR, 2018).

Uma das abordagens mais prevalentes é o mapeamento de quantis (QM) (CASTRO, 2022; SHRESTHA, A. *et al.*, 2020). Essa técnica incorpora dados observados da área de interesse e ajusta a distribuição de saída do modelo por meio da criação de uma função de transferência para realocar os quantis das variáveis climáticas (SHRESTHA, M.; ACHARYA; SHRESTHA, 2017). Essa metodologia emprega uma equação para corrigir os dados históricos e outra para os dados futuros, derivados dos resultados do modelo climático global (CASTRO, 2022).

## **2.2 Bacias Hidrográficas**

O ciclo hidrológico é um curso natural da água em um sistema hidrológico e compreende os processos de evapotranspiração, condensação, precipitação, retenção e escoamento superficial, infiltração, percolação da água nos aquíferos e solo, escoamentos fluviais e intervenções nesses componentes (RIGHETTO, 1998). Conforme Chow, Maidment e Mays (1988), um sistema hidrológico pode ser indicado como uma estrutura ou volume no espaço,

tendo por restrição uma fronteira, que aceita água e outras substâncias, para manipular essas introduções internamente, e produz suas devidas saídas.

A bacia hidrográfica é um sistema hidrológico definido como a área onde a captação natural da água da precipitação permite convergir os escoamentos para uma única saída, seu exutório (TUCCI; CLARKE, 1997). Uma bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema que converte chuva em vazão. Essa conversão envolve alterações no volume total da água, visto que parte da chuva infiltra e fica temporariamente armazenada no solo e pode retornar à atmosfera por evapotranspiração, acarretando um retardo no evento da vazão quanto ao tempo de ocorrência da chuva (COLLISCHONN, W.; TASSI, 2011).

As condições naturais (meteorológicas, topográficas, geológicas, pedológicas) definem o comportamento das vazões de uma bacia (GOLDENFUM, J. A.; ACIOLI, L. A.; AGRA, S. G.; SILVEIRA, 2003; SILVA, 2009). Por sua vez, as atividades humanas desenvolvidas nas bacias hidrográficas (como as alterações no uso e manejo da terra) podem provocar alterações, efeitos e impactos a jusante e nos seus fluxos de saída (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016; GUERRA, A.J.T.; CUNHA, 2000).

A caracterização das condições naturais e das modificações humanas nas bacias hidrográficas tem significativa importância para a previsão de seu comportamento hidrológico. A partir destas, pode-se determinar ligações e comparações com dados hidrológicos conhecidos, permitindo a obtenção indireta de valores hidrológicos em locais com escassez de dados, além de corresponderem a informações essenciais para a elaboração e instalação de projetos de infraestrutura (SILVA, 2009).

Entretanto, os maiores contratempos dos estudos hidrológicos em bacia hidrográfica estão associados com a alta variabilidade espacial e temporal de suas características. Deste modo, na demarcação de uma bacia, é significativo que o conceito empregado afirme que a área escolhida constitua todos os processos envolvidos no projeto de análise e apresente justo grau de homogeneidade, de maneira que, estratégias, ações e conclusões gerais consigam ser estabelecidas para toda área circunscrita (MACHADO, 2005).

### **2.3 Modelagem Hidrológica**

Entende-se por modelagem a aplicação de um modelo matemático para representar o comportamento de um sistema, visando gerar um retorno ao transferir um estímulo ou entrada.

Esse conceito é empregado na construção de um modelo hidrológico chuva-vazão, com o objetivo de replicar um sistema específico, como uma bacia hidrográfica, por meio da definição de parâmetros. Isso permite simular a relação entre a precipitação e a vazão (TUCCI, 2005; VIOLA, M. R., 2008).

Os modelos representam ferramentas eficazes para o planejamento e gestão sustentável dos recursos hídricos, sendo os modelos hidrológicos responsáveis por atender a diversas demandas. De maneira geral, um modelo hidrológico pode ser definido como um conceito matemático que descreve o fluxo de água e seus elementos em uma parte específica da superfície ou subsuperfície terrestre (ABBASPOUR *et al.*, 2015).

Em linhas gerais, um modelo de simulação é uma representação matemática de um sistema por meio de equações. Ele traduz, de maneira matemática, as características do sistema real com base em um modelo conceitual construído a partir dos dados fornecidos pelo sistema real. O propósito dessa modelagem é aprofundar a compreensão do sistema e antecipar situações futuras, podendo, em alguns casos, reproduzir eventos passados para orientar decisões (MACHADO, 2005).

De acordo com Chow, Maidment e Mays (1988), a investigação da modelagem de um sistema hidrológico tem como objetivo analisar as operações que ocorrem no sistema e avaliar a previsibilidade de suas saídas. A construção do modelo é conduzida de maneira a descrever com a maior precisão possível as ocorrências observadas em eventos reais. As variáveis hidrológicas do modelo, tanto de entrada quanto de saída, são inter-relacionadas por meio de equações matemáticas. Esses modelos são desenvolvidos tanto para prever o impacto antropológico na qualidade das águas superficiais e subterrâneas, quanto para simular uma variedade de cenários, abrangendo desde os piores casos possíveis até diferentes abordagens de manejo e práticas conservacionistas. Além disso, a modelagem proporciona benefícios, tais como baixo custo e rapidez na simulação de estudos.

Diante da crescente demanda pelo desenvolvimento, proposição e validação de modelos matemáticos e simuladores cada vez mais realistas, destaca-se a importância e as vantagens dessas técnicas, incluindo baixo custo, rapidez, obtenção de informações abrangentes e a capacidade de simular cenários diversos e ideais.

### 2.3.1 Modelo SWAT

O modelo Soil & Water Assessment Tool - SWAT, traduzido como "Ferramenta de Avaliação de Solo e Água", foi desenvolvido pela USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) e pela Texas A&M AgriLife Research, como parte do The Texas A&M University System. Criado na década de 1990, o modelo tem suas raízes no Simulator for Water Resources in Rural Basins (SWRRB), originalmente concebido para auxiliar na gestão da água e no transporte de sedimentos em bacias rurais dos Estados Unidos (GASSMAN *et al.*, 2007).

O SWAT é um modelo semi-conceitual, semi-distribuído e contínuo no tempo, operando em intervalos diários. Ele lida com uma ampla gama de dados espaciais e não espaciais, incluindo informações sobre hidrologia, clima, sedimentos, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e práticas agrícolas, refletindo a heterogeneidade dos sistemas naturais. O modelo utiliza um conjunto de comandos para programar o escoamento superficial, os sedimentos e os nutrientes da bacia por meio das sub-bacias (PEREIRA, 2013).

O modelo SWAT adota métodos descritos com base física, em contraste com o uso de equações de regressão, para detalhar as relações entre as variáveis de entrada e saída. Isso requer dados específicos sobre clima, propriedades do solo, topografia e vegetação. Os processos físicos relacionados ao movimento da água, transporte de sedimentos, crescimento das culturas e ciclo de nutrientes são moldados pelo modelo de maneira precisa, utilizando os dados de entrada (NEITSCH; ARNOLD; WILLIAMS, 2011).

Conforme destacado no manual do SWAT, o modelo tem a capacidade de realizar simulações abrangentes, incluindo escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo na rede de drenagem. Ele também abrange análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas, bactérias, práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água. É importante ressaltar que não é necessário abordar todas essas características para utilizar o modelo (NEITSCH; ARNOLD; WILLIAMS, 2011).

#### 2.3.1.1 Fundamentação Matemática do SWAT

A expressão hidrológica representa a quantificação da água presente nas diferentes fases do ciclo ao longo de um intervalo de tempo especificado (BECKIE, 2005). O modelo SWAT

fundamenta-se na equação do balanço hidrológico, a qual pode ser expressa quantitativamente por meio de uma relação matemática (Eq. 1):

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

Onde, temos que:

$[SW_t]$ : é a quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo t (mm);

$[SW_0]$ : é a quantidade inicial de água no solo no dia (mm);

$[t]$ : é a duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

$[R_{day}]$ : é a quantidade de água precipitada no dia (mm);

$[Q_{surf}]$ : é a quantidade de escoamento superficial no dia (mm);

$[E_a]$ : é a quantidade de água evapotranspirada no dia (mm);

$[w_{seep}]$ : é a quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia (mm);

$[Q_{gw}]$ : é a quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia devido ao escoamento sub-superficial (mm).

Com o intuito de aprimorar a compreensão do sistema hidrológico, o modelo incorpora os principais componentes do balanço hídrico para apresentar os dados simulados com a ajuda da ferramenta SWAT Check. Nessa representação, são exibidos os dados simulados da Bacia Hidrográfica do Rio Jucu.

No SWAT, o balanço hídrico é calculado em quatro volumes distintos: superficial, subsuperficial, aquífero raso e aquífero profundo. O modelo SWAT fragmenta o ciclo hidrológico em diversas etapas, tais como interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento lateral, evapotranspiração e percolação (CORREIA, 2016).

### 2.3.2 Calibração e Validação de Modelos Hidrológicos

Na modelagem hidrológica, comumente enfrentam-se dois desafios: a seleção do modelo que melhor representa o comportamento hidrológico da bacia e a determinação dos valores dos parâmetros do modelo que possibilitam a obtenção de resultados simulados próximos aos observados. Esta última questão é abordada por meio da calibração, entendida como o processo de busca pelos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico (TUCCI, 2005).

A calibração, ou a estimativa de parâmetros, refere-se à ajustagem dos parâmetros do modelo a um cenário fictício, visando uma condição ideal que corresponda à realidade (LOPES, 2008). Essa técnica envolve a identificação da faixa ideal de valores para os parâmetros escolhidos, de modo a minimizar a discrepância entre os valores simulados e observados. No modelo SWAT existem duas formas de realizar a calibração sendo elas manual e automática.

Na calibração manual, os valores dos parâmetros de entrada do modelo são ajustados para gerar valores simulados que estejam dentro de um intervalo preciso dos dados medidos (MORIASI *et al.*, 2007). Os parâmetros são manipulados individualmente, e o modelo é executado para verificar as mudanças nos valores de saída. Esse procedimento é repetido até alcançar um valor aceitável que se aproxime dos valores medidos.

Já a calibração automática, baseia-se em algoritmos de otimização, que buscam o valor de uma ou várias variáveis para obter o melhor resultado em uma função dependente dessas variáveis, dentro de um objetivo e obedecendo a restrições (TUCCI, 2005). Em modelos chuva-vazão, um procedimento típico para estabelecer os valores dos parâmetros envolve a análise da função-objetivo, do algoritmo de otimização e do critério de parada. A função-objetivo representa a medida de desempenho do problema em questão. Na calibração de modelos chuva-vazão, essa função é uma equação utilizada para calcular uma medida numérica da diferença (erro) entre os resultados do modelo (geralmente um hidrograma) e os valores observados da mesma variável de saída. Dessa forma, o objetivo da calibração automática é encontrar os valores dos parâmetros do modelo que otimizam a função-objetivo.

Considerando a necessidade de validar o modelo para situações semelhantes àquelas em que se pretende aplicá-lo, os resultados da validação indicam a adequação do modelo em reproduzir a série de dados que foi excluída durante o período de calibração (GASSMAN *et al.*, 2003).

A validação do modelo ocorre como uma etapa subsequente à calibração, onde o modelo é executado com os valores de parâmetros estabelecidos em um conjunto de dados diferente daquele utilizado na calibração (NEITSCH; ARNOLD; WILLIAMS, 2011). Sua função é avaliar a capacidade do modelo em prever períodos de tempo e/ou áreas distintas daquelas utilizadas durante a fase de calibração (BENAMAN; SHOEMAKER; HAITH, 2005). Destaca-se que a validação é considerada a avaliação mais avançada de um modelo, uma vez que os valores dos parâmetros obtidos permanecem constantes durante essa etapa.

#### **2.4 Associação de Mudanças Climáticas e Estudos Hidrológicos**

Nos últimos anos, diversas pesquisas em vários países têm abordado as questões relacionadas às mudanças climáticas e sua relação com o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas. No Brasil, existem alguns estudos realizados relacionados a previsão de disponibilidade hídrica em cenários de mudanças no uso e ocupação do solo (ADAM *et al.*, 2015; CASTRO, 2022; LUCAS-BORJA *et al.*, 2020; PEREIRA, 2013; VIOLA *et al.*, 2014), também somados aos cenários de mudanças climáticas.

Adam *et al.* (2013), examinaram cenários de mudanças climáticas previstos para 2050, na Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí. Os resultados indicam um consenso quanto ao aumento da temperatura, mas há consideráveis incertezas, especialmente em relação à magnitude das variações de precipitação. Também foram observadas disparidades nessas previsões entre três cenários de mudanças climáticas analisados. A discrepância na magnitude das alterações previstas para a precipitação é substancial, e não há consenso entre os MCGs sobre se essa variável aumentará ou diminuirá no futuro. As incertezas relacionadas às projeções de anomalias de precipitação e temperatura, provenientes do conjunto de 20 MCGs, foram amplificadas ao avaliar o impacto das mudanças climáticas no regime de vazões da bacia. As análises de sensibilidade da vazão em relação a hipotéticas variações na precipitação média anual indicaram que as vazões médias e máximas são mais suscetíveis a alterações na precipitação.

Schuster *et al.* (2020), em um estudo realizado em Lagoa dos Patos, ressaltam que os dados indicaram que a maioria das simulações demonstram uma inclinação para o aumento das vazões médias, com variações entre -13% e +29% em relação ao período de controle. Verificou-se uma tendência de aumento das vazões na bacia simulada, uma vez que mais de 60% das simulações indicaram algum percentual de aumento da vazão média em todas as unidades de modelagem

discretizadas. A análise revela que os modelos HadGEM2-ES e GFDL-CM3 delimitam os extremos de vazão na simulação conjunta, enquanto a combinação desses modelos com alto cenário de emissões abrange cenários de vazões extremas para a bacia da Lagoa dos Patos. Outros modelos, como bcc-csm1, BNU-ESM e CNRM-CM5, apresentam resultados semelhantes à mediana do conjunto de simulações. A região norte da área de estudo é identificada como mais sensível às mudanças climáticas, conforme projetado pelos modelos do CMIP5. A maioria dos modelos climáticos avaliados indicaram pelo menos alguma percentagem de aumento médio de descarga em todas as unidades de discretização modeladas.

De forma específica, Martins *et al.* (2021) investigaram as relações entre o uso do solo e os cenários futuros de alterações do solo no escoamento e armazenamento de água subterrânea em uma bacia hidrográfica de Área de Proteção Ambiental (APA). O desempenho dos indicadores de adequação na calibração e validação foi classificado como bom e muito bom, respectivamente. O modelo reproduziu com precisão a distribuição interanual das chuvas. A distribuição espacial do fluxo superficial médio anual, do fluxo lateral e do fluxo de águas subterrâneas foi diferente entre as sub-bacias. O cenário futuro de mudança do uso da terra para floresta e pastagem diferiu durante o ano, com maiores mudanças nas estações chuvosa e seca. Os resultados mostraram que um aumento de 64,5% na área de FRSE levou a uma diminuição de 71,1 mm no escoamento superficial, 11 mm no escoamento total e 48,5 mm na água do solo; e um aumento de 21 mm no fluxo lateral, 17,1 mm nas águas subterrâneas e 23,2 mm na evapotranspiração. O aumento de 43,8% na área PAST levou a um aumento de 1 mm no fluxo superficial, 2,1 mm nas águas subterrâneas, 2,5 mm na evapotranspiração e 48,3 mm nas águas subterrâneas; e diminuição de 5,4 mm no fluxo lateral e 0,8 mm no escoamento total. O efeito da cobertura vegetal natural no teor de humidade do solo ainda não é claro. O modelo hidrológico indicou as principais áreas de fluxo espacial ótimo de água. Os modelos de processamento de informações sugerem que uma variedade de características de cenários pode afetar os ecossistemas das bacias hidrográficas em cenários hipotéticos de teste, de maneiras que podem influenciar o grau em que um proprietário de terras se envolve e considera cuidadosamente as informações sobre os usos da terra de pastagens e florestas.

Brêda *et al.* (2020), avaliaram as alterações médias das variáveis do balanço hídrico e da vazão média anual dos rios na América do Sul até o final deste século usando dois cenários diferentes de GEE (RCP4.5 e RCP8.5). Obtendo um resultado negativo em relação às mudanças na precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, observado na maior parte do continente. Espera-se grandes reduções na vazão média anual para as bacias do Orinoco,

Tocantins e Amazônia, que seriam em torno de 8–14%. Apenas a Bacia do Uruguai apresenta tendência positiva para a vazão média.

Son *et al.* (2022), investigaram a aplicação do SWAT para avaliar as mudanças no uso da terra e os impactos das mudanças climática em uma bacia no noroeste do Vietnã, eles mostraram que o escoamento superficial e a produção de água foram previstos para aumentar significativamente cerca de 7,4% e 3,8%, respectivamente. Por outro lado, outras componentes (ET, águas subterrâneas e percolação) deverão aumentar ligeiramente de 2015 a 2030 devido a um ligeiro aumento na precipitação (3,1%).

Ross e Randhir (2022) realizaram um estudo que simula diversas bacias costeiras na Baía de Narragansett, com o objetivo de analisar os impactos das mudanças climáticas e da alteração no uso da terra na quantidade e qualidade da água, os pesquisadores identificaram mudanças significativas que afetam a carga de sedimentos, nitratos, nitrogênio e fósforo orgânico. Na definição dos cenários de mudanças climáticas, eles se basearam nas projeções de temperatura e precipitação do IPCC, adotando o cenário intermediário RCP 4.5, com um forçamento radiativo de 4.5 W/m<sup>2</sup>. Isso resultou em um aumento de temperatura de +3°C e um aumento de precipitação de +10% em relação aos níveis da linha de base.

Ahn, Jeong e Kim (2016) conduziram um estudo sobre os efeitos na capacidade agrícola e no fornecimento de água em uma bacia na Coreia do Sul. Integraram a modelagem hidrológica usando o SWAT e simularam as mudanças climáticas com dados do modelo climático HadGEM3-RA para os cenários de emissão RCP4.5 e RCP8.5. Por meio de um método de amostragem dividida, calibraram as vazões diárias e as afluições das barragens em três locais. Os resultados indicaram uma taxa máxima de escassez hídrica para usos agrícolas de 38,2% para as décadas de 2040 e 2080 no cenário RCP4.5, enquanto no cenário RCP8.5 foi menor (21,3% na década de 2040 e 22,1% na década de 2080). No cenário RCP 4.5, a taxa de escassez projetada foi superior à registrada durante o período de referência medido (1982-2011) de 25,6% e ao período histórico do RCP (1982-2005) de 30,1%. E associaram que, os futuros níveis elevados de seca são atribuídos principalmente à distribuição cada vez mais concentrada das chuvas ao longo do ano sob um clima de monções, conforme projetado pelos cenários climáticos do IPCC.

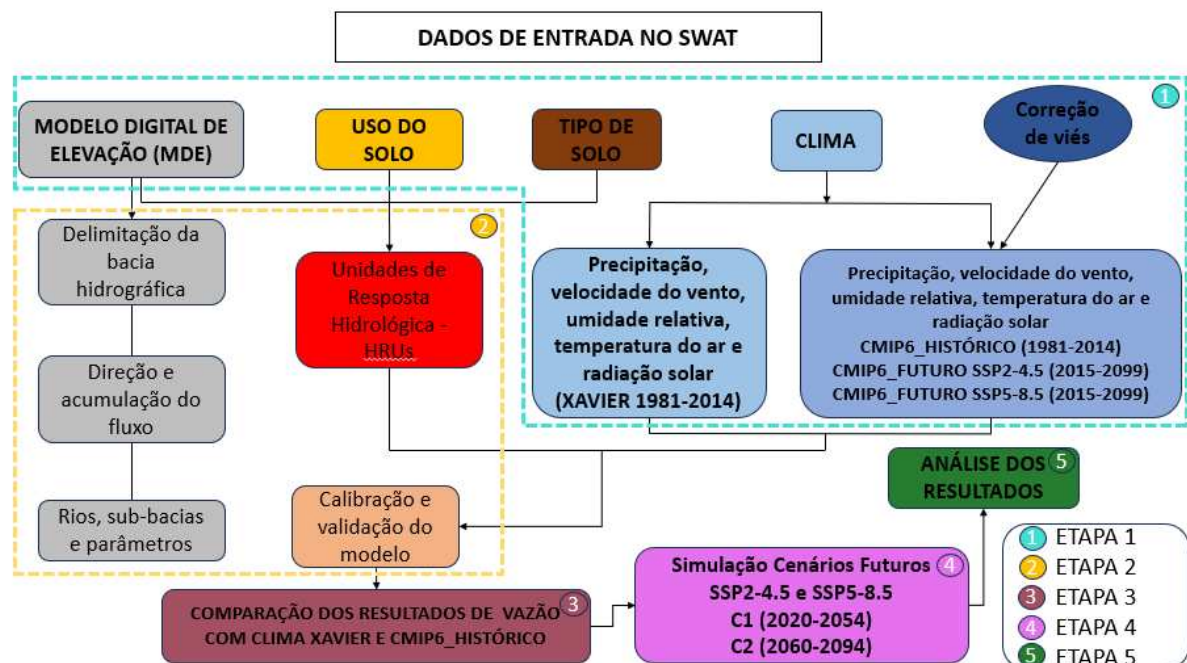
Nos estudos mencionados, uma parte significativa deles avaliou as vazões médias, com resultados geralmente indicando uma tendência para o aumento das mesmas. No entanto, houve variações nos resultados para as vazões mínimas e máximas, com alguns estudos apontando

para aumentos e outros para diminuições, refletindo a complexidade das interações entre mudanças climáticas e hidrologia em diferentes regiões. Adam *et al.* (2013), examinaram as variações sazonais no regime hidrológico, destacando os desafios e incertezas associados à projeção de mudanças no comportamento da água ao longo do ano. Esses estudos contribuem para uma compreensão mais abrangente dos impactos das mudanças ambientais globais na disponibilidade hídrica e na gestão dos recursos hídricos. Para o Brasil é observado uma grande deficiência em relação aos estudos de vazões mensais e mudanças climáticas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi composto por cinco etapas distintas, conforme ilustra a Figura 1. Inicialmente, na Etapa 1, foi elaborado um banco de dados que inclui informações sobre o tipo e uso do solo, topografia e clima (coleta de dados e correção de viés), os quais foram essenciais para a implementação do SWAT na modelagem hidrológica. Na Etapa 2, procederam-se a calibração e a validação do SWAT. A Etapa 3 compreendeu a análise dos resultados de calibração. Etapa 4, realizaram-se as simulações dos cenários de mudanças climáticas futuras, com os dados CMIP6\_FUTURO SSP2-4.5 e SSP5-8.5, conforme detalhado posteriormente no item 3.4. Por fim, a Etapa 5 concentrou-se na análise dos resultados obtidos nas simulações, proporcionando uma avaliação crítica dos impactos hidrológicos decorrentes das mudanças climáticas.

Figura 1 – Fluxograma com as etapas de criação do projeto desenvolvido



Fonte: a autora (2024).

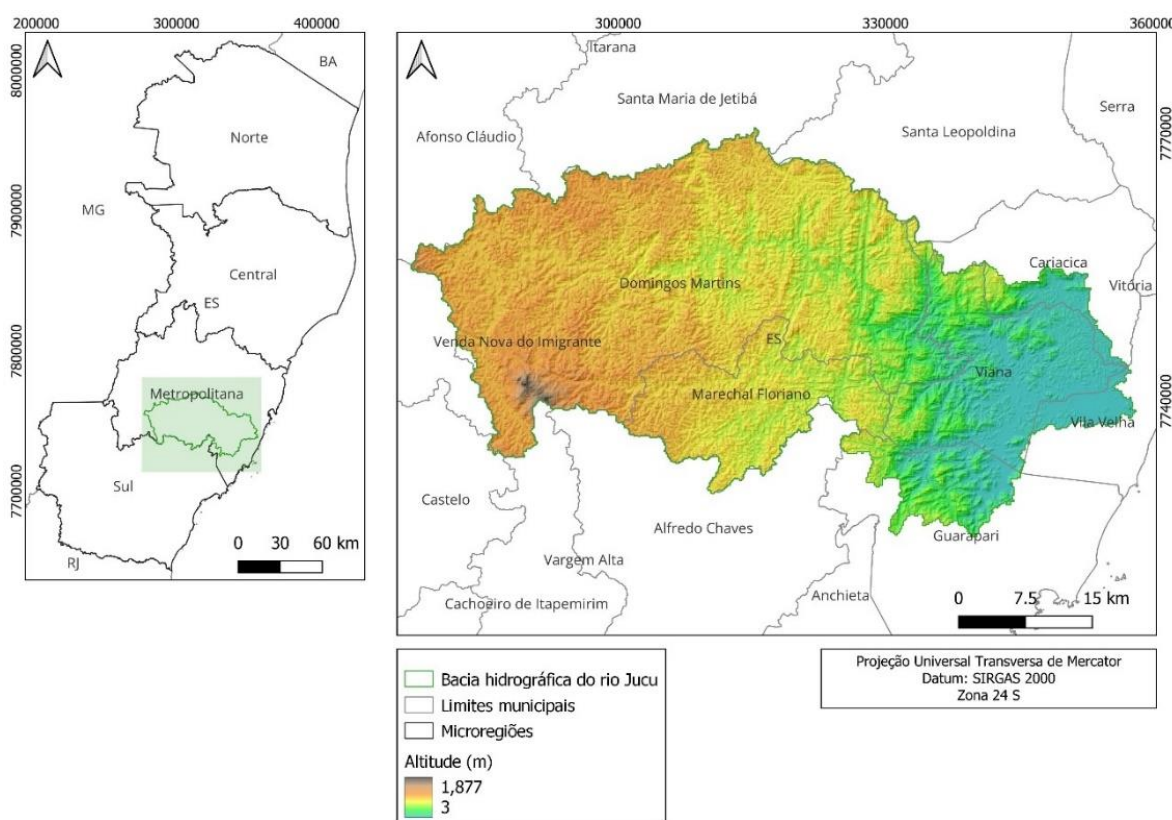
#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica do rio Jucu (BHRJ), localizada na região Sudeste do Brasil, no estado do Espírito Santo (Figura 2), com área de aproximadamente 4.133

km<sup>2</sup>. O clima predominante é o Aw, caracterizado como tropical úmido, apresentando uma estação chuvosa no verão e uma estação seca no inverno, segundo a classificação de Köppen. A precipitação média anual varia de 1.300 a 1.600 mm, acompanhada de temperaturas médias entre 22 e 24°C (ALVARES *et al.*, 2013).

A bacia está totalmente inserida no bioma Mata Atlântica, com coberturas florestais principais de Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta (SIMONELLI; FRAGA, 2007).

Figura 2 - Localização da bacia hidrográfica do Rio Jucu (BHRJ)



Fonte: a autora (2024).

### 3.2 Modelagem Hidrológica com o SWAT: Bases de Dados de Entrada

São necessárias inserção de diversas variáveis no modelo SWAT, tais como precipitação, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar, propriedades físicas do solo, topografia e informações sobre o uso e ocupação do solo na bacia de estudo (NEITSCH; ARNOLD; WILLIAMS, 2011).

### 3.2.1 Dados Topográficos

Os dados topográficos foram obtidos através do Modelo digital de Elevação (MDE) disponibilizado pelo projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (USGS, 2018), com uma resolução espacial original de 90 metros.

### 3.2.2 Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi adquirido por meio do mapeamento realizado pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA). Esse mapeamento foi desenvolvido por uma empresa especializada contratada pelo estado, a Hiparc Geotecnologia, utilizando a fotointerpretação manual do ortofotomosaico retificado do IEMA, referente ao período de 2012/2015.

Em relação ao uso do solo, o SWAT integra uma extensa base de dados que inclui características de coberturas vegetais e urbanas. Para configurar as informações de uso do solo na bacia, foi realizada uma correlação entre as classes de uso do solo mapeadas e aquelas disponíveis no banco de dados do SWAT (Quadro 1).

Quadro 1 - Classes de usos do solo utilizadas

Uso da terra	Usos correspondente no SWAT	Sigla no SWAT
Área Urbana	Residential-Low Density	URLD
Áreas úmidas naturais não florestais (mangue/brejo)	Wetlands-Non-Forested	WETN
Vegetação campestre (campo rupestre)	Range-grasses	RNGE
Cultivo Agrícola - Bananas	Bananas	BANA
Cultivo Agrícola- Café	Coffee	COFF
Cultivo Agrícola - Cana-de-Açúcar	Sugarcane	SUGC
Cultivo Agrícola - Coco-da-Baía	Coconut	COCO
Cultivo Agrícola - Permanente (Área Irrigada)	Agricultural Land-Row Crops	AGRR
Cultivo Agrícola - Temporário	Agricultural Land-Generic	AGRL
Mineração	Grarigue	GRAR
Massas de Água	Water	WATR
Mata Nativa (Vegetação arbórea)	Forest-Evergreen	FRSE
Mata em estágio inicial	Forest mix	FRST
Outros	Orchard	ORCD
Pastagem	Pasture	PAST
Reflorestamento - Eucalipto	Eucalyptus	EUCA
Reflorestamento - Pinus	Pine	PINE
Reflorestamento - Seringueira	Rubber Trees	RUBR

Vegetação arbustiva (Floresta aberta, Restinga)	Range-brush	RNGB
Afloramento Rochoso	South Western Range	SWRN
Solo Exposto	Barren	BARR

Fonte: a autora (2024).

### 3.2.3 Tipos de Solo

O mapa de solos foi obtido através do GEOBASES (Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo), disponível em <http://www.geobases.es.gov.br>. O mapa fornecido pelo "Navegador Geobases" possui representação digital na escala de 1:400.000 em relação ao mapa original do Projeto RADAMBRASIL (1:250.000). A Quadro 2 fornece uma descrição das classes de solo na bacia em análise, juntamente com a fonte dos parâmetros físicos do solo para cada tipo específico de solo.

As características de cada tipo de solo foram obtidas por meio da revisão da literatura dos estudos conduzidos na região sudeste, nos quais o modelo foi empregado em diversas pesquisas. Em casos em que faltavam informações ou estas eram inconsistentes, os parâmetros foram calculados utilizando a planilha macro *SWAT\_usersoil*<sup>1</sup>. Os parâmetros das classes de solo foram ajustados para apresentar os valores mais próximos dos reais. No Apêndice A1, se encontra a tabela que fornece uma descrição das classes de solo na bacia em análise, juntamente com a fonte dos parâmetros físicos e químicos do solo para cada tipo específico de solo.

Quadro 2 - Classes de solos utilizadas e respectivas fontes dos parâmetros

Classe do solo	Sigla	Fonte
Cambissolo Háplico	CX	macroSWAT_usersoi; (LELIS, 2011)
Nitossolo Vermelho Eutrófico	NV	(MARCHIORI, 2014)
Neossolo Litólico	RL	(BELON, 2014); (MARCHIORI, 2014)
Argissolo Vermelho Amarelo	PVA	macroSWAT_usersoi; (LELIS, 2011)
Argissolo Vermelho Amarelo	PVA	macroSWAT_usersoi; (LELIS, 2011)
Latossolo Amarelo Distrófico	LA	macroSWAT_usersoi; (PEREIRA, 2013)
Neossolo Flúvico	RY	(PINTO, 2014)
Espodossolo Humilúvico	EK	(CUNHA, 2016)
Argilossolo Amarelo	PA	(CUNHA, 2016)

Fonte: a autora (2024).

### 3.2.4 Dados Meteorológicos

Este estudo se baseia em uma abordagem abrangente que emprega dados climáticos atuais e futuros. Os dados atuais abrangem o período de 1981 a 2014, proporcionando uma

visão retrospectiva das condições climáticas ao longo de três décadas. Para avaliar as possíveis mudanças climáticas, foram incorporados dados futuros projetados para os intervalos de 2020 a 2054 e 2060 a 2094.

Para a obtenção de dados, foram utilizadas duas bases de dados de séries diárias de dados meteorológicos espacializados para a BHRJ. A primeira, são dados disponibilizados por Xavier, King e Scanlon (2016). Estes dados foram anteriormente analisados para as bacias do Centro-Sul capixaba, apresentando bons resultados quanto à precipitação e evapotranspiração potencial diárias, quando comparados com medições convencionais (BARATTO *et al.*, 2022a, b). A segunda, são dados CMIP6 adquiridos da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) que fazem parte do Working Group on Coupled Modelling (WCRP) e são operados pela Earth System Grid Federation (ESGF) encontrados no endereço <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/E>, no site são disponibilizados vários modelos, fornecidos por várias instituições de pesquisa espelhadas pelo mundo.

Então, para escolher o modelo climático mais adequado para a área de estudo, foi utilizada a ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020), descrita no item 3.2.4.1, sendo o modelo indicado por ela, o GDFL-ESM4.

Para a aquisição dos dados, dentro do site do WCRP, foi feita uma busca dos dados climáticos específicos do modelo escolhido na ferramenta GCMeval, foram selecionados filtros, os quais estão detalhados no Quadro 3 (CASTRO, 2022).

Quadro 3 - Filtros aplicados para obter dados climáticos do CMIP6 do site do WCRP

<b>Filtro</b>	<b>Opção escolhida</b>
<b>MIP Era</b>	CMIP6
<b>ID da fonte</b>	GDFL-ESM4
<b>ID do experimento</b>	Historical, ssp245, ssp585
<b>Etiqueta da variante</b>	r1i1p1f1
<b>Frequência</b>	day
<b>Variáveis</b>	pr, tasmin, tasmax, hurs, rsds, sfcWind

Fonte: Castro (2022) adaptado pela autora.

Os dados CMIP6 são disponibilizados em arquivos netCDF, fracionados em escalas de tempo e dados em escala global. Foi necessário consolidar esses arquivos e extrair as informações relevantes, para isso, utilizou-se o software Climate Data Operators (CDO), para

extrair e unir os dados utilizados, além de aplicar filtros de latitude e longitude conforme a localização da bacia.

Com os dados CMIP6 adquiridos, para a área de estudo desejada, foi necessário tornar as características e os fatores de conversão das variáveis compatíveis com as exigidas pelo modelo SWAT, sendo esses apresentados na Quadro 4, estes também foram realizados pelo software CDO.

Posteriormente foi aplicada a correção de viés nesses dados, conforme descrito no item 3.2.4.2.

Quadro 4 - Características e fatores de conversão das variáveis de interesse do modelo climático global

Variável	Unidade	Fator de conversão
Precipitação (pr)	$kg\ m^{-2}s^{-1}$	$pr\ \left[\frac{mm}{dia}\right] = pr\ [kg\ m^{-2}s^{-1}] * 86400$
Temperatura mínima diária do ar próxima da superfície (tasmin)	K	$tasmin[C] = tasmin[K] - 273.15$
Temperatura máxima diária do ar próxima da superfície (tasmax)	K	$tasmax[C] = tasmax[K] - 273.15$
Umidade relativa (hurs)	%	$hurs[unidade] = hurs[\%]/100$
Radiação de onda curta descendente superficial (rsds)	$W\ m^{-2}$	$rsds\ [MJ\ m^{-2}dia^{-1}] = rsds\ [W\ m^{-2}] * 0.0864$
Velocidade do vento próxima da superficial (sfcWind)	$m\ s^{-1}$	

Fonte: Castro (2022).

### 3.2.4.1 Seleção do Modelo Climático

A ferramenta utilizada para selecionar o modelo climático global é conhecida como GCMeval, essa ferramenta foi desenvolvida por Parding *et al.* (2020) e está acessível na página web: <https://gcmeval.met.no/>. Essa ferramenta realiza a avaliação e ponderação de parâmetros que facilitam a escolha de um conjunto de modelos climáticos que preservem as características estatísticas da mudança climática, excluindo aqueles com desempenho inferior.

Na ferramenta GCMeval, o procedimento envolveu a seleção das regiões de interesse principal e secundária (Sudeste da América do Sul e Global), bem como a especificação da

importância atribuída às variáveis climáticas (precipitação e temperatura), às estações do ano (Inverno, Primavera, Verão e Outono) e às pontuações de desempenho do GCM (viés, correlação espacial, razão de desvio padrão espacial e RMSE do ciclo anual). Isso foi realizado atribuindo pesos que variavam de 0 a 2, onde 0 indicava "Não considerado", 1 representava "Importante" e 2 indicava "Muito Importante". Com base nesses critérios, a ferramenta identificou os melhores MCGs conforme as regiões de interesse selecionadas e a ponderação dos parâmetros. No âmbito deste estudo, as características e os pesos definidos na ferramenta GCMeval (PARDING *et al.*, 2020) foram determinados conforme o Quadro 5.

Quadro 5 - Parâmetros e pesos ingressados na ferramenta GCMeval

<b>Parâmetro</b>	<b>Peso</b>	<b>Definição do peso</b>
<b>Regiões de foco</b>		
Região de foco primária: Sudeste da América do Sul	2	Muito importante
Região de foco secundária: Global	1	Importante
<b>Variáveis</b>		
Temperatura	1	Importante
Precipitação	1	Importante
<b>Estações</b>		
Anual	2	Muito importante
Inverno	1	Importante
Primavera	1	Importante
Verão	1	Importante
Outono	1	Importante
<b>Pontuações das habilidades do GCM</b>		
Viés	1	Importante
Correção espacial	1	Importante
Razão de desvio padrão espacial	1	Importante
RMSE do ciclo anual	1	Importante

Fonte: Castro (2022).

### 3.2.4.2 Correção de Viés

Para corrigir os dados fornecidos pelo CMIP6, empregou-se uma técnica de redução de escala, visando ajustar a resolução dos dados de uma escala global para regional. Utilizou-se um código preexistente no *RStudio* desenvolvido por (SHRESTHA, M.; ACHARYA; SHRESTHA, 2017). Este código realiza a redução de escala, empregando o método de *quantile mapping* por meio do pacote *QMAP* (GUDMUNDSSON *et al.*, 2012). Os dados de entrada no código consistiram nos dados climáticos “atuais” (1981-2014) e futuros (2015-2099) extraídos do CMIP6 (XAVIER; KING; SCANLON, 2016), com frequência diária, resultando nos dados climáticos futuros corrigidos como saída. Sendo aplicadas as equações de correção dos dados

para corrigir os dados históricos (Equação 2) e outra para os dados futuros, derivados dos resultados do modelo climático global (Equação 3).

$$X_{hist}(d)^* = X_{hist}(d) * \left[ \frac{\mu_m\{X_{obs}(d)\}}{\mu_m\{X_{hist}(d)\}} \right] \quad (2)$$

$$X_{sim}(d)^* = X_{sim}(d) * \left[ \frac{\mu_m\{X_{obs}(d)\}}{\mu_m\{X_{hist}(d)\}} \right] \quad (3)$$

$[X_{hist}(d)^*]$ : Variável climática diária corrigida, referente a dados históricos.

$[X_{hist}(d)]$ : Variável climática diária histórica, obtida do MCG.

$[\mu_m]$ : Média mensal de longo prazo.

$[X_{obs}(d)]$ : Registro diário de variáveis climáticas observadas.

$[X_{sim}(d)]$ : Projeção diária de variáveis climáticas futuras fornecidas pelo MCG.

$[X_{sim}(d)^*]$ : Variável climática diária futura ajustada.

### 3.2.5 Séries de Vazão

As séries temporais de vazões empregadas neste estudo foram obtidas a partir do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA) por meio do Sistema de Informações Hidrológicas - HidroWeb ( <http://hidroweb.ana.gov.br/>).

Os dados foram coletados na estação fluviométrica denominada Fazenda Jucuruaba (código 57230000), situada no município de Viana, com coordenadas geográficas de latitude -20,415° e longitude -40,4853°, altitude de 80 metros, e área de drenagem de 1.690 km<sup>2</sup>. Os registros diários de vazão utilizados compreenderam o período de 1981 a 2014.

#### 3.2.4.2 Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação do SWAT

A análise de sensibilidade se baseia na escolha e ajustes de parâmetros que permitem o modelo refletir melhor o comportamento real da bacia. Os parâmetros listados no Quadro 6 para a análise de sensibilidade foram escolhidos com base em estudos anteriores (CASTRO, 2022; CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016). Esses autores conduziram uma

extensa análise dos parâmetros mais sensíveis, considerando trabalhos previamente publicados em bacias hidrográficas brasileiras, com alguns deles realizando pesquisas na área em estudo.

Existem três abordagens para estabelecer os limites dos parâmetros: multiplicar o valor inicial por um fator fixo; somar um valor constante ao valor inicial; ou substituir diretamente o valor do parâmetro por uma porcentagem (GREEN; VANGRIENSVEN, 2008). Neste trabalho foram utilizadas as abordagens de multiplicação e substituição.

Para pré-calibração, calibração e validação, a série temporal de vazão empregada no estudo foi em escala mensal, dividida em período de aquecimento (1981-1985), calibração (1986-2004) e validação (2005-2014).

Quadro 6 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo

<b>Parâmetro e Arquivos</b>	<b>Descrição</b>
<b>SOL_AWC.Sol</b>	Capacidade de água disponível no solo (mm/mm).
<b>SOL_K.Sol</b>	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm/h).
<b>SOL_ALB.Sol</b>	Albedo do solo (fração).
<b>ANION_EXCL.Sol</b>	Fração de porosidade (espaços vazios) (fração).
<b>EPCO.Hru/.BSN</b>	Fator de compensação de absorção de plantas (adimensional).
<b>ESCO.Hru/.BSN</b>	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional).
<b>CANMX.Hru</b>	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm).
<b>LAT_TIME.Hru</b>	Tempo do fluxo lateral (dias).
<b>CH_N2.Rte</b>	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal (mm/h).
<b>GWQMN.Gw</b>	Profundidade limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer (mm).
<b>GW_REVAP.Gw</b>	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular (adimensional).
<b>GW_DELAY.Gw</b>	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias).
<b>SURLAG.Hru/.BSN</b>	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional).

Fonte: a autora (2024).

Na pré-calibração, o modelo é processado sem alteração dos parâmetros, já na fase de calibração, os parâmetros do modelo foram ajustados para otimizar os indicadores estatísticos, enquanto na fase de validação esses parâmetros foram mantidos fixos.

A calibração foi feita manualmente, pois, como em outros estudos, a calibração realizada pela ferramenta SWAT Calibration and Uncertainty Programa (SWAT-CUP), não forneceu resultados satisfatórios (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016). Sendo assim, durante a calibração foi observada a resposta que cada alteração de parâmetro gerava no modelo, até que fornecesse um resultado aceitável.

A escolha de alguns parâmetros adotados na calibração (SOL\_AWC, SOL\_K, SOL\_ALB, EPCO, ESCO, CANMX, SURLAG, GWQMN, GW\_REVAP e GW\_DELAY), partiu de trabalhos anteriormente realizados na mesma bacia (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016). Enquanto outros parâmetros (ANION\_ESCL, LAT\_TIME e CH\_N2), foram escolhidos com base no estudo de outras bacias brasileiras (ARAGÃO *et al.*, 2013; IENSEN, 2018; SARTORI, 2019).

Foram realizadas simulações de vazão para o período de calibração (1/1/1981 a 31/12/2004), comparando os valores simulados com os observados por meio de hidrogramas, gráficos e índices estatísticos. Os parâmetros do modelo foram ajustados manualmente em escala mensal até que os resultados da simulação fossem considerados aceitáveis.

A avaliação estatística do desempenho de um modelo comumente ocorre mediante a comparação entre os dados observados e os simulados. Geralmente, são empregados o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) (Equação 4), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) (Equação 5) e o índice PBIAS (Equação 6).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] 100 \quad (6)$$

Em que:

[ $n$ ]: número de observações durante o período simulado;

[ $O_i$ ]: vazões observadas;

[ $S_i$ ]: vazões simuladas pelo modelo;

[ $\bar{O}$ ]: média dos valores observados;

[ $\bar{S}$ ]: média dos valores simulados.

O coeficiente NS varia de  $-\infty$  a 1, sendo valores mais próximos de 1 indicativos de ajustes mais precisos. A utilização do NS também possibilita avaliar a precisão do modelo (BRESSIANI *et al.*, 2015).

O coeficiente de determinação,  $R^2$ , assume valores entre 0 e 1. Contudo, sua limitação está no fato de que valores mais altos (próximos de 1) nem sempre indicarem um ajuste adequado (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016).

O índice PBIAS indica a média percentual pela qual os dados simulados subestimam ou superestimam os dados observados (MORIASI *et al.*, 2015). Valores positivos apontam para superestimação, enquanto valores negativos indicam subestimação. Magnitudes baixas sinalizam maior precisão na simulação do modelo, sendo que o valor ideal é 0 (OLIVEIRA, 2014).

Para padronizar os resultados do modelo de acordo com os índices estatísticos, alguns estudiosos estabeleceram critérios, sendo  $NS > 0,4$  e  $R^2 > 0,5$  para dados mensais (GREEN; VANGRIENSVEN, 2008; WU; CHEN, 2009) e outros sugerem que o modelo pode ser considerado satisfatório se NS entre 0,5 e 0,7;  $R^2$  entre 0,6 e 0,75; e PBIAS entre  $\pm 10$  e  $\pm 15$  para vazões em intervalos mensais (Tabela 1) (MORIASI *et al.*, 2015, 2007). Ao avaliar modelos de bacias hidrográficas em intervalos diários, as classificações podem ser menos rigorosas devido à maior aleatoriedade ou instabilidade dos valores diários.

Tabela 1 - Classificação dos coeficientes para avaliação dos resultados do modelo SWAT

<b>Classificação</b>	<b>NS</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>PBIAS (%)</b>
Muito Bom	$NS > 0,8$	$R^2 > 0,85$	$PBIAS < \pm 5$
Bom	$0,70 < NS \leq 0,80$	$0,75 < R^2 \leq 0,85$	$\pm 5 \leq PBIAS < \pm 10$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,70$	$0,60 < R^2 \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Insatisfatório	$NS \leq 0,5$	$R^2 \leq 0,60$	$PBIAS \geq \pm 15$

Fonte: a autora (2024).

### 3.4 Cenários Simulados para Contemplar as Mudanças Climáticas

Os cenários futuros de mudanças climáticas foram estimados com base no tempo de dados observados e simulados no SWAT, utilizando valores para o futuro de variáveis climáticas, que são, precipitação, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura mínima e máxima.

Os SSP utilizados no estudo são os cenários de emissões intermediárias (SSP2-4.5) e emissões elevadas (SSP8-5.8), considerando os períodos de médio prazo (2020-2059) e longo prazo (2060-2099). Para simplificar a identificação da composição dos diferentes cenários de mudanças climáticas, eles foram denominados conforme consta na Quadro 7.

Quadro 7 - Nomeação dos cenários futuros de mudanças climáticas

<b>Nome do cenário</b>	<b>Descrição</b>
C1_245	SSP 2-4.5 no período 2020-2059
C2_245	SSP 2-4.5 no período 2060-2099
C1_585	SSP 5-8.5 no período 2020-2059
C2_585	SSP 5-8.5 no período 2060-2099

Fonte: a autora (2024).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Calibração e Validação do SWAT

Os treze parâmetros de maior sensibilidade que foram utilizados na calibração do SWAT para a BHRJ, bem como os métodos de variação e seus respectivos valores inicial e calibrado estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade do modelo

Parâmetro	Método de variação	Valor inicial	Valor calibrado
SOL_AWC	Multiplicação	0,0906 – 0,25	x 0,5
SOL_K	Multiplicação	1,403 – 7,929	x 0,25
SOL_ALB	Multiplicação	0,283 – 0,505	x 0,5
ANION_EXCL	Substituição	0.5	0,3
EPCO	Substituição	1	0,8
ESCO	Substituição	0,95	0,1
CANMX	Substituição	0	80
LAT_TIME	Substituição	0	2
CH_N2	Substituição	0,014	0,03
GWQMN	Substituição	1000	3000
GW_REVAP	Substituição	0,02	0,14
GW_DELAY	substituição	31	200
SURLAG	Substituição	4	2

Fonte: a autora (2024).

É possível analisar os parâmetros utilizados neste estudo em relação a outros estudos na mesma bacia (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016a; MOREIRA, 2017) e em bacias do Brasil (IENSEN, 2018; SARTORI, 2019) (Tabela 3).

Toda a modelagem foi realizada visando obter a evapotranspiração potencial (PET) do balanço hídrico o mais próximo do real, podendo assim justificar alguns valores calibrados de maneira diferente a outros autores na mesma bacia (SOL\_AWC, SOL\_K, SOL\_ALB), além da diferença dos dados meteorológicos e do intervalo de tempo analisados neste estudo. Foi observado que alguns parâmetros como SURLAG, EPCO e ESCO, utilizados na calibração, podem ter ajustes diferentes na bacia (.BSN) e nas HRUs (.Hru), sendo SURLAG ajustado somente na bacia e EPCO e ESCO, ajustados em ambos.

Tabela 3 - Comparação de parâmetros utilizados por outros autores

Parâmetro	Cecílio	Moreira	Correia	Sartori	Iensen	Autora
SOL_AWC	x1,4	x1,3906	x1,21	x0,34	-	<b>x 0,5</b>
SOL_K	-	x0,5174	x1,05	-	-	<b>x 0,25</b>
SOL_ALB	-	x1,5060	x1,33	-	-	<b>x 0,5</b>
ANION_E	-	-	-	0,3-0,5	-	<b>0,3</b>
XCL	-	-	-	-	-	-
EPCO	0,3	0,7791	0,03	-	-	<b>0,8</b>
ESCO	0,6	0,2529	0,65	0,1	0,1	<b>0,1</b>
CANMX	10-26	0,4	63,35	-	-	<b>80</b>
LAT_TIM	-	-	-	-	4	<b>2</b>
E	-	-	-	-	-	-
CH_N2	-	1	0,09	-	-	<b>0,03</b>
GWQMN	2300	408	1953,57	0,36	-	<b>3000</b>
GW_REV	0,2	0,1284	0,15	0,146	-	<b>0,14</b>
AP	-	-	-	-	-	-
GW_DEL	150	38,35	304,89	-	-	<b>200</b>
AY	-	-	-	-	-	-
SURLAG	2	3,5652	7,16	-	-	<b>2</b>

Fonte: a autora (2024).

De maneira a ter uma melhor visão da influência dos parâmetros no SWAT, foram denominados 6 tipos principais de influências, na modelagem, que são:

*Escoamento de água superficial* – os parâmetros utilizados na calibração com essa influência foram o SURLAG e LAT\_TIME. SURLAG, representa o coeficiente de retardo do escoamento superficial. O valor do parâmetro de SURLAG foi ajustado para 2, sugerindo que o modelo leva em consideração um intervalo de dois dias para que o escoamento atinja seu pico após a ocorrência de precipitação. Em trabalhos anteriores Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019) substituíram por 2, Moreira (2017), substituiu por 3,6 e Correia (2016), substituiu por 7,14. Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019), obtiveram o mesmo valor que foi adotado neste trabalho. O parâmetro LAT\_TIME, que representa o tempo do fluxo lateral, desempenha um papel essencial na simulação dos processos de escoamento lateral em uma bacia, o valor adotado para esse parâmetro foi a substituição por 2, indicando uma modificação específica na estimativa do tempo necessário para o escoamento lateral ocorrer, influenciando diretamente na dinâmica do escoamento de água na paisagem, afetando a resposta do sistema às condições climáticas e de uso do solo. Iensen (2018), adotou em seu trabalho o valor 4 para o parâmetro LAT\_TIME.

*Água subterrânea* – os parâmetros que representaram essa influência foram GWQMN, EPCO, GW\_REVAP e GW\_DELAY. O parâmetro GWQMN, que se refere à profundidade

limite de água no aquífero raso necessária para o fluxo de retorno ocorrer, é crucial para determinar o início do fluxo de base, esse parâmetro foi ajustado para 3000, sugerindo que o modelo considera uma profundidade significativa no aquífero raso antes de permitir o retorno de água para o sistema. Já o parâmetro EPCO, representa o fator de compensação de absorção de plantas, é essencial para simular a dinâmica da vegetação e a absorção de nutrientes na bacia, esse valor foi substituído por 0,8. O parâmetro GW\_REVAP, representa o coeficiente de ascensão da água à zona não saturada, esse parâmetro tem influencia no fluxo de água no solo, foi substituído por 0,14 indicando uma adaptação específica, que sugere uma constante de proporcionalidade modificada para calcular a quantidade máxima de água que se desloca no solo em resposta às deficiências hídricas. E o parâmetro GW\_DELAY, representa o intervalo de tempo para a recarga do aquífero, atua no cálculo da recarga do aquífero, para este adotou-se o ajuste em 200. Estes parâmetros foram utilizados em trabalhos anteriores na bacia em estudo sendo que Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019) adotaram os valores 2300; 0,3; 0,2 e 150, Moreira (2017) 408; 0,7791; 0,1284 e 38,35, Correia (2016) 1953,57; 0,03; 0,15 e 304,89, respectivamente e em outras bacias como Sartori (2019) GWQMN 0,36 e GW\_REVAP 0,146.

*Evapotranspiração* – Associado aos parâmetros CANMX, ESCO e SOL\_ALB. O parâmetro CANMX, representa o armazenamento máximo do dossel, contribui para simular a quantidade máxima de água que a vegetação pode interceptar, este parâmetro foi substituído por 80, para todas as culturas. Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019) substituíram de acordo com o cultivo, variando de 10 a 26, já Moreira (2017) e Correia (2016), substituíram por um único valor 0,4 e 63,35 cada. Já o parâmetro ESCO, que representa o fator de compensação de evaporação do solo, foi substituído por 0,1, este exerce relevância para simular os processos de evaporação no solo. Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019), Moreira (2017), Correia (2016), Sartori (2019) e Iensen (2018) substituíram por 0,6; 0,25; 0,65; 0,1 e 0,1, respectivamente. O parâmetro SOL\_ALB aplicou-se uma redução de 50%. Moreira (2017) e Correia (2016), aplicaram os valores de 1,506 e 1,33 em seus trabalhos nesta ordem.

*Água do solo* – Os parâmetros utilizados foram SOL\_AWC, SOL\_K e ANION\_EXCL. O SOL\_AWC foi reduzido pela metade (-50%), este reflete a quantidade de água retida no solo após a infiltração, pode influenciar diretamente processos como a evapotranspiração e o escoamento superficial. Trabalhos anteriores como o de Cecílio, Pimentel e Zanetti (2019), Moreira (2017) e Correia (2016), aumentaram em 40%, 39%, 21% respectivamente e Sartori (2019) reduziu em 66%. Já o parâmetro SOL\_K, foi reduzido em 75%, este parâmetro desempenha um papel significativo na representação da dinâmica do solo em uma bacia, sendo

ela a condutividade hidráulica efetiva no canal principal. Moreira (2017), reduziu em 30%, e Correia (2016), aumentou 5%. ANION\_EXCL é um parâmetro que reflete a fração de porosidade (espaços vazios), onde nesse estudo foi aplicado o valor do 0,3. Sartori (2019) apresenta um valor de ANION\_EXCL para cada tipo de solo, esses valores variaram de 0,3 a 0,5.

*Fluxo nos canais* - O parâmetro CH\_N2, que representa o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal, é essencial para modelar a resistência ao fluxo da água em canais. Neste trabalho o parâmetro foi substituído por 0,03. Moreira (2017) e Correia (2016), utilizaram para esse parâmetro os valores 1 e 0,09 respectivamente.

A tabela 4 apresenta os valores dos índices estatísticos para avaliar todas as três etapas de simulações das vazões mensais, sendo duas com a utilização dos novos valores de parâmetros (não-calibração, calibração e validação). A avaliação dos índices estatísticos foi baseada nos estudos de Moriasi *et al.* (2015).

Tabela 4 - Índices estatísticos da pré-calibração, calibração e validação do SWAT para a bacia hidrográfica do rio Jucu

<b>Estatísticas</b>	<b>Não-calibração</b>	<b>Calibração</b>	<b>Validação</b>
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	0,336	0,682	0,542
Coeficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	0,714	0,735	0,593
Percentual de tendência (%) (PBIAS)	0,95	-0,158	-0,696

Fonte: a autora (2024).

No que se refere à fase pré-calibração, observa-se, na Figura 3, que as vazões simuladas foram superiores às observadas, principalmente aquelas resultantes dos maiores eventos de precipitação. De forma semelhante, outros estudos em bacias próximas e semelhantes também observaram a superestimativa das vazões de pico simuladas pelo SWAT (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016; MOREIRA, 2017), reforçando a necessidade de calibração dos parâmetros de entrada dos modelos hidrológicos. Pela análise visual dos hidrogramas (Figura 3) é possível verificar que, sem a calibração, o modelo SWAT não conseguiu simular a vazão da bacia hidrográfica do rio Jucu de forma satisfatória. Todos os índices estatísticos (Tabela 4) mostraram que o desempenho do SWAT não-calibrado foi

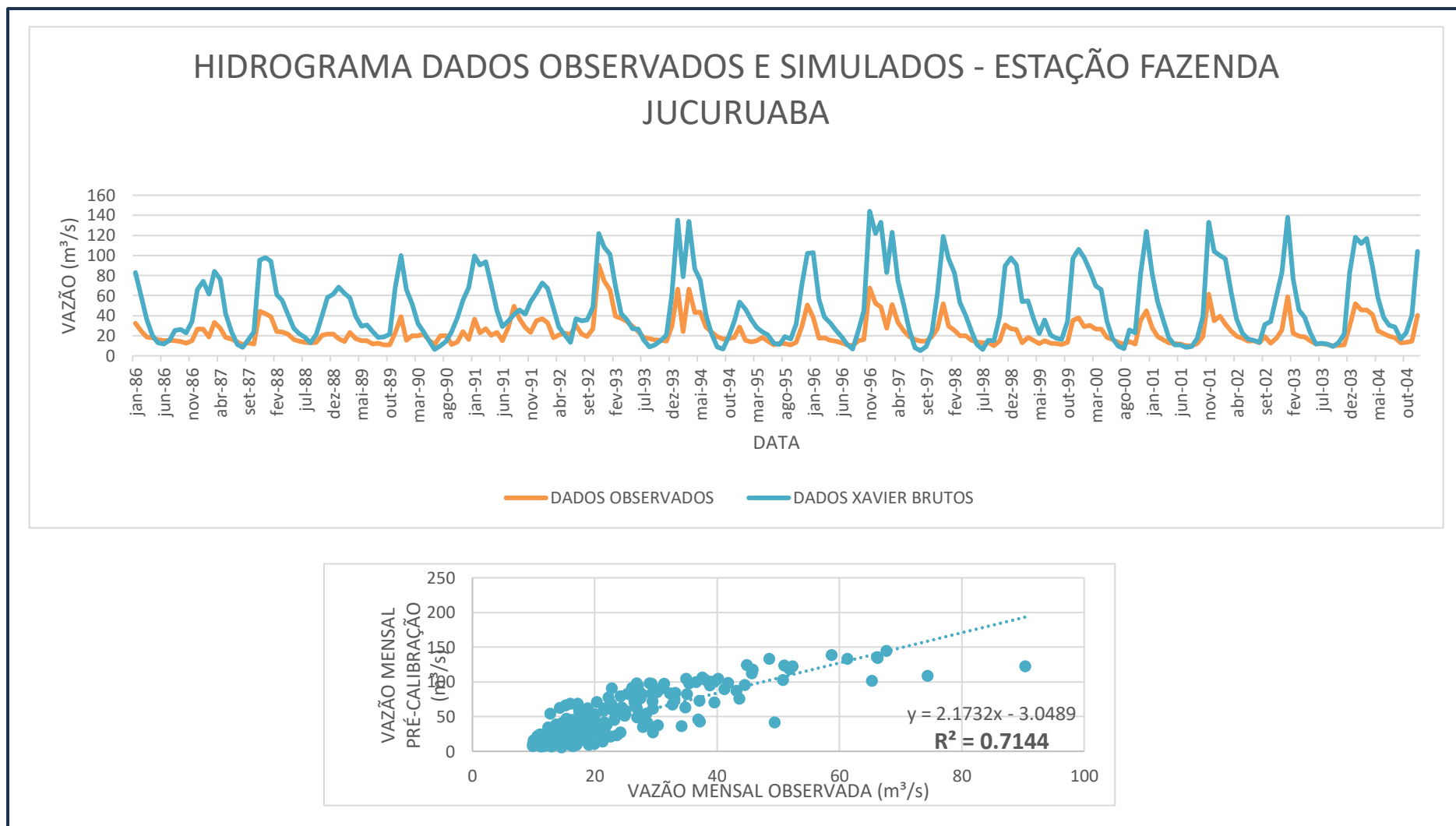
insatisfatório de acordo com os critérios da literatura. Os valores de PBIAS se destaca por estar em um valor muito bom, o valor de  $R^2$  se enquadra no valor satisfatório, mesmo sem calibração, já NS está demonstrando valores insatisfatórios, de acordo com a literatura, ((CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016; MOREIRA, 2017). Do exposto, o hidrograma da Figura 3 e os índices estatísticos da Tabela 4, indicaram a necessidade de calibração dos parâmetros de entrada do SWAT.

Após a calibração, PBIAS continua com um valor muito bom, -0,158, o valor de  $R^2$  se mantém em valor satisfatório, 0,735, já NS apresenta um valor satisfatório de 0,682. Desta forma ao analisar-se a Tabela 4. Outros trabalhos na BHRJ calibraram de forma satisfatória, para vazões mensais, (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019; CORREIA, 2016; MOREIRA, 2017). A calibração aqui apresentada demonstrou um bom desempenho para estimativa das vazões mensais (Figura 4), sendo, portanto, mais adequada para a determinação das vazões médias.

A etapa de validação permitiu confirmar a eficiência do modelo. Observa-se um melhor ajuste da simulação na fase de validação para os dados diários (Tabela 4 e Figura 4). Os hidrogramas, os gráficos de dispersão (Figura 4), e os índices da Tabela 4 indicam uma melhoria no ajuste das vazões simuladas após a calibração e validação, em relação às vazões observadas, apesar das vazões simuladas ainda tenderem a ser subestimadas nas vazões mínimas e superestimadas nas vazões máximas.

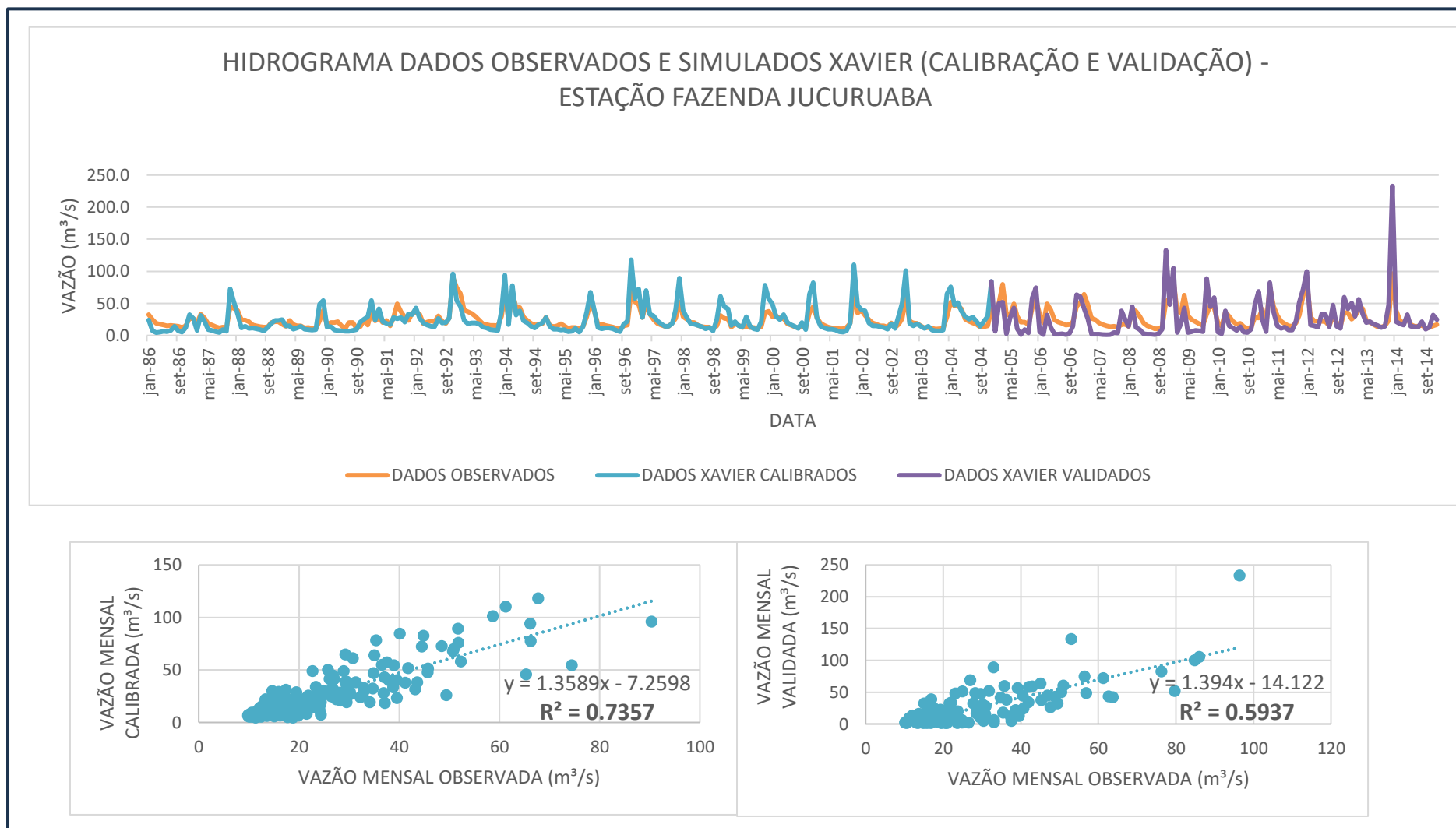
No presente estudo, todos estes ajustes realizados contribuíram para melhorar a previsão das vazões simuladas, conforme mostram os índices estatísticos de desempenho (Tabela 4) tanto da calibração quanto da validação do SWAT.

Figura 3 - Hidrograma comparativo dos dados observados e os simulados, e correlações das vazões mensais Pré-calibração



Fonte: a autora (2024).

Figura 4 - Hidrograma comparativo dos dados observados e os simulados, e correlações das vazões mensais Calibração e Validação.



Fonte: a autora (2024).

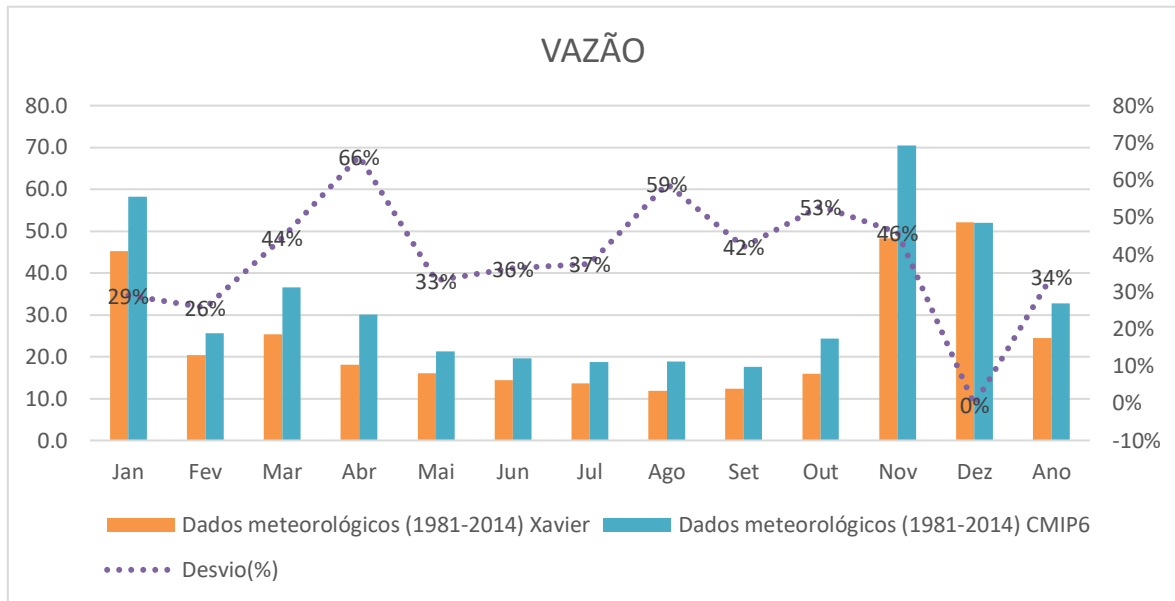
## 4.2 Comparação dos Resultados Históricos

Alguns estudos avaliam os resultados de dados meteorológicos provenientes de diferentes modelos de projeções de MCGs, que se mostram diferentes dependendo do modelo escolhido, destacando algumas incertezas em relação as projeções (BOSCO; VALVERDE, 2022; REBOITA *et al.*, 2022).

Existem trabalhos que fizeram uma comparação entre diferentes bases de dados de precipitação e evapotranspiração amplamente utilizadas, para o estado do Espírito Santo (BARATTO *et al.*, 2022a, b). Sendo, a base de dados XAVIER utilizada no presente estudo, uma que forneceram melhor resultado.

Foi feita uma comparação das análises de vazão obtidas a partir das simulações após correção de viés, dos dados XAVIER, base de dados nacional, e CMIP6\_HISTÓRICO, base do MCG GDFL-ESM4, com a mesma calibração dos parâmetros durante o mesmo tempo de observação, que tiveram bons resultados na calibração nacional. A comparação está disposta na Figura 5, e demonstra que os desvios mensais tem uma variação de 26 a 66%, as maiores diferenças estão nos meses de março (44%), abril (66%), agosto (59%), outubro (53%) e novembro (46%), e o mês de dezembro se destaca por ter um desvio menor que 1%. Para justificar o motivo da variação anual de 34%, foram analisados os dados de precipitação (PREC), evapotranspiração potencial (PET) e evapotranspiração real (ET), obtidos das duas bases de dados.

Figura 5 - Gráfico Comparativo das vazões obtidas dos dados XAVIER e CMIP6\_HISTÓRICO



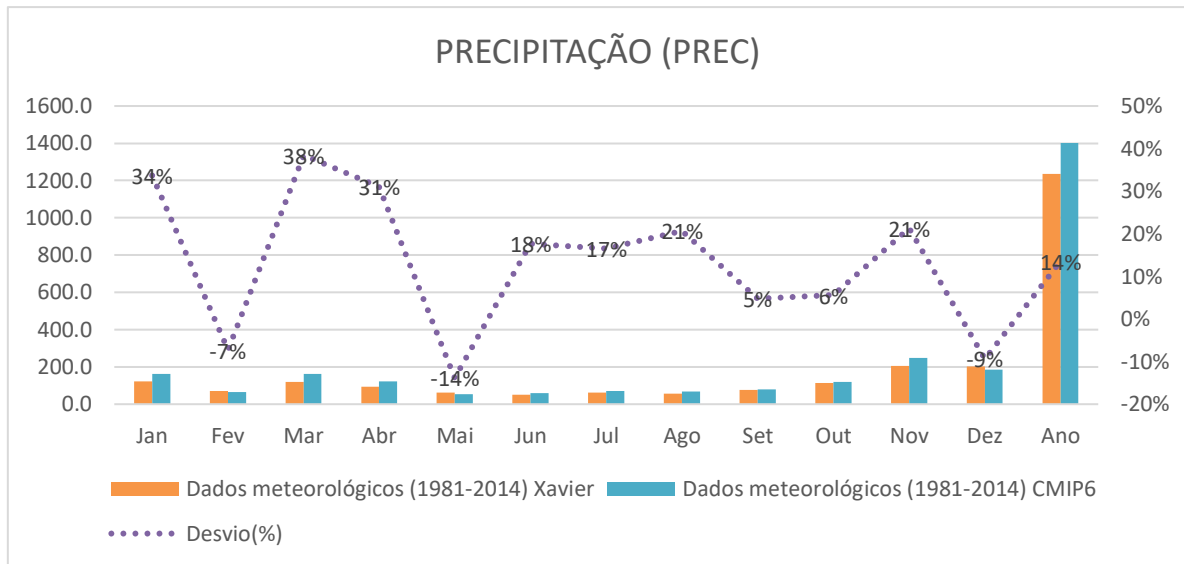
Fonte: a autora (2024).

Nos dados de precipitação (Figura 6), mensalmente, observa-se uma variação nos dados fornecidos pelo CMIP6 de -14% a 38%. Nota-se que os meses de dezembro (-9%) e fevereiro (-7%), tem desvios subestimados pelo CMIP6 e a diferença na vazão é menor. No geral, a precipitação fornecida pelo CMIP6 é superestimada, que leva a maiores estimativas de vazão. Anualmente a diferença observada mostra que esses dados tem um desvio de 14% em relação aos dados XAVIER.

Os dados de evapotranspiração potencial (Figura 7), mostram que a variação mensal é de  $\pm 4\%$  e anualmente fica em -1%. Evidenciando que estes dados estão condizentes com os dados reais.

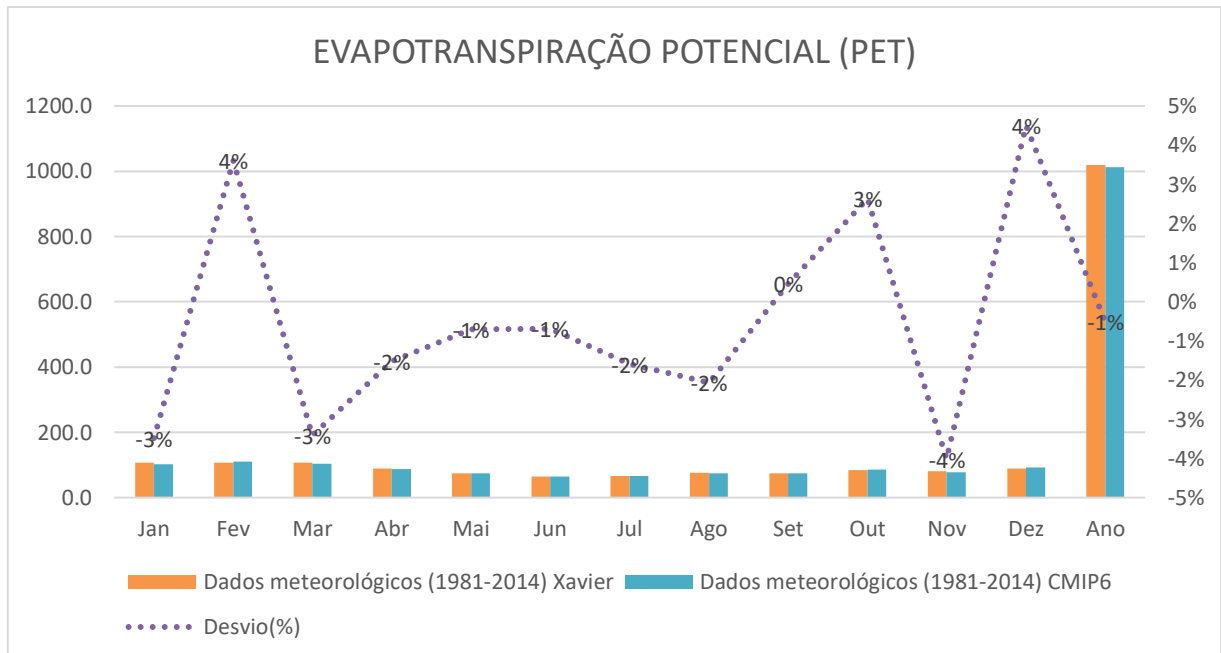
Já nos dados de evapotranspiração real (Figura 8), nota-se uma variação mensal de -8% a 27% e anualmente essa diferença é de 3%. Esses dados demonstram nos meses de setembro (14%), outubro (27%) e dezembro (24%) desvios maiores que o esperado.

Figura 6 - Gráfico Comparativo das precipitações obtidas dos dados XAVIER e CMIP6\_HISTÓRICO



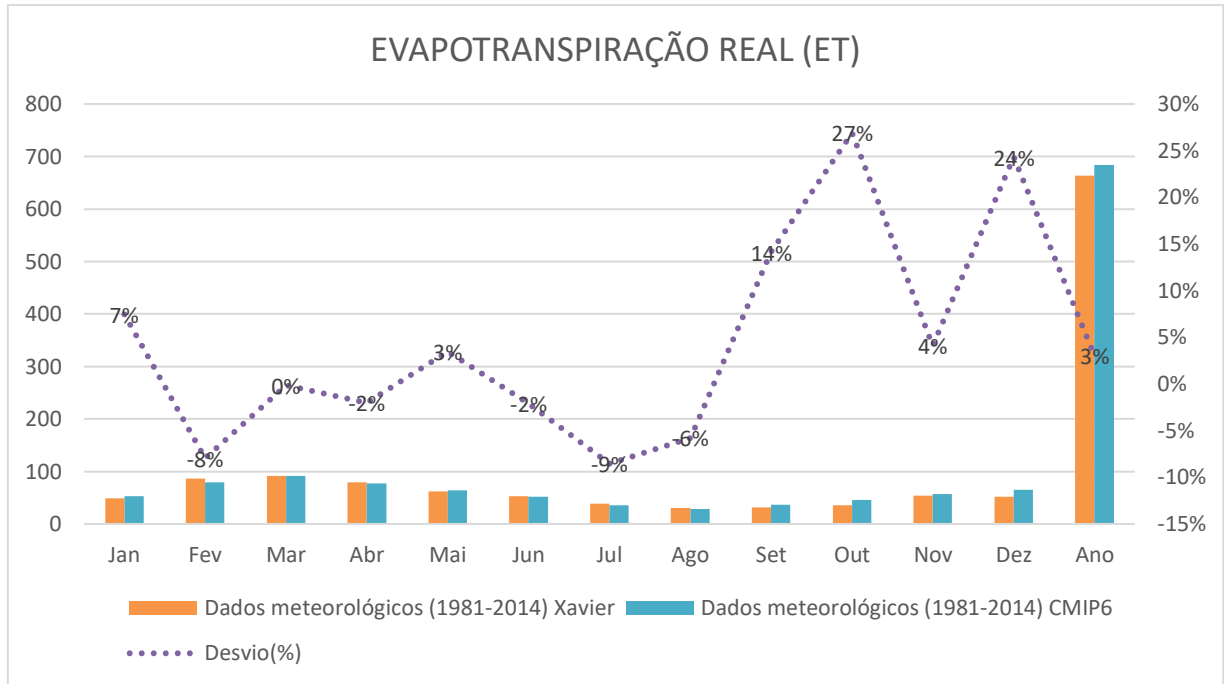
Fonte: a autora (2024).

Figura 7 - Gráfico Comparativo da evapotranspiração potencial obtida dos dados XAVIER e CMIP6\_HISTÓRICO



Fonte: a autora (2024).

Figura 8 - Gráfico Comparativo da evapotranspiração real obtida dos dados XAVIER e CMIP6\_HISTÓRICO



Fonte: a autora (2024).

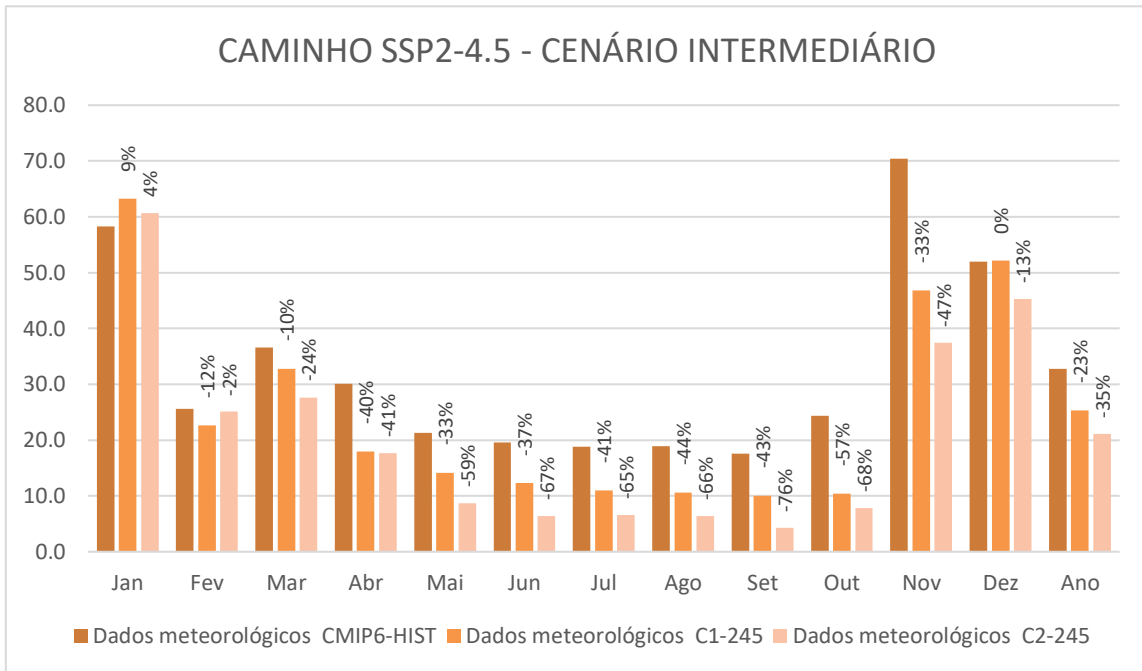
### 4.3 Simulação de cenários

Aplicando as simulações em cenários climáticos futuros, utilizando os dados históricos e futuros do CMIP6, é possível observar que, de maneira geral, as projeções do caminho SSP2-4.5 (Figura 9) apontam redução das vazões médias anuais ao longo do tempo, tanto no futuro próximo (C1\_245) quanto no futuro distante (C2\_245), nas magnitudes de -23% e -35%, respectivamente.

Reduções das vazões médias mensais são apontadas para os meses mais secos (de abril a setembro), com magnitudes variando entre -33% e -68%. Também se verifica redução das vazões médias para os meses de outubro e novembro. Tais resultados refletem uma tendência que já acontece na região, em especial em uma bacia vizinha, a Bacia do Rio Itapemirim (Gonçalves *et al.*, 2020).

Por outro lado, nota-se um aumento nas vazões médias mensais durante apenas para o mês de janeiro, com magnitudes variando entre 9% (curto prazo) e 4% (longo prazo).

Figura 9 - Gráfico Projeções do caminho SSP2-4.5.

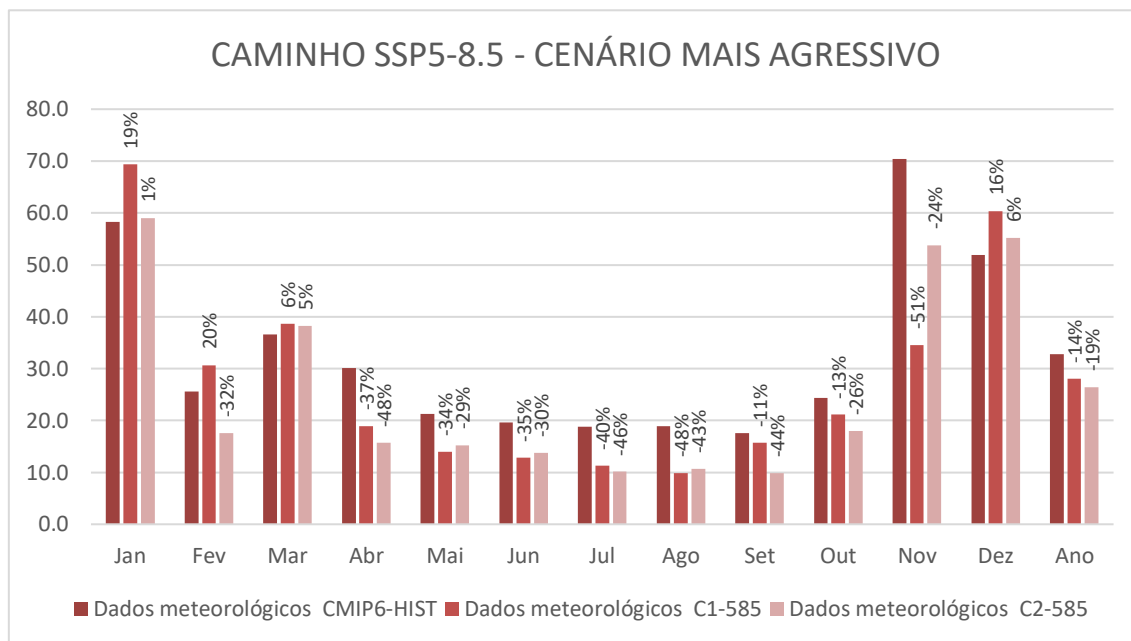


Fonte: a autora (2024).

As projeções do caminho SSP5-8.5 (Figura 10) apresentam comportamento semelhante às do caminho SSP2-4.5: redução das vazões médias anuais ao longo do tempo; redução das vazões médias mensais entre abril e novembro (que inclui o período seco); e aumento das vazões médias mensais em janeiro (parte do período chuvoso). Todavia, as variações nas vazões que reduzem são inferiores às projetadas no caminho SSP2-4.5. As médias anuais reduzem entre -14 e -19%. As médias mensais de abril a novembro reduzem em magnitudes variando entre 11% e 51%. As médias de janeiro aumentam mais que no caminho SSP2-4.5: entre 1 e 19%.

Diferente do caminho anterior, a Figura 10 mostra aumento das vazões médias mensais para os períodos chuvosos (dezembro a março), com magnitudes variando entre 1% e 19%.

Figura 10 - Gráfico Projeções do caminho SSP5-8.5.



Fonte: a autora (2024).

Tan (2015), demonstrou em seus resultados que, para as Bacias Jucu e Santa Maria, as estimativas de média anual do escoamento superficial, obtidas por abordagem baseada em sensibilidade sugerem um aumento médio de 20% a 45% em toda a região. As diferenças entre cada cenário do IPCC AR5 são pequenas (<5%). Na bacia de Santa Maria, os fluxos anuais diminuiriam 36% e na do rio Jucu, os fluxos médios diminuiriam 30%. Dados também observados nesse estudo tendo diminuição de 14 a 35% nas vazões médias. Ainda com base nas análises de cenários futuros de Tan (2015), os efeitos das mudanças no uso da terra sobre os rendimentos hídricos sazonais e anuais são um balanço líquido da mudança no tamanho do armazenamento de umidade da bacia, interação vegetação-solo e regulação do fluxo.

De acordo com as análises geradas neste estudo, as diferenças entre os cenários intermediário está com aproximadamente 12% e entre os cenários agressivo a diferença é de aproximadamente 5%. Em uma comparação com os dois cenários a médio e longo prazo temos uma diferença de 9% de 2020 a 2054 e 16% de 2060 a 2094.

Nas análises aqui dispostas é possível verificar uma redução significativa nas vazões, de abril a novembro em todos os cenários, podendo ter reduções que variam de 33 a 76% nos cenários do caminho SSP2-4.5 e de 11 a 51% nos cenários do caminho SSP5-8.5.

Essas reduções podem ser interpretadas como alterações significativas nos parâmetros avaliados ao longo do período mencionado, refletindo possíveis mudanças nas condições

ambientais ou em processos relacionados à bacia hidrográfica. A variação nos cenários SSP2-4.5 sugere que em contextos de mitigação mais moderada, a Bacia do rio Jucu experimenta uma redução mais acentuada nos indicadores analisados. Por outro lado, nos cenários SSP5-8.5, que representam trajetórias mais pessimistas em termos de emissões de gases de efeito estufa, a redução é relativamente menor, indicando uma possível relação entre as ações de mitigação e os impactos observados.

A compreensão desses resultados requer uma investigação mais aprofundada para identificar as causas específicas dessa redução de vazões. A identificação de padrões sazonais nesses resultados, de abril a novembro, pode fornecer informações adicionais sobre os eventos ou processos que desencadeiam tais variações.

Em termos técnicos, os dados sugerem uma dinâmica significativa nos indicadores avaliados na Bacia do rio Jucu, com implicações importantes para a gestão ambiental e estratégias de adaptação, como planejamento do uso da terra, conservação e recuperação dos recursos naturais da bacia. A análise dessas reduções fornece uma base para investigações mais detalhadas e a implementação de medidas específicas destinadas a preservar e sustentar a saúde ecossistêmica da bacia hidrográfica em questão, tais como realizar uma avaliação abrangente da situação atual, envolver todas as partes interessadas, identificar os principais problemas e pressões, desenvolver estratégias específicas, implementar práticas sustentáveis de uso da terra e conservação de ecossistemas, estabelecer um sistema de monitoramento, promover a educação ambiental, cooperar entre governos, ONGs e comunidades, desenvolver legislação adequada e adaptar-se às mudanças climáticas. Essas medidas integradas e coordenadas são essenciais para garantir a saúde a longo prazo da bacia hidrográfica e seus ecossistemas.

A redução nos indicadores pode afetar a disponibilidade de recursos hídricos para a geração de energia hidrelétrica, sendo essa uma fonte significativa na região. Quedas nos níveis de água podem impactar a eficiência das usinas hidrelétricas e, em casos extremos, podem levar a restrições na produção de energia. Isso destaca a importância de monitorar de perto os recursos hídricos para garantir a estabilidade na geração de energia.

A variabilidade nos indicadores pode influenciar também na disponibilidade de água para a agricultura. Reduções em épocas específicas do ano podem impactar os padrões de irrigação e, conseqüentemente, a produção agrícola. Isso pode ser crítico para uma região dependente da agricultura, pois afeta diretamente a produtividade e a segurança alimentar.

Estratégias de gestão de recursos hídricos e adaptação são necessárias para garantir a sustentabilidade da atividade agrícola.

A redução nos indicadores pode afetar a disponibilidade de água para o abastecimento público e industrial. Quedas nos níveis de água dos rios e reservatórios podem levar a desafios no fornecimento de água potável para a população local e para as atividades industriais, o que já vem sendo observado tornado a BHRJ a primeira bacia do estado do Espírito Santo a ter critérios próprios de outorga para uso da água desde 2020 (AGERH, 2020). Isso destaca a necessidade de uma gestão cuidadosa dos recursos hídricos, com medidas para conservação e eficiência no uso da água.

A interconexão entre os setores de geração de energia, agricultura e abastecimento de água destaca a natureza sistêmica dos desafios enfrentados. Mudanças nos padrões de precipitação e disponibilidade de água podem criar desafios complexos que exigem abordagens integradas e colaborativas para mitigação e adaptação.

Em relação aos possíveis desastres causados pelas mudanças climáticas é bom destacar que o aumento do risco de secas, impactam a economia, o meio ambiente e a qualidade de vida da população, além do aumento do risco de inundações em áreas baixas da bacia hidrográfica.

A análise dos indicadores na Bacia do rio Jucu não apenas alerta para mudanças ambientais, mas também destaca a necessidade de planejamento e estratégias adaptativas para garantir a sustentabilidade nos setores críticos de geração de energia, agricultura e abastecimento de água na região. A compreensão dessas mudanças e a implementação de medidas adequadas são cruciais para enfrentar os desafios decorrentes das variações nos recursos hídricos.

## **5.CONCLUSÕES**

Com base nas análises realizadas sobre as projeções dos cenários climáticos futuros para a bacia hidrográfica do rio Jucu, é evidente que as mudanças climáticas estão exercendo um impacto significativo no comportamento sazonal das vazões. Tanto os modelos do caminho SSP2-4.5 quanto do SSP5-8.5 indicam uma tendência geral de redução das vazões médias anuais ao longo do tempo, com reduções ainda mais acentuadas durante os meses mais secos, de abril a novembro. Especificamente, as reduções podem variar de 33% a 76% nos cenários do SSP2-4.5 e de 11% a 51% nos cenários do SSP5-8.5 durante esses meses.

Essas mudanças têm implicações significativas em vários setores-chave, incluindo geração de energia hidrelétrica, agricultura e abastecimento público e industrial de água. Quedas nas vazões podem afetar a eficiência das usinas hidrelétricas, padrões de irrigação agrícola e fornecimento de água potável, levando a desafios adicionais para a população local e para a economia regional. Além disso, as mudanças climáticas também aumentam o risco de desastres, como secas e inundações, impactando negativamente a qualidade de vida e o meio ambiente na região.

Em suma, as análises realizadas destacam a urgência de implementar estratégias adaptativas e medidas de gestão de recursos hídricos para enfrentar os desafios decorrentes das mudanças no comportamento das vazões na bacia do rio Jucu. Essas medidas devem ser integradas, colaborativas e sustentáveis para garantir a resiliência dos setores críticos e a sustentabilidade a longo prazo da região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K. C. *et al.* A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 733–752, maio 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169415001985>>.

ADAM, K. *et al.* Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná / Climate Change and Extreme Streamflows in Paraná River Basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 999–1007, 2015. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=156&SUMARIO=5125>>.

ADAM, K.; COLLISCHONN, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 3, p. 69–79, 2013. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=109&SUMARIO=1615>>.

AGERH. Bacia Hidrográfica do Rio Jucu é a primeira do Estado a ter critérios próprios de Outorga para uso da água. Disponível em: <<https://www.es.gov.br/Noticia/bacia-hidrografica-do-rio-jucu-e-a-primeira-do-estado-a-ter-criterios-proprios-de-outorga-para-uso-da-agua>>.

AHN, S. R.; JEONG, J. H.; KIM, S. J. Assessing drought threats to agricultural water supplies under climate change by combining the SWAT and MODSIM models for the Geum River basin, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, v. 61, n. 15, p. 2740–2753, 17 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2015.1112905>>.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. Disponível em: <[http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil?af=crossref](http://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil?af=crossref)>.

ANA. Guia de Revisão Periódica de Segurança de Barragem. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <[https://www.snisd.gov.br/Entenda\\_Mais/volume-iii-guia-de-revisao-periodica-de-seguranca-de-barragem](https://www.snisd.gov.br/Entenda_Mais/volume-iii-guia-de-revisao-periodica-de-seguranca-de-barragem)>.

ANDRADE, E. M. *et al.* Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 27, p. 100649, fev. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214581819300485>>.

ARAGÃO, R. de *et al.* Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT e simulação dos processos hidrossedimentológicos em uma bacia no agreste nordestino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 4, p. 1091–1102, ago. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832013000400026&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832013000400026&lng=pt&tlng=pt)>.

BARATTO, P. F. B. *et al.* Espacialização da Precipitação Diária em Bacias Hidrográficas do Sul do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 3, p. 385–404, set. 2022a.

Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862022000300385&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862022000300385&tlng=pt)>.

BARATTO, P. F. B. *et al.* Random Forest for spatialization of daily evapotranspiration (ET0) in watersheds in the Atlantic Forest. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 6, p. 449, 23 jun. 2022b. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10661-022-10110-y>>.

BECKIE, R. *Fundamental Hydrologic Equations*. *Encycl. Hydrol. Sci.* [S.l.]: Wiley, 2005. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470848944.hsa004>>.

BEDNAR, M.; MARTON, D. IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON HYDROLOGICAL AND METEOROLOGICAL QUANTITIES IN WATERSHED SCALE. 27 dez. 2022, [S.l.: s.n.], 27 dez. 2022. p. 91–100. Disponível em: <[https://epslibrary.at/sgem\\_jresearch\\_publication\\_view.php?page=view&editid1=8775](https://epslibrary.at/sgem_jresearch_publication_view.php?page=view&editid1=8775)>.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and Validation of Soil and Water Assessment Tool on an Agricultural Watershed in Upstate New York. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 10, n. 5, p. 363–374, set. 2005. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%291084-0699%282005%2910%3A5%28363%29>>.

BLEIDORN, M. T. *et al.* MODELAGEM E PREVISÃO DE VAZÕES MÉDIAS MENSAS DO RIO JUCU, ES, UTILIZANDO O MODELO SARIMA. *IRRIGA*, v. 24, n. 2, p. 320–335, 27 jun. 2019. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3207>>.

BOSCO, R. B.; VALVERDE, M. C. Projeções climáticas de precipitação e temperatura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba – SP simulados por modelos climáticos do CMIP6. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/361398860\\_Projecoes\\_climaticas\\_de\\_precipitacao\\_e\\_temperatura\\_na\\_Regiao\\_Metropolitana\\_do\\_Vale\\_do\\_Paraiba\\_-\\_SP\\_simulados\\_por\\_modelos\\_climaticos\\_do\\_CMIP6](https://www.researchgate.net/publication/361398860_Projecoes_climaticas_de_precipitacao_e_temperatura_na_Regiao_Metropolitana_do_Vale_do_Paraiba_-_SP_simulados_por_modelos_climaticos_do_CMIP6)>.

BRÊDA, J. P. L. F. *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, v. 159, n. 4, p. 503–522, 30 abr. 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10584-020-02667-9>>.

BRESSIANI, D. A. *et al.* NoReview of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. 2015. Disponível em: <<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765>>.

CASTRO, E. L. H. Avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na bacia do rio Piracicaba, utilizando modelagem hidrológica. 2022. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-05082022-170655/>>.

CECÍLIO, R. A. *et al.* Hydrological modelling of tropical watersheds under low data availability. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 5, p. e100953262, 30 mar. 2020. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/3262>>.

CECÍLIO, R. A.; PIMENTEL, S. M.; ZANETTI, S. S. Modeling the influence of forest cover on streamflows by different approaches. *CATENA*, v. 178, p. 49–58, jul. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816219300876>>.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied Hydrology*. 1988. Universidade Estadual de San Diego, 1988. Disponível em: <[https://ponce.sdsu.edu/Applied\\_Hydrology\\_Chow\\_1988.pdf](https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf)>.

CIABATTA, L. *et al.* Assessing the impact of climate-change scenarios on landslide occurrence in Umbria Region, Italy. *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 285–295, out. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169416300324>>.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. *Introduzindo hidrologia*. 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/104348/000940239.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

CORREIA, T. P. *Aplicação do modelo SWAT para simulação de cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Jucu*. 2016. 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufes.br/handle/10/7688>>.

DAS, S. K. *et al.* Impacts of Climate Alteration on the Hydrology of the Yarra River Catchment, Australia Using GCMs and SWAT Model. *Water*, v. 14, n. 3, p. 445, 1 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/14/3/445>>.

EL JEITANY, J.; PACETTI, T.; CAPORALI, E. Evaluating climate change effects on hydrological functionality and water-related ecosystem services. *Ecohydrology*, 20 maio 2023. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eco.2557>>.

FIELD, C. B. *et al.* *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012. v. 9781107025. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781139177245/type/book>>.

FLINT, L. E.; TORREGROSA, A. Evaluating Hydrological Responses to Climate Change. *Water*, v. 12, n. 6, p. 1691, 12 jun. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/12/6/1691>>.

FU, G. *et al.* Decadal Climatic Variability, Trends, and Future Scenarios for the North China Plain. *Journal of Climate*, v. 22, n. 8, p. 2111–2123, 15 abr. 2009. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2008JCLI2605.1>>.

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. *Mass-Movements and Climate Change*. *Treatise Geomorphol.* [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 546–558. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128182345000432>>.

GASSMAN, P. W. *et al.* Initial calibration and validation of the SWAT model for the upper Mississippi river basin. [S.l.: s.n.], 2003. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/267679409\\_Initial\\_calibration\\_and\\_validation\\_of\\_the\\_SWAT\\_model\\_for\\_the\\_upper\\_Mississippi\\_river\\_basin](https://www.researchgate.net/publication/267679409_Initial_calibration_and_validation_of_the_SWAT_model_for_the_upper_Mississippi_river_basin)>.

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. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=23637&CID=t2007&v=50&i=4&T=1>>.

GAUR, S. *et al.* Study of hydrologically critical subbasins under climate change. *Journal of Water and Climate Change*, v. 14, n. 5, p. 1723–1740, 1 maio 2023. Disponível em: <<https://iwaponline.com/jwcc/article/14/5/1723/94687/Study-of-hydrologically-critical-subbasins-under>>.

GFDL. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Disponível em: <<https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/>>.

GOLDENFUM, J. A. *et al.* Implantação de um módulo experimental para análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte. Porto Alegre: [s.n.], 2003. Disponível em: <[https://professor.ufrgs.br/joel-goldenfum/files/pre-dimensionamento\\_hidrologico\\_de\\_pavimentos\\_permeav\\_.pdf](https://professor.ufrgs.br/joel-goldenfum/files/pre-dimensionamento_hidrologico_de_pavimentos_permeav_.pdf)>.

GREEN, C.; VANGRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, n. 4, p. 422–434, abr. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815207001168>>.

GUDMUNDSSON, L. *et al.* Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations – a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 9, p. 3383–3390, 21 set. 2012. Disponível em: <<https://hess.copernicus.org/articles/16/3383/2012/>>.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S. B. *Geomorfologia e Meio Ambiente*. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2000.  
GUO, B. *et al.* Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 81, 9 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-019-57078-3>>.

IENSEN, I. R. R. AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE ESCALA SOBRE PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS EM BACIAS EXPERIMENTAIS UTILIZANDO O MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT). 2018. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2018. Disponível em: <[https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id\\_trabalho=5698189#](https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=5698189#)>.

IPCC. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>>.

IPCC. Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-FrontMatterA_FINAL.pdf)>.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>>.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

LELIS, T. A. *et al.* Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 623–634, abr. 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832012000200031&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832012000200031&lng=pt&tlng=pt)>.

LOPES, N. H. Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. 2008. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91899>>.

LUCAS-BORJA, M. E. *et al.* Impacts of land-use and climate changes on surface runoff in a tropical forest watershed (Brazil). *Hydrological Sciences Journal*, v. 65, n. 11, p. 1956–1973, 17 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2020.1787417>>.

MACHADO, C. J. S. V. Problemas sociais descrição e análise das relações entre gestão de água doce e exercício da cidadania no Brasil contemporâneo. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. Disponível em: <<https://books.scielo.org/id/w5p4j/pdf/minayo-9788575413920-31.pdf>>.

MARTINS, M. S. de M. *et al.* Potential Impacts of Land Use Changes on Water Resources in a Tropical Headwater Catchment. *Water*, v. 13, n. 22, p. 3249, 16 nov. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/13/22/3249>>.

MOREIRA, L. L. Análise de Sensibilidade de Parâmetros e de Desempenho do Modelo Soil And Water Assessment Tools (SWAT) na Estimativa de Vazões Médias em Bacias Hidrográficas. 2017. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, 2017. Disponível em: <[https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UFES\\_4b82a0b3af12c94ae5ce369193dcfa7a](https://oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UFES_4b82a0b3af12c94ae5ce369193dcfa7a)>.

MORIASI, D. *et al.* Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE*, v. 58, n. 6, p. 1763–1785, 30 dez. 2015. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=46548&t=3&dabs=Y&redir=&redirType=>>>.

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. [S.l.: s.n.], 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; WILLIAMS. Soil & Water Assessment Tool - SWAT model. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>>.

O'NEILL, B. C. *et al.* A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, v. 122, n. 3, p. 387–400, 15 fev. 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10584-013-0905-2>>.

OLIVEIRA, L. T. Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES. 2014. Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.

PARDING, K. M. *et al.* GCMeval – An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. *Climate Services*, v. 18, p. 100167, abr. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405880720300194>>.

PEREIRA, D. R. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. 2013. 2013. Disponível em: <[https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/744/1/texto\\_completo.pdf](https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/744/1/texto_completo.pdf)>.

POGGIO, L.; GIMONA, A. Downscaling and correction of regional climate models outputs with a hybrid geostatistical approach. *Spatial Statistics*, v. 14, p. 4–21, nov. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211675315000305>>.

PRASAD, V.; YOUSUF, A.; SANDHU, P. S. Global Climate Change Impacts on Watershed Hydrology. *Clim. Chang. Alleviation Sustain. Progress*. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 33–54. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9781003106982/chapters/10.1201/9781003106982-3>>.

REBOITA, M. S. *et al.* Ciclo de Vida do Sistema de Monção da América do Sul: Clima Presente e Futuro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 1, p. 343–358, 23 mar. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/251766>>.

RIAHI, K. *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, v. 42, p. 153–168, jan. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959378016300681>>.

RIGHETTO, A. M. Hidrologia e recursos hídricos. 1998. 1998. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-27012017-170915/publico/Dissert\\_Righetto\\_GiovanniM\\_corrigido.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-27012017-170915/publico/Dissert_Righetto_GiovanniM_corrigido.pdf)>.

ROSS, E. R.; RANDHIR, T. O. Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. *Science of The Total Environment*, v. 807, p. 151082, fev. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004896972106160X>>.

SARTORI, A. P. Aplicação do modelo SWAT na modelagem do escoamento superficial e perda de solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis em Itabira-MG. 2019. Universidade Federal de Viçosa, 2019.

SCHUSTER, R. C.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon's Basin. *RBRH*, v. 25, 2020. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2318-03312020000100208&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312020000100208&tlng=en)>.

SHRESTHA, A. *et al.* Climatological Drought Forecasting Using Bias Corrected CMIP6 Climate Data: A Case Study for India. *Forecasting*, v. 2, n. 2, p. 59–84, 22 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2571-9394/2/2/4>>.

SHRESTHA, M.; ACHARYA, S. C.; SHRESTHA, P. K. Bias correction of climate models for hydrological modelling – are simple methods still useful? *Meteorological Applications*, v. 24, n. 3, p. 531–539, 21 jul. 2017. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.1655>>.

SHRESTHA, S. *et al.* Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the great Miami river watershed, Ohio, USA. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 12, n. 1, p. 84–95, 2019. Disponível em: <<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/4486>>.

SILVA, L. A. da. Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande -MG. 2009. Universidade Federal de Lavras, 2009. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3432/1/DISSERTAÇÃO\\_Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande - MG.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3432/1/DISSERTAÇÃO_Regime%20de%20escoamento%20e%20recarga%20subterr%C3%A2nea%20de%20nascentes%20na%20regi%C3%A3o%20do%20Alto%20Rio%20Grande%20-%20MG.pdf)>.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. *Hidrol. ciência e Apl.* [S.l: s.n.], 2009. p. 40.

SIMONELLI, M.; FRAGA, C. N. de. Espécies da flora ameaçadas de extinção no estado do Espírito Santo. Vitória, ES: [s.n.], 2007.

SON, N. T. *et al.* Application of SWAT model to assess land use change and climate variability impacts on hydrology of Nam Rom Catchment in Northwestern Vietnam. *Environment, Development and Sustainability*, v. 24, n. 3, p. 3091–3109, 29 mar. 2022. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s10668-021-01295-2>>.

SOPRANI, J. *et al.* Navegando os rios capixabas: Rio Jucu e Rio Santa Maria da Vitória. *A Tribuna*, Espírito Santo, p. 12, [s.d.].

SRINIVASA RAJU, K.; NAGESH KUMAR, D. *Impact of Climate Change on Water Resources*. Singapore: Springer Singapore, 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-6110-3>>. (Springer Climate).

TAN, A. *Impacts of future climate and landuse on water resources in Espírito Santo, Brazil*. 2015. University of Washington, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1773/35154>>.

TOUMA, D. *et al.* A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century. *Journal of Hydrology*, v. 526, p. 196–207, jul. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169414010221>>.

TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. [S.l: s.n.], 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. 1997, p. 135–152 Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/233443>>.

USGS. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Disponível em:

<<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>>.

VIOLA, M. R. Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG. 2008. UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS, 2008. Disponível em: <[http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3452/1/DISSERTAÇÃO\\_Simulação\\_hidrológica\\_na\\_região\\_Alto\\_Rio\\_Grande\\_a\\_montante\\_do\\_Reservatório\\_de\\_Camargos\\_CEMIG.pdf](http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/3452/1/DISSERTAÇÃO_Simulação_hidrológica_na_região_Alto_Rio_Grande_a_montante_do_Reservatório_de_Camargos_CEMIG.pdf)>.

VIOLA, Marcelo Ribeiro *et al.* Distribuição e potencial erosivo das chuvas no Estado do Tocantins. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 49, n. 2, p. 125–135, fev. 2014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2014000200125&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2014000200125&lng=pt&tlng=pt)>.

WCRP. CMIP Phase 6 (CMIP6). 2023. Disponível em: <<https://wcrp-cmip.org/cmip-phase-6-cmip6/>>.

WU, Y.; CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang River basin in South China using SWAT. Frontiers of Earth Science in China, v. 3, n. 3, p. 273–278, 21 set. 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11707-009-0032-6>>.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 8 maio 2016. Disponível em: <<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.4518>>.

ZHAO, P. *et al.* Impacts of climate change on hydrological droughts at basin scale: A case study of the Weihe River Basin, China. Quaternary International, v. 513, p. 37–46, abr. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S104061821831053X>>.

## APÊNDICE A

**A1** - Parâmetros físicos e químicos do solo para cada tipo específico de solo

<b>Parâmetros</b>	<b>CX</b>	<b>NV</b>	<b>RL</b>	<b>PVA</b>	<b>PV</b>	<b>LA</b>	<b>RY</b>	<b>EK</b>	<b>PA</b>
NLAYERS	3	2	2	9	9	8	8	5	9
HYDGRP	C	C	B	B	B	B	C	C	B
SOL_ZMX (mm)	2630	180	320	1800	1800	1910	1470	780	1800
ANION_EXC	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
SOL_CRK	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
TEXTURE	C	SLC	S	LS	LS	SCL	S	S	LS
SOL_Z1 (mm)	260	30	105	100	100	60	60	100	100
SOL_BD1 (g/cm <sup>3</sup> )	1,4	1,3	1,34	1,5	1,5	1,14	1,11	1,16	1,5
SOL_AWC1 (mm)	0,111	0,2311	0,08	0,5	0,5	0,18	0,5	0,1434	0,5
SOL_K1 (mm/hr)	1,20162	1,3	9,33	58,2643	58,2643	7,929	141,32	15,049	58,26
SOL_CBN1 (%)	3,22	0,4	2,07	0,58	0,58	1,09	0,81	8,8	0,58
CLAY1 (%)	45	65	18	10	10	27	3	32	10
SILT1 (%)	18	32	22	7	7	7	3	25	7
SAND1 (%)	37	3	60	83	83	66	94	43	83
ROCK1 (%)	2	1	1	8	8	1	2	-	8
SOL_ALB1 (%)	0,0654	0,15	0,2	0,4026	0,4026	0,283	0,3436	0,0014	0,403
USLE_K1	0,1031	0,1225	-	0,1019	0,1019	0,109	0,0695	0,1172	0,102
SOL_EC1	1	1	1	1	1	1	1	-	1
SOL_Z2 (mm)	1630	180	320	220	220	250	130	250	220
SOL_BD2 (g/cm <sup>3</sup> )	1,37	1,3	1,4	1,5	1,5	1,1	1,6	1,3	1,5
SOL_AWC2 (mm)	0,123	0,1393	0,08	0,151	0,151	0,25	0,5	0,1003	0,151
SOL_K2 (mm/hr)	0,12537	1,3	7,53	48,7518	48,7518	4,484	118,79	6,3177	48,75

<b>Parâmetros</b>	<b>CX</b>	<b>NV</b>	<b>RL</b>	<b>PVA</b>	<b>PV</b>	<b>LA</b>	<b>RY</b>	<b>EK</b>	<b>PA</b>
SOL_CBN2 (%)	0,92	0,4	1,67	0,3	0,3	0,91	1,72	1,81	0,3
CLAY2 (%)	57	76	18,5	12	12	31	4	29	12
SILT2 (%)	11	31	20,7	4	4	5	6	13	4
SAND2 (%)	32	3	60,8	84	84	64	90	58	84
ROCK2 (%)	2	1	1	9	9	1	1	2	9
SOL_ALB2 (%)	0,3186	0,1	0,2	0,4881	0,4881	0,321	0,1837	0,1727	0,488
USLE_K2	0,1086	0,1225	0	0,0851	0,0851	0,102	0,0671	0,1085	0,085
SOL_EC2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z3 (mm)	2630	-	-	310	310	410	270	400	310
SOL_BD3 (g/cm³)	1,58	-	-	1,6463	1,6463	1,03	1,5084	1,5112	1,646
SOL_AWC3 (mm)	0,1037	-	-	0,046	0,046	0,25	0,5	0,0577	0,046
SOL_K3 (mm/hr)	12,735	-	-	71,5437	71,5437	4,311	142,43	63,201	71,54
SOL_CBN3 (%)	0,92	-	-	0,22	0,22	0,61	0,68	2,01	0,22
CLAY3 (%)	21	-	-	8	8	31	3	10	8
SILT3 (%)	24	-	-	7	7	7	3	7	7
SAND3 (%)	55	-	-	85	85	62	94	83	85
ROCK3 (%)	2	-	-	10	10	1	1	2	10
SOL_ALB3 (%)	0,3186	-	-	0,5157	0,5157	0,394	0,3758	0,1505	0,516
USLE_K3	0,1548	-	-	0,0982	0,09282	0,117	0,0706	0,0792	0,098
SOL_EC3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z4 (mm)	-	-	-	450	450	720	620	590	450
SOL_BD4 (g/cm³)	-	-	-	1,6586	1,6586	1,15	1,5663	1,5454	1,659
SOL_AWC4 (mm)	-	-	-	0,0469	0,0469	0,24	0,5	0,042	0,047
SOL_K4 (mm/hr)	-	-	-	63,614	63,614	3,658	198,44	96,52	63,61
SOL_CBN4 (%)	-	-	-	0,12	0,12	0,37	0,14	0,88	0,12
CLAY4 (%)	-	-	-	9	9	32	2	6	9
SILT4 (%)	-	-	-	7	7	6	4	4	7

<b>Parâmetros</b>	<b>CX</b>	<b>NV</b>	<b>RL</b>	<b>PVA</b>	<b>PV</b>	<b>LA</b>	<b>RY</b>	<b>EK</b>	<b>PA</b>
SAND4 (%)	-	-	-	84	84	62	94	90	84
ROCK4 (%)	-	-	-	10	10	-	7	3	10
SOL_ALB4 (%)	-	-	-	0,5524	0,5524	0,465	0,5449	0,3275	0,554
USLE_K4	-	-	-	0,1009	0,1009	0,113	0,0791	0,0717	0,101
SOL_EC4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z5 (mm)	-	-	-	580	580	1110	900	780	580
SOL_BD5 (g/cm³)	-	-	-	1,6613	1,6613	1,597	1,5394	1,64	1,661
SOL_AWC5 (mm)	-	-	-	0,0737	0,0737	0,091	0,5	0,1146	0,074
SOL_K5 (mm/hr)	-	-	-	12,336	12,336	4,228	853,02	0,2762	12,34
SOL_CBN5 (%)	-	-	-	0,33	0,33	0,41	0,14	0,64	0,33
CLAY5 (%)	-	-	-	23	23	31	1	47	23
SILT5 (%)	-	-	-	8	8	7	2	6	8
SAND5 (%)	-	-	-	69	69	62	97	47	69
ROCK5 (%)	-	-	-	7	7	1	6	1	7
SOL_ALB5 (%)	-	-	-	0,4781	0,4781	0,453	0,5449	0,3863	0,478
USLE_K5	-	-	-	0,127	0,127	0,118	0,079	0,1016	0,127
SOL_EC5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z6 (mm)	-	-	-	740	740	1420	1200	-	740
SOL_BD6 (g/cm³)	-	-	-	1,6693	1,6693	1,575	1,571	-	1,669
SOL_AWC6 (mm)	-	-	-	0,0893	0,0893	0,097	0,5	-	0,089
SOL_K6 (mm/hr)	-	-	-	2,6554	2,6554	2,319	197,32	-	2,655
SOL_CBN6 (%)	-	-	-	0,33	0,33	0,5	0,11	-	0,33
CLAY6 (%)	-	-	-	34	34	35	2	-	34
SILT6 (%)	-	-	-	8	8	6	5	-	8
SAND6 (%)	-	-	-	58	58	59	93	-	58
ROCK6 (%)	-	-	-	16	16	1	7	-	16
SOL_ALB6 (%)	-	-	-	0,4781	0,4781	0,425	0,556	-	0,478

<b>Parâmetros</b>	<b>CX</b>	<b>NV</b>	<b>RL</b>	<b>PVA</b>	<b>PV</b>	<b>LA</b>	<b>RY</b>	<b>EK</b>	<b>PA</b>
USLE_K6	-	-	-	0,1204	0,1204	0,11	0,082	-	0,120
SOL_EC6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z7 (mm)	-	-	-	1050	1050	1760	1350	-	1050
SOL_BD7 (g/cm³)	-	-	-	1,5606	1,5606	1,565	1,604	-	1,561
SOL_AWC7 (mm)	-	-	-	1,5605	1,5605	0,101	0,5	-	1,561
SOL_K7 (mm/hr)	-	-	-	0,7044	0,7044	1,638	109,57	-	0,704
SOL_CBN7 (%)	-	-	-	0,32	0,32	0,25	0,14	-	0,32
CLAY7 (%)	-	-	-	42	42	37	4	-	42
SILT7 (%)	-	-	-	7	7	7	11	-	7
SAND7 (%)	-	-	-	51	51	56	85	-	51
ROCK7 (%)	-	-	-	7	7	1	6	-	7
SOL_ALB7 (%)	-	-	-	0,4814	0,4814	0,505	0,5449	-	0,481
USLE_K7	-	-	-	0,1108	0,1108	0,114	0,113	-	0,111
SOL_EC7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z8 (mm)	-	-	-	1400	1400	1910	1470	-	1400
SOL_BD8 (g/cm³)	-	-	-	1,3952	1,3952	1,555	1,6178	-	1,395
SOL_AWC8 (mm)	-	-	-	0,12	0,12	0,103	0,5	-	0,12
SOL_K8 (mm/hr)	-	-	-	0,0291	0,0291	1,403	41,497	-	0,029
SOL_CBN8 (%)	-	-	-	0,27	0,27	0,35	0,73	-	0,27
CLAY8 (%)	-	-	-	57	57	38	13	-	57
SILT8 (%)	-	-	-	4	4	7	8	-	4
SAND8 (%)	-	-	-	39	39	55	79	-	39
ROCK8 (%)	-	-	-	4	4	1	5	-	4
SOL_ALB8 (%)	-	-	-	0,4982	0,4982	0,472	0,363	-	0,498
USLE_K8	-	-	-	0,088	0,088	0,113	0,114	-	0,088
SOL_EC8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SOL_Z9 (mm)	-	-	-	1800	1800	-	-	-	1800

