

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL MULTICAMPI
APUCARANA E LONDRINA**

JULIO CESAR ANGELO BORGES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO PIQUIRI NO ESTADO DO
PARANÁ**

LONDRINA

2023

JULIO CESAR ANGELO BORGES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO PIQUIRI NO ESTADO DO
PARANÁ**

**HYDROLOGICAL MODELING IN THE PIQUIRI RIVER BASIN IN THE STATE OF
PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, multicampi Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Monitoramento Ambiental

Orientadora: Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira

Coorientadora: Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina



JULIO CESAR ANGELO BORGES

MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO PIQUIRI NO ESTADO DO PARANÁ

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 22 de Setembro de 2023

Dra. Edilaine Regina Pereira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Danielle De Almeida Bressiani, Doutorado - Universidade Federal de Pelotas (Ufpel)

Dr. Jorge Alberto Martins, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/09/2023.

Dedico este trabalho a todos que se fizeram
presentes ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

Neste momento de realização e conclusão da minha dissertação de mestrado, é com profunda gratidão que expresso meus sinceros agradecimentos às pessoas e instituições que contribuíram de maneira significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, Professora Dra. Edilaine Regina Pereira. Durante os últimos sete anos, desde a minha iniciação científica até o mestrado, sua orientação foi fundamental para meu crescimento acadêmico. Suas orientações, incentivo constante, amizade, dedicação e compromisso com meu desenvolvimento científico deixaram uma marca indelével em minha formação.

À Professora Dra. Lígia Flávia Antunes Batista, minha orientadora de TCC e coorientadora neste mestrado, expresso minha profunda gratidão. Foi sob sua orientação que fui introduzido ao vasto mundo das geociências. Sua paixão pelo conhecimento e sua abordagem orientadora moldaram minha perspectiva e me inspiraram a explorar novos horizontes. Agradeço por sua presença constante e por compartilhar seu conhecimento de maneira generosa.

Aos meus amigos: Janaína, desde os tempos da graduação, merece meus sinceros agradecimentos. Nossas conversas sobre vida pessoal, estudos e aspirações acadêmicas foram uma fonte constante de inspiração e apoio mútuo. Sua amizade e troca de ideias foram inestimáveis; Augusto, pela amizade de muitos anos, discussões sobre tecnologia, pela ajuda com programação e insights que me permitiram resolver problemas dos softwares que trabalhei.

Ao Matheus, meu companheiro há oito anos, dedico um agradecimento especial. Sua paciência, incentivo e compreensão ao longo desta jornada foram um pilar essencial. Sua presença constante, apoio incondicional e crença em mim foram fundamentais para superar os desafios que surgiram 🐾 🐾 .

Por fim, expresso minha gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Processo Número 88887.688354/2022-00) pela oferta da bolsa de mestrado. Este apoio financeiro permitiu-me dedicar tempo e recursos à pesquisa, ampliando minhas possibilidades de desenvolvimento acadêmico e profissional.

RESUMO

Devido ao cenário recorrente de estiagens que têm acometido a região centro-sul do Brasil nos últimos 10 anos e a crescente demanda por recursos hídricos, o uso de ferramentas de modelagem ambiental por meio de softwares de predição passa a ganhar destaque, entre elas o SWAT+ (*Soil and Water Assessment Tool*). Este trabalho objetivou obter um modelo espaço-temporal capaz de simular a vazão da bacia do Rio Piquiri, localizada na região centro-oeste do Estado do Paraná. Desse modo, a caracterização da área de estudo se fez necessária, abrangendo dados físicos como topografia, pedologia, uso e ocupação do solo, além de dados climatológicos de precipitação, ventos, umidade, temperatura e radiação solar. Este estudo foi segmentado em 3 etapas: 1^a- obtenção e preparação dos dados de entrada para uso do software; 2^a- pré-processamento para delimitar a bacia e as unidades de respostas hidrológicas; e 3^a- processamento realizando a calibração, validação e simulação da vazão mensal. Para a construção do banco de dados necessários ao desenvolvimento do modelo SWAT+ foram utilizados dados de solos existentes no SiBCS da EMBRAPA, os dados climatológicos foram extraídos do sistema do IDR-Paraná e do CFSR fornecidos pelo próprio SWAT+. Na elaboração do modelo foram geradas 1622 sub-bacias e 10828 unidades de resposta hidrológicas em uma área de 20.925,34 km². Dentre todas as estações fluviométricas existentes na área de estudo, a estação Balsa Santa Rita foi escolhida como exultório da bacia e como ponto de controle para a calibração e validação dos dados. Como forma de identificar os parâmetros mais sensíveis bem como os limites mais adequados para calibrar o modelo, foram feitas 10 diferentes tentativas de calibração tendo o melhor resultado de calibração para o período entre 2003 e 2006 com índice Nash-Sutcliffe 0,441. Após a obtenção dos limites mais adequados para maximizar a eficiência do modelo chegou-se a um modelo calibrado para vazão mensal da bacia do rio Piquiri que atingiu índice de eficiência de Nash-Sutcliffe equivalente a 0,55, sendo considerado satisfatório, porém o modelo superestimou em cerca de 38% a vazão média conforme indicou o índice PBIAS. Foram identificados como parâmetros mais sensíveis K, AWC, CHK, CHN e MSK_CO2 e como principal causa para a baixa eficiência do modelo pode-se indicar a pouca existência de dados climáticos sem falhas e com longas séries para a região avaliada para todas as variáveis exigidas pelo SWAT+ bem como séries de dados como evapotranspiração e sedimentos que pudessem ser comparados aos dados gerados, a fim de servir como parâmetros calibradores.

Palavras-chave: swat; modelo hidrológico; dados climáticos; vazão hidrológica.

ABSTRACT

Due to the recurring scenario of droughts that have affected the central-southern region of Brazil in the last 10 years and the increasing demand for water resources, the use of environmental modeling tools through prediction software gains prominence, including SWAT+ (Soil and Water Assessment Tool). This study aimed to obtain a spatiotemporal model capable of simulating the streamflow of the Piquiri River basin, located in the central-western region of the State of Paraná. Thus, the characterization of the study area was necessary, encompassing physical data such as topography, soil, land use and land cover, as well as climatological data of precipitation, wind, humidity, temperature, and solar radiation. This study was divided into 3 stages: 1st - obtaining and preparing input data for software use; 2nd - preprocessing to delimit the basin and hydrological response units; and 3rd - processing involving calibration, validation, and simulation of monthly streamflow. For the construction of the database necessary for the development of the SWAT+ model, soil data from SiBCS of EMBRAPA were used, climatological data were extracted from the IDR-Paraná system and CFSR provided by SWAT+ itself. In the model development, 1622 sub-basins and 10828 hydrological response units were generated in an area of 20,925.34 km². Among all existing streamflow stations in the study area, the Balsa Santa Rita station was chosen as the watershed outlet and as a control point for calibration and validation. To identify the most sensitive parameters as well as the most suitable limits for model calibration, 10 different calibration attempts were made, with the best calibration result for the period between 2003 and 2006 with a Nash-Sutcliffe index of 0.441. After obtaining the most suitable limits to maximize the model's efficiency, a calibrated model for the monthly streamflow of the Piquiri River basin was achieved, reaching a Nash-Sutcliffe efficiency index equivalent to 0.55, considered satisfactory. However, the model overestimated the average streamflow by about 38% as indicated by the PBIAS index. Parameters K, AWC, CHK, CHN, and MSK_CO2 were identified as the most sensitive, and the main cause for the low model efficiency can be attributed to the limited availability of error-free climatic data with long series for the evaluated region for all variables required by SWAT+, as well as data series like evapotranspiration and sediment that could be compared to generated data to serve as calibration parameters.

Keywords: swat; hydrological model; climate data; hydrological flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ciclo natural da água	17
Figura 2 - Vista de uma bacia hidrográfica e seus principais componentes	20
Figura 3 - Esquema das relações entre águas superficiais e subterrâneas	21
Figura 4 - Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN	27
Figura 5 - Carta de localização da BH Piquiri	33
Figura 6 - Carta classes climáticas da BH Piquiri segundo Köppen-Geiger.....	34
Figura 7 - Precipitação média anual	36
Figura 8 - Carta de classes de solos da BH Piquiri	37
Figura 9 - Compartimentos geológicos do Paraná.....	38
Figura 10 - a) Perfil estratigráfico do território paranaense direção NW. (Escala vertical exagerada para realçar as estruturas). Pr: Primeiro; PI: Planalto; Par.: Paranaense; S.M.: Serra do Mar; P.C.: Planície Costeira; b) Classes geológicas paranaense	39
Figura 11 - Carta das unidades geológicas que compõem a BH Piquiri	40
Figura 12 - Unidades aquíferas presentes na BH Piquiri	41
Figura 13 - Seção geológica esquemática com as superfícies dos aquíferos Caiuá e Serra Geral	41
Figura 14 - Formação geológica ao longo do transecto EF e direção do fluxo nos aquíferos.....	42
Figura 15 - Carta da fitogeografia da BH Piquiri.....	43
Figura 16 - Carta da rede de drenagem e hipsometria da BH Piquiri	44
Figura 17 - Perfil topográfico da calha do rio Piquiri	45
Figura 18 - Variação das áreas ocupadas pelas classes de uso e ocupação do solo na BH Piquiri entre 1985 e 2015.....	46
Figura 19 - Carta de uso e ocupação do solo entre os anos 1985 e 2015	47
Figura 20 - Fluxograma de processos para elaboração do modelo SWAT	48
Figura 21 – Localização das Estações Climáticas na Bacia do Rio Piquiri - PR55	
Figura 22 – Precipitação anual das estações entre 2000 e 2011.....	56

Figura 23 – Radiação solar média dos pontos de amostragem CFSR	57
Figura 24 - Delimitação da BH Piquiri para modelagem e suas respectivas estações fluviométricas.....	60
Figura 25 – Classes de declividade da BH Piquiri.....	61
Figura 26 – Classes de solos predominantes na bacia hidrográfica do rio Piquiri	63
Figura 27 – Vazão média anual da estação Balsa Santa Maria	64
Figura 28 – Curva de permanência logarítmica da vazão na estação Balsa Santa Maria.....	65
Figura 29 – Balanço hídrico simulado pelo SWAT+ para a bacia do rio Piquiri – PR.....	66
Figura 30 – CN estimado (a) para a bacia do rio Piquiri e histograma (b).....	67
Figura 31 – Comportamento anual da evapotranspiração potencial da bacia do rio Piquiri simulado pelo SWAT+.....	68
Figura 32 – Evapotranspiração potencial estimada pelo SWAT+ vs. MODIS	69
Figura 33 – Vazão observada e simulada pelo SWAT+.....	70
Figura 34 – Hidrograma das precipitações e vazões mensais acumuladas: observações simulações.....	71
Figura 35 – Parâmetros mais sensíveis testados e seus respectivos níveis de sensibilidade pelo teste t.....	72
Figura 36 – Comparação entre as vazões acumuladas observadas e simuladas, com limites de incerteza de previsão de 95%.....	75
Figura 37 – Comparação das vazões acumuladas observadas e simuladas com limites de incerteza de previsão de 95% para os períodos de calibração (2003 - 2006) e validação (2007 - 2011)	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações gerais de desempenho para estatísticas recomendadas para uma etapa de tempo mensal.....	51
Tabela 2 – Descrição dos parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT+	52
Tabela 3 – Tabulação dos dados climáticos de entrada do SWAT para estação Campo Mourão	58
Tabela 4 – Estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri.....	59
Tabela 5 – Classes de declividade e área que ocupam na bacia hidrográfica do Rio Piquiri - PR	60
Tabela 6 – Usos e ocupações do solo e sua porção na BH Piquiri relacionadas as classes do SWAT+.....	62
Tabela 7 – Classes de solos existentes na área modelada da bacia hidrográfica do Rio Piquiri e seus grupos hidrológicas.....	62
Tabela 8 – Índice NSE calculado anualmente e para o período de calibração ..	70
Tabela 9 – Variação das faixas de valores para os parâmetros utilizados na calibração e o método de substituição	73
Tabela 10 – NSE anual e global após a calibração.....	74
Tabela 11 – NSE anual e global após a calibração e validação.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA_BF	Coeficiente de recessão do escoamento de base
CANMAX	Água interceptada (mm)
CH_K1	Condutividade efetiva dos canais tributários (mm h^{-1})
CH_K2	Condutividade efetiva do canal (mm h^{-1})
CH_N1	Coeficiente de Manning para os canais tributários
CH_N2	Coeficiente de Manning para o canal principal
CN2	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II
CRM	Coeficiente de massa residual
EPCO	Fator de compensação de água pelas plantas
ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)
GW_QMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão de água à zona de saturação
LATTIME	Escoamento lateral (dias)
NSE	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
RCHRG_DP	Coeficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)
REVAPMN	Limite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar
RSR	Taxa de desvio padrão das observações
SLSUBBSN	Comprimento médio do declive (m)
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo ($\text{mmH}_2\text{O mmSolo}^{-1}$)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo
SOL_Z	Profundidade do Solo (em mm)
SURLAG	Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto
SWAT	Soil And Water Assessment Tool
SWAT CUP	Soil And Water Assessment Tool Calibration Uncertainty Program

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Ciclo hidrológico	17
2.1.1	Etapas do ciclo hidrológico.....	17
<u>2.1.1.1</u>	<u>Evapotranspiração.....</u>	<u>18</u>
<u>2.1.1.2</u>	<u>Precipitação.....</u>	<u>18</u>
<u>2.1.1.3</u>	<u>Interceptação e escoamento</u>	<u>19</u>
<u>2.1.1.4</u>	<u>Infiltração e armazenamento no solo.....</u>	<u>19</u>
2.2	Bacias hidrográficas	20
2.3	Modelagem hidrológica	22
2.3.1	Modelos.....	22
2.3.2	Modelo SWAT	23
2.3.3	Aplicações do Modelo SWAT	30
2.4	R-SWAT	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1	Área de estudo.....	33
3.1.1	Caracterização física	34
<u>3.1.1.1</u>	<u>Clima</u>	<u>34</u>
<u>3.1.1.2</u>	<u>Pedologia</u>	<u>36</u>
<u>3.1.1.3</u>	<u>Litologia e aquíferos</u>	<u>38</u>
<u>3.1.1.4</u>	<u>Biomias originais</u>	<u>43</u>
3.1.2	Hidrologia e hipsometria	44
3.1.3	Uso e ocupação do solo	45
3.2	Fases da modelagem	48
3.2.1	Preparação dos dados	48
<u>3.2.1.1</u>	<u>Variáveis físicas.....</u>	<u>49</u>
<u>3.2.1.2</u>	<u>Variáveis climáticas</u>	<u>49</u>
3.2.2	Pré-processamento	50
3.2.3	Processamento.....	50
4	RESULTADOS.....	54

4.1	Caracterização dos dados climáticos.....	54
4.2	Caracterização da área modelada e obtenção das URH's	59
4.3	Hidrologia da bacia	64
4.4	Análise da simulação do ciclo hidrológico	66
4.5	Simulação inicial	70
4.6	Análise de sensibilidade, calibração e validação	72
4.7	Resultados da calibração e validação	74
4.8	Aplicação do SWAT como ferramenta de gestão	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
	REFERÊNCIAS.....	81
	APÊNDICE A - Série histórica das variáveis climáticas utilizadas na obtenção do modelo <i>SWAT</i>	95
	APÊNDICE B - Tabulação dos dados climáticos de entrada do SWAT	101
	APÊNDICE C - Testes de calibração, parâmetros testados, número de interações e análise de sensibilidade.....	104
	ANEXO A - Dados pedológicos extraídos do SiBCS - EMBRAPA ..	108

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso vital para a sobrevivência humana. A sua falta pode causar diversos transtornos e gerar uma série de problemas. Entre eles, podemos citar a redução da produção agrícola e industrial, a diminuição da geração de energia, problemas com a dessedentação de animais e a redução do abastecimento público. Além disso, a escassez de água pode levar a guerras e conflitos armados entre países, bem como causar problemas de saúde na população (AUGUSTO *et al.*, 2012; MERTEN; MINELLA, 2002; MILNE, 2021; PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000; REBOUÇAS, 1997). Contudo, nos últimos 10 anos, as estiagens prolongadas têm se espalhado e afetado todas as regiões do Brasil, atingindo proporções raramente vistas (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016; EMBRAPA, 2022).

Segundo o relatório da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), o total de água retirada das bacias hidrográficas chegou a $2.134 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2022. Desse volume total, foram direcionados 1,5% para abastecimento rural, 1,4% para mineração, 4,3% para termelétricas, 7,6% para dessedentação animal, 8,8% para indústria, 22,6% para abastecimento urbano e 53,7% para irrigação. Esse valor corresponde a uma extração anual da ordem de aproximadamente 67,2 trilhões de litros de água. Estima-se que este valor deva crescer cerca de 24% até 2030, conforme estudo elaborado pela ANA (2019).

O crescimento demográfico, associado ao aumento do consumo de água, pode acelerar a falta deste recurso. No Brasil, essa escassez não se dá unicamente pela estiagem, mas também pela falta de planejamento e gestão (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2022; CÔRTEZ *et al.*, 2015). Compreender os processos existentes nas bacias hidrográficas, bem como os impactos gerados pela ação humana, são elementos necessários para orientar a tomada de decisão de gestores (JACOBI; EMPINOTTI; SCHMIDT, 2016; SORIANO *et al.*, 2016; TUNDISI, 2008).

O crescimento urbano desordenado, que avança sobre áreas vegetadas e as substitui por áreas impermeabilizadas, está entre os principais responsáveis pela alteração da dinâmica hidrológica da bacia. Isso causa alagamentos, reduz a infiltração e a recarga dos lençóis freáticos, afetando negativamente o fluxo de base dos rios, além de transportar poluentes e sedimentos para os corpos hídricos (BENINI; MENDIONDO, 2015).

A substituição da vegetação ainda causa aumento de temperatura e formação de ilhas de calor. Isso afeta diretamente a intensidade das precipitações, desencadeando alguns dos problemas supracitados (ANGELO BORGES; ANTUNES BATISTA, 2020; SERRETI; MARTINS; ALVES, 2015).

Há ainda a supressão vegetal na zona rural, onde ocorre a implementação de sistemas agrícolas que fazem uso intensivo de produtos químicos como fertilizantes e defensivos agrícolas, que também são carregados para os mananciais (SANTOS, 2005; SORIANO *et al.*, 2016; VANZELA; HERNANDEZ; FRANCO, 2010). A grande presença de compostos químicos como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), além de micronutrientes componentes de defensivos agrícolas, afetam negativamente a qualidade da água, alterando as relações tróficas nos ambientes aquáticos. O desequilíbrio da oferta de Nitrogênio ou Fósforo favorece o crescimento anômalo das populações de algas e outras plantas aquáticas, levando a eutrofização dos corpos hídricos e à consequente mortandade de peixes e outros organismos (RESENDE, 2002; SHAUGHNESSY *et al.*, 2019; SILVA, 2019; TIECHER *et al.*, 2017; WHITTON; KELLY, 1998).

A implementação inadequada de técnicas de contenção do escoamento superficial e da remoção de vegetação ciliar, associada com o uso intensivo de fertilizantes, favorece sobremaneira a eutrofização dos corpos hídricos, aumentando os impactos ambientais e sociais (KLEIN; AGNE, 2013; RESENDE, 2002; ROCHA; LOUGON; GARCIA, 2009; TUNDISI, 2006). Essas alterações no uso e cobertura do solo geram impactos na hidrologia da bacia que afetam diretamente o escoamento superficial, o transporte de sedimentos, a vazão máxima de cheias, fluxo de base e a recarga de aquíferos (BALBINOT *et al.*, 2008; PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013).

Devido à expansão das atividades humanas sobre a superfície das bacias hidrográficas e das mudanças climáticas se faz importante a aplicação de sistemas de modelagem. A utilização de modelos hidrológicos tem por finalidade fornecer informações aos gestores públicos e consequentemente auxiliar na tomada de decisões que podem maximizar o desenvolvimento dessas regiões e minimizar os impactos das ações humanas sobre a disponibilidade e qualidade da água para evitar danos ambientais, desabastecimento e conflitos (BOLDRIN *et al.*, 2022; LUZ; GALVÍNCIO, 2022; MARQUES; RODRIGUEZ, 2019).

Tendo em vista os períodos de seca que têm ocorrido em todo o Centro-sul do país desde 2014, a elaboração de modelos hidrológicos visa simular previsões do comportamento da bacia, inclusive com a possibilidade de simulação em diferentes situações de uso e ocupação do solo, de modo que possam fornecer informações como base na hora da tomada de decisões acerca de investimentos e regras de manejo e gestão dos recursos hídricos da bacia (SORIANO *et al.*, 2016).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Calibrar e validar o modelo hidrológico, *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT, para descrever o comportamento do balanço hídrico na bacia hidrográfica do Rio Piquiri no Estado do Paraná.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Caracterizar a Bacia do Rio Piquiri com relação aos dados geográficos das características físicas, incluindo o uso do solo, a topografia e a pedologia, bem como os dados climáticos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pluviosidade, radiação solar e velocidade do vento no período de 2000 a 2011;
- ✓ Determinar os parâmetros mais sensíveis para os resultados de vazão simulada para a bacia hidrográfica;
- ✓ Calibrar o modelo utilizando dados de 2000 a 2006, a fim de ajustar os parâmetros que mais influenciam nos resultados de vazão;
- ✓ Validar os resultados da simulação da vazão com dados do período de 2007 a 2011.

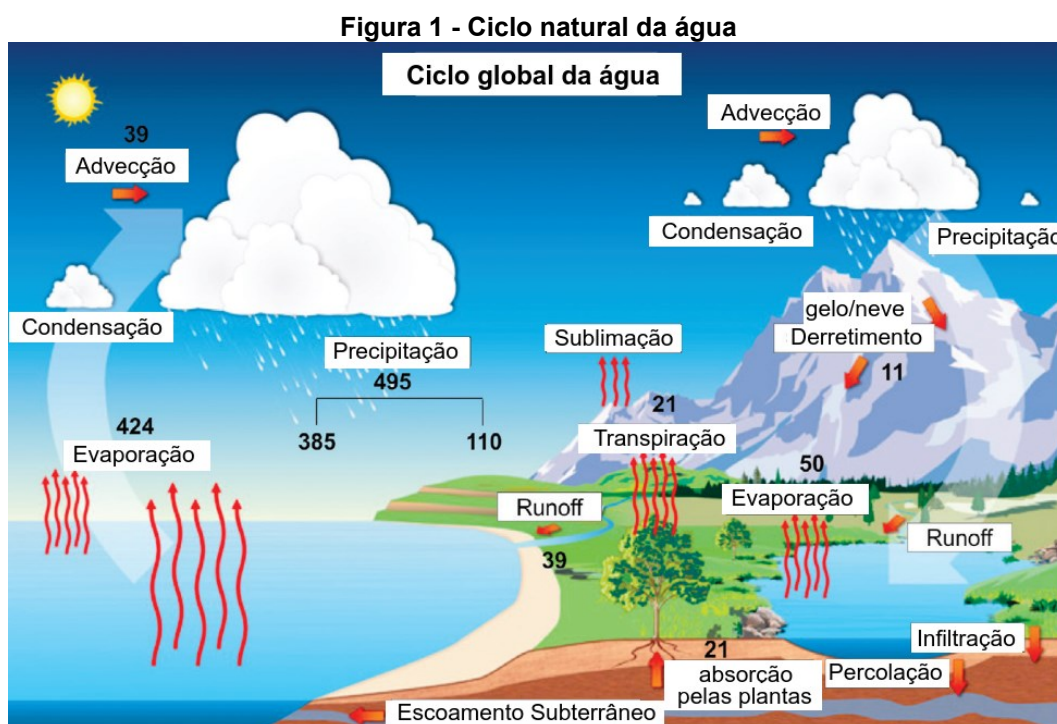
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera formado pela sucessão de diversos processos que se originam da absorção da energia solar pelas superfícies e da ação da gravidade e da rotação terrestre (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; COLLISCHONN; TASSI, 2008; LORANDI; CANÇADO, 2002; SILVEIRA, 2001).

2.1.1 Etapas do ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é composto por diversos subprocessos em escala local que compõem parte fundamental da bacia hidrográfica, conforme demonstrado pela Figura 1 (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; SILVEIRA, 2001).



A movimentação da água parte da influência da radiação solar, que ao incidir sobre as superfícies aquece-as aumentando sua energia e facilitando seu movimento (SILVEIRA, 2001). Esse movimento tem basicamente duas direções, superfície-atmosfera, com a evaporação das águas nos oceanos, rios e lagos e a

evapotranspiração das plantas e animais, e, atmosfera-superfície, com a precipitação em diferentes formas (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

2.1.1.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração é formada por dois grandes processos: a evaporação e a transpiração (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

A evaporação ocorre quando a água nos rios, lagos e oceanos absorve a radiação solar e se aquece e se transforma em vapor de água indo para a atmosfera, quando em excesso e em certas condições esse vapor condensa e forma gotículas precipitando em forma de chuva, granizo ou neve (OKI; KANAE, 2006).

A transpiração por sua vez ocorre quando as plantas retiram a água do solo durante seus processos fisiológicos e ao chegarem à superfície das folhas e caules a água se desprende em forma de vapor para a atmosfera (MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

Ocorre ainda a sublimação, neste caso, nas superfícies cobertas de gelo e/ou neve pode ocorrer a passagem direta da água em estado sólido para vapor (WATER SCIENCE SCHOOL, 2019). A presença de vapor d'água na atmosfera em certas condições meteorológicas dá origem a precipitação.

2.1.1.2 Precipitação

A precipitação é o caminho inverso realizado pela água no ciclo hidrológico, ou seja, uma vez na atmosfera, o vapor se concentra e, em determinadas condições, esse vapor condensa e forma gotículas. Essas gotículas dão origem às nuvens, que, ao serem atingidas por massas de ar, podem dar origem à chuva, granizo e neve (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; COLLISCHONN; TASSI, 2008; MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA, 2010).

Quando essas diferentes formas de precipitação, chega à superfície dá origem aos processos fundamentais para a bacia hidrográfica, como escoamento e infiltração (BROOKS; FFOLIOTT; MAGNER, 2012).

2.1.1.3 Interceptação e escoamento

A interceptação é a retenção de parte da precipitação pela cobertura florestal ou pelas estruturas antrópicas, ocorrendo um fracionamento da água que posteriormente sofre a evaporação (ARCOVA; CICCIO; ROCHA, 2003). A interceptação causa, mesmo em pequena escala, uma distribuição da energia e da água na superfície.

A interceptação causada pela presença de florestas é capaz de reduzir o volume final de vazão nas bacias hidrográficas, devido à evapotranspiração, sendo maior nos períodos secos que nos chuvosos (TRIMBLE, WEIRICH, HOAG, 1987).

A precipitação que escapa da interceptação chega ao solo, podendo infiltrar ou escoar na superfície. O escoamento pode ser superficial ou subsuperficial conforme as capacidades hidráulicas, a umidade já existente e as diferentes coberturas existentes sobre o solo (BALBINOT *et al.*, 2008; TUCCI; CLARKE, 1997).

Pritchett (1987) afirma que solos com florestas possuem baixa taxa de escoamento superficial. Assim, essa etapa do ciclo hidrológico é especialmente sensível em áreas onde o manejo do solo não está adequado, causando danos não só à qualidade do solo como também à produção de sedimentos (PERAZZOLI; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013).

2.1.1.4 Infiltração e armazenamento no solo

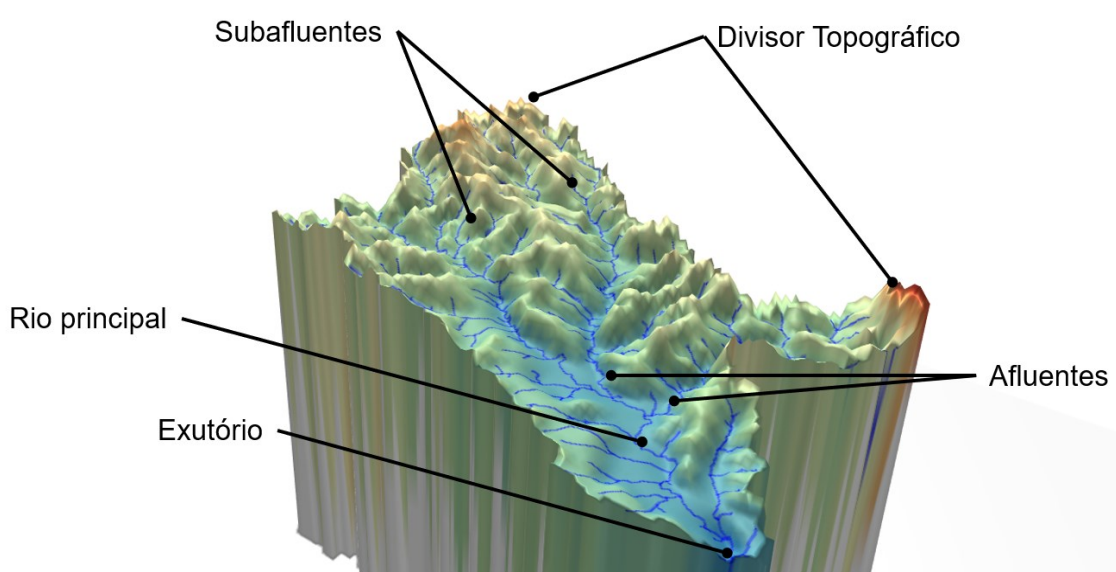
A parcela da precipitação que não escoou pela superfície do solo infiltra ou percola. A infiltração é a passagem da água superficial para o interior do solo. Esse movimento depende das características do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar presentes ali (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2001).

Após infiltrar nas camadas superficiais do solo não saturadas a água continua se movimentando para baixo devido à ação da gravidade e da diferença de potencial hídrico, esse movimento é denominado percolação (BERKOWITZ; EWING, 1998; LIBARDI, 1995). Ao seguir seu caminho pelo interior do solo, a água pode chegar às camadas de rochas impermeáveis, formando os lençóis freáticos (TOMASELLA *et al.*, 2008). Os lençóis freáticos então formados são responsáveis por alimentar a vazão dos rios por meio do fluxo de base que foi definido por Hall (1968) como a porção do fluxo que vem das águas subterrâneas e outras fontes atrasadas, de modo a manter os rios perenes.

2.2 Bacias hidrográficas

As bacias hidrográficas (Figura 2) são constituídas pela área de captação natural da água da precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, o exutório (TUCCI, 2001). A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, ANA (2011), por sua vez, define bacias hidrográficas como regiões banhadas por cursos d'água, delimitadas por limites topográficos, onde a água escoa superficialmente até o rio principal ou por seus afluentes.

Figura 2 - Vista de uma bacia hidrográfica e seus principais componentes



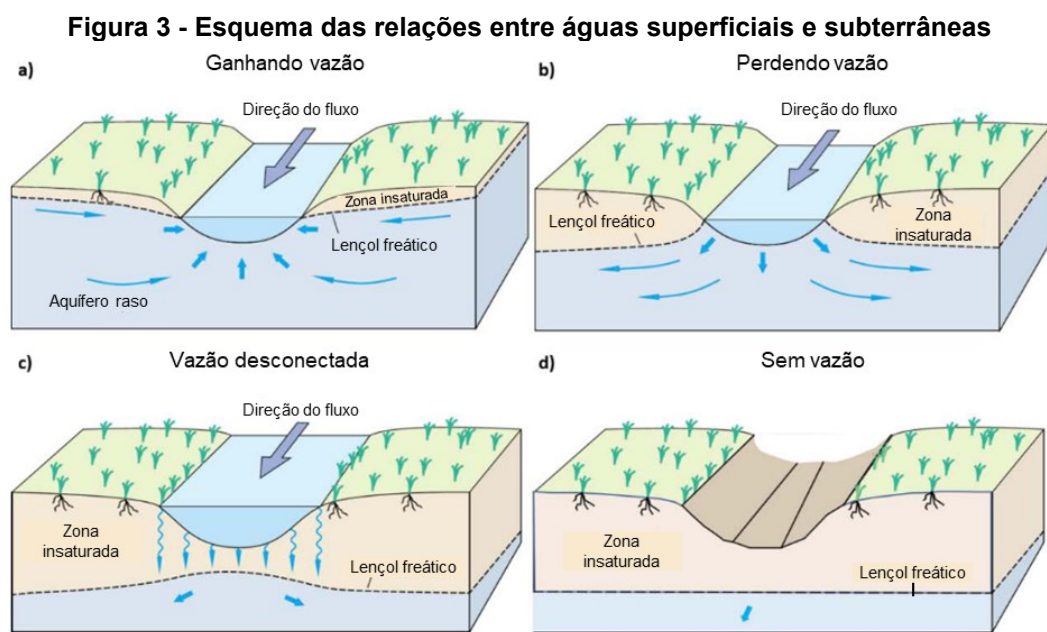
FONTE: Aatoria Própria (2021)

Oficialmente a bacia hidrográfica foi instituída como unidade de gestão no país pela Lei N.º 9.433/1997, no artigo 1º, inciso V, que define a bacia hidrográfica como “a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (BRASIL, 1997). Essa lei visa assegurar disponibilidade da água, bem como instituir mecanismos para defesa dos recursos hídricos de eventuais impactos naturais ou antrópicos.

Além do fluxo superficial facilmente observado, a bacia hidrográfica é formada ainda pelo fluxo de base, componente fundamental para manutenção da vazão durante períodos sem precipitação (DEL REY; CUNHA, 2021; POETER *et al.*, 2020; RODRIGUES, 2011). Von Sperling (2007), define o escoamento de base como parcela da precipitação que infiltrou a níveis profundos, servindo de recarga para

reservas subterrâneas e posteriormente sustenta a totalidade do escoamento superficial dos corpos hídricos nos períodos secos. O autor define ainda escoamento subsuperficial como aquele que ocorre nas camadas mais superficiais do solo, na zona não saturada, chegando aos cursos d'água com leve atraso em relação ao escoamento superficial.

A interação dos processos anteriormente citados favorece a permanente vazão nos corpos hídricos. O fluxo de base pode ocorrer segundo as condições apresentadas na Figura 3 (POETER *et al.*, 2020).



FONTE: Poeter *et al.* (2020)

Na primeira situação, conforme a Figura 3a, o nível freático apresenta coincidência com o relevo da paisagem, com pequenas suavizações da topografia. Nessa situação, o potencial hidráulico do lençol freático é maior que o apresentado pelo rio, favorecendo a recarga do fluxo de água. Isso é caracterizado como um sistema hidráulico conectado efluente (POETER *et al.*, 2020). Por analogia, Figura 3b, o rio atua como fonte de recarga para o aquífero, pois este se apresenta com níveis freáticos abaixo do potencial hidráulico do rio, sendo caracterizado como sistema hidráulico conectado influente (FREEZE; CHERRY, 2017; POETER *et al.*, 2020).

Nas situações das Figuras 3c e 3d, ocorre a separação entre os sistemas hidráulicos. O nível freático abaixa além da zona de influência do rio. Neste caso, o rio ainda serve de recarga para o aquífero, até que, por falta de precipitação ou

recarga, este possa secar completamente (FREEZE; CHERRY, 2017; WOESSNER, 2020).

Quando se expande a observação do ciclo hidrológico de uma área pequena e pontual para uma área maior como a de uma bacia hidrográfica, a complexidade se eleva devido à soma de outros fatores como, por exemplo, as variações de topografia, pedologia e fontes de perturbação que tendem a serem suavizadas pelos modelos (BRIGHENTI, 2015).

2.3 Modelagem hidrológica

2.3.1 Modelos

Um modelo é uma abstração da realidade. O objetivo de se construir modelos matemáticos é de representar uma realidade altamente complexa de um modo mais simples e adequado aos interesses da modelagem em questão (WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2013). Ainda segundo os autores, a modelagem não é uma alternativa à observação, mas sob certas circunstâncias, pode ser uma ferramenta poderosa para entender as observações e desenvolver e testar uma teoria.

De acordo com Bivand e Lucas (2000), a complexidade dos processos ambientais se deve à tridimensionalidade, à dependência do tempo, à não-linearidade, aos componentes estocásticos e às reações em diferentes escalas espaço-temporais. Isso demonstra a importância dos modelos e do uso da computação para a resolução de situações complexas

Para Taylor (1999), um modelo apresenta relação funcional entre variáveis, parâmetros e equações matemáticas. Esses modelos podem se apresentar em diferentes tipos quanto a sua estrutura e relação temporal (VIESSMAN; LEWIS, 1996).

Quando se analisa um modelo em relação ao tempo, ele pode ser estático ou dinâmico, sendo adversos entre si. Sampaio (1998) enuncia todo modelo que é capaz de se desenvolver (evoluir) ao longo do tempo é dito dinâmico, em contraponto, o modelo é estático.

Quando se trata de variação temporal há duas possibilidades, tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis elevados de precisão. Já a representação discreta permite a especificação de intervalos de tempo em passos constantes, como horas, dias, meses e a variação não pode ser determinada entre um intervalo e o seguinte

(PEDROSA; CÂMARA, 2004). Tucci (2005) esclarece que a maioria dos sistemas hidrológicos é do tipo contínuo, porém representados de modo discreto.

Os modelos hidrológicos podem ser caracterizados ainda quanto sua capacidade de considerar a influência das variações espaciais, os ditos modelos distribuídos, ou, genéricos/concentrados (“*lumped*”) que ignoram esses parâmetros como o hidrógrafo unitário (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Sistemas especializados na modelagem utilizados para interpretar e caracterizar fenômenos hidrológicos que levam em consideração os fenômenos físicos são chamados de modelos conceituais. Quando estes modelos visam analisar fenômenos baseados na utilização de funções (regressões, por exemplo), que não tem relação direta ao fenômeno físico em questão, são determinados modelos descritivos/empíricos (CHRISTOFOLETTI, 1999; TUCCI, 2005).

Segundo Chow (1964), se o conceito de probabilidade faz parte da construção do modelo, este é chamado de estocástico. Se as diversas possibilidades de uma variável ocorrerem forem ignoradas, e uma mesma entrada gerar sempre a mesma saída, o modelo é dito determinístico.

Christofoletti (1999) descreve os modelos hidrológicos quanto a sua finalidade, os de balanço hídrico, que confirmam o balanço histórico nos influxos, defluxos e mudanças de armazenamento para o sistema estudado, e os preditivos, que se estruturam inicialmente sobre os modelos de balanço hídrico e utilizam parâmetros para simular condições futuras.

Steyaert (1993) por fim, define os modelos ambientais como, modelos matemáticos baseados em computador que simulam realisticamente processos ambientais dependentes do tempo e espacialmente distribuídos na natureza.

2.3.2 Modelo SWAT

O Soil & Water Assessment Tool doravante SWAT, é uma ferramenta de modelagem para avaliação do solo e água. Desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura (USDA), em parceria com a Texas A&M University, na década de 90, nos Estados Unidos (NEITSCH *et al.*, 2009).

O SWAT é um modelo em escala de bacia e de tempo contínuo que opera em passo de tempo diário ou sub-diário, foi desenvolvido para estimar impactos sobre os constituintes de uma bacia, a partir de fatores como clima, hidrologia, características

do solo e uso e ocupação do solo (GASSMAN *et al.*, 2007). Neitsch *et al.* (2009) ainda explicam que, em virtude dessas características, esta ferramenta não é desenvolvida para simular de forma detalhada eventos únicos como cálculos de propagação de cheias, mas sim modelos de eventos de longo prazo.

Para desenvolvimento do modelo SWAT são necessários dados sobre as características geoclimáticas e geofísicas da bacia hidrográfica, sendo caracterizado como um modelo físico.

No SWAT a modelagem é feita em uma sequência de etapas. A primeira etapa diz respeito a delimitação das bacias e das suas subdivisões, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (URH) (CARVALHO, 2014). De posse das URHs e dos dados climáticos é que se dá início a simulação hidrológica, utilizando as informações climáticas fornecidas, o programa aplica os dados sobre estas URHs e calcula os fluxos d'água e sedimentos em cada uma das subdivisões existentes, em seguida essas respostas geradas são direcionadas para os leitos da rede hidráulica (ARNOLD *et al.*, 1998). A terceira etapa diz respeito a calibração e validação dos resultados obtidos na segunda etapa.

A versão utilizada neste projeto foi a SWAT+, uma reformulação completa da interface original do SWAT. Essas mudanças foram implementadas com adições e modificações da interface do modelo para tornar a ferramenta ainda mais completa e facilitar sua adoção nas pesquisas (USDA-ARS; TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH, 2023).

No SWAT+ as URHs são criadas em duas etapas, a primeira consiste na divisão da área de drenagem da bacia em áreas menores, as sub-bacias. Na segunda fase, as sub-bacias são divididas em áreas menores não contíguas delimitadas com base nas características de cobertura do solo, tipo de solo e faixa de declividade definidas pelo usuário, sendo agrupadas posteriormente na bacia como áreas de características semelhantes (ARNOLD *et al.*, 2012a; COLLISCHONN *et al.*, 2007; GASSMAN *et al.*, 2007; NEITSCH *et al.*, 2009; PAI; SARASWAT; SRINIVASAN, 2012).

Essa caracterização única das URH objetiva facilitar a simulação dos fenômenos hidrológicos que ali ocorrem e a espacialização dos parâmetros de teste (NETO *et al.*, 2014). As URHs são as unidades primárias do SWAT onde será aplicada a equação de balanço hídrico (ARNOLD *et al.*, 2012a; NEITSCH *et al.*, 2009)

Haverkamp *et al.* (2002) demonstram que, a etapa de delimitação das URHs é altamente importante para o sucesso do modelo. E que ao tentar buscar o máximo de homogeneidade entre as URHs tendem-se ao aumento no seu número, elevando o custo computacional em processamento e armazenamento. Dessa forma é necessário refletir se o aumento dos números de URH é realmente necessário para cada área de estudo.

No SWAT+, o ciclo hidrológico é segmentado em diversas fases para a aplicação das equações físicas em que água se encontra. São equacionados desde o balanço energético que dá origem a movimentação da água, a presença de água na atmosfera, escoamento lateral, superficial e subsuperficial, transporte e perda de sedimentos e qualidade da água (NEITSCH *et al.*, 2009).

Arnold *et al.* (1998) demonstra que no SWAT+ há uma divisão dos fenômenos hidrológicos em duas partes. A primeira é relacionada a fase terrestre, na qual são determinadas as quantidades de água, sedimentos e nutrientes transportados até as calhas dos rios. A segunda etapa é relacionada a fase aquática, onde ocorrem os processos de movimentação da água, sedimentos e nutrientes ao longo da rede hídrica (ARNOLD *et al.*, 1998).

O SWAT+ adota como base as equações para estimar o (1) balanço hídrico; (2) escoamento superficial (CN); (3), (4) e (5) evapotranspiração, para quantificar os volumes de água em cada uma das fases do ciclo para um tempo determinado (FREIRE; OMENA, 2005; NEITSCH *et al.*, 2009).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{dia} - Q_{sup} - E_c - W_{inf} - Q_{aq}) \quad 1$$

Onde:

SW_t = umidade final do solo no tempo t (mm H₂O);

SW_0 = umidade inicial do solo (mm H₂O);

t = duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

R_{dia} = quantidade de água precipitada no dia i (mm H₂O);

Q_{sup} = quantidade de escoamento superficial do dia i (mm H₂O);

E_c = quantidade de evapotranspiração no dia i (mm H₂O);

W_{inf} = quantidade de água percolada da camada simulada para a camada inferior no dia i (mm H₂O);

Q_{aq} = é a quantidade de fluxo de retorno no dia i (mm H₂O).

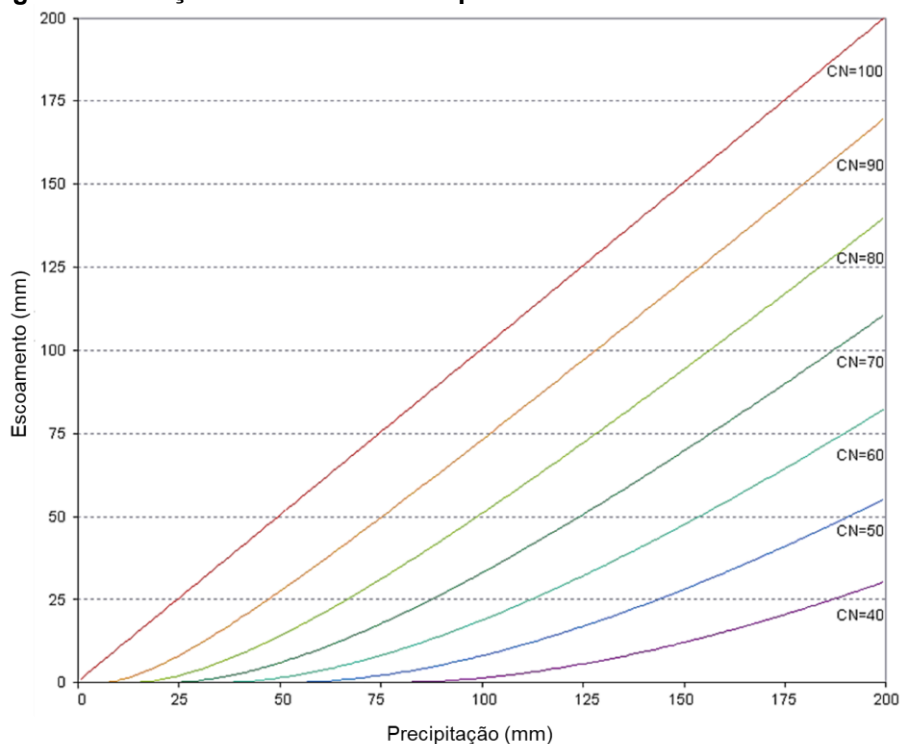
Neitsch *et al.* (2009), Zhan e Huang (2004) explicam que o SWAT utiliza o método da Curva-Número (CN), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos, para determinar o volume de água que escoar superficialmente ou infiltra no solo, ou aquífero.

A Curva-Número é um parâmetro adimensional cujos valores são tabelados de acordo com uma combinação do grupo hidrológico do solo e o tipo de uso e cobertura do solo, sempre associados a uma condição antecedente de umidade do solo, dado pela Equação 2 (GONÇALVES, 2007; SOARES *et al.*, 2017).

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \quad 2$$

Os valores de CN indicam as condições do solo, podendo variar desde uma cobertura altamente permeável (limite inferior = 0), até uma cobertura completamente impermeável (limite superior = 100) (Figura 4), e o S representa a capacidade máxima de retenção de água no solo (em mm) (SARTORI, 2004).

Figura 4 - Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN



FONTE: Neitsch et al. (2009)

As características dos grupos hidrológicos do solo, apresentadas pelo *Soil Conservation Service* (SCS), são segundo Sartori, Neto e Genovez (2005):

a) Grupo A: Solos de baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areia ou cascalho, ambos profundos e excessivamente drenados. Índice mínimo de infiltração: $>7,62\text{mm h}^{-1}$.

b) Grupo B: Solos com taxa moderada de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a grossa. Índice mínimo de infiltração: $3,81 - 7,62\text{ mm h}^{-1}$.

c) Grupo C: Solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Índice mínimo de infiltração: $1,27 - 3,81\text{mm h}^{-1}$.

A variabilidade do CN depende de um volume precipitado num período de 5 a 30 dias anteriores, denominada de "Precipitação Antecedente". Dessa forma, o SCS elaborou três condições de umidade antecedente do solo de acordo com (SARTORI, 2004; USBR, 1977):

Condição I: Condição em que os solos de uma bacia hidrográfica estão secos, mas não ao ponto de murcharamento das plantas, é quando se ara ou cultiva bem o solo.

Condição II: É o caso em que os solos se encontram na “umidade ideal”, isto é, nas condições que precederam a ocorrência de uma enchente máxima anual em numerosas bacias hidrográficas.

Condição III: Condição em que os solos se apresentam quase saturados, quando da ocorrência de chuvas fortes ou fracas e baixas temperaturas durante 5 dias anteriores a uma determinada precipitação.

Por fim, para determinar a evapotranspiração potencial o SWAT pode utilizar as equações de Penman-Monteith, Equação 3 (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor, Equação 4 (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972) e o método de Hargreaves (Hargreaves e Samani, 1985), Equação 5, sendo um termo do balanço hídrico (E_c), conforme descrito por Neitsch *et al.* (2009). Chega-se nesta equação por meio de representações simplificadas do fluxo de calor latente e sensível a partir de uma superfície úmida associada a equação do balanço de energia. São considerados valores de radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura (COLLISCHONN; TASSI, 2008).

$$\lambda E = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \rho_{ar} * c_p * \left[\frac{e_z^0 - e_z}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad 3$$

λE : densidade de fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

E : taxa de evaporação de profundidade (mm d^{-1});

Δ : inclinação da curva pressão-temperatura do vapor de saturação, $\partial e / \partial T$ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

H_{net} : radiação líquida diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G : densidade do fluxo de calor para o solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

ρ_{ar} : densidade do ar (kg m^{-3});

c_p : é o calor específico a pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

e_z^0 : pressão de saturação de vapor do ar na altura z (kPa);

e_z : pressão de vapor da água na altura z (kPa);

γ : constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

r_c : resistência a copa das plantas (s m^{-1});

r_a : resistência da difusão da camada do ar (s m^{-1}).

Tucci (1998) descreve o método de estimação de evapotranspiração de Penman-Monteith como o mais completo, por exigir mais informações climáticas, mesmo que nem sempre de fácil acesso.

Pereira, Villa Nova e Sentelhas (1997) explicam que o modelo ou equação de Priestley-Taylor (Equação 4) é uma simplificação da equação de Penman, aparecendo apenas o termo da radiação corrigido por um coeficiente de ajuste (α). Priestley e Taylor (1972) determinaram valores para α variando de 1,08 (evaporação do solo nu) a 1,32 (evapotranspiração do solo nos vegetais).

$$\lambda E_{\alpha} = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G) \quad 4$$

Onde:

λ : calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹);

E_0 : evapotranspiração potencial (mm d⁻¹);

α_{pet} : coeficiente de ajuste de Priestley-Taylor;

Δ : tangente da curva temperatura-pressão do vapor de saturação, de/dT (kPa °C⁻¹);

γ : constante psicométrica (kPa °C⁻¹);

H_{net} : radiação da rede (MJ m⁻² d⁻¹);

G : densidade do fluxo de calor para o solo (MJ m⁻² d⁻¹).

A equação de Priestley-Taylor é comumente indicada para determinação da evapotranspiração potencial em áreas que apresentam condições advectivas baixas. Nas áreas semiáridas ou áridas a equação subestimar a evapotranspiração, pois nestas regiões a componente advecção do equilíbrio de energia é significativo (NEITSCH *et al.*, 2009).

O método de Hargreaves (Equação 5) é o mais simples dentre os utilizados pelo SWAT, pois requer apenas a temperatura do ar (NEITSCH *et al.*, 2009).

$$\lambda E_0 = 0,0023 * H_0 * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * (\bar{T}_{med} + 17,8) \quad 5$$

Onde:

λ : calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹);

E_0 : evapotranspiração potencial (mm d⁻¹);

H_0 : radiação extraterrestre (MJ m⁻² d⁻¹);

T_{max} : temperatura máxima do ar para um dado dia;

T_{min} : temperatura mínima do ar para um dado dia;

T_{med} : temperatura média do ar para um dado dia;

2.3.3 Aplicações do Modelo SWAT

O SWAT tem se popularizado no Brasil nos últimos anos, com a realização de inúmeros trabalhos nos mais distintos biomas e estados do país, com as mais diversas finalidades conforme apresentadas por BRESSIANI *et al.* (2015).

Os autores Fontes Júnior e Montenegro (2019), por exemplo, buscaram identificar os impactos do reflorestamento da Caatinga arbórea sobre a disponibilidade de água em uma bacia do semiárido nordestino com forte influência antrópica, considerando um período de severa escassez hídrica de 2012 a 2015, utilizando o modelo SWAT. Conforme os autores, o modelo SWAT simulou com sucesso o hidrograma de vazão para o período de 2000 a 2015, com coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS) de 0,77 e 0,55 na calibração e validação da vazão diária. Segundo os Autores, os cenários de reflorestamento simulados mostraram um aumento de 6 a 20% na recarga e armazenamento de água no solo de 9 a 28%, demonstrando os impactos do reflorestamento nos processos hidrológicos.

Fujita (2018) fez aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Ivaí, localizada ao norte da bacia hidrográfica do rio Piquiri. Este estudo, a autora demonstrou a eficiência do Modelo SWAT, modelando de forma satisfatória, conforme NSE, as vazões mensais. Com 4 das 5 estações fluviométricas de monitoramento apresentando eficiência de Nash-Sutcliffe entre 0,86 e 0,89. Além disso, indicou o impacto do número de estações de monitoramento do clima e, conseqüentemente, da oferta de dados sobre os resultados da simulação para este modelo. Existem centenas de trabalhos analisando as mais diferentes aplicações do modelo SWAT no Brasil, alguns destes são apresentados no QUADRO 1. Os trabalhos foram selecionados por demonstrarem diferentes as aplicações do SWAT em diversas regiões e biomas do país, além de suas experiências técnicas. Dentre os trabalhos descritos, destacou-se Martins *et al.* (2021), que foi capaz de obter NSE de 0,77. Entre os não calibrados o destaque fica por conta de Chagas *et al.* (2022) que obteve R^2 de 0,77 para a umidade do solo simulada. Em comum, todos os estudos apresentados no Quadro 1 são relativos a pequenas bacias hidrográficas, não chegando a 300 mil hectares (3.000 km²).

QUADRO 1 - Demonstrativo de trabalhos usando modelo SWAT no Brasil (continua)

Autor	Publicação	Objetos Simulados	Método de Calibração (Software / Algoritmo)	Principais Parâmetros	Resultados (Escala* / Índice**)	Observações	Local	Área da bacia (Ha)
Brighenti, Bonumá e Chaffe (2016)	Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense	Vazão	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	CN2; SOL_AWC; ESCO; GW_DELAY; GW_QMN; RCHRG_DP; SURLAG; CH_N2; CH_N1; CH_K2; CH_K1; SLSOIL; LATTIME; CANMX	Mensal / NSE ≥ 0,5; PBIAS ≤ ±25%	-	Rio Negrinho / SC	20.000
Viana <i>et al.</i> (2018)	Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – PE utilizando o modelo SWAT	Vazão	Sem calibração	-	Diário / R² 0,65	-	Rio Pirapama / PE	1210,23
Bueno <i>et al.</i> (2017)	Desempenho do modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica	Vazão	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	ESCO; CN2; ALPHA_BF; GW_DELAY; GWQMN; CANMX; CH_K2; CH_N2; EPCO; GW_REVAP; REVAPMN; SOL_AWC; SOL_K; SURLAG	Mensal / 0,81 < NSE < 0,89; PBIAS ≤ 15%	Comparativo de diferentes formações de HRU	Rio Grande / MG	203.000
Martins <i>et al.</i> (2020)	Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar	Hidrossedimentológica	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	CN2; GW_DELAY; ESCO; RCHRG_DP; SOL_AWC; EPCO; CH_N2; SOL_K; SLSUBBSN	Mensal / NSE 0,58; PBIAS -2,8%; RSR 0,56	-	Ribeirão Pinhal / SP	23.352
Martins <i>et al.</i> (2021)	Reduction of sediment yield by riparian vegetation recovery at distinct levels of soil erosion in a tropical watershed	Hidrossedimentológica	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	ESCO; CN2; SOL_Z; SOL_AWC	Mensal / NSE 0,70; PBIAS -10,2; RSR 0,55	Diferentes larguras de APPs (5, 8, 15 e 30m)	Rio Jundiá-Mirim / SP	9.500
Blainski, Acosta e Nogueira (2017)	Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense	Hidrossedimentológica	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	LATTIME; ESCO; GWQMN; REVAPMN; ALPHA_BF; GW_DELAY	Mensal / NSE 0,88; CRM 12%	-	Rio Camboriú / SC	19.500
Borges, Batista e Pereira (2022)	Modelagem e simulação hidrológica na microbacia do rio Santa Rita - SP	Vazão	Sem calibração	CN2; AWC; SURLAG; ESCO; REVAP_CO; REVAP_MIN; SLOPE; OVN; SLOPELEN_L	Diário / R² 0,4475	-	Rio Santa Rita / SP	7.450
Chagas <i>et al.</i> (2022)	Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT	Umidade do solo	Sem calibração	-	Mensal / R² 0,77	Análise da umidade do solo por sub-bacias	Riacho Jatobá / PE	1.215
Almeida e Aguiar Netto (2022)	Gestão do Rio Poxim-Açu: um modelo Swat para avaliação de cenários de irrigação	Vazão	Calibração manual	CANMX; SOL_Z; SOL_K; SOL_AWC; RCHRG_DP; ALPHA_BF;	Mensal / NSE 0,82	Avaliar o acúmulo de água no reservatório	Rio Poxim-Açu / SE	10.900
Araújo, Figueiredo e Souto (2022)	Estado da arte: aplicação do modelo SWAT no relevo cárstico	-	-	-	-	Demonstrar aplicações do SWAT e técnicas de abordagem	-	--
Passos, Silva e Silva (2021)	Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Utilizando o Modelo Swat.	Vazão	Calibração manual	GW_DELAY; SOL_K; CH_N2; GWQMN; EPCO	Diário / NSE 0,45	-	Ribeirão José Pereira / MG	4.000
Maraslis (2022)	Influência do uso e ocupação do solo na geração de escoamento superficial de uma pequena bacia costeira utilizando o modelo SWAT	Vazão	SWAT CUP / Sequential Uncertainty Fitting - SUFI2	ESCO; GW_DELAY; SURLAG; CN2	Diário / KGE 0,64; r-fator 0,92; p-fator 0,75	Avaliar diferentes cenários de uso e ocupação do solo	Rio João Gualberto / SC	9.920
Oliveira <i>et al.</i> (2021)	Simulação hidrossedimentológica da bacia hidrográfica e do reservatório de abastecimento do ribeirão João Leite, utilizando o modelo SWAT	Hidrossedimentológica	ARC SWAT / X2- Suffled Complex Evolution Method Algorithms	-	-	Avaliar diferentes cenários se uso e ocupação do solo	Ribeirão João Leite / GO	76.680

* - Escala temporal de análise da simulação podendo ser Anual, Mensal ou Diária.

** - Índices de determinação de eficiência de modelos hidrológicos.

FONTE: Organizado pelo Autor

2.4 R-SWAT

Anteriormente conhecido por SWATshiny, o R-SWAT é uma ferramenta para análise de sensibilidade de parâmetros, calibração e análise de incerteza dos parâmetros do SWAT+. Trata-se de um código de programação em linguagem R (NGUYEN, 2022).

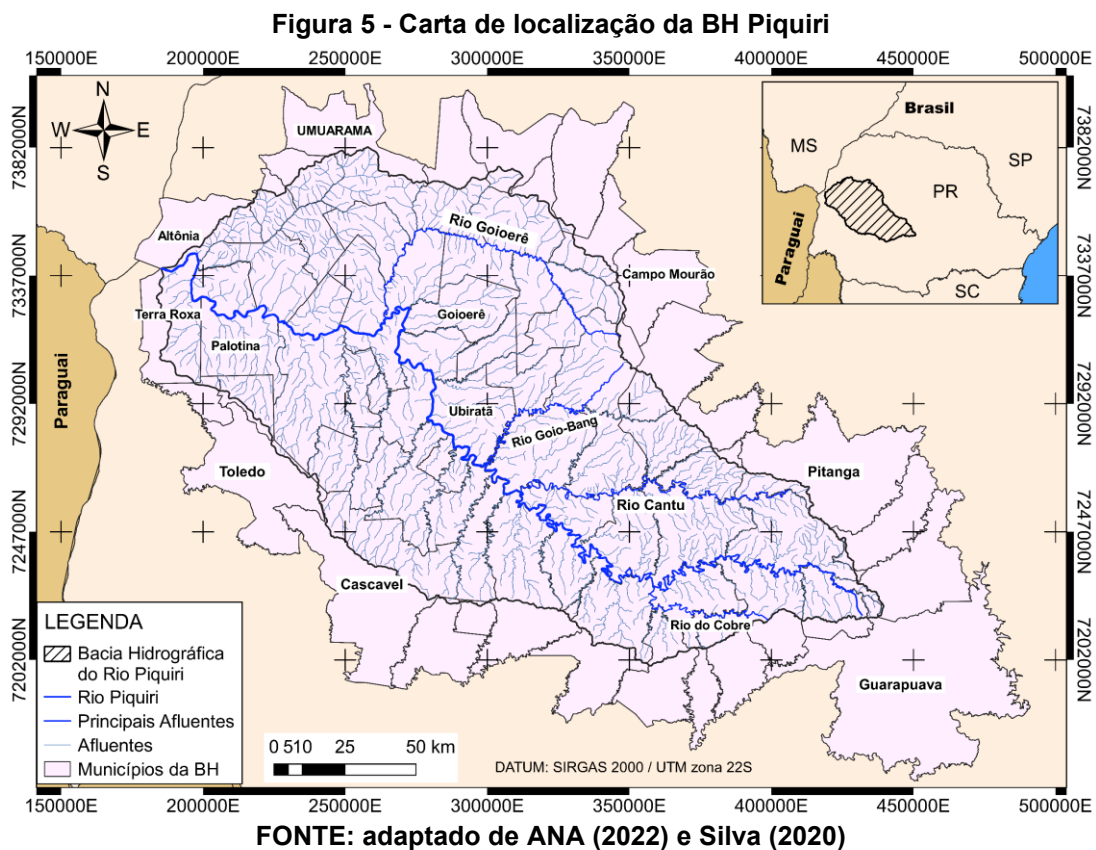
A análise de sensibilidade dos parâmetros é realizada pelo cálculo de regressão múltipla regredindo os parâmetros gerados pelo hipercubo latino, então é aplicado um teste t para definir a significância relativa dos parâmetros (ABBASPOUR, 2015; NGUYEN, 2022). Para estimar o quanto a variação do parâmetro afeta os resultados, são realizadas alterações nos parâmetros da função objetivo, o que resulta em mudanças nos resultados da função objetivo. Essas mudanças fornecem valores de sensibilidade aproximadas e parciais dos parâmetros em relação à função objetivo. Quanto maior o valor absoluto do teste t e menor o p-valor, mais sensível é o parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Rio Piquiri (BH Piquiri), localizada no Estado do Paraná, entre latitudes de 23°00' S, 25°30' S e longitudes 52°00' W, 55°30' W. A BH Piquiri ocupa cerca de 12% da área total do estado, com cerca de 24.731 km² e o rio Piquiri possui 485 km de extensão da cabeceira até sua foz.

Sua nascente está localizada no Terceiro Planalto, na região centro-sul do Estado, na localidade de Paiquerê, no município de Campina do Simão, a uma altitude aproximada de 1.190 m (Figura 5). A foz está localizada entre os municípios de Altônia e Terra Roxa, na margem esquerda do rio Paraná, a uma altitude de cerca de 230 m e seus principais afluentes são, na margem direita, os rios Cantú, Goio-Bang e Goioerê e o rio do Cobre na margem esquerda (CORREA; GALVANI, 2017; LIMA *et al.*, 2004; PARANÁ, 2006).



A bacia é formada por 69 municípios nas regiões centro-oeste e noroeste, com áreas abrangidas pela BH Piquiri, os quais possuem aproximadamente 1,617 milhão

de habitantes, 14% da população do estado (IBGE, 2021). Consoante à Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná, os municípios da bacia hidrográfica do rio Piquiri e entorno se destacam pela diversidade e alta produção agrícola. Entre os principais produtos da região se destacam a cana-de-açúcar, soja, milho e mandioca, com produção de 9,7 milhões de toneladas, 7,2 milhões de toneladas, 6,5 milhões de toneladas e 1,8 milhões de toneladas, respectivamente para a safra 2019/2020. Além da produção de trigo, aveia, arroz, feijão, batata, tomate entre outros (PARANÁ, 2022).

3.1.1 Caracterização física

3.1.1.1 Clima

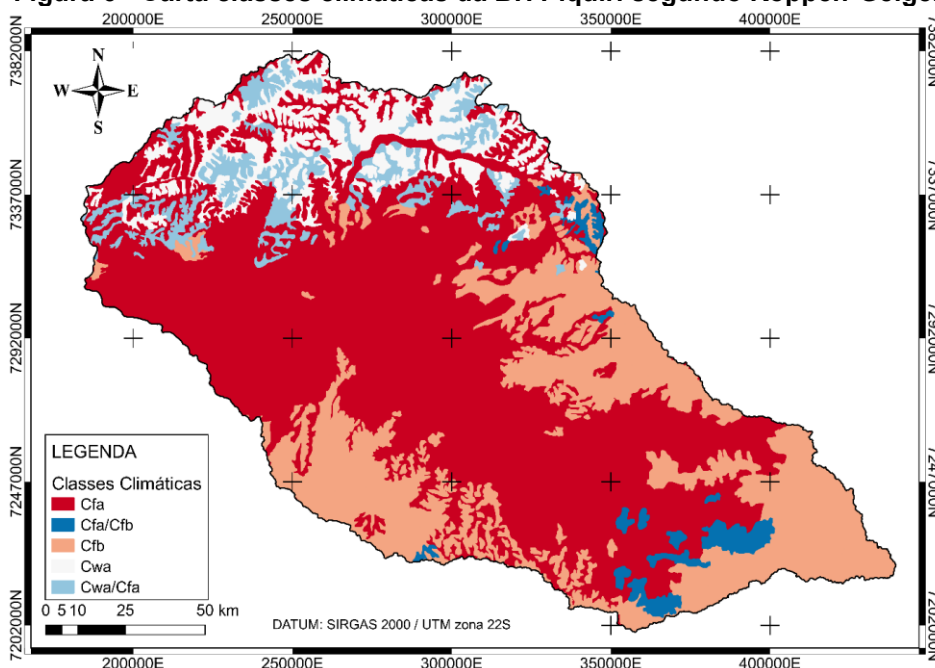
Na BH Piquiri é possível notar a influência de cinco classificações climáticas, das quais três são classes distintas, Cfa, Cfb e Cwa e duas classes são de transição ou mista, Cfa/Cfb e Cwa/Cfa, conforme Figura 6 (IAT, 2010):

Cfa: clima temperado úmido com verão quente (ALVARES *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2021);

Cfb: clima temperado úmido com verão ameno (ALVARES *et al.*, 2013; APARECIDO *et al.*, 2016);

Cwa: clima temperado úmido com verão quente e inverno seco (ALVARES *et al.*, 2013; DUBREUIL *et al.*, 2019);

Figura 6 - Carta classes climáticas da BH Piquiri segundo Köppen-Geiger



FONTE: Adaptado de IAT (2010)

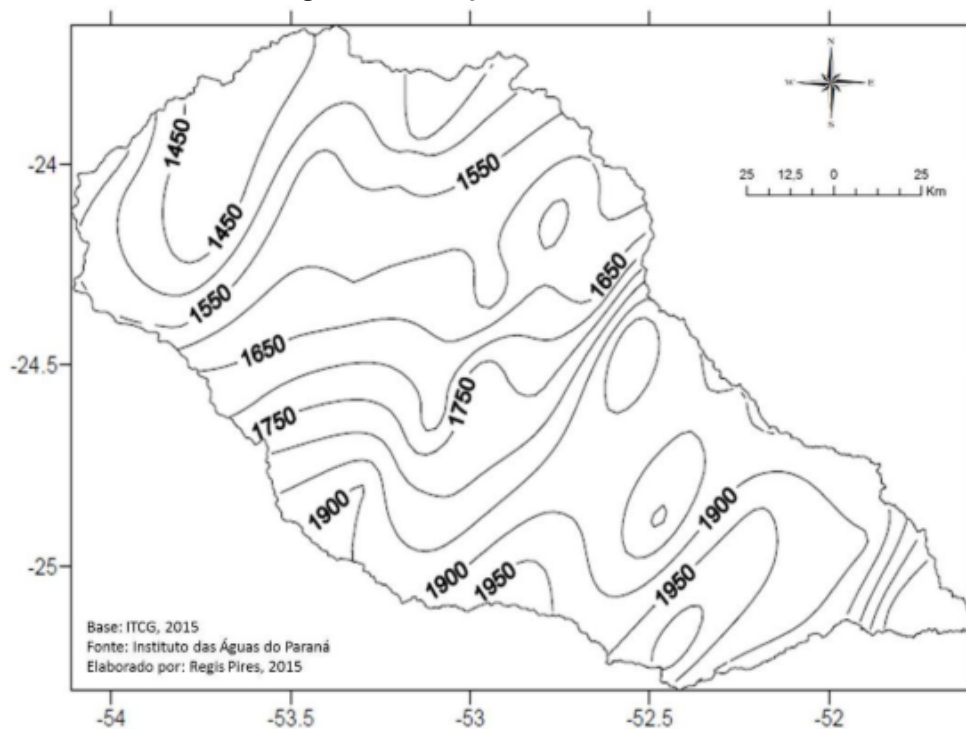
O clima do Estado e conseqüentemente da BH Piquiri, é influenciado por um conjunto de grandes sistemas atmosféricos de escala regional, conforme descrito por Mendonça (2000) e Borsato e Souza Filho (2010). Entre esses sistemas estão: massa Tropical atlântica (mTa), massa Polar atlântica (mPa), massa Equatorial continental (mEc), além do Cavado, Sistema Frontal (SF), Frente Polar Atlântica (FPA), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e El Niño/La Niña que regulam a precipitação na BH Piquiri (ANDRADE; NERY, 2003; BORSATO; SOUZA FILHO, 2010; WREGE *et al.*, 2012).

Correa (2015) demonstrou uma análise de correlação entre o fenômeno ENOS (IOS - Índice de Oscilação Sul), precipitação pluviométrica e vazão fluvial na bacia hidrográfica do rio Piquiri-PR. O Autor delimitou a análise do fenômeno ENOS para o triênio 1997/1999. Segundo Correa, a correlação e o teste de significância mostraram maior confiabilidade nas correlações entre as variáveis durante o período de La Niña, mas também se observou aumento da precipitação pluviométrica e da vazão fluvial nos meses de El Niño.

O estudo apresentado por Correa e Galvani (2019) sobre a análise de correlação de variabilidade entre a precipitação pluviométrica e vazão fluvial para a bacia hidrográfica do rio Piquiri demonstrou que a defasagem entre a precipitação e a vazão é inferior a um mês, podendo ser na escala de semanas ou dias. Além de demonstrar que o mês de agosto é o de menor precipitação e outubro o mais chuvoso para o período analisado.

Pires (2018) em seu trabalho sobre a caracterização da precipitação na bacia do rio Piquiri entre os anos de 1979 e 2012, demonstra que a variabilidade de precipitação na bacia hidrográfica está diretamente relacionada aos fenômenos El Niño (aumento na precipitação) e La Niña (queda na precipitação). Além disso, Pires demonstra quais anos apresentaram variações de precipitação acima da média e a precipitação média ao longo da bacia segue um gradiente direcional de redução da cabeceira para a foz (Figura 7).

Figura 7 - Precipitação média anual



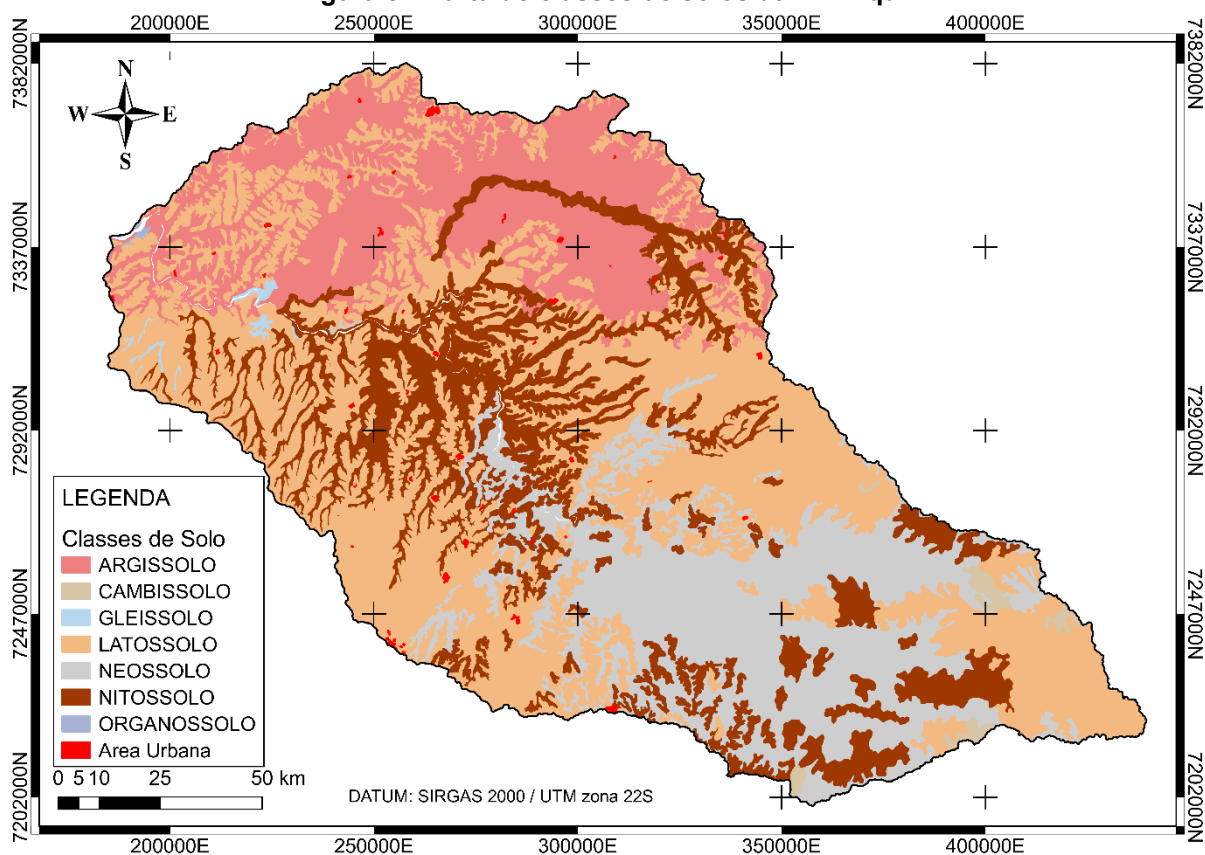
Fonte: Pires (2018)

A cabeceira da bacia apresenta os maiores índices médios de pluviometria média anual (1950 mm), bem com os maiores números de dias chuvosos ao longo do ano (103 dias), ao passo que seguindo em direção à foz, esses números tendem a reduzir, 1450 mm e 81 dias respectivamente (PIRES, 2018).

3.1.1.2 Pedologia

Os solos podem ser originados de duas fontes, da rocha, ao ser intemperizada, ou de sedimentos, que foram erodidos e depositados em local diferente da sua origem (PEREIRA *et al.*, 2019). O intemperismo predominante no Brasil é do intemperismo climático, que ocorre em regiões com altas variações térmicas e pluviométricas (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2000). A combinação geológica e climática ao longo de centenas de milhares de anos deu origem aos solos paranaenses, em especial os que compõem a BH Piquiri, conforme Figura 8, que continuam o processo de intemperização.

Figura 8 - Carta de classes de solos da BH Piquiri



FONTE: adaptado de EMBRAPA (2018)

Na BH Piquiri há predomínio do Latossolo (41,4%), Neossolo, Nitossolo e Argissolo correspondem a 20,7%, 18,8% e 17,1% respectivamente, os demais solos são cerca de 1,0%.

O termo 'Latosolo' conota solos altamente intemperizados, formados pelo processo denominado latolização. Trata-se da remoção de sílica e das bases do perfil (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , etc.), sendo estes solos muito profundos. Foram definidos sete tipos de latossolos, que se diferem pela coloração e pelo teor de ferro do ataque sulfúrico (KER, 1997; SOUSA; LOBATO, 2021). Destaca-se na bacia hidrográfica do rio Piquiri o Latossolo Vermelho, ocorrendo em áreas com relevo de plano a suavemente ondulado. Além disso, pode possuir baixa disponibilidade de água para plantas, ser facilmente compactado e ser suscetível à erosão (SANTOS; ZARONI, 2021a; SOUSA; LOBATO, 2021).

Os Neossolos, por sua vez, são solos pouco intemperizados e jovens, compostos de materiais minerais ou orgânicos pouco espesso. Encontram-se na maioria em áreas fortemente onduladas e montanhosas, sendo altamente susceptíveis a erosão, já quando presentes em áreas planas podem estar sob influência de lençóis freáticos (EMBRAPA, 2018; SANTOS; ZARONI, 2021b). Os

Neossolos são subdivididos em quatro classes, com destaque para a presença do Neossolo Litólico na área de estudo, que se caracteriza pela espessura de até 50 cm, associados a relevos mais declivosos e favoráveis à erosão, recomendado para áreas de proteção de fauna e flora (SANTOS; ZARONI; ALMEIDA, 2021a).

Os Nitossolos são constituídos de material mineral, profundos e bem drenados associados a relevos desde suave ondulado a fortemente ondulado (SANTOS; ZARONI, 2021c). Podem ser subdivididos em três classes, com destaque para Nitossolos Háplicos e Nitossolos Vermelhos presentes na bacia hidrográfica do rio Piquiri. O Nitossolo Vermelho caracteriza-se pela alta presença de argilas, sendo anteriormente conhecido por Terra Roxa Estruturada. Apresentam alto risco de erosão devido à associação a relevos acidentados (SANTOS; ZARONI; ALMEIDA, 2021b). Os Nitossolos Háplicos por sua vez são aqueles que não se enquadram nas demais classes (EMBRAPA, 2018).

3.1.1.3 Litologia e aquíferos

A geologia do Estado do Paraná tem seu início a cerca de 2,8 bilhões de anos com os derramamentos magmáticos e o surgimento das rochas metamórficas, dando origem aos dois compartimentos morfoestruturais do estado, o Escudo Orogênico do Atlântico e a Bacia Sedimentar do Paraná, Figura 9 (MINEROPAR, 2001).

Figura 9 - Compartimentos geológicos do Paraná

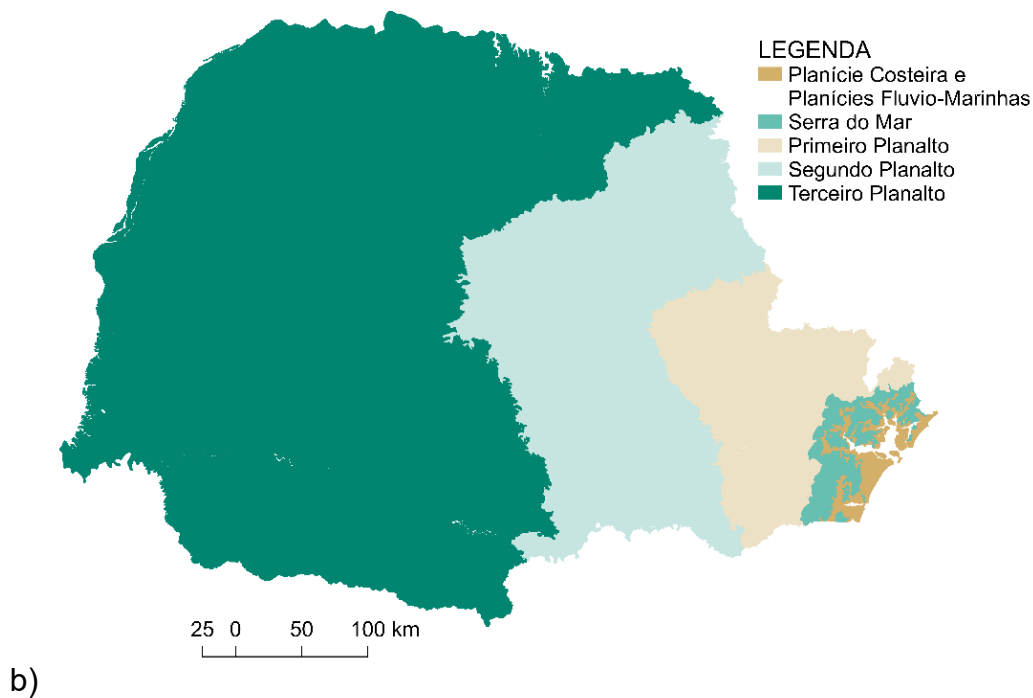
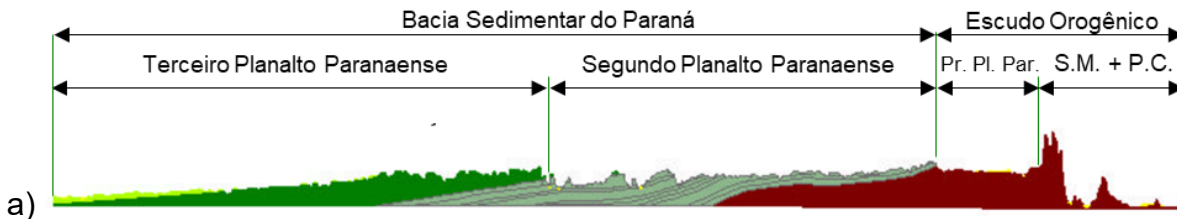


FONTE: MINEROPAR (2001)

O Escudo é o afloramento morfoestrutural mais antigo e elevado do Estado, originando o Primeiro Planalto e o Litoral/Serra do Mar Paranaense (IAT, 2022). Essa formação faz parte do Cinturão Orogênico do Atlântico, sendo um dos mais extensos do Brasil, além de possuir natureza poliorogênica (conjunto de processos de deformação compressiva da litosfera que induzem a formação e rejuvenescimento das montanhas) (MINEROPAR, 2001; SANTOS, *et al.*, 2006).

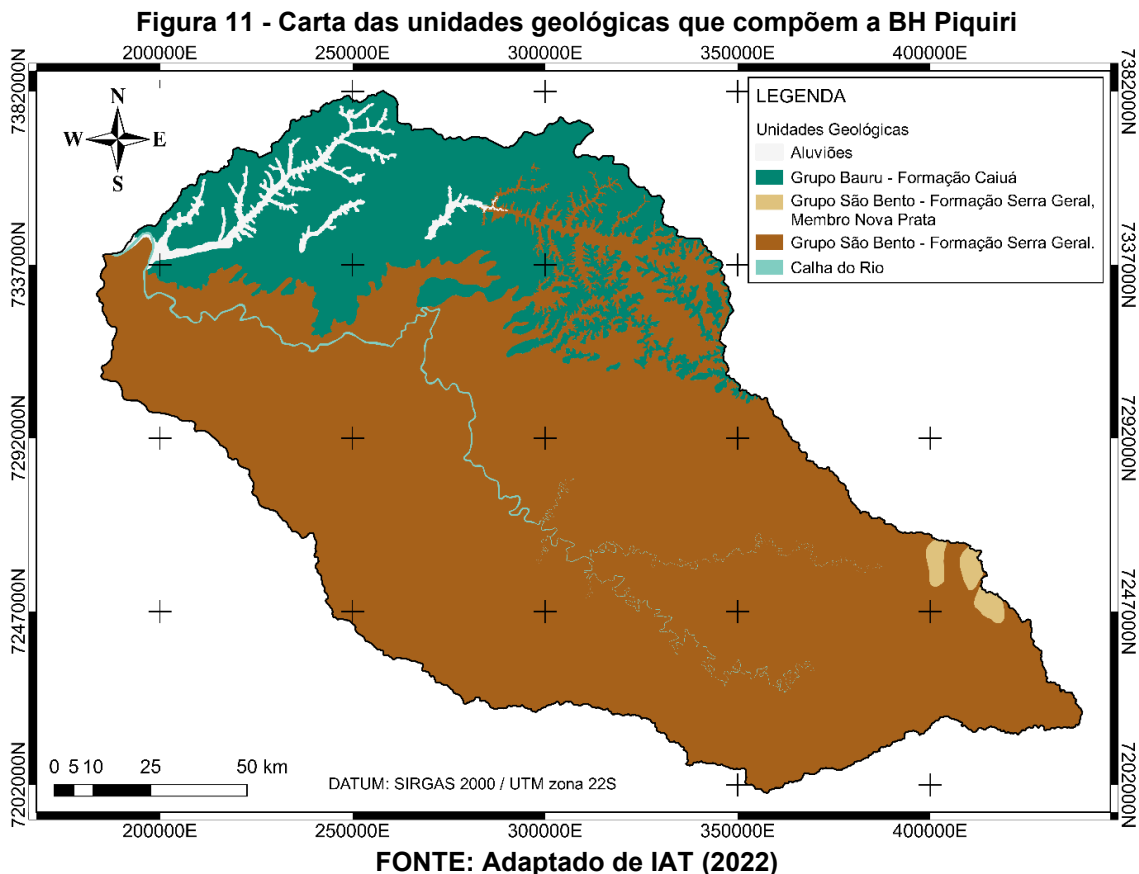
A Bacia Sedimentar do Paraná, segundo compartimento morfoestrutural, é oriunda de sedimentos provenientes do intemperismo de outras rochas e vulcanismos, que deram origem as rochas sedimentares depositadas sobre rochas mais antigas, o Escudo, Figura 10a, (CPRM, 2022; MINEROPAR, 2001).

Figura 10 - a) Perfil estratigráfico do território paranaense direção NW. (Escala vertical exagerada para realçar as estruturas). Pr: Primeiro; Pl: Planalto; Par.: Paranaense; S.M.: Serra do Mar; P.C.: Planície Costeira; b) Classes geológicas paranaense



FONTE: Adaptado de IAT (2022) e MINEROPAR (2001)

A Bacia Sedimentar do Paraná abrange o Segundo e Terceiro Planaltos, recobrendo a maior parte do estado do Paraná. É no Terceiro Planalto, também chamado de Planalto de Guarapuava, que possui inclinação homoclinal em direção ao oeste, a porção mais rebaixada onde se encontra o Rio Paraná (MINEROPAR, 2001). É neste Planalto que se encontra a nascente e toda a área de drenagem da BH Piquiri. A bacia é formada por três formações geológicas, Aluviões, Grupo Bauru e Grupo São Bento conforme Figura 11.



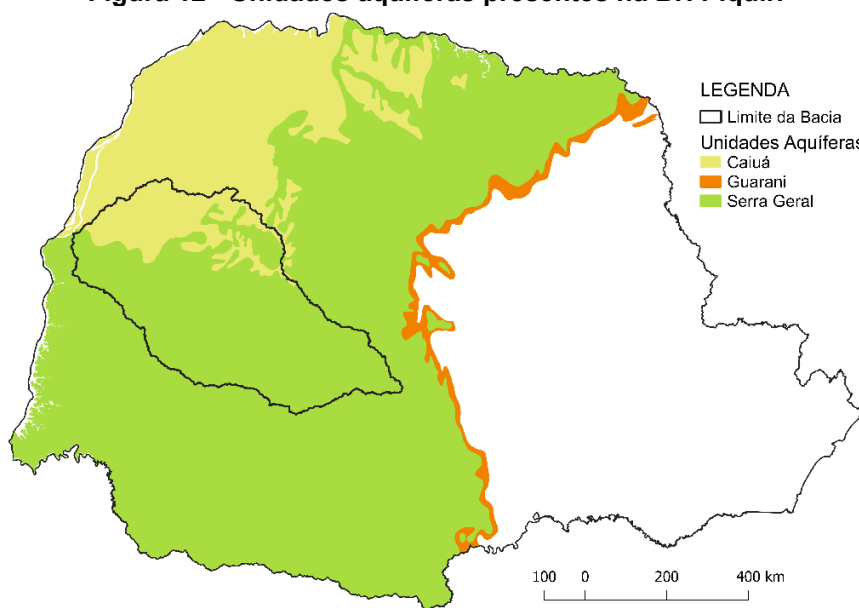
Os depósitos aluvionares são detritos ou sedimentos de qualquer natureza, carregados e depositados pelos rios. Este material é retirado das margens e das vertentes, levado em suspensão pelas águas dos rios que o acumulam em bancos, constituindo assim os depósitos aluvionares (GUERRA; GUERRA, 2003).

A unidade Caiuá é um grupo geológico composto pelas formações Goio Erê, Rio Paraná e Santo Anastácio, são caracterizadas pela presença de arenitos, rochas formadas da compactação de deposições de areia sobre a Formação Serra Geral (FERNANDES, 2004; FERNANDES; COIMBRA, 1994).

A formação Serra Geral é resultado de extensos e sucessivos derrames magmáticos de origem vulcânica fissural, predominando rochas basálticas (MELATI, 2018; MINEROPAR, 2001). Essa sucessão de derramamentos forma camadas que são características dessa formação. A formação Serra Geral é cheia de fraturas devido à deformação causada pelos processos orogênicos e epirogênicos, além do próprio resfriamento da rocha (CURTI, 2011). A Unidade Nova Prata é uma subunidade que se distingue das características gerais da Serra Geral com rochas que variam entre básicas e ácidas (MINEROPAR, 2001; ROCHA, 2014).

As formações geológicas dão origem a diversas unidades aquíferas. Segundo Rosa Filho *et al.* (1998), no Paraná há formação de onze unidades aquíferas, dentre elas, as que compõem a BH Piquiri, em destaque na Figura 12.

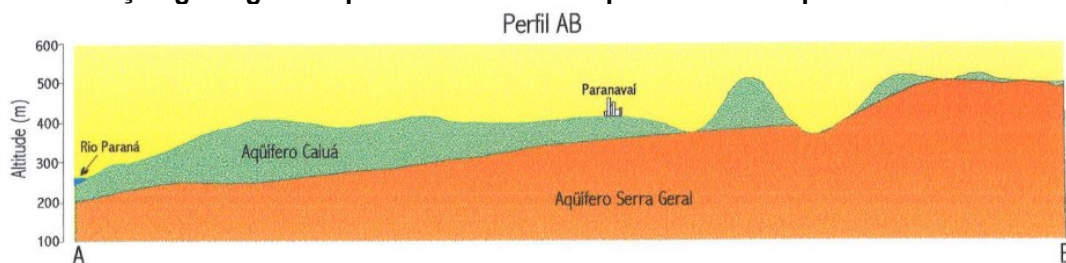
Figura 12 - Unidades aquíferas presentes na BH Piquiri



FONTE: Adaptado de IAT (2022)

As três unidades aquíferas apresentam-se sotopostas, conforme demonstrado na Figura 10a. O aquífero Caiuá, localizado na região noroeste do estado do Paraná, possui espessura variando entre 50 e 270 m e é formado por rochas sedimentares porosas, onde a água fica armazenada, sendo considerado um aquífero livre (CELLIGOI, 2000; CELLIGOI; DUARTE, 2002). Celligoi (2000) apresentou ainda em seu estudo uma demonstração de como o aquífero Caiuá está disposto sobre o aquífero Serra Geral (Figura 13).

Figura 13 - Seção geológica esquemática com as superfícies dos aquíferos Caiuá e Serra Geral



Fonte: Celligoi (2000)

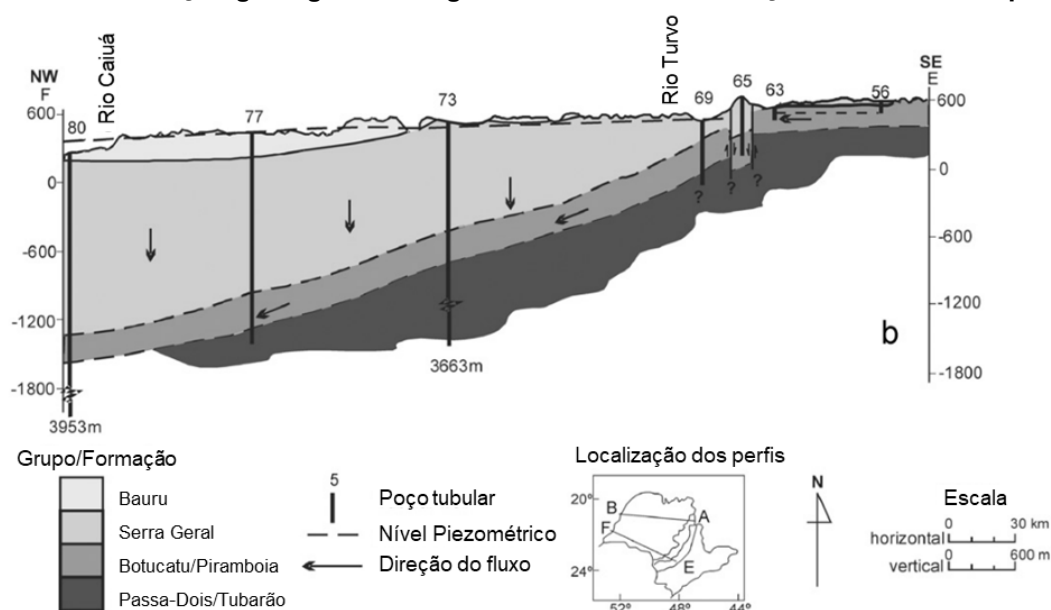
O aquífero Serra Geral é formado pelo derrame sucessivo de magma basáltico intercalado de camadas arenosas, somado a isso os processos de tectônica, presença de gases e o resfriamento do magma formaram uma rocha porosa, vesicular e

fraturada (BUCHMANN FILHO *et al.*, 2002; CAMPOS, 2004; MENDES *et al.*, 2002). Para Rebouças (1978), a água é armazenada e conduzida por meio de fraturas e descontinuidades, como as citadas.

A formação do aquífero Serra Geral possui uma área de afloramento aproximada de 110.000 km² no estado, podendo chegar a 1400 m de profundidade na região de Alto Piquiri (ARAÚJO; FRANÇA; POTTER, 1995). Segundo Bittencourt (1996), nas zonas de contato entre o Serra Geral e o Guarani é comum a mistura das águas entre os dois sistemas aquíferos.

O aquífero Guarani é composto no Paraná pelas formações Piramboia e Botucatu, um conjunto de formações rochosas arenosas abrangendo uma área de 131.300 km², estando confinado pela rocha basáltica do aquífero Serra Geral, de modo similar ao que ocorre no estado de São Paulo, conforme apresentado na Figura 14 (ROSA FILHO *et al.*, 2003).

Figura 14 - Formação geológica ao longo do transecto EF e direção do fluxo nos aquíferos

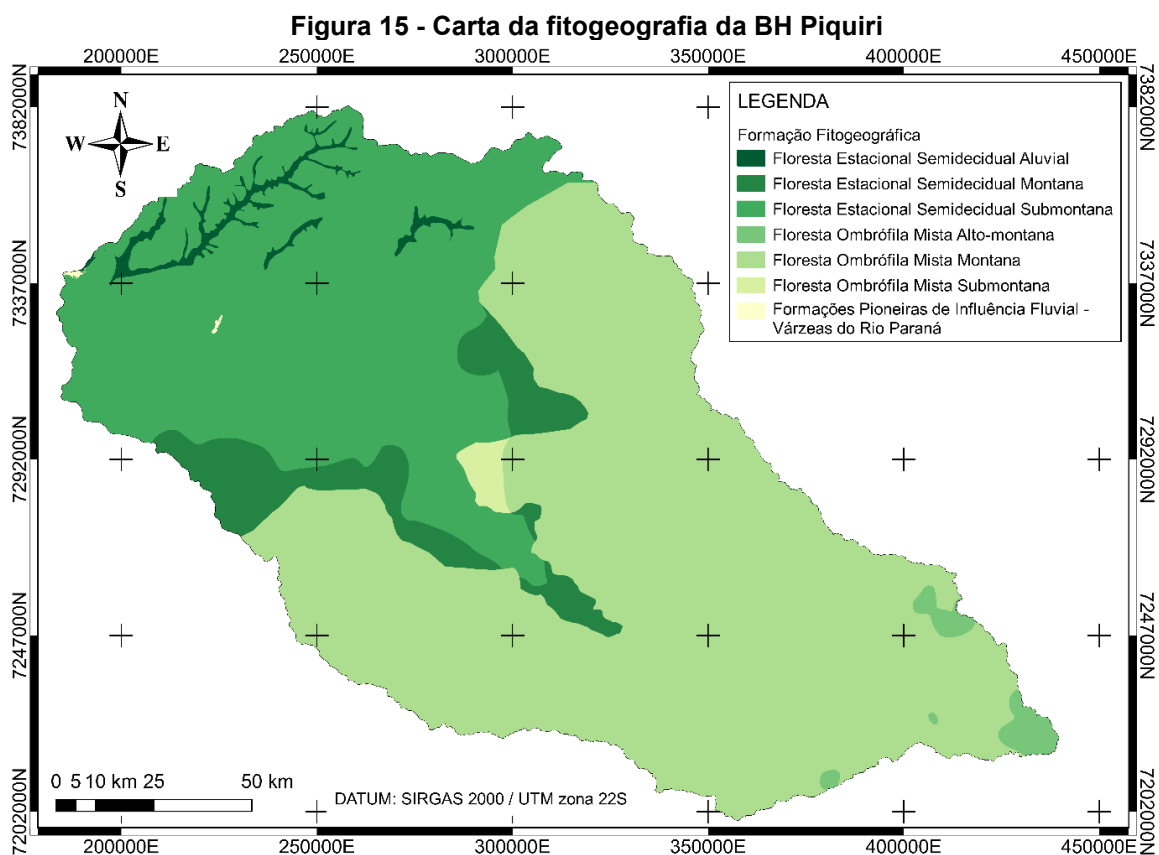


FONTE: Adaptado de Bonotto (2011)

O aquífero Guarani possui uma pequena zona de afloramento na porção oriental do Terceiro Planalto onde ocorre sua recarga (Figura 12). Quando se avança para o lado ocidental do Terceiro Planalto, o Guarani é sobreposto pelo basalto da Serra Geral, que pode chegar a 1400 m de profundidade, enquanto o aquífero Guarani possui espessura que varia de 200 a 800 m (HARTMANN, 2014; ROSA FILHO *et al.*, 2003). Pela característica da formação estrutural, o aquífero Guarani apresenta alto potencial hidrológico de abastecimento (CAMPOS, 2004).

3.1.1.4 Biomass originais

A fitogeografia paranaense é formada por dois biomas, a Mata Atlântica, predominante no estado, com a Floresta Ombrófila Densa - F.O.M. (Mata Atlântica), Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucárias), Floresta Estacional Semidecidual (Floresta Estacional) e Estepe (Campos); e o Cerrado com pequenas áreas de Savana (BRASIL, 2022; BROTTTO *et al.*, 2019; IBGE, 2012). Conforme dados apresentados pelo Instituto de Água e Terra do Paraná, as características da vegetação que predominam na BH Piquiri são as formações de florestas, conforme demonstrado na Figura 15.



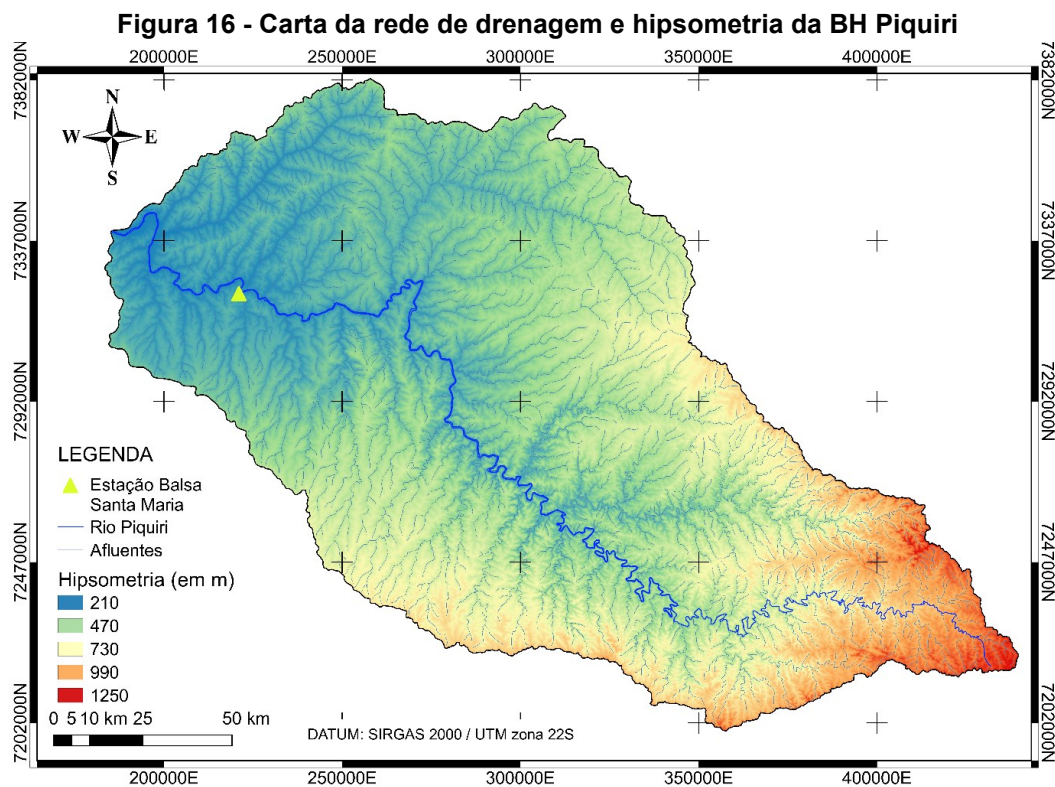
FONTE: adaptado de IAT (2010)

Conforme apresentado na Figura 15 na porção oriental da BH Piquiri, há predomínio de vegetação com características de Floresta Ombrófila Mista, devido ao tipo de clima mais úmido e altitudes acima de 400m. Na área da nascente há predomínio da F.O.M. Alto-Montana devido as maiores altitudes existentes na área, com a redução da altitude na direção SE-NO passa a ver predomínio da F.O.M. Montana e Submontana (IBGE, 2012).

Da região central até a foz há predomínio de florestas com características de Floresta Estacional Semidecidual, por se tratar de uma região menos úmida e de menor altitude, abaixo dos 400m (ARAÚJO FILHO, 2022; IBGE, 2012). Trata-se de vegetação que em clima subtropical com inverno com temperaturas médias abaixo de 15 °C apresenta queda parcial das folhas em mais de 50% dos indivíduos, formando, grandes massas de serapilheira (IBGE, 2012; TOSCAN; TEMPONI; GUIMARÃES, 2017).

3.1.2 Hidrologia e hipsometria

A calha sinuosa do rio Piquiri possui uma extensão de 485 km da nascente até sua foz na margem esquerda do rio Paraná (Figura 16), possuindo uma vazão média mensal na ordem de $508,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na estação fluviométrica de Balsa Santa Maria (média entre os anos 1976 e 2010) (CORREA, 2017; CORREA; GALVANI, 2019).

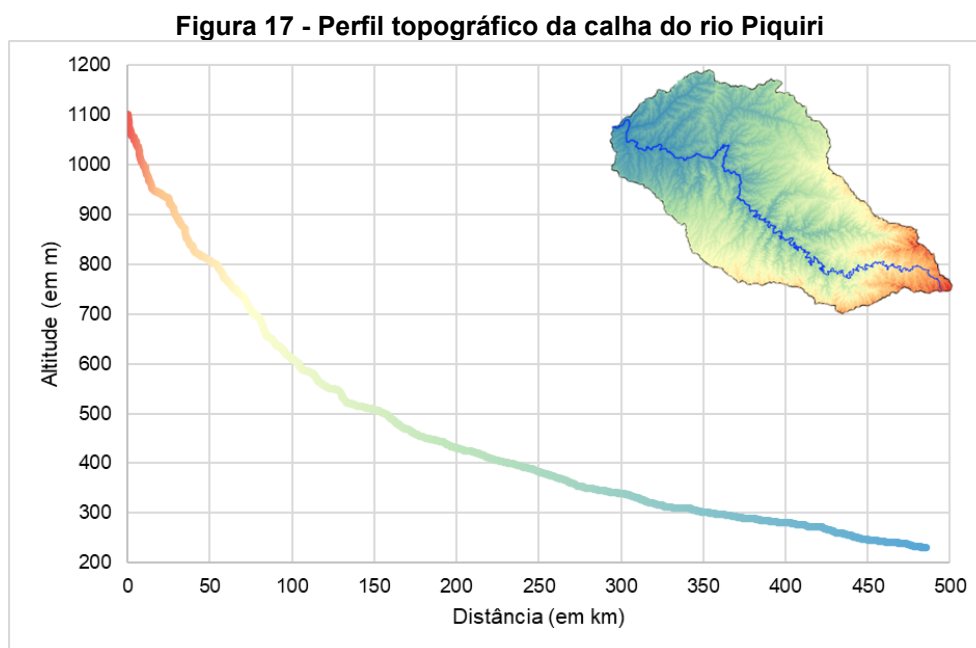


FONTE: adaptado de COPERNICUS SPACE COMPONENT DATA ACCESS PANDA CATALOGUE (2022)

O terreno da bacia possui em sua maior parte, 54%, declividade suave ondulado a ondulado forte (6-20%), enquanto 14% apresentam declividade superior a 20% fazendo com que a velocidade de escoamento da água seja relativamente rápida (AGUIAR, 2009).

A calha do rio Piquiri percorre trechos bastante acidentados, podendo ser dividida em três segmentos quanto a variação altimétrica, no primeiro trecho, 50 km, há

uma variação de cerca de 300 m de altitude, favorecendo o rápido fluxo da água demonstrado na Figura 17.



FONTE: Autoria própria (2022)

No trecho posterior, a mesma variação de altitude ocorre em uma distância de cerca de 100 km, e o trecho final com variação altimétrica de 500 até 230 m ocorre em cerca de 335 km, tornando o escoamento mais lento em relação aos trechos anteriores.

A BH Piquiri possui uma disponibilidade hídrica superficial de cerca de 157 mil $L s^{-1}$ e as unidades aquíferas Guarani, Serra Geral Norte e Caiuá possuem disponibilidade estimada em 32 mil $L s^{-1}$. Estimava-se que em 2013 a demanda hídrica na bacia era de cerca de 3 mil $L s^{-1}$, sendo 52% proveniente de mananciais superficiais e 48% de mananciais subterrâneos (IAT, 2010b; IPARDES, 2017).

3.1.3 Uso e ocupação do solo

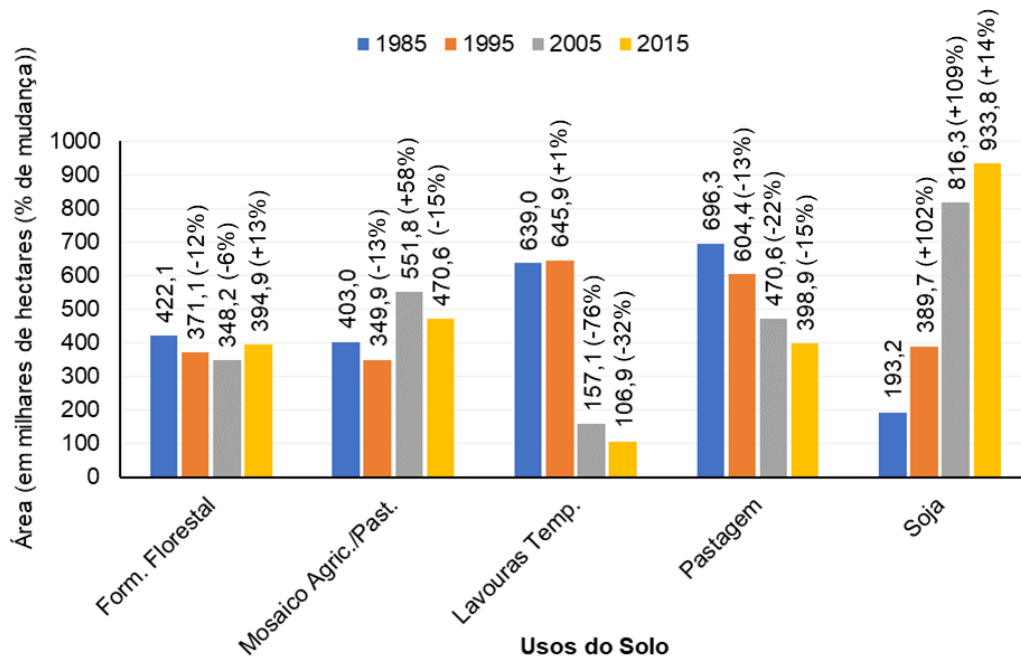
O processo de ocupação do interior do Paraná foi desigual, dividido em diferentes frentes entre anos de 1930 e 1960, onde cada uma caracterizou-se por uma forma de ocupação e conseqüentemente um uso agrícola (FARJADO, 2006; FRANÇA, 2011).

Em comum, estas frentes de exploração buscavam ocupar o território e introduzir agricultura e assentar pessoas, mas para que isso pudesse ocorrer era necessário a modificação da paisagem, ou seja, substituição da cobertura nativa (EMER, 1991; FARJADO, 2006; FRANÇA, 2011).

Ao longo desse período de expansão em direção ao interior, que teve origem no Segundo Planalto Paranaense e no Norte do Estado, as regiões que compõem a BH Piquiri sofreram transformação com a extração predatória e a consequente substituição das matas por pastagens e usos agrícolas. Como resultado, o estado chegou a perder quase 95% da sua cobertura vegetal nativa (GUBERT FILHO, 2010; HAUER, 2010). Tendo em vista essas mudanças ao longo dos anos, a Figura 18 e Figura 19 demonstram um panorama evolutivo do uso e ocupação das áreas na BH Piquiri entre os anos 1985 e 2015.

Durante este avanço em direção ao oeste do Estado, diferentes ciclos e produtos agrícolas foram explorados. Além do forte desmatamento já citado, entre os anos de 1985 e 2015 outras atividades perderam área na região, entre elas lavouras temporárias ou pequenos roçados (-83%), café (-89%) e pastagens (-43%). Ademais, formações florestais e superfícies de rios e lagos encolheram cerca de -6% e 16%. Essas atividades deram espaço as rotações de culturas como soja (milho e trigo fazem parte da rotação de cultura entre safras, substituindo a soja em determinadas épocas do ano) conforme análise de dados do (MAPBIOMAS, 2019).

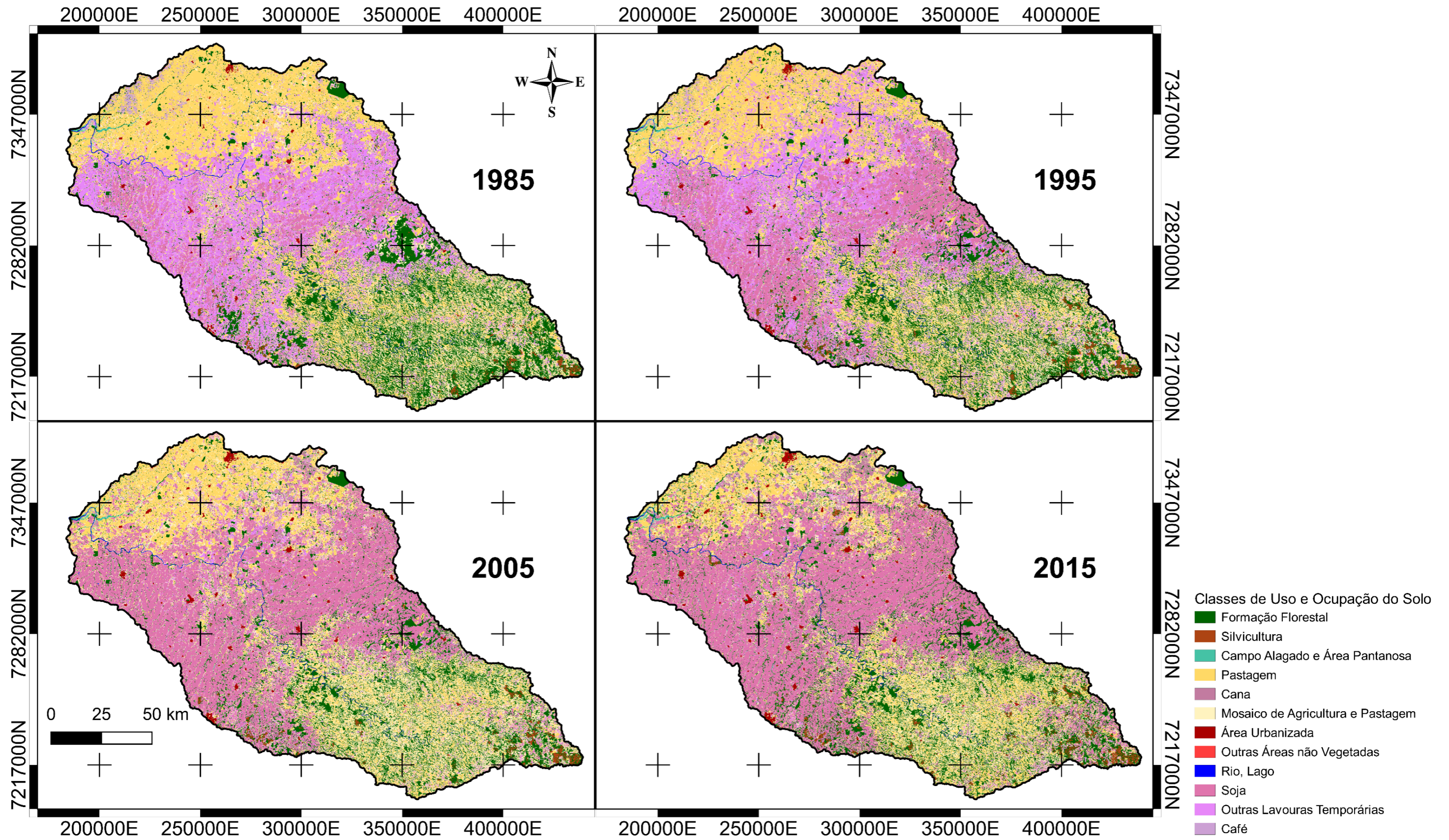
Figura 18 - Variação das áreas ocupadas pelas classes de uso e ocupação do solo na BH Piquiri entre 1985 e 2015



FONTE: Adaptado de MAPBIOMAS (2019)

Na contramão da redução, áreas de produção de soja superaram 380% de aumento, chegando a cerca de 930 mil hectares, se tornando o único dos usos do solo com área acima de 400 mil hectares a se manter em crescimento entre 1985 e 2015, conforme demonstrado na Figura 18.

Figura 19 - Carta de uso e ocupação do solo entre os anos 1985 e 2015

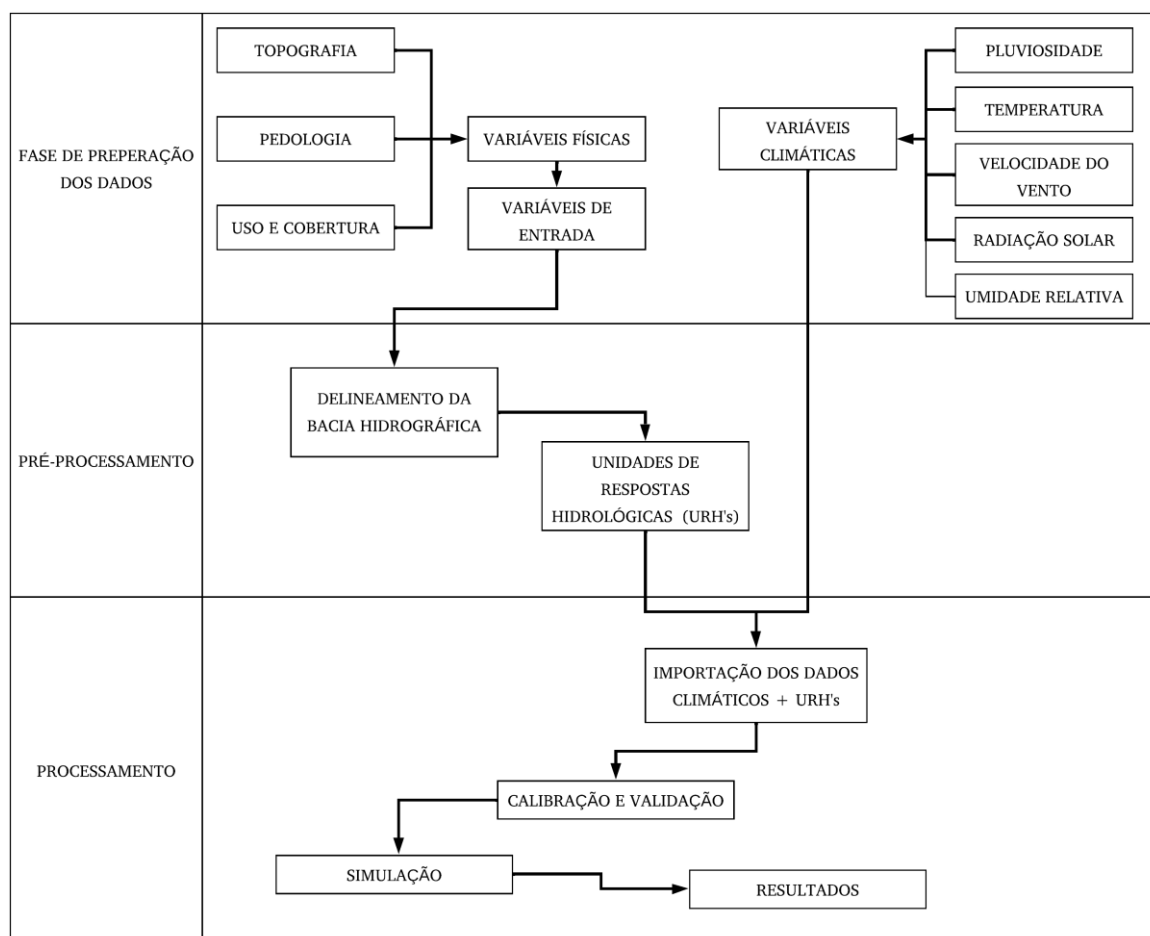


FONTE: Adaptado de MAPBIOMAS (2019).

3.2 Fases da modelagem

Para elaboração do modelo SWAT da BH Piquiri foram seguidas as etapas conforme apresentadas na Figura 20. Essas etapas visam estruturar e organizar o desenvolvimento do projeto e são requeridas pelo SWAT para se construir o modelo de simulação hidrológica (NEITSCH *et al.*, 2009).

Figura 20 - Fluxograma de processos para elaboração do modelo SWAT



FONTE: Autoria Própria (2022)

3.2.1 Preparação dos dados

A fase inicial foi de obtenção e adequação dos dados para os padrões predefinidos pelo SWAT. Os dados foram divididos em dois tipos: variáveis físicas (pedologia, topografia e uso e ocupação do solo); e variáveis climáticas (pluviosidade, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar) com valores diários (NEITSCH *et al.*, 2009).

3.2.1.1 Variáveis físicas

Foram utilizados dados altimétricos Copernicus DEM fornecidos pela The European Space Agency (2021), cujo pixel possui resolução espacial de 30 m. Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) representam um conjunto matricial de dados numéricos que correspondem a um valor de altitude em relação a um ponto georretificado, baseada em áreas ou pontos em grades retangulares de formato raster (CASTRO *et al.*, 2015; GUTH *et al.*, 2021). O MDE foi utilizado para delimitar os fluxos de água e conseqüentemente a área da bacia e sub-bacias, e é feito por meio de um procedimento automático (ADAMI *et al.*, 2011).

Os dados de tipos de solos foram adaptados da base de dados da EMBRAPA, o SiBCS, que é o sistema taxonômico oficial de classificação dos solos do Brasil, que contém dados amostrados em campo que descrevem as características geoquímicas necessárias para desenvolvimento do modelo (SANTOS *et al.*, 2018). Os dados do SiBiCS fornecem valores de composição granulométrica do solo com valores de argila, silte e areia, além de valores de carbono orgânico e rochas. Esses valores servem de dados de entrada na planilha de cálculo de pedotransferência desenvolvida por Balaji Narasimhan e Dhanesh Y utilizando cálculos desenvolvidos por Saxton e Rawls (2006). Como resultado são obtidos dados de propriedades hidráulicas do solo, albedo e o fator K da equação de perda de solo (USLE).

Os dados de uso e ocupação do solo foram obtidos junto ao MAPBIOMAS, que é atualmente a maior referencial nacional em classificação de uso e ocupação da terra, seus produtos são do tipo matricial e possuem pixel com resolução espacial de 30 m (MAPBIOMAS, 2022). A classificação das imagens de satélite é feita pelo método de aprendizado de máquina *Random Forest* e processada em nuvem na plataforma *Google Earth Engine* através de amostras fornecidas a partir de imagens de satélite da série Landsat (MAPBIOMAS, 2022). A partir da série histórica fornecida pelo MAPBIOMAS foi selecionado o dado para o ano de 2010 referente ao uso e ocupação da terra na BH Piquiri.

3.2.1.2 Variáveis climáticas

As variáveis climáticas necessárias ao modelo SWAT são a pluviosidade, radiação solar, intensidade dos ventos, temperatura e umidade relativa. Estes dados foram fornecidos de forma diária ao software após a determinação dos limites da bacia

e das URHs, pois é sobre as URHs que eles serão aplicados (ARNOLD *et al.*, 2012a; NEITSCH *et al.*, 2009).

Os dados diários no período de 2000 a 2011 de precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa e intensidade dos ventos foram obtidos junto ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IDR-PARANÁ (2022), os dados de radiação solar foram retirados do banco de dados do *CFSR Global Weather Data for SWAT 1979-2014*¹ (SAHA *et al.*, 2014). Os intervalos escolhidos são referentes ao intervalo de tempo nos quais foram observados os maiores períodos de dados ininterruptos ou com menores falhas dentre os fornecidos pelo IDR-PR.

3.2.2 Pré-processamento

Nesta etapa, os dados foram pré-tratados de modo a torná-los adequados às formas de entrada exigidas pelo SWAT+. Os dados climáticos foram tabulados e analisados gerando uma estatística mensal de cada variável climática para cada estação.

Após a obtenção do Modelo Digital de Elevação e do ponto exutório, por meio de técnicas de geoprocessamento foi possível determinar a direção do fluxo de água pela superfície e assim delimitar uma bacia e suas subunidades (FAN *et al.*, 2013).

Baseado em parâmetros matemáticos aplicados sobre o MDE e os demais fatores físicos fornecidos por meio do algoritmo do SWAT+ determinam-se as áreas de contribuição para o escoamento em cada trecho da bacia e associa a uma drenagem, delimitando as URHs (MARTINS *et al.*, 2020; SARTORI; NETO; GENOVEZ, 2005). É sobre as URHs que por meio do modelo se aplica os dados climáticos para determinar todos os fluxos do ciclo hidrológico na BH Piquiri e assim determinar a vazão no ponto exutório.

3.2.3 Processamento

Na etapa final, ou etapa de processamento, os dados físicos e climáticos foram modelados gerando um modelo de vazão para à área de estudo. Por meio do modelo gerou-se dados de vazão mensal para o período de 01/01/2003 a 31/12/2006 (calibração) e 01/01/2007 a 31/12/2011 (validação). O período compreendido entre 2000 e 2002 serviu de warm-up ou aquecimento do modelo, período que o algoritmo

¹ Disponível em: <https://swat.tamu.edu/data/cfsr>

leva para estabilizar valores de cada compartimento de água existente em uma bacia hidrográfica (aquíferos, zonas úmidas, umidade do solo, entre outros).

Na etapa de calibração e validação os dados de vazão então gerados foram avaliados por métodos estatísticos, como o índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe e PBIAS (Percent BIAS), Equações 6 e 7, visando avaliar a qualidade dos dados gerados como parte do processo de calibração comum a todos os modelos hidrológicos (MORIASI *et al.*, 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{med,obs})^2} \quad 6$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{obs}} \times 100 \quad 7$$

Nas equações:

NSE: Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe;

PBIAS: Percentual de Tendências;

Q_i^{obs} : vazão observada ($m^3 s^{-1}$);

Q_i^{sim} : vazão simulada ($m^3 s^{-1}$);

$Q^{med,obs}$: vazão média observada ($m^3 s^{-1}$).

Moriasi *et al.* (2007) propôs intervalos de valores para os índices NSE e PBIAS como forma de classificar o desempenho de calibração e validação dos resultados das simulações em SWAT, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificações gerais de desempenho para estatísticas recomendadas para uma etapa de tempo mensal

Avaliação de Desempenho	NSE	PBIAS
Muito Bom	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 < PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 < PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi *et al.* (2007)

Como parte do processo de calibração destes dados gerados para adequá-los a realidade da área de estudo, a análise de sensibilidade dos parâmetros que

compõem o modelo hidrológico é o primeiro passo na identificação dos ajustes cabíveis. Para chegar a uma lista inicial de parâmetros (Tabela 2) a serem calibrados foram feitas buscas na literatura a fim de identificar os parâmetros mais recomendados e amplamente utilizados, bem como sugestões de possíveis limites e formas de calibração, sendo utilizados os autores Almeida, Aguiar Netto (2022); Blainski, Acosta, Nogueira (2017); Bressiani (2016); Brighenti, Bonumá, Chaffe (2016); Bueno *et al.* (2017); Castro (2013); Fujita (2018); Maraslis (2022); Martins *et al.* (2020, 2021); Viana *et al.* (2018).

Tabela 2 – Descrição dos parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT+

Parâmetros	Descrição
ALPHA	Fator de resposta às variações na recarga do aquífero (dias)
AWC	Capacidade de água disponível da camada de solo (mm H ₂ O mm ⁻¹ solo)
CANMX	Armazenamento máximo do dossel (mm H ₂ O)
CHK	Condutividade inferior do canal lte (mm dia ⁻¹)
CHN	Valor "N" de Manning para o canal principal
CN2	Número da curva SCS para condição de umidade II
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
GWFLOW	Fluxo inicial do aquífero raso (mm)
K	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
LAT_LEN	Comprimento da inclinação para fluxo lateral de subsuperfície (m)
MSK_CO1	Coefficiente de calibração usado para controlar o impacto da constante de tempo de Armazenamento (Km) para fluxo normal
MSK_CO2	Coefficiente de calibração usado para controlar o impacto da constante de tempo de armazenamento (Km) para baixo fluxo
PERCO	Coefficiente de percolação - ajusta a umidade do solo para que a percolação ocorra
REVAP_CO	Coefficiente de recapitulação da evapotranspiração do aquífero raso
REVAP_MIN	Profundidade limite da água no aquífero raso para que ocorra "revap" ou percolação para o aquífero profundo (mm H ₂ O).
SURLAG	Coefficiente de atraso de escoamento superficial
WD_RTO	Relação largura-profundidade

Fonte: USDA-ARS e TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH (2020)

Após selecionar os parâmetros deu-se início a análise de sensibilidade feita por meio de análise estatística utilizando o R-SWAT. Como forma de determinar os limites para os parâmetros selecionados são disponibilizadas três formas de inserção dos valores. O primeiro deles é a Substituição (Replace), o usuário indica um valor que substitui os valores existentes; o segundo é a Mudança Absoluta (Absolute

Change) na qual o usuário indica um valor e este é somado e/ou subtraído dos valores previamente existente; o terceiro método de substituição é a Mudança Relativa (Relative Change), no qual o valor indicado pelo usuário é utilizado para um cálculo de variação percentual, ou seja, é feita uma soma e/ou subtração percentual do valor previamente existente. Neste software foi feita a análise de sensibilidade dos parâmetros e a determinação dos valores mais adequados para que o produto da simulação se aproxime dos valores de vazão observados na bacia.

Para isso, optou-se pela análise estatística de Amostragem de Hipercubo Latino Uniforme (Uniform Latin Hypercube Sampling), que é uma técnica de amostragem por meio de sorteios aleatórios visando selecionar um conjunto de dados representativos em um espaço amostral multidimensional. De forma simplificada, a amostragem por Hipercubo Latino segmenta conjuntos de dados multidimensionais em segmentos simplificados, e, dentro desses segmentos simplificados, é extraído um conjunto de amostras únicas utilizados para avaliações estatísticas, análises de sensibilidade e otimização de parâmetros (HELTON; DAVIS, 2003; IMAN, 2008; STEIN, 1987)

No total foram feitas 10 tentativas de calibração variando os limites mínimos e máximos dos parâmetros, foram utilizadas interações variando entre 200 e 500 por tentativa.

Após as calibrações foram gerados dados estatísticos da influência sobre os resultados e dados descritivos do comportamento de cada parâmetro testado, bem como uma simulação de vazão que variava dentro dos limites testados. Após a simulação foi gerado um intervalo para o NSE, neste intervalo existem diversos cenários de comportamento dos parâmetros acarretando diferentes vazões resultantes do pior ao melhor índice produzido pelos limites testados.

Por meio da avaliação gráfica e dos índices NSE e PBIAS para a vazão determinou-se a simulação que continha os melhores resultados além dos parâmetros mais sensíveis, bem como seus limites mais adequados.

4 RESULTADOS

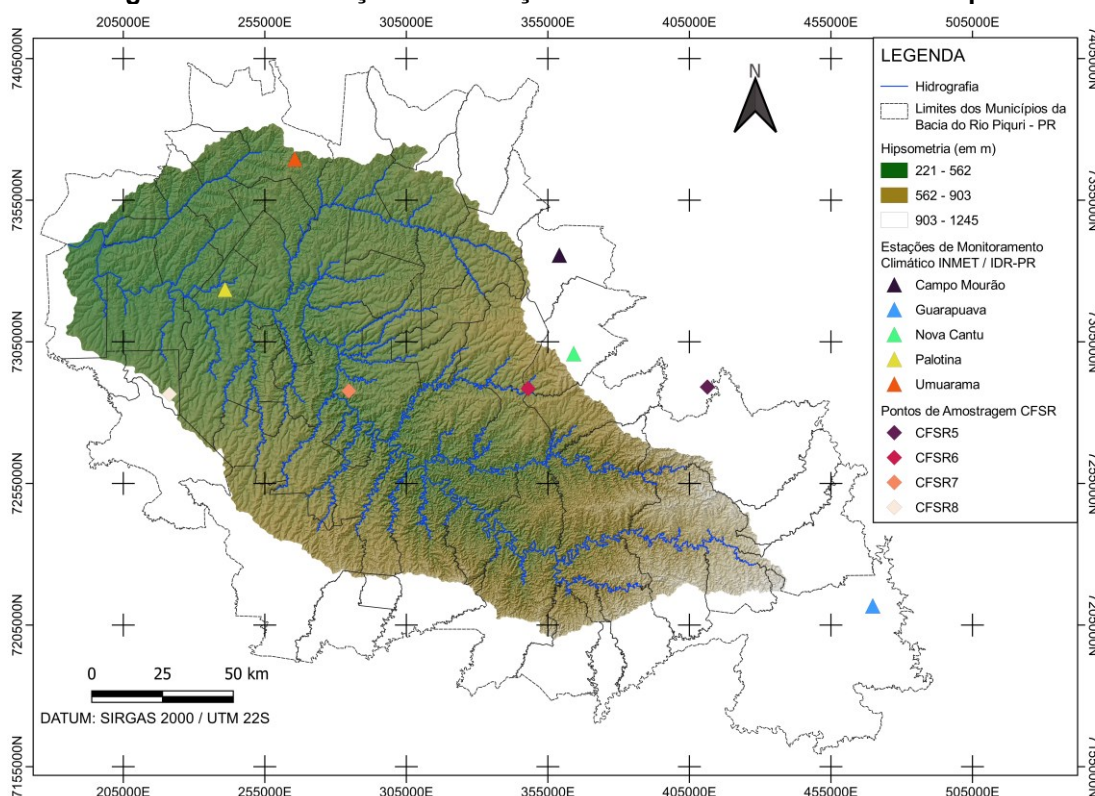
4.1 Caracterização dos dados climáticos

Para desenvolvimento de simulação utilizando SWAT+ foram necessárias informações climáticas referentes a: precipitação, temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade dos ventos e radiação solar (CHEN *et al.*, 2020; SIRISENA; MASKEY; RANASINGHE, 2020).

A região apesar de contar com diversas estações pluviométricas, apresenta um problema, poucas estações possuem longas séries de dados ininterruptas. Consoante o banco de dados do IDR-PARANÁ (2022) e INMET (2023), nas imediações da bacia do Rio Piquiri existem 23 estações, destas, 10 não apresentam qualquer dado, das 13 restantes apenas 5 possuíam dados com mais de 10 anos com poucas e/ou sem falhas.

Além disso, as estações existentes são divididas em 2 tipos: convencionais, compostas de equipamentos analógicos que necessitam de observação humana para registro dos dados, e as automáticas, que possuem equipamentos digitais autônomos de aquisição de dados (WMO, 2018). As estações automáticas são mais recentes e começaram a registrar dados na região de estudo após 2006, com grande maioria contendo dados após 2010. Devidos às limitações previamente citadas é que foram escolhidas as estações apresentadas na Figura 21.

Figura 21 – Localização das Estações Climáticas na Bacia do Rio Piquiri - PR

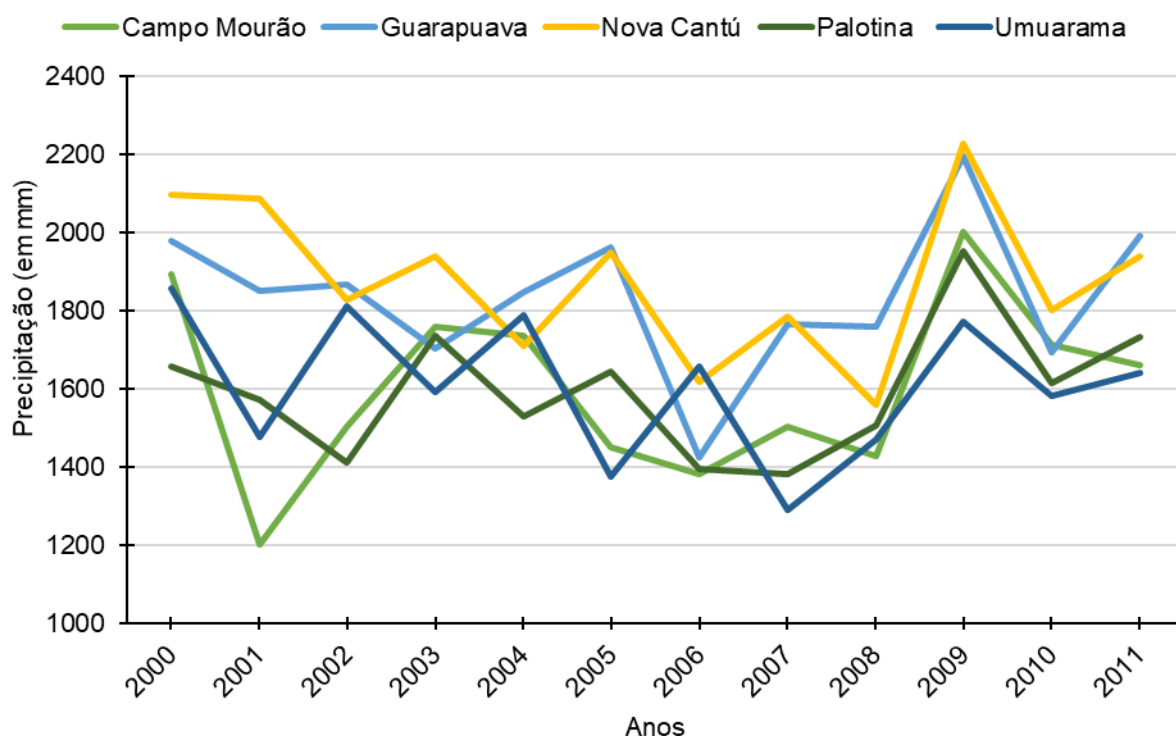


Fonte: Autoria Própria (2023)

A disponibilidade limitada de dados é um obstáculo no desenvolvimento de um modelo hidrológico, particularmente o SWAT. Fujita (2018) demonstrou que um número insuficiente de estações de monitoramento climático pode comprometer negativamente os resultados da simulação. Para contornar a falta de dados de radiação solar nas estações locais, foram utilizadas de forma complementar os dados do CFSR - *Climate Forecast System Reanalysis* fornecidos pelo THE NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION (NCEP, 2014).

As estações selecionadas apresentadas na Figura 21, apresentavam o máximo de informações necessárias para o desenvolvimento do modelo hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Piquiri com o menor número de dados perdidos dentre as analisadas. A Figura 22 demonstra o comportamento da precipitação nas estações utilizadas e a tendência entre 01/01/2000 e 31/12/2011.

Figura 22 – Precipitação anual das estações entre 2000 e 2011



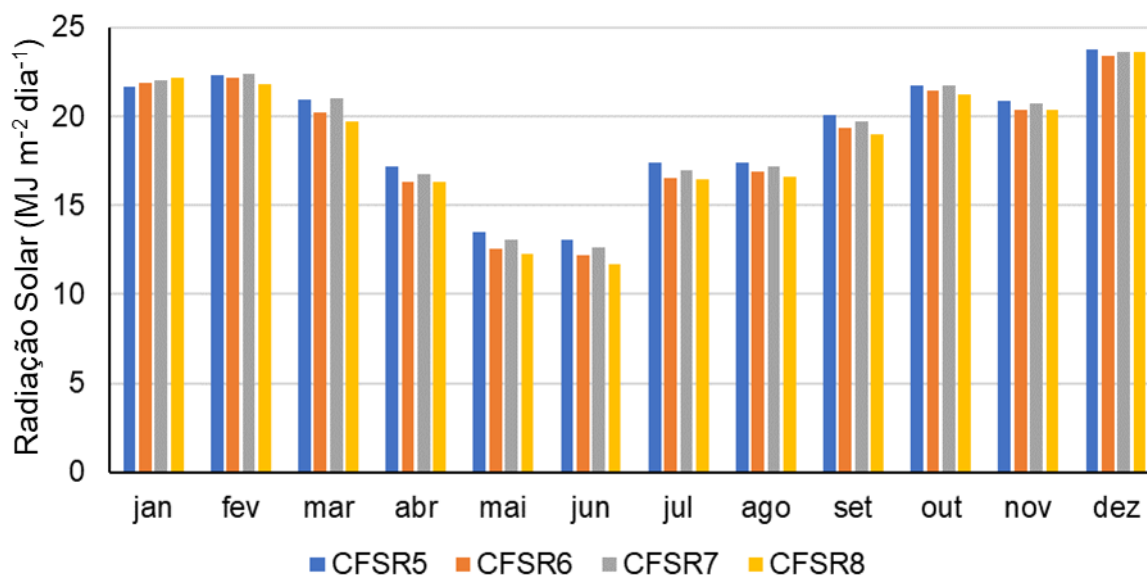
Fonte: IDR-PARANÁ (2022)

Foi possível notar que as estações de Campo Mourão e Guarapuava apresentaram picos pluviométricos menores que as demais, com precipitação máxima não chegando aos 400 mm. Enquanto isso, as estações de Nova Cantú, Palotina e Umuarama apresentaram picos de precipitação de 600 mm, 500 mm e 500 mm respectivamente.

As estações localizadas em municípios do centro-norte da bacia do Rio Piquiri apresentaram precipitação média mensal no período de 133 mm para Campo Mourão, 132 mm para Palotina e 134 mm para Umuarama, já as estações do centro-leste da bacia apresentaram precipitação média de 153 mm para Guarapuava e 156 mm para Nova Cantú o que é corroborado pelo estudo de Pires (2018) no qual o autor demonstrou que a precipitação segue um gradiente decrescente do sudeste para o noroeste. A precipitação fornecida pelo CFSR não foi adotada tendo em vista que os valores apresentados divergiam dos dados coletados por estações de monitoramento locais.

Os dados de radiação solar necessários foram extraídos do banco de dados do CFSR. A média de radiação solar para os meses do ano ao longo do período foram representadas na Figura 23 (SAHA *et al.*, 2014).

Figura 23 – Radiação solar média dos pontos de amostragem CFSR



Fonte: NCEP (2014)

O comportamento dos dados disponibilizados pelo NCEP e apresentados na Figura 23 são corroborados pelo estudo de Tiepolo *et al.* (2018). No estudo, o autor e seus colaboradores apresentam a variação sazonal e mensal da radiação solar no estado do Paraná, demonstrando que os meses de outubro a março apresentam as médias de radiação solar variando entre 20 e 25 MJ m⁻² e os meses de maio e junho variam entre 10 e 15 MJ m⁻², valores que se aproximam dos disponíveis no banco de dados do CFSR reforçando a qualidade destes dados. Os dados de radiação solar fornecidos pelo CFSR se mostraram bastante adequado, conforme demonstrado no estudo de Bressiani *et al.* (2015a). Neste mesmo estudo ficou evidenciado que os dados de precipitação não são adequados e condizentes com a realidade local, sendo este o motivo da adoção apenas do dados de radiação solar neste estudo.

As demais variáveis climáticas: temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar e velocidade do vento, bem como seu comportamento ao longo do período de estudo, são apresentados no Apêndice A. Dentre as variáveis citadas, apenas a velocidade do vento foi considerada inexistente em duas estações, Nova Cantú e Umuarama, tendo em vista que os valores disponíveis apresentavam características de mau funcionamento do equipamento. Além disso, a estação de Campo Mourão apresentou dois pequenos intervalos sem dados para temperatura e velocidade do vento. Todas as séries de dados ausentes foram substituídas por -99, que indica ao algoritmo a falta de dados e a necessidade de estimá-los.

O SWAT+ necessita de dados climáticos diários para elaboração dos modelos hidrológicos. Mas também se faz necessário tabulá-los de forma mensal, gerando uma análise estatística inicial conforme demonstrado na Tabela 3. Os dados das demais estações constam no Apêndice B.

Tabela 3 – Tabulação dos dados climáticos de entrada do SWAT para estação Campo Mourão

Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Max tmp (°C)	24,5	17,9	19,1	27,4	22,7	22,6	21,8	25,2	25,8	28,5	29,1	28,5
Min tmp (°C)	18,6	18,1	17,8	15,4	11,9	11,3	10,5	11,5	12,3	16,1	17,1	16,3
Max tmp std (°C)	2,32	2,26	2,38	3,05	3,5	3,82	4,18	4,6	4,79	3,43	3,04	2,63
Min tmp std (°C)	1,9	1,82	2,14	2,76	3,79	3,9	4,11	3,7	3,84	2,56	2,61	2,38
Pcp avg (mm)	209,2	170,2	119,2	99,6	119,9	75,6	105,5	89,2	117,5	175,2	174,5	147
Pcp std (mm)	13,1	12,83	8,86	10,35	10,92	7,91	9,6	9,2	10,1	13,2	13,4	11,2
Pcp skew (mm)	2,6	3,38	3	4,96	3,74	5,13	3,92	4,48	3,72	4,26	3,13	4,01
Prob. dry (dia)	0,28	0,31	0,24	0,2	0,18	0,12	0,15	0,13	0,17	0,27	0,29	0,24
Prob. wet (dia)	0,61	0,57	0,48	0,4	0,52	0,49	0,51	0,54	0,51	0,5	0,39	0,53
Pcp days (dia)	13	11,75	10,25	7,33	7,92	6,17	7,25	6,75	8,25	10,17	9,83	10,75
Max rainfall (mm)	54	60	30,6	61,8	44,4	48	41,4	44,4	45,6	82,8	60,6	60,6
Slr (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
Dew (°C)	21,8	22,22	20,94	19,21	18,01	17,29	16,84	18,33	18,77	18,6	19,34	20,55
Wnd (m s ⁻¹)	2,55	2,50	2,72	2,69	2,51	2,33	2,55	2,64	3,09	2,97	2,96	2,68

Fonte: Autoria Própria (2023)

Onde:

- Max tmp – média da temperatura máxima mensal;
- Min tmp – média temperatura mínima mensal;
- Max tmp std – desvio padrão da temperatura máxima mensal;
- Min tmp std – desvio padrão da temperatura mínima mensal;
- Pcp avg – precipitação média mensal;
- Pcp std – desvio padrão da precipitação mensal;
- Pcp skew – coeficiente de assimetria da precipitação mensal;
- Prob dry – probabilidade de um dia seco após um de chuva
- Prob wet – probabilidade de um dia chuvoso após um dia de chuva;
- Pcp days – média do número de dias de chuva no mês;
- Max rainfall – volume máximo de chuva em meia hora para o mês;
- Slr – radiação solar média mensal;
- Dew – temperatura do ponto do orvalho;
- Wnd – velocidade do vento a 10 metros de altura.

4.2 Caracterização da área modelada e obtenção das URH's

A bacia hidrográfica do Rio Piquiri conta com 14 estações de monitoramento da vazão, das quais 8 estão localizadas na calha do rio Piquiri conforme demonstrado na Tabela 4.

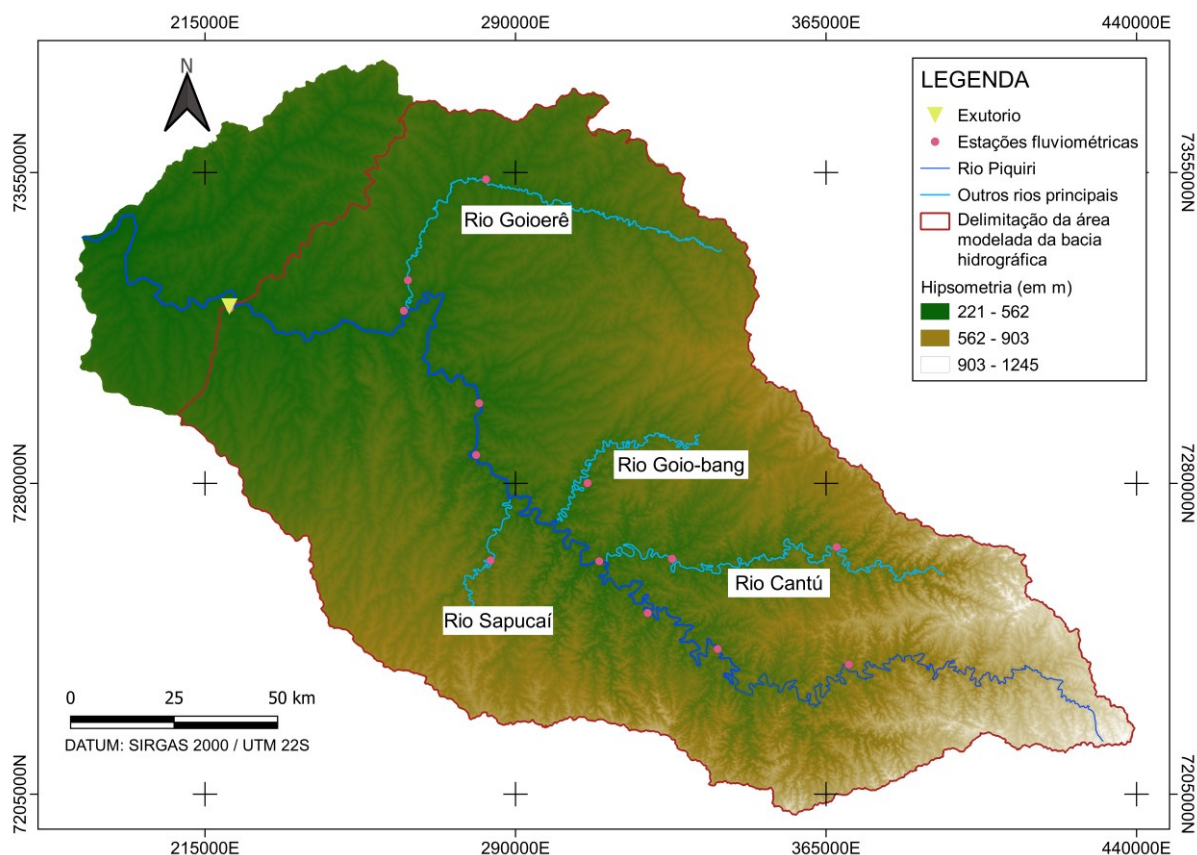
Tabela 4 – Estações fluviométricas da bacia do rio Piquiri

Código	Nome	Latitude	Longitude	Rio
64810000	Balsa do Goio Erê	-53° 07' 59"	-23° 55' 00"	Goio Erê
64815000	Fazenda Uberaba	-53° 19' 00"	-24° 07' 59"	Goio Erê
64830000	Balsa Santa Maria	-53° 44' 46"	-24° 11' 17"	Piquiri
64820000	Porto Formosa	-53° 19' 59"	-24° 12' 00"	Piquiri
64799500	Novo Porto 2	-53° 09' 27"	-24° 24' 15"	Piquiri
64795000	Ponte do Piquiri	-53° 10' 00"	-24° 31' 00"	Piquiri
64785000	Ponte do Goio-Bang	-52° 54' 07"	-24° 34' 53"	Goio-bang
64773000	Ponte Leoncio Primo	-52° 18' 34"	-24° 43' 37"	Cantú
64790000	Salto Sapucaí	-53° 08' 10"	-24° 44' 48"	Sapucaí
64775000	Balsa do Cantú	-52° 42' 10"	-24° 44' 55"	Cantú
64776100	Foz do Cantú	-52° 52' 36"	-24° 45' 07"	Piquiri
64771500	Porto Guarani	-52° 45' 46"	-24° 51' 58"	Piquiri
64767000	Porto Carriel	-52° 35' 47"	-24° 56' 48"	Piquiri
64764000	Guampará	-52° 16' 59"	-24° 58' 59"	Piquiri

Fonte: IDR-PARANÁ (2022)

Tendo em vista que a estação Balsa Santa Maria era a última localizada na calha do Rio Piquiri, esta estação foi definida como o exutório da bacia durante a modelagem. Desta forma, a área da BH Piquiri que foi modelada é apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Delimitação da BH Piquiri para modelagem e suas respectivas estações fluviométricas



Fonte: Autoria Própria (2023)

Da área total apresentada na Figura 24, 24,7 mil km², cerca de 20,9 mil km² foram utilizados durante a modelagem. A partir da área delimitada, por meio do SWAT+ se calcula parâmetros como área, declividade e elevação para cada sub-bacia para que, ao associá-los aos dados de uso e ocupação e tipos de solos, possa definir as URH's.

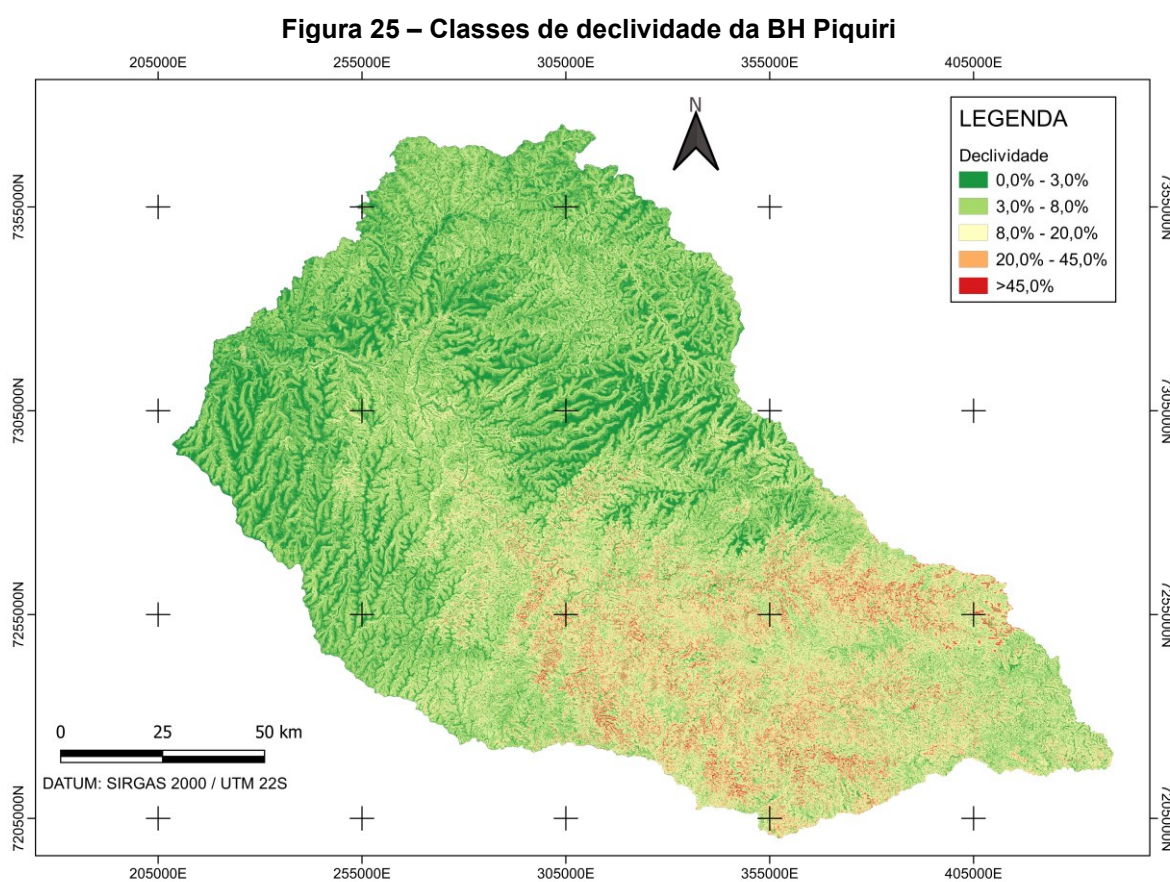
Como parte das exigências do modelo SWAT+ de indicar os níveis de declividade, a bacia hidrográfica delimitada foi seccionada em 5 níveis, adaptados de EMBRAPA (2018), conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de declividade e área que ocupam na bacia hidrográfica do Rio Piquiri - PR

Declividade (%)	Relevo	Área (km ²)	%
0 - 3	Plano	1091,345	5
3 - 8	Suave-ondulado	7038,516	34
8 - 20	Ondulado	8721,136	42
20 - 45	Forte-ondulado	3630,529	17
> 45	Montanhoso-escarpado	412,864	2

Fonte: Autoria Própria (2023)

O predomínio de um relevo variando entre plano e ondulado na bacia hidrográfica do rio Piquiri, cerca de 81% da área, reforça a aptidão agrícola da região conforme Figura 25 (EMBRAPA, 2018). Essa menor ondulação ainda contribui para redução na velocidade de escoamento das águas superficiais (GARCIA *et al.*, 2020; VIDALETTI *et al.*, 2021). Os 19% restantes são formados por áreas acidentadas, com alta variação no relevo com perfil montanhoso e escarpado entre o centro e o leste da bacia hidrográfica, onde se encontram a maioria das nascentes (EMBRAPA, 2018; SEMA-PR, 2006).



O uso e ocupação do solo na porção da bacia modelada é caracterizado por grande predomínio de áreas agrícolas, com destaque para área cultivada de soja em rotação com milho (no oeste e norte) e trigo (no sul e sudoeste), que corresponde a mais de 36%, conforme Tabela 6 (SEAB-PR, 2023). Ainda de acordo com dados do Governo do Paraná, outras culturas estão presentes na bacia em menor proporção, que agrupadas alcançam cerca de 29%, por isso foram unificadas em classes como mosaico de agricultura e pastagem e outras lavouras temporárias.

Tabela 6 – Usos e ocupações do solo e sua porção na BH Piquiri relacionadas as classes do SWAT+

Classe MAPBIOMAS	Classe SWAT	Área (km ²)	%
Formação florestal	FRSE	3.558,480	17,01%
Silvicultura	FRSE	222,561	1,06%
Campo alagado e área pantanosa	WETL	3,793	0,02%
Pastagem	PAST	3.091,187	14,77%
Cana de açúcar	SUGC	262,572	1,25%
Mosaico de agricultura e pastagem	PAST	4.229,053	20,21%
Área urbanizada	URML	141,097	0,67%
Áreas não vegetadas	AGRL	6,043	0,03%
Rios e lagos	WATR	75,671	0,36%
Soja	SOYB	7.599,795	36,32%
Outras lavouras temporárias	AGRL	1.725,717	8,25%
Café	AGRL	9,450	0,05%

Fonte: Autoria Própria (2023)

O agrupamento dessas culturas em classes é necessário para adequar os dados aos padrões necessários para o funcionamento do SWAT+ de modo a correlacioná-las com as classes pré-existentes no modelo.

Os solos existentes na área de estudo, por sua vez, apresentaram-se divididos em treze classes, conforme demonstrado na Tabela 7, com predomínio de Latossolos (41%), Neossolos (25%) e Nitossolos (21%).

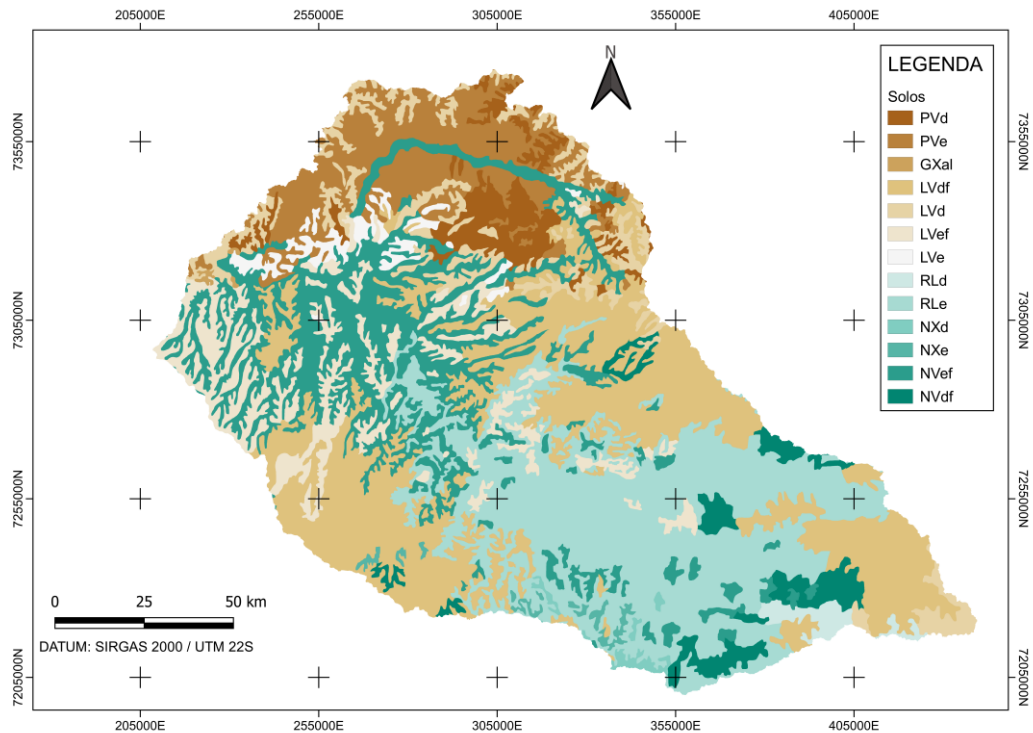
Tabela 7 – Classes de solos existentes na área modelada da bacia hidrográfica do Rio Piquiri e seus grupos hidrológicos

Classes	3º Nível categórico	Área (km ²)	%	Grupo Hidrológico
PVd	ARGISSOLOS VERMELHOS Distróficos	769.93	3.68	B
PVe	ARGISSOLOS VERMELHOS Eutróficos	1845.84	8.82	B
GXal	GLEISSOLOS HÁPLICOS Alíticos	22.99	0.11	D
LVdf	LATOSSOLOS VERMELHOS Distroférricos	5360.78	25.62	A
LVd	LATOSSOLOS VERMELHOS Distróficos	1221.74	5.84	A
LVef	LATOSSOLOS VERMELHOS Eutroférricos	1689.53	8.07	A
LVe	LATOSSOLOS VERMELHOS Eutróficos	371.65	1.78	A
RLd	NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos	190.76	0.91	D
RLe	NEOSSOLOS LITÓLICOS Eutróficos	5021.95	24.00	D
NXd	NITOSSOLOS HÁPLICOS Distróficos	96.28	0.46	B
NXe	NITOSSOLOS HÁPLICOS Eutróficos	119.99	0.57	B
NVef	NITOSSOLOS VERMELHOS Eutroférricos	3523.72	16.84	B
NVdf	NITOSSOLOS VERMELHOS Distroférricos	689.94	3.30	B

Fonte: adaptado de ANA (2018), EMBRAPA (2018) e IAT (2010)

O predomínio dessas classes influencia drasticamente como se comporta a drenagem nesta bacia hidrográfica. Os Latossolos, em geral, são encontrados em áreas de baixa a média declividade e são classificados variando de fortemente a bem drenados, indicando menor escoamento superficial em detrimento a uma maior capacidade de infiltração (Figura 26) (EMBRAPA, 2018).

Figura 26 – Classes de solos predominantes na bacia hidrográfica do rio Piquiri



Fonte: adaptado de EMBRAPA (2018) e IAT (2010a)

Os Neossolos por sua vez são pouco espessos, se apresentam em áreas de relevo com maior declividade e presença de rochas, sendo facilmente erodidos (BONFATTI, 2012).

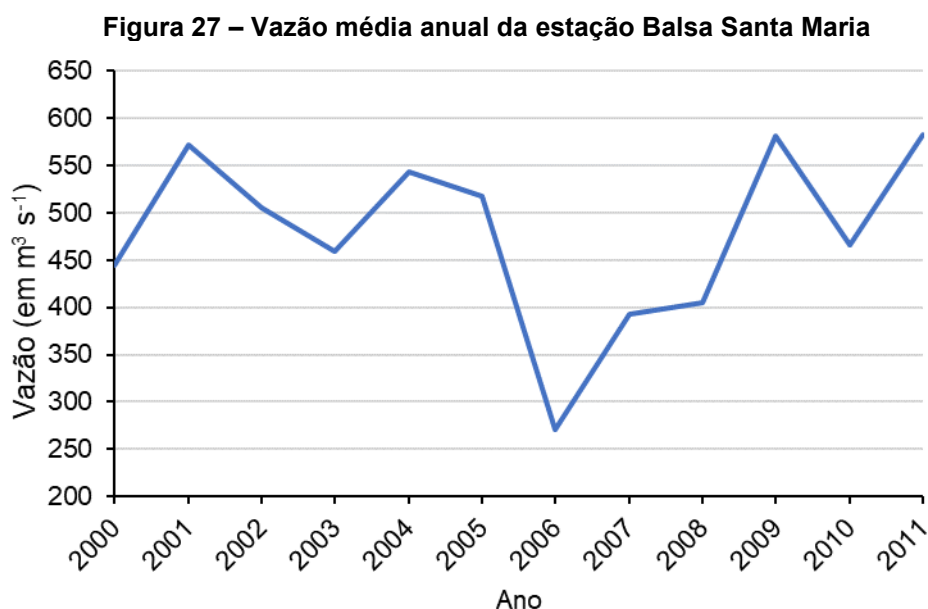
Os dados físicos dos solos da bacia do rio Piquiri foram obtidos junto ao SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA (2018). Porém, este banco de dados não fornece todas as variáveis necessárias para obtenção do modelo SWAT sendo necessário o uso da planilha de determinação de parâmetros desenvolvida por Narasimhan e Y Dhanesh utilizando equações de pedotransferência elaboradas por Saxton e Rawls (2006) para determinação de valores para as variáveis. A caracterização inicial dos solos foi apresentada no Anexo A.

Por meio do algoritmo do SWAT+ foram definidos valores de CN – Curva Número, conforme proposto pelo SCS - *Soil Conservation Service* (HAWKINS *et al.*, 2008).

A partir da composição destes dados de entrada por meio do algoritmo do SWAT+ foi possível gerar as URH's, além dos limites de declividades previamente apresentados na Tabela 5. Foi selecionado o filtro por número de URH's, optando pelo mínimo oferecido pelo software. Desta forma foram geradas 10.828 unidades de respostas hidrológicas, compostas pela combinação de 8 classes de uso e ocupação, 13 classes de solos e 5 classes de declividade agrupadas em 1622 sub-bacias.

4.3 Hidrologia da bacia

A estação fluviométrica Balsa Santa Maria, localizada na área rural do município de Palotina, foi selecionada como exultório da bacia do rio Piquiri. A vazão média anual da bacia é de cerca de $478 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no período de 2000 a 2011, com mínima de $270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2006 e máxima de $582 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2011, conforme Figura 27 IAT (2023).

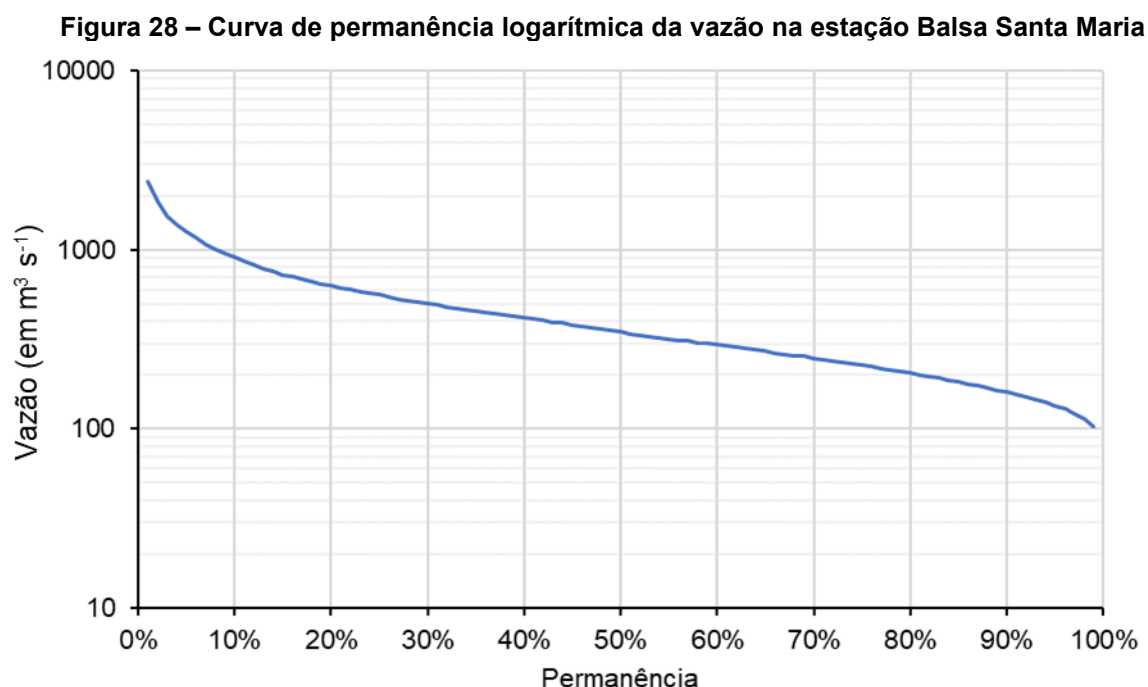


Fonte: Adaptado de IAT (2023)

Os anos de 2007 e 2008 apresentaram vazões de $392 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $405 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, segundo estudo feito por Pires (2018) esse biênio sofreu com condições climáticas anormais, sendo registrado seca por parte do INPE. Porém, analisando o Índice da Anomalia Climática para o ano de 2006 também é possível notar que diversas regiões da bacia

hidrográfica rio Piquiri sofreram com anomalias de chuvas, registrando secas. Esse comportamento pode potencialmente explicar a vazão mínima existente para este ano.

Analisando a curva de permanência de vazão da estação Balsa Santa Rita (Figura 28), pode-se observar que a bacia possui um comportamento pouco verticalizado, isso indica menor variabilidade de vazão ao longo do tempo (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013). O coeficiente de variação anual da vazão entre 2000 e 2011 foi da ordem de 18%, para uma vazão média de $478,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e desvio padrão de $88,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



Fonte: Adaptado de IAT (2023)

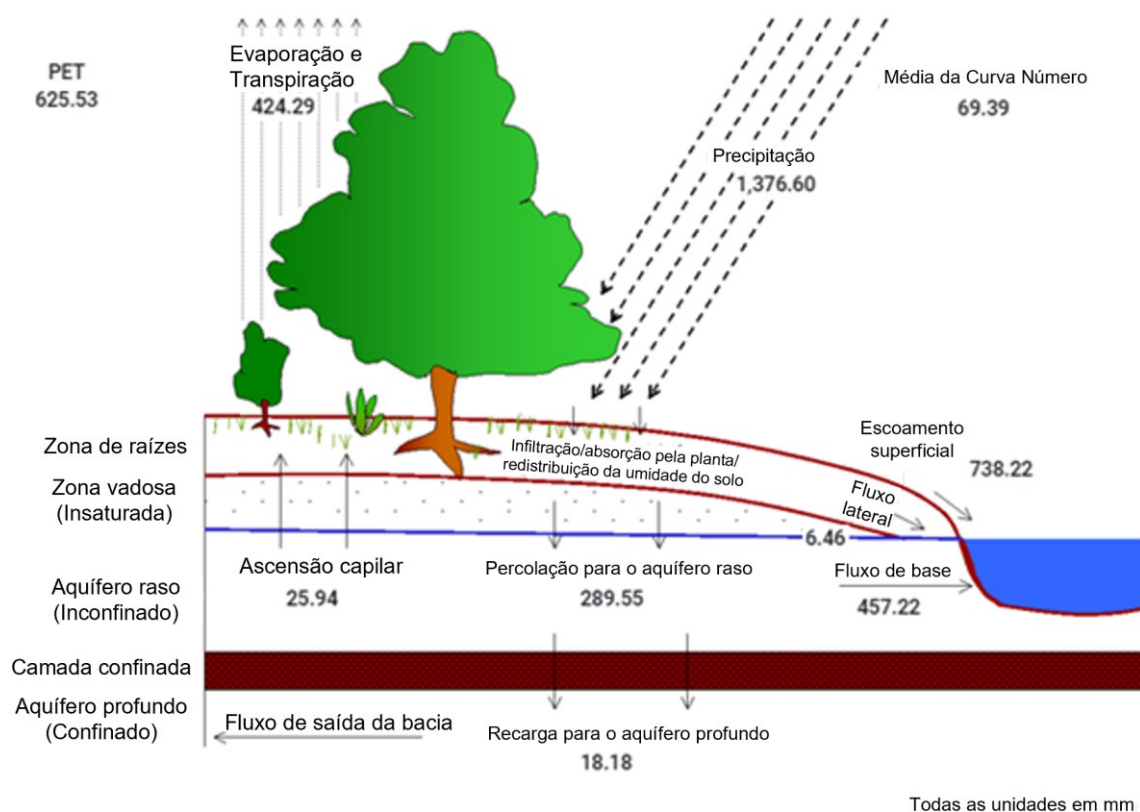
Esse comportamento é fruto em parte da composição pedogeológica da região como demonstrado na Figura 11, Figura 12 e Figura 26. A região possui predomínio de solos argilosos e relativamente profundos associados a rochas basálticas porosas e fraturadas que contribuem para um rápido escoamento superficial e menor disponibilidade de fluxo de base em comparação a regiões com formações mais porosas como Arenito Caiuá ao norte da bacia (ATHAYDE; ATHAYDE, 2016; CELLIGOI, 2000; COLLISCHONN; DORNELLES, 2013; FEITOSA, 2008).

4.4 Análise da simulação do ciclo hidrológico

A simulação hidrológica da bacia do rio Piquiri utilizando dados climáticos diários compreendeu o período entre 01/01/2000 e 31/12/2011, deste intervalo os três anos iniciais foram de warm-up ou preparação do algoritmo.

O SWAT-Check é a ferramenta de visualização das componentes do ciclo hidrológico, permitindo rápida análise das interações existentes na bacia hidrográfica. A Figura 29 demonstra o balanço hídrico anual sem calibração da bacia do rio Piquiri, com resultados dos componentes do balanço hídrico. Já o CN médio da área foi de 69,39, conforme demonstrado na Figura 30a.

Figura 29 – Balanço hídrico simulado pelo SWAT+ para a bacia do rio Piquiri – PR

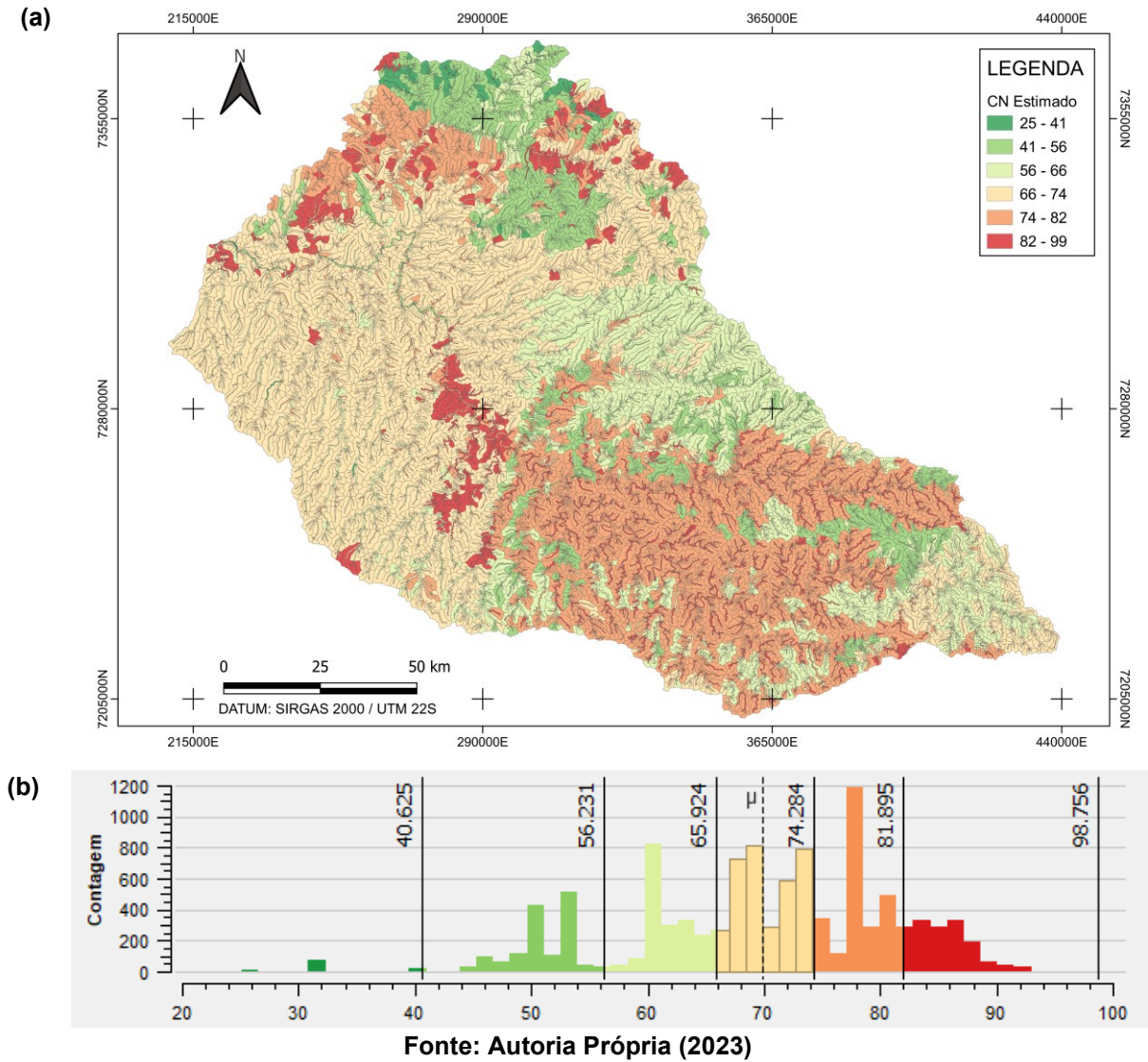


Fonte: Adaptado de SWAT (TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH; USDA-ARS, 2021).

Conforme o histograma apresentado na Figura 30b, pode-se observar o predomínio de classes de CN com valores variando entre 56 e 82. Esse predomínio de classes indica a limitada capacidade de retenção de água pelos solos associados a manejos potencialmente inadequados ao tipo de relevo e geologia da região, em especial nas áreas em laranja (74 a 82) e vermelho (82 a 99) da Figura 30a,

demonstrando potenciais fragilidades ambientais, em especial a geração de erosão e o consequente transporte dessa massa para áreas susceptíveis a acúmulo de sedimentos (GALHARTE; VILLELA; CRESTANA, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Figura 30 – CN estimado (a) para a bacia do rio Piquiri e histograma (b)

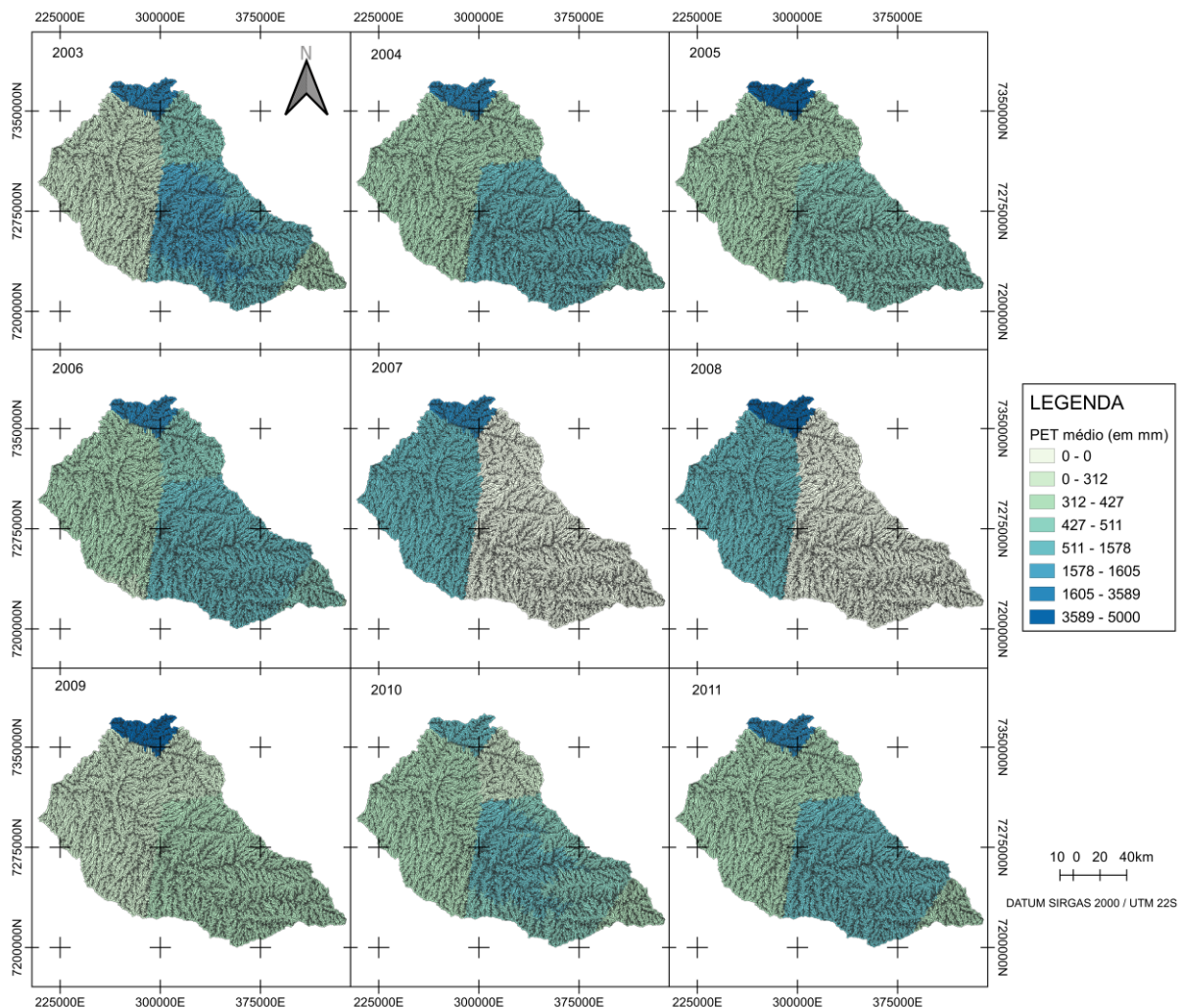


Conforme explicado previamente e demonstrado por Hawkins *et al.* (2008) Rezende, Ribeiro e Mendes (2018) a Curva Número serve como parâmetro para determinação do volume de escoamento superficial e de infiltração, contudo este valor é estimado e não é definitivo, variando com base nas informações fornecidas e nas características de umidade do solo.

Como forma de avaliação inicial destes dados fornecidos pelo SWAT-Check foram feitas algumas análises preliminares.

A evapotranspiração potencial (PET) da área foi estimada, por meio de balanço hídrico simplificado, em 654,34 mm, ou seja, de toda precipitação média anual (1376,60 mm) cerca de 48% são convertidos em evapotranspiração potencial. A simulação estimou uma evapotranspiração potencial cerca de 4% menor que a calculada, 625,53 mm. Quando se observa o comportamento anual (Figura 31), é possível notar como o SWAT estimou de forma espacializada a evapotranspiração potencial média, regionalizando-a. Esse comportamento é fruto das interações físicas entre diferentes tipos de solos, declividade, densidades de drenagem, uso e ocupação do solo demonstradas na Figura 8, Figura 11, Figura 16 e Figura 19.

Figura 31 – Comportamento anual da evapotranspiração potencial da bacia do rio Piquiri simulado pelo SWAT+

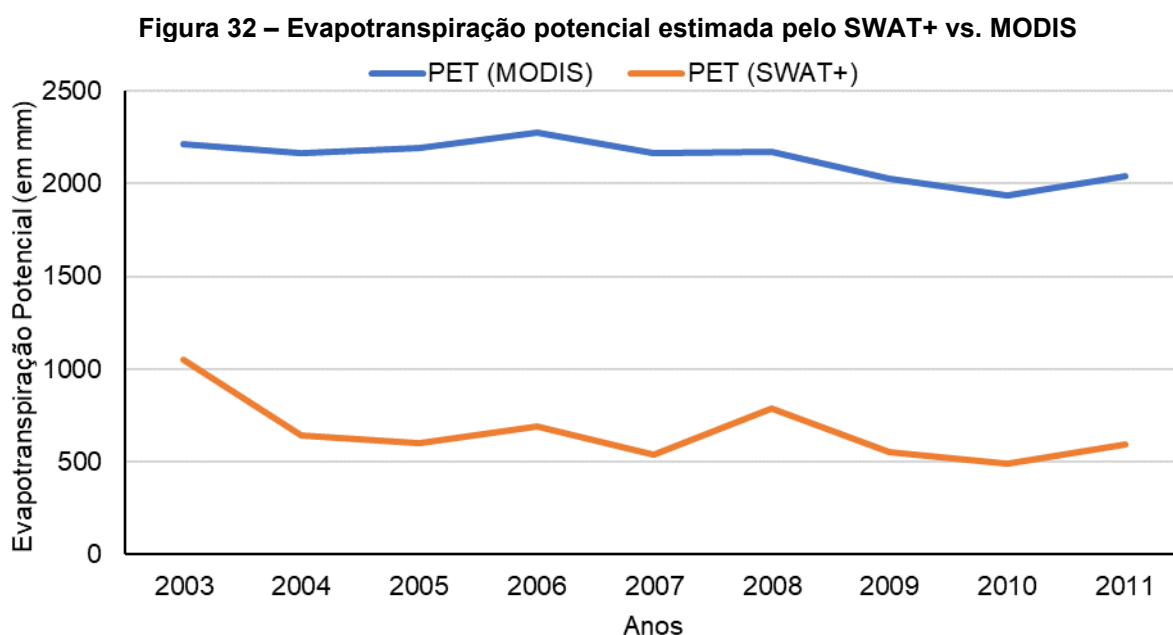


Fonte: Autoria Própria (2023)

Destacaram-se as simulações dos anos de 2007 e 2008 que apresentaram uma redução da evapotranspiração potencial no centro-leste da bacia em relação aos

demaís anos, apresentando um cenário de inversão, pois a região centro-oeste tende a mais seca e nestes dois anos apresentaram as maiores taxas de evapotranspiração potencial. Nestes dois anos, 2007 e 2008, segundo dados do INMET (2023) e Pires (2018) a região centro-leste sofreu com eventos de estiagem, o que justificam tal comportamento.

Quando se compara dados de evapotranspiração fornecidos pelo instrumento MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* - Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada) foi possível notar que os dados coletados por MODIS indicam uma evapotranspiração potencial superior ao simulado, conforme Figura 32. Essa superestimação dos dados de PET do MODIS está associado a falhas de classificação do uso e ocupação do solo, que induz ao na escolha dos parâmetros gerando resultados menos precisos (RUHOFF *et al.*, 2013)

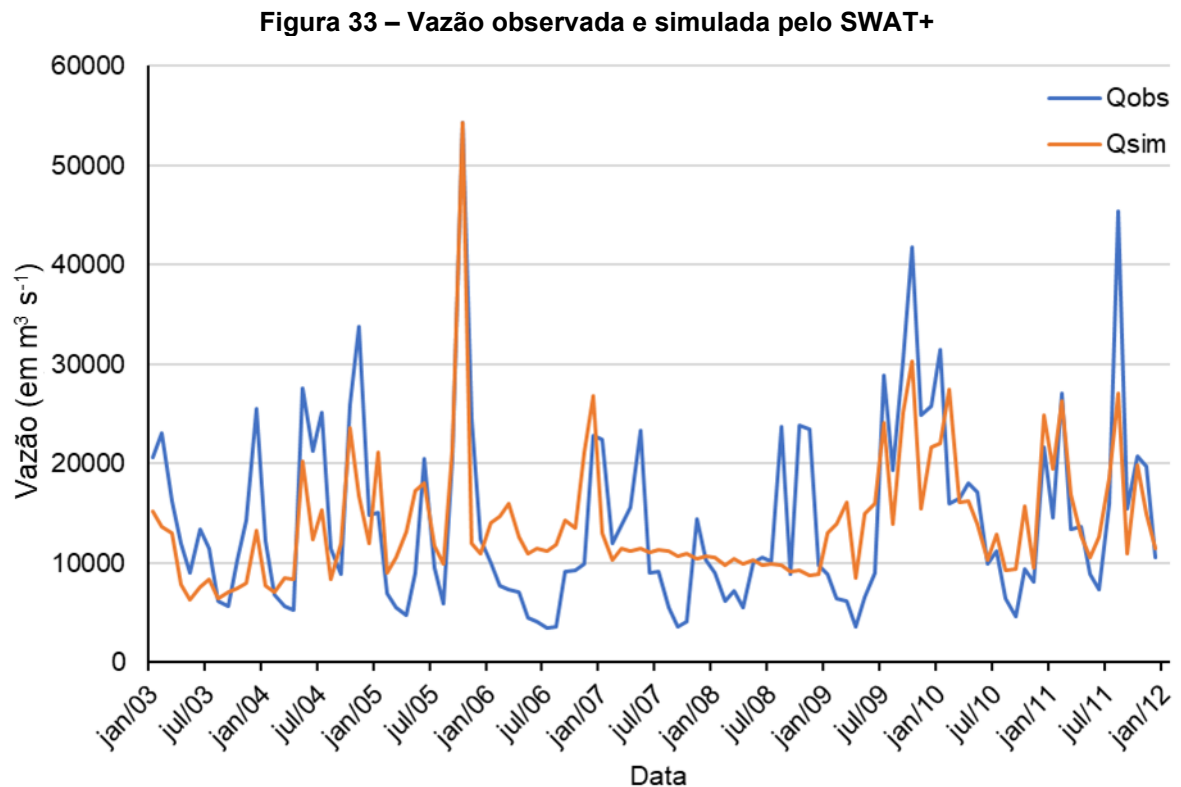


Fonte: adaptado de Running *et al.* (2019)

Não havia dados disponíveis de PET para a região nos bancos de dados utilizados durante a elaboração deste projeto que pudessem servir para comparar os estimados pelo modelo SWAT+ desta bacia hidrográfica e determinar sua confiabilidade.

4.5 Simulação inicial

Como parte inicial do desenvolvimento do modelo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piquiri, foram feitas simulações sem qualquer tipo de ajustes nos parâmetros. A partir dessas simulações foram gerados dados de vazão mensal para o período de 2003 a 2006, conforme Figura 33.



Fonte: Autorial Própria (2023)

Observando a Figura 33, notou-se que o SWAT+ foi capaz de estimar de modo geral o comportamento das vazões mensais ao longo do período para a estação Balsa Santa Maria. Como forma de avaliar o desempenho da simulação mensal neste período foi calculado o Índice Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) para cada ano e para o período de 2003 a 2006, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Índice NSE calculado anualmente e para o período de calibração

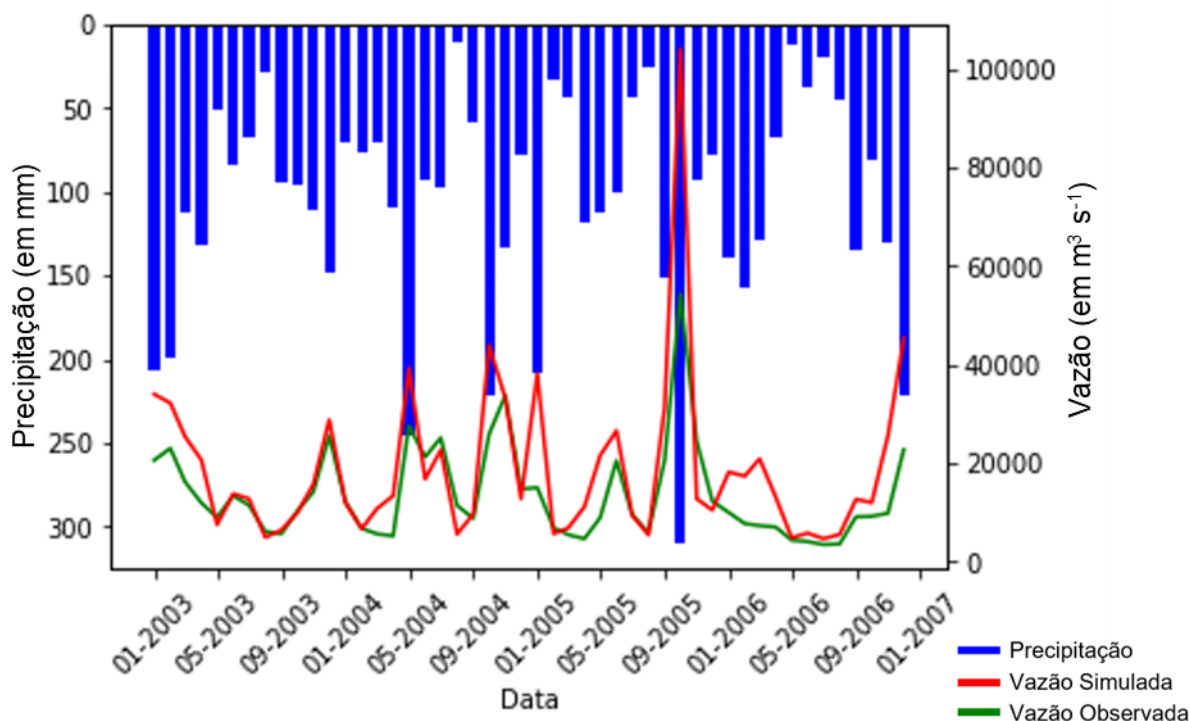
Ano	NSE
2003	0,002
2004	0,411
2005	-0,660
2006	-2,949
2003 a 2006	-0,301

Fonte: Autoria Própria (2023)

De acordo com índice NSE por ano e para o período, pôde-se notar que em nenhum momento a simulação pôde ser considerada satisfatória. Com destaque para 2006 que apresentou o pior índice para entre os anos observados.

Quando se compara os dados de vazão observada e simulada apresentadas na Figura 34 com a precipitação podemos notar que os picos de precipitação geraram picos de vazão observada, porém a estes picos foram superestimados na simulação.

Figura 34 – Hidrograma das precipitações e vazões mensais acumuladas: observações simulações



Fonte: Autoria Própria (2023)

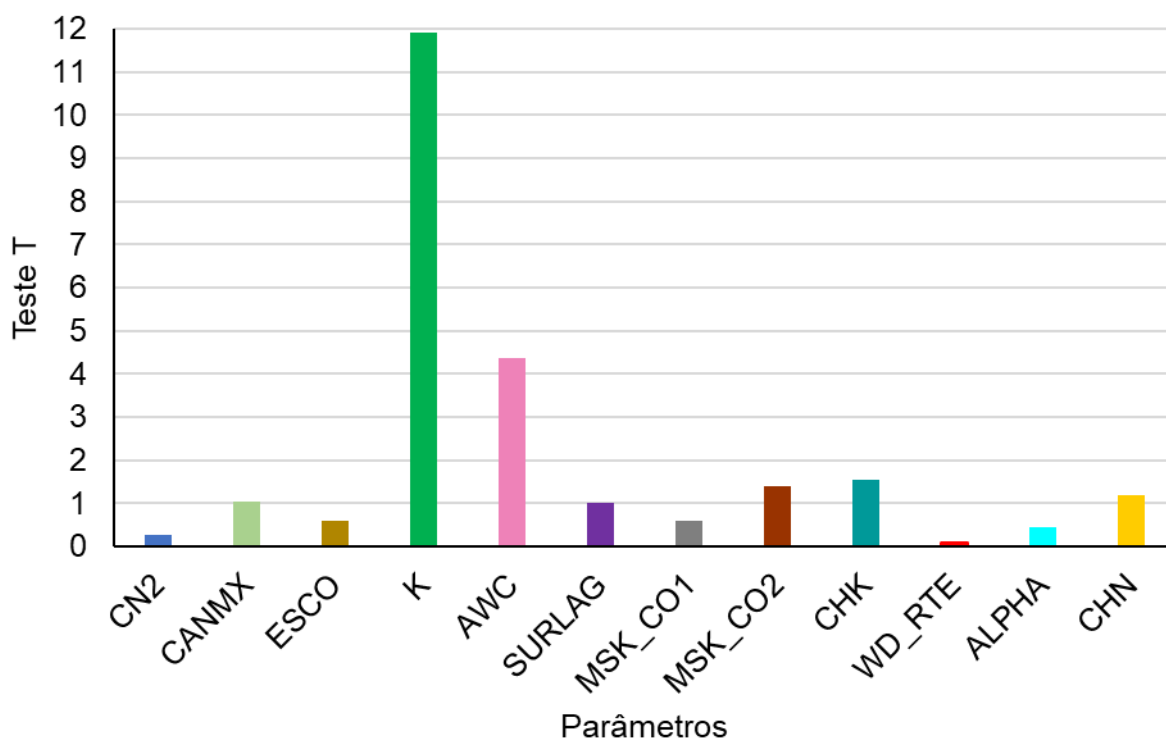
A partir do estudo feito por Correa (2017) para analisar o comportamento das vazões observadas na bacia do rio Piquiri, pode-se demonstrar que as vazões simuladas neste modelo são discrepantes. O estudo de Correa constata que a vazão observada para o ano de 2006 foi de 416 mm, a simulação, porém, indicou vazão de 892 mm, o que explicou a baixa eficiência apresentada pelo NSE deste ano e contribuiu para o baixo índice do período. Essa discrepância não é justificada por fenômenos climáticos, pois Pires (2018) demonstra em suas análises que neste período não foram observados excessos de chuva capazes de quase dobrar a vazão durante a simulação.

4.6 Análise de sensibilidade, calibração e validação

Para dar início a esta etapa foi necessário selecionar os parâmetros que seriam testados para identificar os níveis de sensibilidade. A determinação destes parâmetros foi feita com base em compilados de informações de autores como Arnold *et al.* (2012b), Bressiani (2016) e Castro (2013) que elencaram parâmetros com base em análises próprias e de outros autores.

A análise de sensibilidade dos parâmetros foi realizada pelo R-SWAT, por meio do método de Amostragem do Hipercubo Latino Uniforme (NGUYEN *et al.*, 2022). Os parâmetros mais sensíveis e seus respectivos valores foram demonstrados na Figura 35.

Figura 35 – Parâmetros mais sensíveis testados e seus respectivos níveis de sensibilidade pelo teste t



Fonte: Autoria Própria (2023)

Dentre os parâmetros testados, os que apresentaram maiores sensibilidades foram K e AWC, que respondem pelo fluxo e presença de água no solo, conforme indicado por Villela (2015), CHK, CHN e MSK_CO2, que correspondem a condutividade hidráulica e o fluxo de água nos rios, SURLAG, que atua no tempo de

concentração do escoamento superficial da água e CANMX, que corresponde ao armazenamento de água no dossel, afetando o escoamento superficial, a infiltração e a evapotranspiração. Com exceção do parâmetro MSK_CO2, os demais parâmetros eram esperados que estivessem entre os mais sensíveis com base em levantamento feito por (CASTRO, 2013) que elencou com base em análises próprias e compilando informações de outros autores quais os parâmetros mais sensíveis para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Por meio da análise de sensibilidade foram determinados os valores mínimos e máximos a serem utilizados na calibração de cada parâmetro, de modo a maximizar a eficiência da simulação. As faixas de valores que apresentaram os melhores resultados de calibração foram apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Variação das faixas de valores para os parâmetros utilizados na calibração e o método de substituição

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo
CN2	relative	-0,25	0,25
CANMX	replace	1	7
ESCO	replace	0	1
K	replace	0	15
AWC	replace	0,01	1
SURLAG	replace	0,05	7
MSK_CO1	replace	0	7
MSK_CO2	replace	0	7
CHK	replace	3	5
WD_RTO	replace	0,5	15
ALPHA	replace	0	0,5
CHN	relative	0	0,1
REVAP_MIN	relative	-0,5	0,5

Relative = valor percentual é somado/subtraído ao valor inicial; replace = o valor original é substituído

Fonte: Autoria Própria (2023)

A partir destes parâmetros e limites foi possível obter o melhor valor global de NSE para a simulação dentre todas as 10 tentativas com diferentes números de interações, variáveis e faixas de valores limites (Apêndice C). Após a análise de diferentes variáveis e limites em 10 testes independentes, chegou-se ao melhor dos cenários, com um NSE de 0,55. Esse valor indicou que o teste de número 6 foi o que apresentou o melhor NSE geral para o período de 2003 a 2011, tornando-a a melhor simulação feita. As demais tentativas de calibração, bem como seus resultados de NSE foram demonstradas no Apêndice C.

4.7 Resultados da calibração e validação

A partir dos parâmetros e limites indicados na Tabela 9, foram obtidas novas vazões para os períodos de calibração e validação. Durante as tentativas de se alcançar o melhor índice NSE para o período de calibração chegou-se aos índices apresentados na Tabela 10 e que resultaram nas vazões observadas na Figura 36

Tabela 10 – NSE anual e global após a calibração

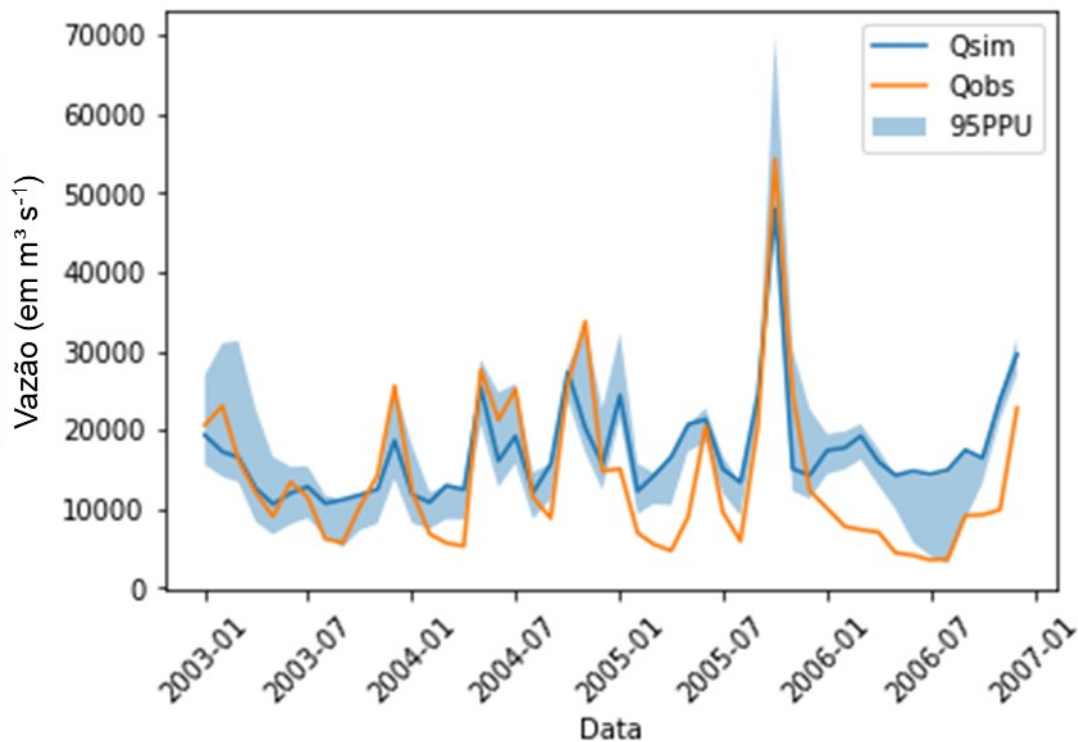
Ano	NSE
2003	0,673
2004	0,599
2005	0,667
2006	-3,033
2003 a 2006	0,441

Fonte: Autora Própria (2023)

Os anos de 2003 a 2005 apresentaram classificação pelo índice de Nash-Sutcliffe de satisfatório a bom, conforme descrito por Moriasi *et al.* (2007). O ano de 2006 apresentou índice NSE muito abaixo do esperado, conforme demonstrado na Tabela 10, essa variação não se justificou por conta de variações climáticas conforme demonstrado por Pires (2018), não havendo anomalias que justificassem a elevação da vazão pelo modelo.

Correa (2017) demonstrou em seu estudo que no ano de 2006 a vazão observada foi de 416 mm para uma precipitação de 1569 mm, enquanto a vazão simulada para este ano pelo SWAT+ foi de 892 mm aproximadamente. Quando se comparou a Figura 34 e Figura 36 foi possível notar que apesar da evidente redução da precipitação ao longo do ano de 2006, o modelo não foi capaz de estimar uma redução na simulação como de fato ocorreu. Além disso, em vários momentos os intervalos de confiança da simulação 95% PPU (Percent Point Uncertainty) foram extrapolados. Em outras palavras, observou-se que esses intervalos não englobavam os valores de vazão previamente medidos, sugerindo uma possível discrepância entre as estimativas simuladas e os dados reais (Figura 36). Essa extrapolação dos intervalos de confiança pode indicar um grau de incerteza maior do que o esperado nas projeções, ressaltando a importância de uma análise criteriosa dos resultados e a consideração de outros fatores que possam influenciar os resultados da simulação.

Figura 36 – Comparação entre as vazões acumuladas observadas e simuladas, com limites de incerteza de previsão de 95%

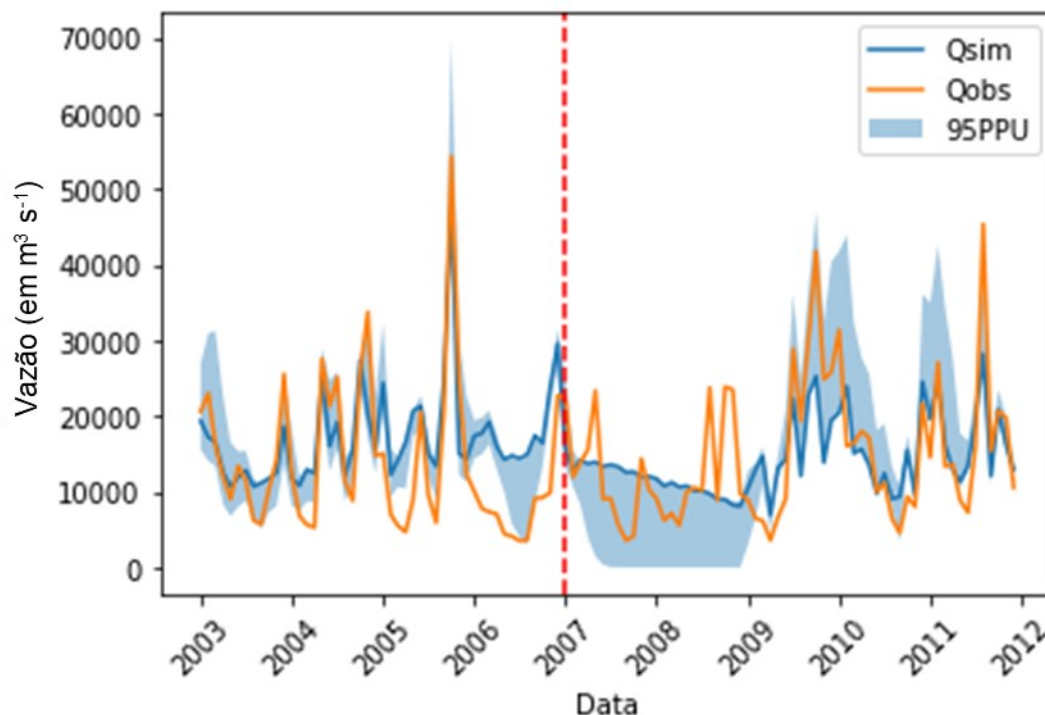


Fonte: Autoria Própria (2023)

Apesar da identificação dos parâmetros mais sensíveis e seus limites mais adequados e conseqüentemente obtenção de melhora no índice NSE, quando se analisa outra métrica de avaliação de modelos hidrológicos como Percent BIAS (PBIAS), fica evidenciado que o modelo superestimou a vazão do período em cerca de 38%.

Para a validação da simulação foram utilizados dados de vazão para o período de 2007 a 2011 conforme apresentados na Figura 37. Ao avaliar graficamente o comportamento da simulação, ficou evidenciado que o modelo gerou resultados que abrangem, na maioria, a vazão observada para o período para a estação de Balsa Santa Maria. Mantendo-se majoritariamente dentro dos limites de 95% de confiança. A pós-calibração indicou um PBIAS de 2%, caracterizando o modelo como muito bom de acordo com esse índice.

Figura 37 – Comparação das vazões acumuladas observadas e simuladas com limites de incerteza de previsão de 95% para os períodos de calibração (2003 - 2006) e validação (2007 - 2011)



Nota: a linha vertical tracejada em vermelho indica a separação da série histórica em dois períodos: calibração (2003-2006) e validação (2007-2011).

Fonte: Autoria Própria (2023)

Analisando o comportamento anual da vazão apresentado na Figura 37 e pela Tabela 11 pode-se notar que 2006 a 2008 apresentaram NSE aquém dos demais, isso é fruto de um período de seca demonstrado por Pires (2018). Para os anos seguintes não foram observadas chuvas abaixo ou acima da média que afetassem a qualidade da simulação anualmente.

Tabela 11 – NSE anual e global após a calibração e validação

Ano	NSE
2003	0,673
2004	0,599
2005	0,667
2006	-3,033
2007	0,119
2008	-0,338
2009	0,543
2010	0,545
2011	0,637
2003 a 2011	0,55

Fonte: Autora Própria (2023)

Correa (2017) demonstra em seu estudo que o comportamento geral da vazão observada em relação à precipitação é anormal nos anos 2006, 2007 e 2008. Correa demonstra que, nestes anos, a vazão na região da Balsa Santa Maria foi anômala de forma negativa. Ou seja, a vazão ficou abaixo da média histórica, chegando a uma defasagem de $2800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em 2006 e melhorando ao longo dos anos seguintes até voltar às médias esperadas.

A análise de Pires (2018) indicando Índice de Anomalia de Chuva apenas para os anos 2007 e 2008, o que corrobora o comportamento descrito por Correa. Porém, nenhum dos autores indicou ou observou qualquer característica anômala que justifique o comportamento apresentado pela vazão no ano de 2006 observado neste estudo. Comportamento anômalo que também foi observado durante a simulação, porém em magnitude superior ao demonstrado por Correa (2017), sugerindo a existência de fator climático não avaliado por ambos os autores, que impactou de forma negativa também a vazão simulada.

Os anos seguintes, conforme demonstrado pela Tabela 11, apresentaram índice NSE considerado satisfatório. Já o NSE global para o período de 2003 a 2011 foi considerado satisfatório pela análise do R-SWAT.

4.8 Aplicação do SWAT como ferramenta de gestão

A existência de trabalhos de pesquisa científica como este e diversos outros, demonstram o potencial do uso da ferramenta SWAT como parte auxiliadora na gestão de bacias hidrográficas por parte dos comitês de bacia, agências de regulação e autarquias estaduais ligadas aos recursos hídricos. Trabalhos como o desenvolvimento por Zhou *et al.* (2020) destacam a capacidade de aplicação desta ferramenta, por exemplo, na avaliação dos impactos causados pela dispersão de metais tóxicos na água, sedimentos e solo, trata-se de uma pesquisa desenvolvida na China, mas que se adequaria a realidade brasileira de garimpos ilegais e dispersão destes poluentes pelo ar.

Outra dificuldade vivenciada nas bacias hidrográficas brasileiras se deve ao assoreamento de rios, lagos e represas de abastecimento público e geração elétrica, gerado em grande parte por falta de aplicações de práticas de conservação do solo nas áreas potencialmente críticas. As aplicações do SWAT feitas por Gashaw *et al.* (2021) demonstram como esta ferramenta é capaz de servir como ponto de partida

para identificações de áreas potencialmente geradoras de sedimentos, bem como as áreas que seriam afetadas pelo transporte deste sedimento. Além disso, este estudo avaliou a eficiência de diferentes técnicas de manejo do solo como forma de reduzir a geração destes sedimentos.

Merriman *et al.* (2019) também demonstram como o SWAT pode ser utilizado para avaliar as práticas de conservação do solo de modo que os rios e lagos não sejam afetados ou afetados em menores proporções pela eutrofização causada pelo transporte de sedimentos carregados de nutrientes de origem agrícola. Busico *et al.* (2020) apresentaram em seu estudo como o uso do SWAT poderia representar uma ferramenta útil no planejamento de gestão de enchentes em bacias altamente antropizadas, o que remete muito as condições em diversas cidades do Brasil.

Esses são alguns exemplos de como o SWAT poderia colaborar com os entes públicos na avaliação de impactos ambientais e conseqüentemente tornar a gestão mais efetiva, tecnológica e preventiva.

A adoção do modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Piquiri por entidades públicas de gestão ambiental e de recursos hídricos poderia proporcionar dados essenciais para a gestão da vazão e o equilíbrio hídrico na região. Essa abordagem serviria como uma ferramenta crucial para avaliar situações adversas, como enchentes e secas, e compreender seus impactos no abastecimento público, na irrigação agrícola e na geração de energia. A integração desse modelo com outros, como o MOLUSCE, por exemplo, seria fundamental para testar os efeitos de diferentes cenários de uso e ocupação do solo no balanço hídrico da bacia, além de avaliar suas conseqüências nas atividades da sociedade.

A elaboração de modelos como este serviria como ferramentas de previsão não apenas para situações adversas decorrentes das variações climáticas naturais, mas também para eventos pontuais que resultam em passivos ambientais, causando impactos financeiros na sociedade. Além disso, esses modelos seriam úteis para identificar a origem de problemas como erosão, enchentes, transporte e acúmulo de sedimentos, permitindo uma avaliação mais eficaz. Eles também possibilitariam testar a eficácia de técnicas de manejo ambiental, reduzindo o tempo necessário para avaliações e os gastos associados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, o modelo SWAT+ da bacia do rio Piquiri – PR apresentou índice global de NSE 0,55 para calibração da mensal, podendo ser considerado satisfatório. Porém, foram observadas inconsistências que afetaram de forma significativa a qualidade do modelo. A principal dificuldade de melhorar o índice de eficiência do modelo se deu pela presença de um período de seca nos anos de 2007 e 2008, além disso, o ano de 2006 apresentou comportamento anômalo durante a simulação, colaborando para baixa eficiência na calibração do modelo.

Em relação aos objetivos deste estudo podemos concluir que:

- Em relação aos dados geográficos, tanto na esfera estadual quanto a federal possuem cartas temáticas de solos que representam bem a região, contudo é muito escasso a amostragem e caracterização pedológica, sendo um dificultador para estudos de modelagem hidrológica, uma vez que as características do solo são primordiais para simulação;
- Quanto aos dados climáticos, a região possui muitas estações climáticas, porém a maioria apresenta grandes falhas ou inexistência de dados. Outras estações são mais recentes e apresentam poucos dados públicos;
- A calibração do modelo indicou os parâmetros mais sensíveis, sendo eles: Condutividade hidráulica saturada (k.sol); Capacidade de água disponível da camada de solo (awc.sol); Condutividade inferior do canal lte (chk.rte); Coeficiente de calibração usado para controlar o impacto da constante de tempo de armazenamento para baixo fluxo (msk_co2.bsn); Valor "N" de Manning para o canal principal (chn.rte); Coeficiente de retardamento do escoamento superficial direto (surlag.bsn); e Armazenamento máximo do dossel (canmx.hru);
- Por fim foi possível obter um modelo hidrológico com Eficiência de Nash-Sutcliffe de 0,55, sendo assim considerado satisfatório.

Por ser considerado satisfatório pelo índice NSE, este modelo já poderia servir de base inicial para órgãos ambientais do Estado e para o comitê da bacia para avaliação de áreas de fragilidade ambiental, como geração de sedimentos, oscilação da vazão em diferentes momentos climáticos.

RECOMENDAÇÕES

Em possíveis trabalhos futuros nesta área recomenda-se:

- Uma busca de dados climáticos junto a outros órgãos;
- Análises de áreas menores da bacia;
- Calibração seja feita por sub-bacias;

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K.; C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. [s.l.] Eawag, 2015.

ADAMI, M. *et al.* **Metodologia para delimitação da bacia hidrográfica de reservatórios hidrelétricos: aplicação ao reservatório de Itumbiara (GO)**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...**Curitiba/PR: INPE, 2011.

ALMEIDA, C. A. P. DE; AGUIAR NETTO, A. DE O. Gestão do Rio Poxim-Açu: um modelo Swat para avaliação de cenários de irrigação. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e302111234732, 15 set. 2022.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Nota Técnica nº 46/2018/SPR**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=580&fname=NOTA_TECNICA_46_2018_SPR.pdf>.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Catálogo de Metadados da ANA**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ANDRADE, A. R.; NERY, J. T. Análise da precipitação pluviométrica diária, mensal e interanual da bacia hidrográfica do Rio Ivaí, Brasil. **Investigaciones Geográficas**, n. 52, p. 7–30, 2003.

ANGELO BORGES, J. C.; ANTUNES BATISTA, L. F. Índice de vegetação e temperatura de superfície terrestre: comparativo entre formação de ilhas de calor nos perímetros urbanos de Londrina e Maringá no PR. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 8, n. 4, p. 256, 28 out. 2020.

ARAÚJO, L. M. DE; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. **Arcabouço hidrogeológico do aquífero gigante do Mercosul (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai): Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do sul, Buena vista, Misiones e Tacuarembó**. IX Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. **Anais...**Curitiba/PR: 1995.

ARAÚJO, L. P. DE; FIGUEIREDO, V. S.; SOUTO, M. V. S. ESTADO DA ARTE: APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NO RELEVO CÁRSTICO. **Caminhos de Geografia**, v. 23, n. 89, p. 150–172, 10 out. 2022.

ARAÚJO FILHO, J. C. **Floresta Estacional Semidecidual**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7102wx7ha087apz2x2zjco4.html>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. DE; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia

experimental em Cunha - São Paulo. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257–262, abr. 2003.

ARNOLD, J. G. *et al.* LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73–89, fev. 1998.

ARNOLD, J. G. *et al.* **Soil & Water Assessment Tool: Input/Output Documentation. Version 2012 Report No. 439**. College Station, TX: Texas Water Resources Institute, 2012a.

ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012b.

ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. D. V. M. Hidrogeologia do sistema aquífero serra geral no Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 315, 27 fev. 2016.

BALBINOT, R. *et al.* O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BERKOWITZ, B.; EWING, R. P. Percolation theory and network modeling applications in soil physics. **Surveys in Geophysics**, v. 19, n. 1, p. 23–72, 1998.

BIVAND, R. S.; LUCAS, A. E. INTEGRATING MODELS AND GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS. Em: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Eds.). **Geocomputation**. 1º ed. London: Taylor & Francis, 2000. p. 331–364.

BLAINSKI, É.; ACOSTA, E.; NOGUEIRA, P. C. DO P. Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 2, p. 226, 22 fev. 2017.

BONFATTI, B. R. **GEOTECNOLOGIAS APLICADAS AO LEVANTAMENTO DE SOLOS E DA APTIDÃO AGRÍCOLA DA MICROBACIA LAJEADO DOS MINEIROS, SÃO JOSÉ DO CERRITO, SC**. Dissertação —Lajes: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2012.

BONOTTO, D. M. Natural radionuclides in major aquifer systems of the Paraná sedimentary basin, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 69, n. 10, p. 1572–1584, out. 2011.

BORGES, J. C. A.; BATISTA, L. F. A.; PEREIRA, E. R. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA MICROBACIA DO RIO SANTA RITA - SP**. XVI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE - 15º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA. **Anais...Caruaru - PE: ABRHidro**, 2022.

BORSATO, V. DA A.; SOUZA FILHO, E. E. DE. A PARTICIPAÇÃO DOS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES NA BACIA DO RIO PARANÁ NO PERÍODO 1980 A 2003. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 7, n. 6, p. 151–168, 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **O Bioma Cerrado**. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/biomas/cerrado.html>>. Acesso em: 12 mar. 2022.

BRESSIANI, D. D. A. *et al.* Effects of different spatial and temporal weather data resolutions on the stream flow modeling of a semi-arid basin, Northeast Brazil. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–16, 2015a.

BRESSIANI, D. DE A. *et al.* Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 9–35, 2015b.

BRESSIANI, D. DE A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. Tese de Doutorado—São Carlos: Universidade de São Paulo, 19 abr. 2016.

BRIGHENTI, T.; BONUMÁ, N.; CHAFFE, P. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 53–64, 25 fev. 2016.

BRIGHENTI, T. M. **Modelagem Hidrológica e Avaliação de Diferentes Métodos de Calibração para o Modelo SWAT**. Mestrado—Florianópolis: Universidade Federal De Santa Catarina, 2015.

BROTTO, M. L. *et al.* Riqueza e endemismo de Lauraceae no Paraná: aspectos fitogeográficos e áreas prioritárias para a conservação. **Rodriguésia**, v. 70, 2019.

BUCHMANN FILHO, A. C. *et al.* **Aspectos da química da água subterrânea da Formação Serra Geral no âmbito da bacia hidrográfica do rio Piquiri – PR**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais...** Florianópolis/SC: Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002.

BUENO, E. DE O. *et al.* DESEMPENHO DO MODELO SWAT PARA DIFERENTES CRITÉRIOS DE GERAÇÃO DE UNIDADES DE RESPOSTA HIDROLÓGICA. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p. 114, 7 jul. 2017.

BUSICO, G. *et al.* Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin. **Journal of Environmental Management**, v. 266, n. December 2019, p. 110625, jul. 2020.

CAMPOS, H. C. N. S. Águas subterrâneas na Bacia do Paraná. **Geosul**, v. 19, n. 37, p. 47–65, 2004.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 2014.

CASTRO, K. B. DE. **Avaliação do modelo SWAT na simulação de vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 22 abr. 2013.

CASTRO, V. L. S. DE *et al.* **Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial**. João Pessoa/PB: Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, abr. 2015.

CELLIGOI, A. **Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná**. Tese (Doutorado)—São Paulo: Universidade de São Paulo, 17 mar. 2000.

CELLIGOI, A.; DUARTE, U. Hidrogeoquímica do aquífero caiuí no estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 51, p. 19–32, 2002.

CHAGAS, A. M. S. *et al.* Análise da umidade do solo em bacia experimental no semiárido pernambucano utilizando o modelo SWAT. **Agrometeoros**, v. 30, 8 ago. 2022.

CHEN, M. *et al.* Analysis of alternative climate datasets and evapotranspiration methods for the Upper Mississippi River Basin using SWAT within HAWQS. **Science of the Total Environment**, v. 720, p. 137562, 2020.

CHRISTOFOLETTI, R. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 1ª Edição ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1999.

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

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia Para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2013.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. 5. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.

COPERNICUS SPACE COMPONENT DATA ACCESS PANDA CATALOGUE. **Copernicus Space Component Data Access PANDA Catalogue**. Disponível em: <<https://panda.copernicus.eu/>>. Acesso em: 28 maio. 2022.

CORREA, M. G. G. **Correlação Entre O Índice De Oscilação Sul (IOS), Precipitação Pluviométrica E Vazão Fluvial Na Bacia Hidrográfica Do Rio Piquiri-Pr Durante O Fenômeno ENOS (1997-1999)**. XI - Encontro Nacional Da Anpege. A Diversidade Da Geografia Brasileira: Escalas E Dimensões Da Análise E Da Ação De. **Anais...Presidente Prudente: Anais do XI-ENANPEGE**, 2015.

CORREA, M. G. G. **Dinâmica hidroclimática e o fenômeno ENOS na bacia hidrográfica do rio Piquiri-PR**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 16 abr. 2017.

CORREA, M. G. G.; GALVANI, E. Análise estatística da variabilidade da precipitação pluviométrica para a bacia hidrográfica do rio Piquiri-PR. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 96, n. March, p. 1–10, 2017.

CORREA, M. G. G.; GALVANI, E. CORRELAÇÃO E VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO E A VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIQUIRI – PR. **Geo UERJ**, n. 34, p. e40945, 15 abr. 2019.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **A Bacia do Paraná**. Disponível em: <http://sgbeduca.cprm.gov.br/adultos_geociencias_bacia_parana.html>. Acesso em: 16 fev. 2022.

CURTI, D. K. **Tipologia e origem das fraturas sub-horizontais em basaltos da Formação Serra Geral, Brasil**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 28 abr. 2011.

DEL REY, G. O.; CUNHA, L. S. Estimativa De Fluxo De Base Em Bacias Hidrográficas E Sua Importância Na Gestão Integrada Dos Recursos Hídricos: Estudo De Caso Da Bacia Do Rio Pipiripau. **Águas Subterrâneas**, 2021.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

EMER, I. O. **DESENVOLVIMENTO HISTORICO DO OESTE DO PARANÁ E A CONSTRUÇÃO DA ESCOLA**. Dissertação —Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1991.

FAN, F. *et al.* Sobre o Início da Rede de Drenagem Definida a Partir dos Modelos Digitais de Elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 241–257, 2013.

FARJADO, S. Aspectos da ocupação, da formação da estrutura produtiva e das transformações na paisagem rural no território paranaense. **Guairacá**, v. 22, p. 95–117, 2006.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008.

FERNANDES, L. A. MAPA LITOESTRATIGRÁFICO DA PARTE ORIENTAL DA BACIA BAURU (PR, SP, MG), ESCALA 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 55, p. 53–66, 31 dez. 2004.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O GRUPO CAIUÁ (Ks): REVISÃO ESTRATIGRÁFICA E CONTEXTO DEPOSICIONAL. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164–176, 1 set. 1994.

FONTES JÚNIOR, R.; MONTENEGRO, A. IMPACT OF LAND USE CHANGE ON THE WATER BALANCE IN A REPRESENTATIVE WATERSHED IN THE SEMIARID OF THE STATE OF PERNAMBUCO USING THE SWAT MODEL. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 110–117, 1 fev. 2019.

FRANÇA, J. P. a Ocupação Do Noroeste Do Paraná E a Cidade De Umuarama: Uma Retrospectiva Do Processo De Ocupação. **Akrópolis**, n. 3, p. 165–174, 2011.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Água Subterrânea**. 1ª ed. São Paulo: Everton de Oliveira, 2017.

FREIRE, C. C.; OMENA, S. P. F. **Princípios de hidrologia ambiental**. 1ª ed. [s.l.] Universidade Federal de Alagoas/Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

FUJITA, T. **Calibração E Validação De Um Modelo Hidrológico Para a Bacia Do Rio Ivaí**. Dissertação —Londrina: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 30 maio 2018.

GALHARTE, C. A.; VILLELA, J. M.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 194–201, fev. 2014.

GARCIA, Y. M. *et al.* DECLIVIDADE E POTENCIAL PARA MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO PEDERNEIRAS - PEDERNEIRAS/SP. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 14, n. 1, p. 62–72, 31 mar. 2020.

GASHAW, T. *et al.* Evaluating the Effectiveness of Best Management Practices On Soil Erosion Reduction Using the SWAT Model: for the Case of Gumara Watershed, Abbay (Upper Blue Nile) Basin. **Environmental Management**, v. 68, n. 2, p. 240–261, 8 ago. 2021.

GASSMAN, P. W. *et al.* THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL: HISTORICAL DEVELOPMENT, APPLICATIONS, AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS Invited Review Series. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GEORGE H. HARGREAVES; ZOHRAB A. SAMANI. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985.

GUBERT FILHO, F. A. O DESFLORESTAMENTO DO PARANÁ EM UM SÉCULO. Em: **Reforma agrária e meio ambiente: teoria e prática no estado do Paraná**. Curitiba/PR: ITCG, 2010. p. 15–25.

GUTH, P. L. *et al.* Digital Elevation Models: Terminology and Definitions. **Remote Sensing**, v. 13, n. 18, p. 3581, 8 set. 2021.

HALL, F. R. Base-Flow Recessions-A Review. **Water Resources Research**, v. 4, n. 5, p. 973–983, out. 1968.

HARTMANN, L. A. A HISTÓRIA NATURAL DO GRUPO SERRA GERAL DESDE O CRETÁCEO ATÉ O RECENTE. **Ciência e Natura**, v. 36, n. 3, p. 173–182, 31 out. 2014.

HAUER, M. AS FLORESTAS NO PARANÁ: UM PROCESSO DE INVOLUÇÃO. Em: **Reforma agrária e meio ambiente: teoria e prática no estado do Paraná**. Curitiba/PR: ITCG, 2010. p. 27–44.

HAVERKAMP, S. *et al.* Subwatershed spatial analysis tool: Discretization of a distributed hydrologic model by statistical criteria. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 38, n. 6, p. 1723–1733, 2002.

HAWKINS, R. H. *et al.* (EDS.). **Curve Number Hydrology**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008.

HELTON, J. C.; DAVIS, F. J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 81, n. 1, p. 23–69, jul. 2003.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Mapas e Dados Espaciais**. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapas-e-Dados-Espaciais>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Dados e Informações Geoespaciais Temáticos**. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Dados-e-Informacoes-Geoespaciais-Tematicos>>. Acesso em: 24 fev. 2022a.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Paraná - PLERH/PR**. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Plano-Estadual-de-Recursos-Hidricos-do-Parana-PLERHPR>>. Acesso em: 1 out. 2023b.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Geologia do Paraná - História Evolutiva**. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva>>. Acesso em: 22 fev. 2022.

IAT - INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>>. Acesso em: 21 jun. 2023.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IDR-PARANÁ. **Dados Meteorológicos Históricos e Atuais**. Disponível em: <<https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Dados-Meteorologicos-Historicos-e-Atuais>>. Acesso em: 8 fev. 2023.

IMAN, R. L. Latin Hypercube Sampling. Em: **Encyclopedia of Quantitative Risk Analysis and Assessment**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2008. p. 408–411.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **INMET:: BDMEP**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

IPARDES - INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável por Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná**. Curitiba/PR: IPARDES, 2017.

JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V. L.; SCHMIDT, L. Water Scarcity and Human Rights. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, mar. 2016.

KER, J. C. LATOSSOLOS DO BRASIL: UMA REVISÃO. **Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1 jul. 1997.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. Piracicaba/SP: USP/ESALQ, 1995.

LIMA, J. E. F. W. *et al.* **Diagnostico Hidrossedimentológico da Bacia do Rio Piquiri**. 1ª ed. Planaltina/DF: Embrapa Cerrados, 2004.

LORANDI, R.; CANÇADO, C. J. Parâmetros Físicos para gerenciamento de bacias hidrográficas. Em: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. (Eds.). **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**. Ilhéus, Ba: EDITUS, 2002. p. 37–65.

MAPBIOMAS. **Produtos**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/produtos>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

MAPBIOMAS. **Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)**. Disponível em: <https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/ATBD_Collection_7_v2.pdf>.

MARASLIS, G. T. **Influência do uso e ocupação do solo na geração de escoamento superficial de uma pequena bacia costeira utilizando o modelo swat**. Dissertação—Florianópolis: UFSC, 2022.

MARTINS, L. L. *et al.* Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 576–594, 2020.

MARTINS, W. A. *et al.* Reduction of sediment yield by riparian vegetation recovery at distinct levels of soil erosion in a tropical watershed. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, 2021.

MELATI, M. D. **INTERAÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUPERFICIAIS E O SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL, NA REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ 3, ESTADO DO PARANÁ**. Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

MENDES, E. A. A. *et al.* **Mananciais subterrâneos no estado do paraná**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais...**2002.

MERRIMAN, K. R. *et al.* Assessment of site-specific agricultural Best Management Practices in the Upper East River watershed, Wisconsin, using a field-scale SWAT model. **Journal of Great Lakes Research**, v. 45, n. 3, p. 619–641, jun. 2019.

MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S/A. **Atlas Comentado da Geologia e dos Recursos Minerais do Estado do Paraná**. Curitiba: [s.n.].

MIRANDA, R. A. DE C.; OLIVEIRA, M. V. S. DE; SILVA, D. F. DA. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, v. 1, n. 21, p. 109–119, 15 jul. 2010.

MONTEITH, J. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, n. 19, p. 205–234, 1965.

MORIASI, D. N. *et al.* MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

NCEP - THE NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL PREDICTION; **CFSR Global Weather Data for SWAT 1979-2014 | SWAT | Soil & Water Assessment Tool**. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/data/cfsr>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

NEITSCH, S. L. *et al.* **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.Report No. 406**. Temple/TX: [s.n.].

NETO, J. DE O. M. *et al.* Simulação Hidrológica Escalar com o Modelo SWAT. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177–188, 2014.

NGUYEN, T. V. *et al.* An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. **Environmental Modelling & Software**, v. 156, n. July, p. 105497, out. 2022.

OLIVEIRA, U. C. DE *et al.* ANÁLISE COMPARATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DO PARÂMETRO CN (CURVE NUMBER) NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITACOLOMI, CEARÁ, ENTRE OS ANOS DE 1990, 2005 E 2020. Em: ANTONELLA CARVALHO DE OLIVEIRA (Ed.). **Engenharia sanitária e ambiental: Recursos hídricos e tratamento de água 2**. 1ª ed. Ponta Grossa/PR: Atena Editora, 2022. v. 55p. 87–94.

OLIVEIRA, W. N. DE *et al.* SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA E DO RESERVATÓRIO DE ABASTECIMENTO DO RIBEIRÃO JOÃO LEITE, UTILIZANDO O MODELO SWAT. **Revista Geociências UNESP**, v. 40, n. 3, p. 695–708, 2021.

PAI, N.; SARASWAT, D.; SRINIVASAN, R. Field_SWAT: A tool for mapping SWAT output to field boundaries. **Computers & Geosciences**, v. 40, p. 175–184, mar. 2012.

PARANÁ. SECRETARIA DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. **Levantamento da Produção Agropecuária**. Disponível em: <<https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/ProducaoAnual>>. Acesso em: 28 jul. 2022.

PARANÁ. SEMA - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Bacias do Piquiri e Paraná II**. 1ª ed. Curitiba: SEMA - PR, 2006.

PASSOS, F. O.; SILVA, B. C. DA; SILVA, F. SAS G. B. DA. Avaliação de Impactos de Mudanças no Uso e Manejo do Solo Sobre as Vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, Utilizando o Modelo Swat. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 619, 14 abr. 2021.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem Dinâmica. Em: DRUCK, S. *et al.* (Eds.). **MODELAGEM DINÂMICA E GEOPROCESSAMENTO**. Brasília: EMBRAPA, 2004. p. 1–39.

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, v. 37, n. 5, p. 859–869, out. 2013.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SENTELHAS, P. C. O PARÂMETRO DE PRIESTLEY-TAYLOR PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA ESCALA MENSAL. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 83–87, 1997.

PEREIRA, M. G. *et al.* FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS. Em: TULLIO, L. (Ed.). **Formação, Classificação e Cartografia dos Solos**. Ponta Grossa/PR: Atena Editora, 2019. p. 1–20.

PIRES, R. A. DE S. CARACTERIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA BACIA DO RIO PIQUIRI - 1979 A 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 327–342, 19 nov. 2018.

POETER, E. *et al.* **Groundwater in Our Water Cycle**. Guelph, Ontario, Canada: Groundwater Project, 2020.

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

REZENDE, V. S.; RIBEIRO, V. DE O.; MENDES, Y. S. **DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE NÚMERO DE DEFLÚVIO (CN) PARA O PERÍMETRO URBANO DE DOURADOS-MS**. Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. **Anais...Jardim/MS: Embrapa / INPE / UFMS**, 2018.

ROCHA, D. DA L. Aspectos Geográficos E Arcabouço Geológico Do Aquífero Serra Geral, No Estado Do Paraná. p. 140–152, 2014.

RODRIGUES, V. A. Análise dos processos hidrológicos em modelo didático de microbacias. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 17, n. 1, p. 1–15, 2011.

ROSA FILHO, E. F. DA *et al.* SISTEMA AQUÍFERO GUARANI - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A INFLUÊNCIA DO ARCO DE PONTA GROSSA NO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas Subterrâneas**, v. 17, n. 1, p. 91–112, 9 dez. 2003.

RUHOFF, A. L. *et al.* Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, n. 8, p. 1658–1676, 17 nov. 2013.

RUNNING, S. *et al.* **MOD16A2GF MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006**. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.006>>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SAHA, S. *et al.* The NCEP Climate Forecast System Version 2. **Journal of Climate**, v. 27, n. 6, p. 2185–2208, 15 mar. 2014.

SAMPAIO, F. F. **Modelagem Dinâmica Computacional E O Processo De Ensino-Aprendizagem: Algumas Questões Para Reflexão**. (J. S. Ilabaca, Ed.) Workshop Internacional de Software Educacional, TISE 98. **Anais...Santiago/Chile: 1998**.

SANTOS, H. G. DOS; ZARONI, M. J. **Latossolos Vermelhos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelhos>>. Acesso em: 2 ago. 2023a.

SANTOS, H. G. DOS; ZARONI, M. J. **Neossolos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos>>. Acesso em: 31 jul. 2023b.

SANTOS, H. G. DOS; ZARONI, M. J. **Nitossolos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/nitossolos>>.

SANTOS, H. G. DOS; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. DE P. C. **Neossolos Litólicos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos/neossolos-litolicos>>. Acesso em: 2 ago. 2023a.

SANTOS, H. G. DOS; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. DE P. C. **Nitossolos Vermelhos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/nitossolos/nitossolos-vermelhos>>. Acesso em: 2 ago. 2023b.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5º Edição ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2004.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569–1578, set. 2006.

SEAB-PR. **Levantamento da Produção Agropecuária**. Disponível em: <<https://www.agricultura.pr.gov.br/deral/ProducaoAnual>>. Acesso em: 15 maio. 2023.

SEMA - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Bacias do Piquiri e Paraná II**. Curitiba/PR: [s.n.].

SERRETI, M. T.; MARTINS, R. C.; ALVES, F. Influência da Impermeabilização no Ciclo Hidrológico da Cidade de Belo Horizonte/MG. **Revista Petra**, v. 1, n. 2, p. 311–327, 30 dez. 2015.

SILVA, V. C. **Fronteiras internacionais da América do Sul**. Disponível em: <https://geonode.paranagua.pr.gov.br/layers/geonode:a__031_001_americaDoSul>. Acesso em: 17 jun. 2022.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. Em: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. p. 17–25.

SILVEIRA, A. L. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. F. Infiltração e Armazenamento no Solo. Em: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2° ed. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. p. 335–372.

SIRISENA, T. A. J. G.; MASKEY, S.; RANASINGHE, R. Hydrological Model Calibration with Streamflow and Remote Sensing Based Evapotranspiration Data in a Data Poor Basin. **Remote Sensing**, v. 12, n. 22, p. 3768, 17 nov. 2020.

SOARES, M. R. G. DE J. *et al.* EFICIÊNCIA DO MÉTODO CURVE NUMBER DE RETENÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS. **Mercator**, v. 16, n. 01, p. 1–16, 13 jan. 2017.

SORIANO, É. *et al.* Water crisis in São Paulo evaluated under the disaster's point of view. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, p. 21–42, mar. 2016.

SOUSA, D. M. G. DE; LOBATO, E. **Latossolos**. . Acesso em: 2 ago. 2023.

STEIN, M. Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling. **Technometrics**, v. 29, n. 2, p. 143–151, maio 1987.

TAM NGUYEN. **tamnva/R-SWAT: v1.0.1 (v1.0.1)**.

TATSCH, J. **Ciclo Hidrológico**. Disponível em: <<https://lhmet.github.io/hidrometeobook/ciclo-hidrológico.html>>. Acesso em: 1 out. 2023.

TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH; USDA-ARS. **SWAT+**. College Station Texas A&M AgriLife Research, , 14 abr. 2021.

THE EUROPEAN SPACE AGENCY. **Dataset Details - CSCDA (Copernicus Space Component Data Access)**. Disponível em: <<https://spacedata.copernicus.eu/web/cscda/dataset-details?articleId=394198>>. Acesso em: 22 jun. 2022.

TIEPOLO, G. M. *et al.* Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. IX, n. 1, p. 1–10, 2018.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B. DE; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. Em: TEIXEIRA, W. *et al.* (Eds.). **Decifrando a Terra**. [s.l.] Oficina de Textos, 2000. p. 139–166.

TOMASELLA, J. *et al.* The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 13, p. 2133–2147, 30 jun. 2008.

TOSCAN, M. A. G.; TEMPONI, L. G.; GUIMARÃES, A. T. B. CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SERAPILHEIRA E DA CHUVA DE SEMENTES EM UMA RESERVA DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL, PARANÁ. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 415–427, 29 jun. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. IMPACTO DAS MUDANÇAS DA COBERTURA VEGETAL NO ESCOAMENTO: REVISÃO PROCESSOS DO CICLO HIDROLÓGICO TERRESTRE Ciclo global Descrição dos processos hidrológicos na bacia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

USBR U.S. BUREAU OF RECLAMATION - UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR. **Design of Small Dams**. 3th. ed. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1977.

USDA-ARS; TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH. CHAPTER FILE.CIO SWAT + INPUT DATA: Variable name. Em: **SWAT+ INPUT/OUTPUT FILE DOCUMENTATION**. College Station, TX: Texas A&M University, 2020. p. 1–57.

USDA-ARS; TEXAS A&M AGRILIFE RESEARCH. **About SWAT+**. Disponível em: <<https://swatplus.gitbook.io/docs/>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

VIANA, J. F. DE S. *et al.* Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – PE utilizando o modelo SWAT. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 155–172, 31 jan. 2018.

VIDALETTI, V. F. *et al.* Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e193101724562, 24 dez. 2021.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. 4th ed ed. [s.l.] Glenview, Ill. : Addison Wesley/Longman, 1996.

VILLELA, J. M. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO REGIME HIDROSEDIMENTOLÓGICO NA MICROBACIA DO CÓRREGO CANA DO REINO, VOTUPORANGA – SP**. Dissertação—São Carlos: Universidade de São Paulo, 29 abr. 2015.

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. (EDS.). **Environmental Modelling**. 2nd. ed. Chichester: Wiley, 2013.

WATER SCIENCE SCHOOL. **O Ciclo d'água, The water cycle, Portuguese**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/o-ciclo-dagua-water-cycle-portuguese>>. Acesso em: 22 abr. 2022.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. 8. ed. Genebra: WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2018.

WOESSNER, W. W. **Groundwater-Surface Water Exchange**. Guelph, Ontario, Canadá: Groundwater Project, 2020.

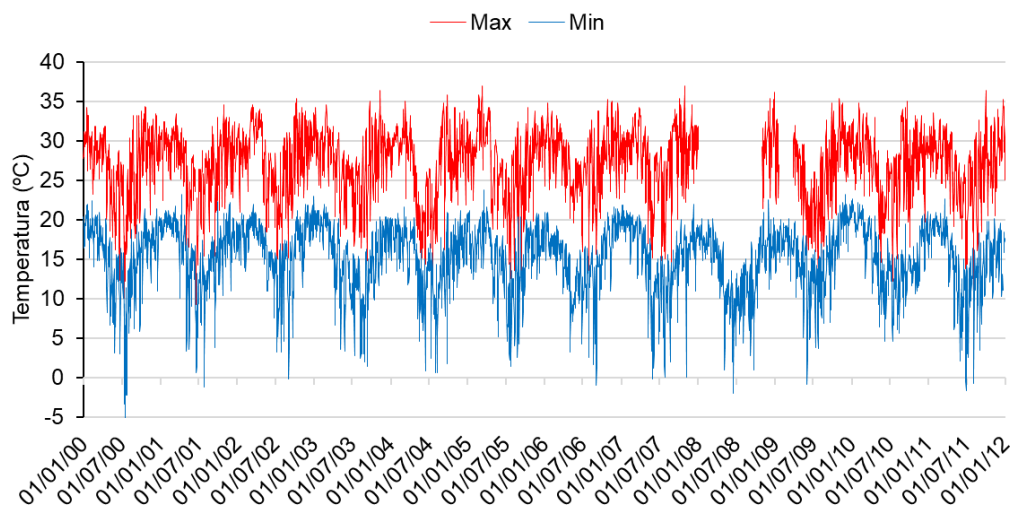
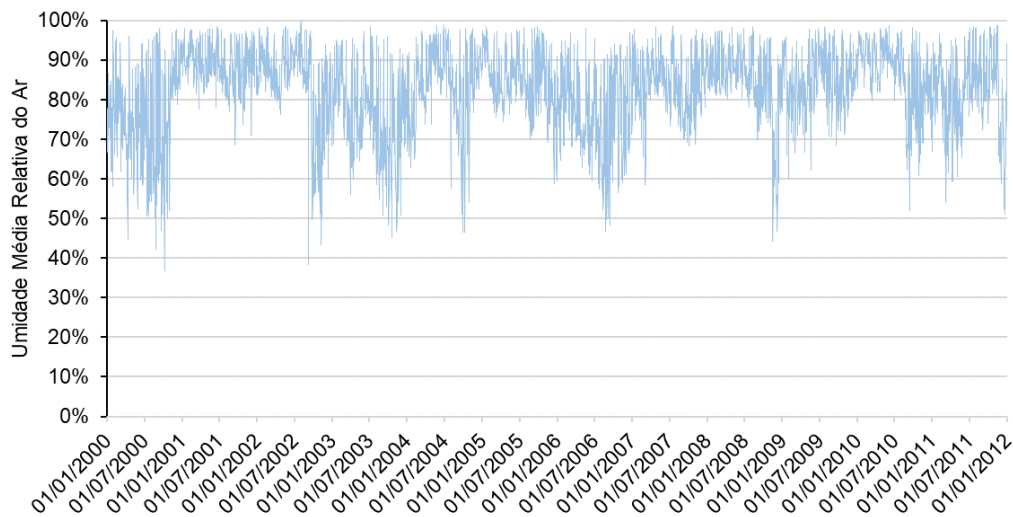
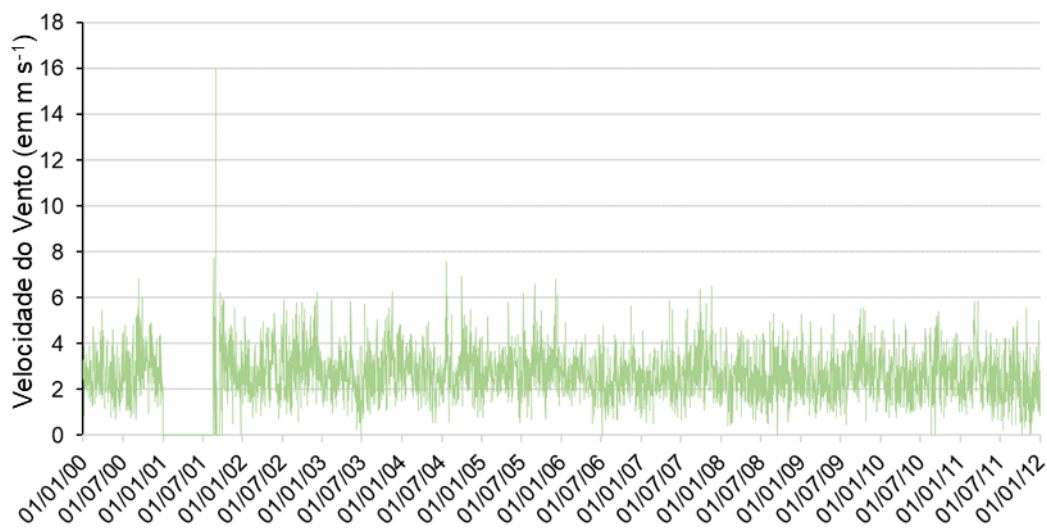
WREGGE, M. S. *et al.* **Atlas Climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2^a ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2012.

ZHAN, X.; HUANG, M.-L. ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. **Environmental Modelling & Software**, v. 19, n. 10, p. 875–879, out. 2004.

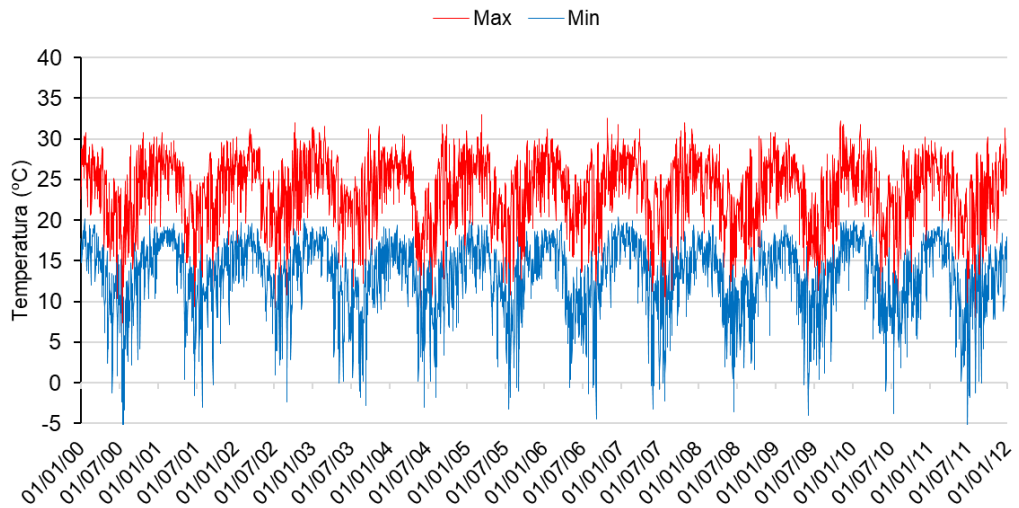
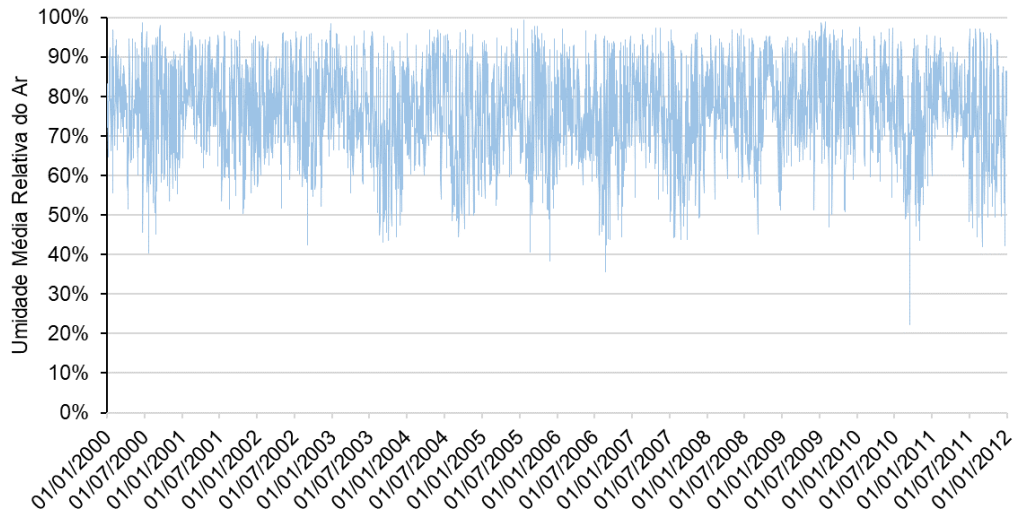
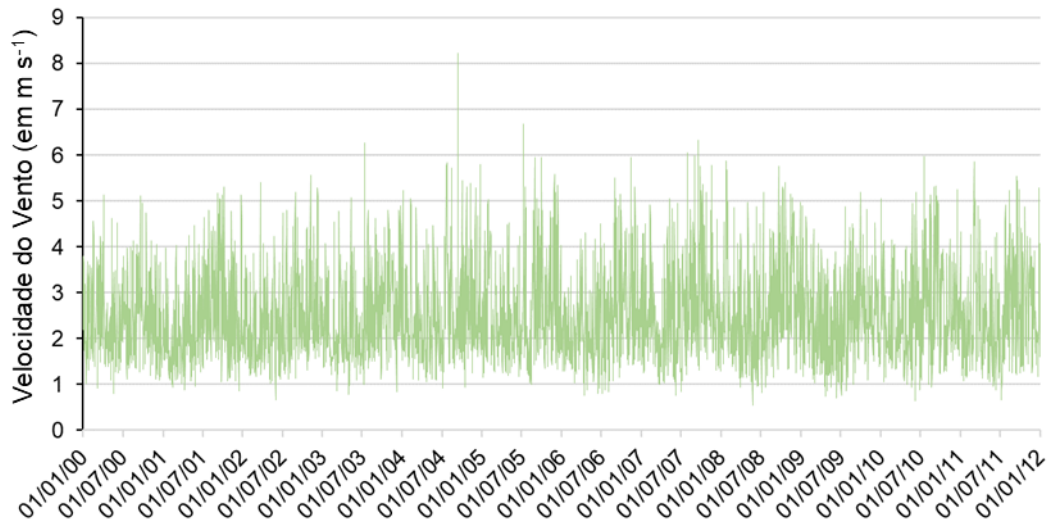
ZHOU, L. *et al.* Uncertainty-based metal budget assessment at the watershed scale: Implications for environmental management practices. **Journal of Hydrology**, v. 584, n. 12, p. 124699, maio 2020.

APÊNDICE A - Série histórica das variáveis climáticas utilizadas na obtenção do modelo *SWAT*

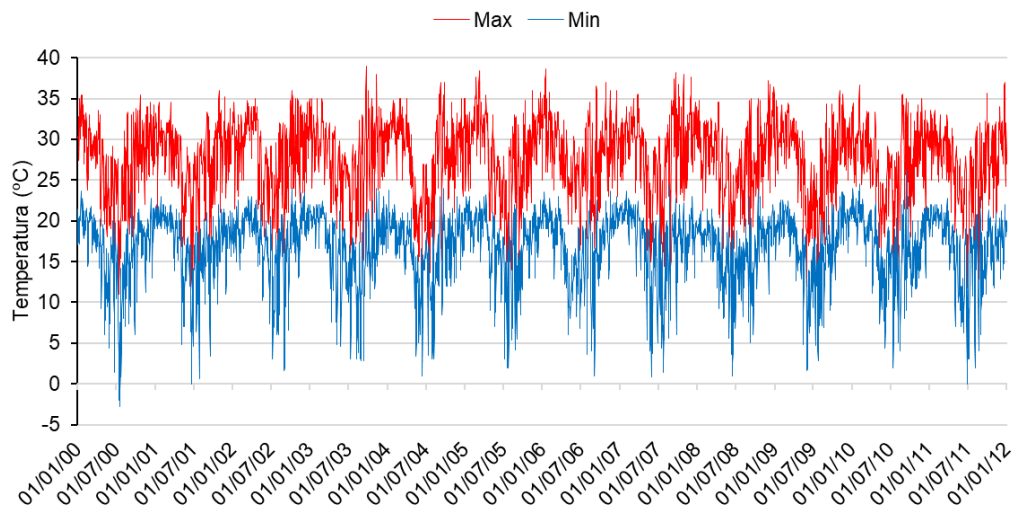
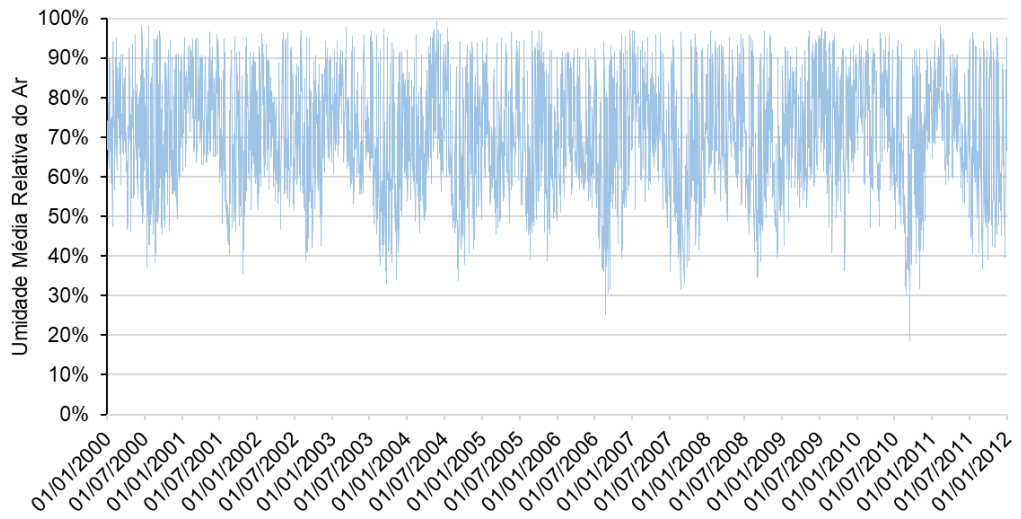
Estação Campo Mourão



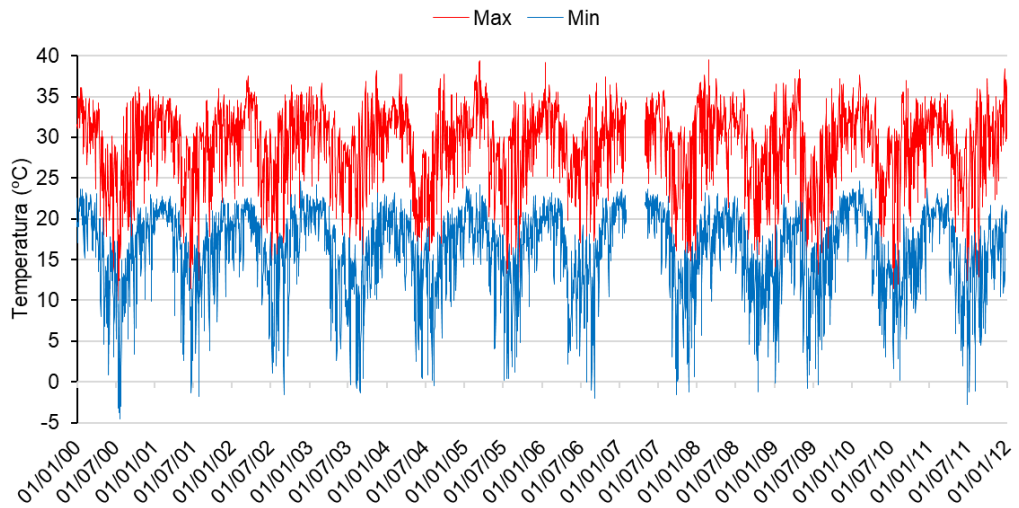
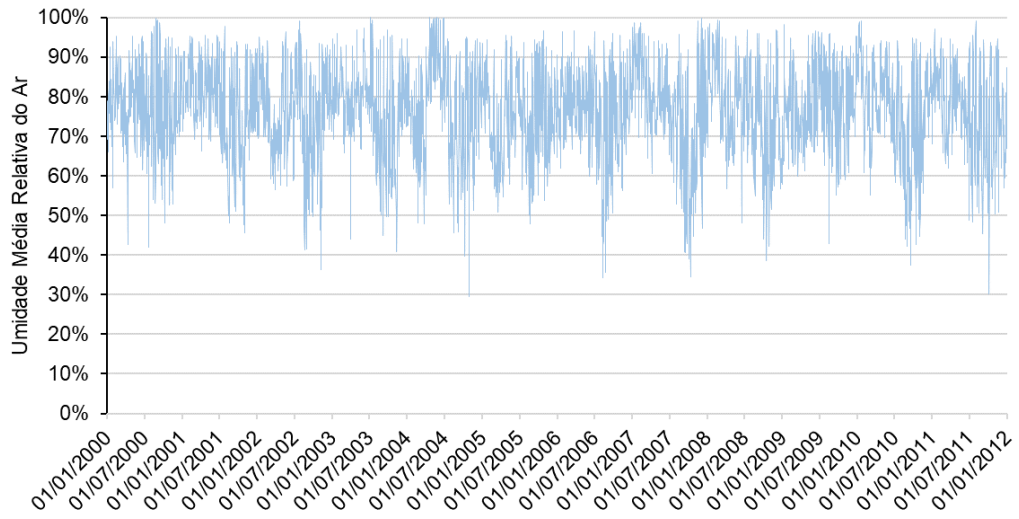
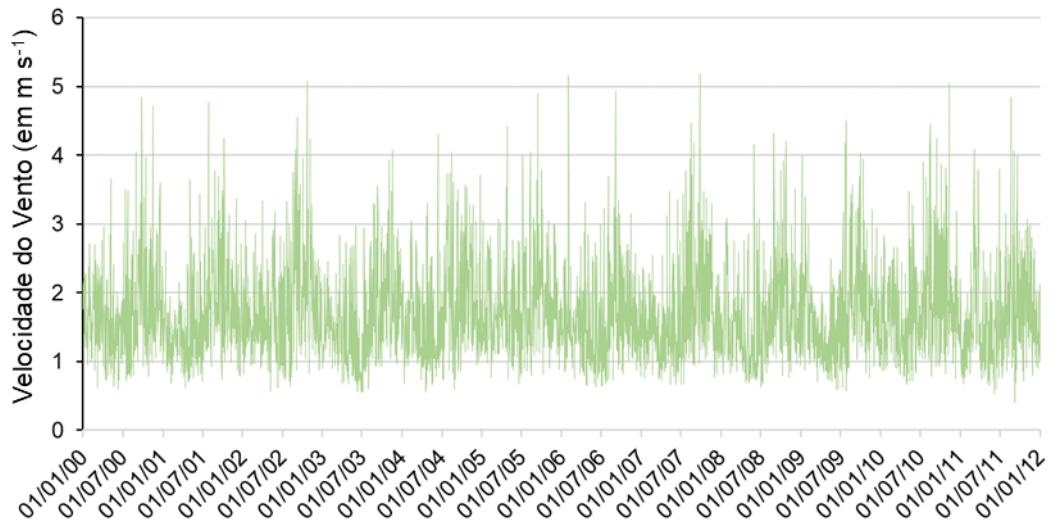
Estação Guarapuava



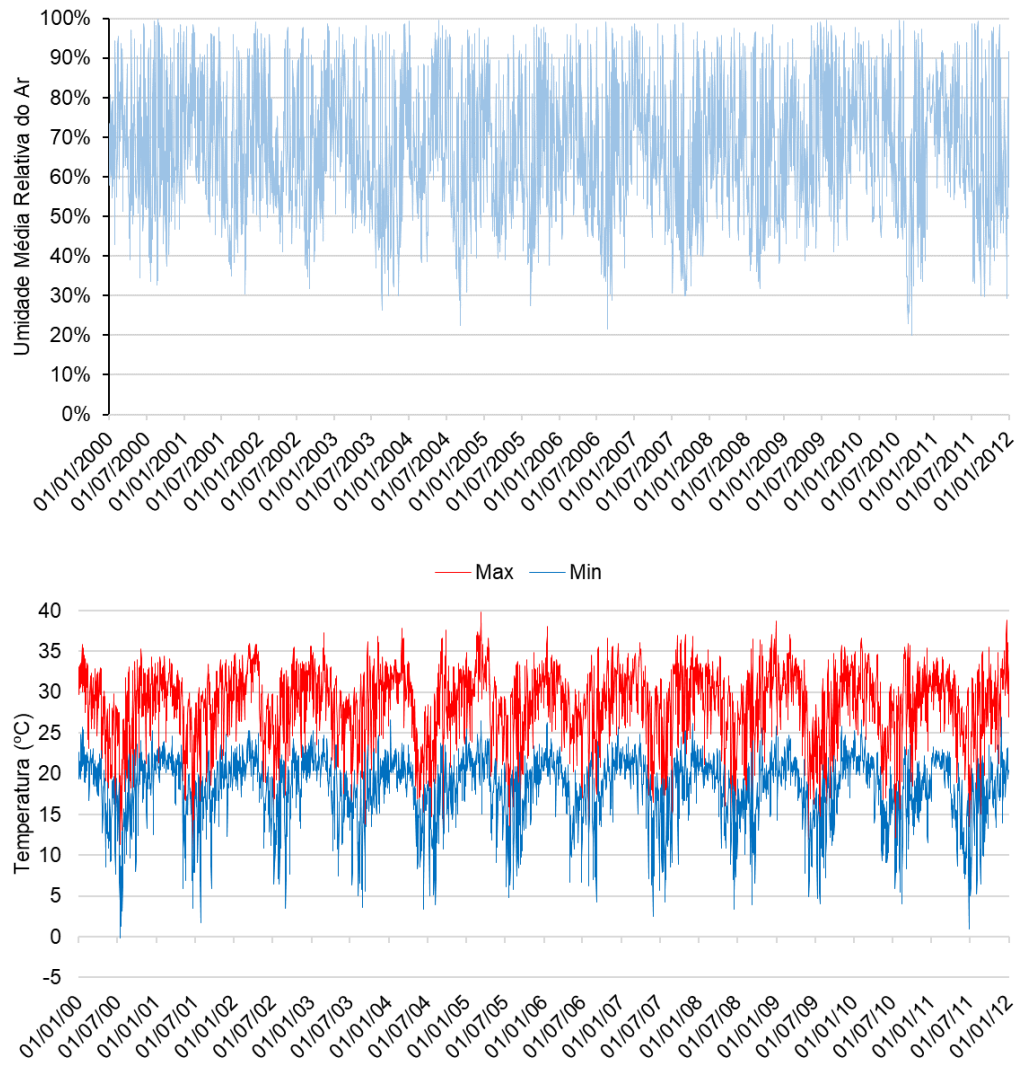
Estação Nova Cantú



Estação Palotina



Estação Umuarama



APÊNDICE B - Tabulação dos dados climáticos de entrada do SWAT

Estação GUARAPUAVA	Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
	Max tmp (°C)	26,3	26,4	26,3	23,9	20,0	20,1	19,5	21,5	22,2	24,3	25,5	26,3
	Min tmp (°C)	17,0	16,9	16,1	13,3	9,6	9,3	8,3	9,6	11,2	13,8	14,7	15,8
	Max tmp std (°C)	2,5	2,2	2,3	2,9	3,4	3,6	4,2	4,5	4,6	3,5	3,0	2,7
	Min tmp std (°C)	1,6	2,0	2,2	3,1	3,9	4,2	4,6	4,1	3,9	2,7	2,7	2,4
	Pcp avg (mm)	210,1	154,7	119,8	132,6	138,1	112,6	126,8	101,3	168,2	224,7	174,1	174,3
	Pcp std (mm)	12,6	10,1	8,8	11,4	11,7	10,0	10,2	11,1	13,4	14,2	12,0	11,4
	Pcp skew (mm)	2,5	2,6	3,2	3,8	4,0	3,4	3,3	6,6	3,3	2,7	2,8	2,7
	Prob. dry (dia)	0,40	0,36	0,22	0,22	0,19	0,18	0,21	0,14	0,24	0,34	0,33	0,31
	Prob. wet (dia)	0,58	0,53	0,55	0,50	0,50	0,48	0,52	0,51	0,53	0,48	0,44	0,57
	Pcp days (dia)	14,9	12,7	10,5	9,1	8,6	7,7	8,8	7,2	10,0	12,6	11,1	12,7
	Max rainfall (mm)	45,0	41,4	35,4	52,8	58,8	38,4	39,6	69,6	51,0	57,6	42,0	42,6
	Slr (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
	Dew (°C)	18,53	18,35	17,61	15,74	11,97	11,66	10,54	10,92	12,23	15,12	15,71	17,11
Wnd (m s ⁻¹)	2,472	2,269	2,341	2,232	2,273	2,294	2,517	2,669	2,991	2,775	2,826	2,623	

Estação NOVA CANTÚ	Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
	Max tmp (°C)	30,4	30,3	30,3	28,0	23,8	23,4	23,0	26,0	27,1	28,6	29,5	30,4
	Min tmp (°C)	20,1	19,8	19,2	16,8	13,4	13,3	12,6	14,0	15,2	17,4	18,2	19,2
	Max tmp std (°C)	2,9	2,5	2,5	3,4	3,8	4,0	4,3	4,9	5,2	3,6	3,3	3,0
	Min tmp std (°C)	1,6	1,8	1,9	2,8	3,9	4,4	4,7	4,5	4,2	2,6	2,5	2,1
	Pcp avg (mm)	127,6	115,7	83,7	67,0	95,9	66,2	74,0	58,5	88,8	141,8	101,2	107,3
	Pcp std (mm)	8,3	8,45	7,35	6,77	7,99	6,01	6,26	5,94	7,61	9,37	7,28	7,56
	Pcp skew (mm)	2,83	4,22	4,39	5,07	3,35	3,42	3,76	5,23	3,73	2,61	2,81	3,25
	Prob. dry (dia)	0,33	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3
	Prob. wet (dia)	0,6	0,6	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
	Pcp days (dia)	13,3	12	9,5	7,92	8,33	6,67	8,25	6,58	9,42	11,33	10,17	11,83
	Max rainfall (mm)	52,2	84,6	57	66,6	48	34,8	51	58,8	60	54	43,2	50,4
	Slr (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
	Dew (°C)	21,14	20,97	19,94	18,06	14,34	13,91	12,58	12,59	13,97	17,21	17,8	19,69
Wnd (m s ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	

	Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Estação PALOTINA	Max tmp (°C)	31,7	29,4	29,6	28,2	25,9	25,9	25,6	27,3	27,0	29,1	29,8	30,6
	Min tmp (°C)	19,5	18,3	17,6	15,7	13,7	13,4	12,1	12,2	13,2	15,9	16,7	18,1
	Max tmp std (°C)	3,3	9,1	9,3	9,1	4,2	5,0	5,6	5,3	5,2	4,0	4,2	3,6
	Min tmp std (°C)	3,5	5,9	5,8	5,7	5,4	5,2	5,8	4,9	4,7	4,3	4,4	3,9
	Pcp avg (mm)	183,3	174,17	103,92	113,58	123,75	82,75	79,58	78,17	112,50	189,33	193,92	159,92
	Pcp std (mm)	14,3	14,89	12,12	11,46	11,84	8,07	7,29	8,54	9,38	14,38	14,36	14,76
	Pcp skew (mm)	4,24	3,6	6,5	5,1	4,0	3,9	4,3	5,5	3,3	3,0	3,0	5,1
	Prob. dry (dia)	0,29	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3
	Prob. wet (dia)	0,5	0,51	0,35	0,41	0,54	0,41	0,49	0,53	0,46	0,41	0,49	0,47
	Pcp days (dia)	11,1	10	6,75	6,75	7,92	6,25	6,83	6,17	7,58	9,58	9,92	9,83
	Max rainfall (mm)	83,4	62,4	86,4	69,6	53,4	31,2	39	52,8	42	53,4	52,2	90
	Slr (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
	Dew (°C)	23,07	20,89	19,64	18,53	17,38	17,12	16,03	15,47	15,71	17,67	18,96	21,27
	Wnd (m s ⁻¹)	1,585	1,569	1,584	1,408	1,495	1,45	1,687	1,943	2,132	2,008	1,899	1,659

	Variáveis	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Estação UMUARAMA	Max tmp (°C)	31,0	31,1	31,5	28,9	24,9	24,6	24,2	26,7	27,5	29,4	30,1	31,3
	Min tmp (°C)	21,4	21,2	21,0	18,5	15,0	14,8	14,1	15,4	16,4	18,9	19,5	20,5
	Max tmp std (°C)	2,5	2,5	2,6	3,3	3,9	4,3	4,8	5,0	4,9	3,2	3,0	2,8
	Min tmp std (°C)	1,6	1,57	1,78	2,73	3,61	3,98	4,39	4,39	4,13	2,47	2,35	2,24
	Pcp avg (mm)	179,0	175,67	97,42	93,58	139,67	82,83	83,67	79,83	122,25	204,42	185,33	166,42
	Pcp std (mm)	12,0	13,3	8,1	9,2	14,2	8,6	7,8	8,2	11,6	14,9	14,6	13,8
	Pcp skew (mm)	3,03	3,0	3,2	4,3	4,5	4,3	3,6	4,8	4,2	3,1	3,5	3,9
	Prob. dry (dia)	0,29	0,28	0,2	0,18	0,14	0,12	0,15	0,12	0,2	0,27	0,27	0,25
	Prob. wet (dia)	0,5	0,61	0,37	0,44	0,53	0,48	0,51	0,5	0,41	0,45	0,4	0,5
	Pcp days (dia)	12,0	11,58	7,67	7	7,25	5,92	7	6,17	7,58	10,17	9,33	9,92
	Max rainfall (mm)	54	49,2	30	43,8	76,2	45	28,2	40,8	57	63	75,6	71,4
	Slr (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99
	Dew (°C)	21,39	21,15	19,96	17,96	14,57	13,79	12,36	12,07	13,87	17,41	18,04	21,08
	Wnd (m s ⁻¹)	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99

APÊNDICE C - Testes de calibração, parâmetros testados, número de interações e análise de sensibilidade

Tabela C1 – Teste de Calibração 1

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
alpha.aqu	replace	0	0,7		
awc.sol	relative	0	0,5		
canmx.hru	replace	1	8		
chk.rte	replace	3	6		
chn.rte	replace	0	0,1		
cn2.hru	relative	-0,1	0,25	200	-0,858
esco.hru	replace	0	0,5		
k.sol	replace	-0,5	1		
msk_co1.bsn	replace	0	15		
msk_co2.bsn	replace	0	15		
surlag.bsn	replace	0,05	10		
wd_rto.rte	replace	0,5	20		

Tabela C2 – Teste de Calibração 2

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
alpha.aqu	replace	0	0,5		
awc.sol	replace	0	2		
canmx.hru	replace	1	7		
chk.rte	replace	2	6		
chn.rte	relative	-0,2	0,2		
cn2.hru	relative	-0,5	0,25		
esco.hru	replace	0	2		
gwflow_lte	relative	-0,6	0,8	500	0,3754
k.sol	replace	0	15		
msk_co1.bsn	replace	0	7		
msk_co2.bsn	replace	0	6		
revap_co	relative	-0,35	0,5		
revap_min	relative	-0,6	0,9		
revap_min.aqu	relative	-0,35	0,35		
surlag.bsn	replace	2	7		
wd_rto.rte	replace	1	12		

Tabela C3 – Teste de Calibração 3

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
k.sol	relative	-0,5	0,5		
awc.sol	relative	-0,4	0,4		
surlag.bsn	replace	0,0001	12	500	-0,4522
alpha.aqu	relative	-0,2	0,2		
chn.rte	relative	0	0,8		
gwflow_lte.hlt	relative	0,2	1		

Tabela C4 – Teste de Calibração 4

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
k.sol	relative	-0,1	0,8		
awc.sol	relative	0,1	0,8		
surlag.bsn	replace	0,1	12	100	-0,34
alpha.aqu	relative	0	0,5		
chn.rte	relative	-0,2	0,2		
gwflow_lte.hlt	relative	-0,6	0,8		

Tabela C5 – Teste de Calibração 5

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
k.sol	relative	-0,5	0		
awc.sol	relative	0,1	0,8		
cn2.hru	relative	-0,25	0,25	100	-0,6053
surlag.bsn	replace	0,05	8		
alpha.aqu	relative	0	0,5		
chn.rte	relative	-0,2	0,2		

Tabela C6 – Teste de Calibração 6

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
cn2.hru	relative	-0,25	0,25		
canmx.hru	replace	1	7		
esco.hru	replace	0	1		
k.sol	relative	-1	0		
awc.sol	relative	-0,5	0,5		
surlag.bsn	replace	0,0001	12	300	-0,48698
chk.rte	replace	3	5		
alpha.aqu	replace	0	0,5		
chn.rte	relative	0	0,1		
revap_min.aqu	relative	-0,5	0,5		
revap_co.aqu	relative	-0,5	0,5		
gwflow_lte.hlt	relative	-1	1		

Tabela C7 – Teste de Calibração 7

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
awc.sol	replace	0,001	0,75		
k.sol	replace	0,0001	60		
revap_co.aqu	replace	0,02	0,25	200	-0,09356
lat_len.hru	replace	1	100		
perco.hru	replace	0	1		
surlag.bsn	replace	0,05	12		

Tabela C8 – Teste de Calibração 8

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
cn2.hru	relative	-0,7	0		
canmx.hru	replace	1	25		
esco.hru	replace	0,6	0,95		
k.sol	relative	-0,5	0,5		
awc.sol	relative	-0,5	0,5		
surlag.bsn	replace	0,05	10		
msk_co1.bsn	replace	0	7	100	-0,4515
msk_co2.bsn	replace	0	7		
chk.rte	replace	3	5		
alpha.aqu	relative	-0,5	0,5		
chn.rte	relative	0	0,1		
revap_co.aqu	relative	-0,5	0,5		
revap_min.aqu	relative	-1	1		
gwflow_lte.hlt	relative	-1	1		

Tabela C9 – Teste de Calibração 9

Parâmetro	Tipo de Alteração	Mínimo	Máximo	Número de Interações	NSE Resultado
cn2.hru	replace	35	95		
alpha.aqu	replace	0	1		
surlag.bsn	replace	0,05	10		
revap_co.aqu	replace	0,02	0,2	200	-0,10959
lat_len.hru	replace	0	150		
perco.hru	replace	0	1		
awc.sol	replace	0,001	1		
k.sol	replace	0,0001	120		

ANEXO A - Dados pedológicos extraídos do SiBCS - EMBRAPA

Tabela A – Caracterização dos solos disponível no SiBiCS – EMBRAPA

(continua)

Classe de Solo	SIGLA	Horizontes - Profundidade Superior (em cm)	Horizontes - Profundidade Inferior (em cm)	Carbono Orgânico (em g/kg)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Rocha (%)
Argissolos Vermelhos Distróficos	PVd	0	20	3,0	5,0	7,0	88,0	0,0
		20	60	1,4	4,0	7,0	89,0	0,0
		60	100	1,7	13,9	8,9	77,2	0,0
		100	140	2,2	30,0	3,0	67,0	0,0
		140	147	3,1	23,0	2,2	46,8	28,1
		147	210	1,9	27,0	5,0	68,0	0,0
		210	280	0,7	15,0	11,0	74,0	0,0
Argissolos Vermelhos Eutróficos	PVe	0	30	1,4	3,0	4,0	93,0	0,0
		30	100	0,7	2,0	4,0	94,0	0,0
		100	138	3,3	22,0	4,0	74,0	0,0
		138	172	3,1	23,0	6,0	71,0	0,0
Gleissolos Háplicos Alítico	GXal	0	25	-	22,9	19,0	53,3	4,8
		35	60	-	31,8	11,2	50,5	6,5
		60	90	-	39,8	7,6	37,3	15,3
Latosolos Vermelhos Distroféricos	LVdf	0	20	22,3	81,0	11,0	8,0	0,0
		20	40	16,1	84,0	9,0	7,0	0,0
		40	65	11,5	87,0	8,0	5,0	0,0
		65	130	8,2	86,0	8,0	6,0	0,0
		130	210	5,5	85,0	10,0	5,0	0,0
Latosolos Vermelhos Distróficos	LVd	0	25	35,5	67,0	18,0	15,0	0,0
		25	45	20,5	77,0	12,0	11,0	0,0
		45	130	12,7	81,0	12,0	7,0	0,0
		130	240	5,5	80,0	12,0	8,0	0,0
Latosolos Vermelhos Eutroféricos	LVef	0	15	23,8	83,0	13,0	4,0	0,0
		15	46	12,7	81,0	16,0	3,0	0,0
		48	68	8,0	82,0	14,0	4,0	0,0
		68	135	9,4	81,0	15,0	4,0	0,0
		135	350	4,2	82,0	15,0	3,0	0,0
		350	450	1,4	81,0	16,0	3,0	0,0
Latosolos Vermelhos Eutróficos	LVe	0	18	22,5	69,0	19,0	12,0	0,0
		18	30	16,0	71,0	17,0	12,0	0,0
		30	60	7,6	80,0	11,0	9,0	0,0
		60	150	4,9	76,0	14,0	10,0	0,0
		150	235	3,2	74,5	13,7	9,8	2,0
		235	275	2,4	69,8	13,2	11,3	5,7
		275	325	1,9	48,8	17,1	15,4	18,7
		325	345	1,3	42,6	32,7	23,8	1,0
Neossolos Litólicos Distróficos	RLd	0	13	375,6	12,4	83,4	4,2	0,0
		13	25	37,3	18,3	46,2	35,5	0,0
Neossolos Litólicos Eutróficos	RLe	0	25	23,7	33,0	44,0	23,0	0,0
		25	55	4,2	25,0	33,0	42,0	0,0

Tabela A – Caracterização dos solos disponível no SiBiCS – EMBRAPA

Classe de Solo	SIGLA	Horizontes - Profundidade Superior (em cm)	Horizontes - Profundidade Inferior (em cm)	Carbono Orgânico (em g/kg)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Rocha (%)
Nitossolos Háplicos Distróficos	NXd	0	13	26,6	49,5	28,0	22,5	0,0
		13	31	18,3	55,7	21,8	22,5	0,0
		31	52	14,4	62,1	15,7	22,2	0,0
		52	82	11,0	60,4	18,0	21,6	0,0
		82	118	6,2	66,1	15,1	18,8	0,0
		118	145	5,1	64,2	17,4	18,4	0,0
		145	180	4,9	66,2	16,2	17,6	0,0
Nitossolos Háplicos Eutróficos	NXe	0	20	14,1	34,5	43,9	21,6	0,0
		20	40	11,0	36,5	42,2	21,3	0,0
		60	80	7,0	42,7	38,4	18,9	0,0
Nitossolos Vermelhos Eutroféricos	NVef	0	20	13,5	65,0	24,0	11,0	0,0
		20	35	7,6	73,3	17,8	7,9	1,0
		35	60	5,8	81,0	13,0	6,0	0,0
		60	125	3,7	82,0	13,0	5,0	0,0
		125	160	2,9	79,2	12,9	6,9	1,0
		160	240	2,4	72,1	16,3	7,7	3,8
		240		2,4	36,8	39,6	17,9	5,7
Nitossolos Vermelhos Distroféricos	NVdf	0	10	25,0	52,0	30,0	18,0	0,0
		10	25	14,1	61,0	22,0	17,0	0,0
		25	73	9,3	69,0	19,0	12,0	0,0
		73	168	4,8	65,0	22,0	13,0	0,0
		168	229	2,0	49,0	34,0	17,0	0,0
		229	260	1,3	42,0	39,0	19,0	0,0