

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IMPACTO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS
DEVIDO AO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO
PIÇARRÃO, TRIÂNGULO MINEIRO**

VINÍCIUS DE MATOS BRANDÃO RAPOSO

UBERLÂNDIA, JANEIRO DE 2019



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Vinícius de Matos Brandão Raposo

**IMPACTO NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS DEVIDO
AO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO PIÇARRÃO,
TRIÂNGULO MINEIRO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos
para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Ricardo Salla
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira

Uberlândia, 10 de janeiro de 2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R219 Raposo, Vinícius de Matos Brandão, 1994-
2020 Impacto na produção de sedimentos devido ao uso e ocupação
do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, Triângulo
Mineiro [recurso eletrônico] / Vinícius de Matos Brandão Raposo. -
2020.

Orientador: Márcio Ricardo Salla.

Coorientador: Carlos Eugênio Pereira.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.329>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. I. Salla, Márcio Ricardo, 1976-, (Orient.). II.
Pereira, Carlos Eugênio, 1974-, (Coorient.). III. Universidade
Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Civil. IV.
Título.

CDU: 624

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Civil				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 247, PPGEC				
Data:	10 de janeiro de 2020	Hora de início:	10h 00 min	Hora de encerramento:	12h 40 min
Matrícula do Discente:	11722ECV005				
Nome do Discente:	Vinícius de Matos Brandão Raposo				
Título do Trabalho:	Impacto na produção de sedimentos devido ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, Triângulo Mineiro				
Área de concentração:	Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental				
Linha de pesquisa:	Recursos Hídricos e Saneamento				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudos de aproveitamento hídrico e autodepuração em bacias hidrográficas nas unidades de planejamento de gestão em recursos hídricos dos Rios Paranaíba e Grande (lado mineiro)				

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, assim composta pelos Professores Doutores: Heber Martins de Paula – DECIV/UFU, José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU e Marcio Ricardo Salla - FECIV/UFU orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Marcio Ricardo Salla, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Ricardo Salla, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/01/2020, às 12:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Eduardo Alamy Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/01/2020, às 12:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Heber Martins de Paula, Usuário Externo**, em 30/01/2020, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1767297** e o código CRC **77ADA1EE**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter sido sempre Aquele que me sustentou em minha caminhada e que pela sua infinita misericórdia, conduziu-me até aqui.

Aos meus pais, Ricardo e Eni, pois além de terem me dado a vida, cuidaram de mim, educaram-me, transmitiram-me seus valores e, principalmente, sempre me amaram.

Aos meus irmãos, Sara e Gabriel, por tanto apoio e conselhos. Vocês fizeram minha caminhada ser mais leve e alegre.

Ao professor Márcio Ricardo Salla, por ter aceitado me orientar e me apoiar nesta caminhada.

Ao professor Carlos Eugênio Pereira, meu coorientador, que me acompanhe desde a graduação e tem-se demonstrado um grande amigo.

Aos amigos do Movimento de Cursilhos de Cristandade que me apoiaram na fé e ajudaram-me nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos César, Carlos Eduardo, Ellen e Leonardo, por terem me escutado tantas vezes e terem dado valiosas contribuições com esta dissertação.

À CAPES, por ter me concedido uma bolsa de estudos que permitiu que eu me dedicasse a esta dissertação.

*Dedico aos meus pais, Ricardo e Eni,
que foram fundamentais na minha
formação quanto pessoa.*

Raposo, V. M. B. Impacto na produção de sedimentos devido ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, Triângulo Mineiro. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

RESUMO

A relação entre o homem e a natureza vem sendo objeto de estudo por diversos pesquisadores em todo o mundo. De maneira particular, pode-se destacar a erosão, que é um processo natural e que tem tido a sua magnitude aumentada a partir das intervenções humanas no meio ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar dois cenários de produção de sedimentos sob a influência do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, Triângulo Mineiro. Para isso, a partir de uma estação de monitoramento de responsabilidade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) nas proximidades da foz da bacia hidrográfica, foram realizadas previamente a calibração e validação hidrológica e de sedimentos totais produzidos, com o período de janeiro de 2017 a dezembro de 2018 para a calibração e de janeiro a novembro de 2019 para a validação. Utilizou-se o modelo computacional *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para as simulações e o *SWAT-Calibration and Uncertainty Programs* (SWAT-CUP) no processo de calibração e validação. Os dados de entrada requeridos pelo modelo SWAT foram mapa de uso e ocupação do solo, mapa de solos, declividade do terreno e dados climáticos. A fim de otimizar o processo de calibração e validação hidrológica e de sedimentos totais produzidos, uma análise prévia de sensibilidade no SWAT-CUP identificou os parâmetros CN2, SOL_K e SURLAG que são, respectivamente, a curva número, condutividade hidráulica saturada e coeficiente de retardo do escoamento superficial como os mais sensíveis. Contudo, a calibração e validação hidrológica trouxeram resultados aceitáveis na comparação entre a vazão superficial simulada e monitorada na foz da bacia hidrográfica, com coeficiente Nash-Sutcliffe de 0,63 para calibração e 0,62 para a validação. A calibração do comportamento temporal de sedimentos totais trouxe resultado satisfatório na comparação entre os sedimentos totais simulados e monitorados na foz da bacia hidrográfica, com um PBIAS de 52,8 e coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,63. Já o processo de validação do comportamento temporal de sedimentos totais não trouxe resultados aceitáveis, com

coeficiente PBIAS igual a 55,6. Os cenários analisados mostraram que as áreas ocupadas por agricultura são as mais susceptíveis à erosão na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.

Palavras-chave: ferramenta SWAT; Ribeirão Piçarrão; Uso e ocupação do solo; produção de sedimentos totais.

Raposo, V. M. B. Impact on the sediment production due to the use and occupation of the soil in the river basin of the Piçarrão river, Triângulo Mineiro. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2019.

ABSTRACT

The relationship between man and nature has been the subject of study by many researchers around the world. Particularly noteworthy is erosion, which is a natural process and has increased in magnitude from human interventions in the environment. The objective of this work was to evaluate two scenarios of sediment production due to land use and occupation in the Piçarrão river watershed, Triângulo Mineiro. For this, from a monitoring station near the mouth of the watershed, the hydrological calibration and validation of the total sediments produced were previously performed, with the period from January 2017 to December 2018 for calibration and from January to November 2019 for validation. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) computational model was used for the simulations and the SWAT - Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP) in the calibration and validation process. The input data required by the SWAT model were land use map, soil map, terrain slope and climate data. In order to optimize the hydrological and total sediment calibration and validation process, a previous sensitivity analysis in the SWAT-CUP software identified the parameters CN2, SOL_K and SURLAG which are, respectively, the number curve, saturated hydraulic conductivity and coefficient of runoff delay as the most sensitive. However, hydrological calibration and validation yielded acceptable results when comparing simulated and monitored surface flow at the watershed mouth, with Nash-Sutcliffe coefficient of 0.63 for calibration and 0.62 for validation. Calibrating the temporal behavior of total sediments yielded a satisfactory result when comparing simulated and monitored total sediments at the mouth of the watershed, with a PBIAS of 52.8, Nash-Sutcliffe coefficient of 0.63. The validation process of the total sediment temporal behavior did not

yield acceptable results, with a PBIAS coefficient equal to 55.6. The scenarios analyzed showed that the areas occupied by agriculture are the most susceptible to erosion in the Piçarrão river watershed.

Keywords: SWAT – Piçarrão river – Land use – Sediments yield



SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

a	- Coeficiente de ajuste de curvas-chave de potência
a_0, a_1, a_2 e a_n	- Coeficientes de ajuste de curvas-chave polinomiais
$ALPHA_BF$	- Constante de recessão para o fluxo de base
$ANIOM_EXCL$	- Fração de porosidade do solo
$area_{HRU}$	- Área do HRU, em ha
b	- Coeficiente de ajuste de curvas-chave
$CANMX$	- Armazenamento máximo do dossel
$CFRG$	- Fator de Fragmento Bruto
CH_N2	- Coeficiente de rugosidade de Manning
$CLAY$	- Porcentagem de silte no solo
$CN2$	- Número da Curva na condição de umidade II
C_{ss}	- Concentração de sedimentos em suspensão
C_{USLE}	- Fator de cobertura e gestão USLE
$DEWPT$	- Temperatura no ponto de orvalho, em °C
d_i	- Distância euclidiana entre o ponto amostrado e o estimado
$EPCO$	- Fator de compensação de retirada das plantas
$ESCO$	- Fator de compensação da evaporação do solo
GW_DELAY	- Intervalo de tempo para a recarga do aquífero
$GWHT$	- Altura inicial do aquífero
$GWQMN$	- Profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado para o canal
GW_REVAP	- Coeficiente de re-evaporação da água subterrânea

H	- Cota referente a uma vazão
H_0	- Cota referente a uma vazão nula
$HYDGRP$	- Grupo de mínima saturação hidráulica
I	- Insolação, em h
K_{USLE}	- Fator de Erodibilidade do Solo USLE
LS_{USLE}	- Fator topográfico USLE
n	- Duração do dia, em h
$NLAYERS$	- Número de horizontes
Q_i	- Quantidade diária de escoamento superficial no dia i , em mm
P_i	- Quantidade diária de percolação no dia i , em mm
Q_{cal}	- Vazão calculada, em m ³ /s
Q_{nm}	- Descarga sólida não medida
Q_{obs}	- Vazão observada, em m ³ /s
q_{peak}	- Índice máximo de escoamento, em m ³ /s
Q_{pol}	- Vazão da curva-chave de polinômio, em m ³ /s
Q_{pot}	- Vazão da curva-chave de potência, em m ³ /s
QR_i	- Quantidade de retorno do fluxo no dia i , em mm
Q_{ss}	- Descarga em suspensão em suspensão
Q_{st}	- Descarga sólida total, em t
Q_{ste}	- Descarga sólida total obtida no tramo extrapolado da curva-chave
Q_{surf}	- Volume de escoamento superficial, em mmH ₂ O/ha
P_i	- Valor interpolado da precipitação, em mm
P'_i	- Valor amostrado da precipitação, em mm
$PCPD$	- Número de dias de precipitação
$PCPMM$	- Precipitação média, em mm
$PCPSKW$	- Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima
$PCPSTD$	- Desvio da precipitação, em mm.
PR_W1	- Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de seca, em %
PR_W2	- Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de chuva, em %
P_{USLE}	- Fator de prática de apoio USLE
Q	- Vazão, em m ³ /s
q_{PEAK}	- Índice máximo de escoamento, em m ³ /s

Q_{SURF}	- Volume de escoamento superficial, em mmH ₂ O/ha
R_a	- Radiação solar extraterrestre, em MJ/m ² .dia
$RAINHHMX$	- Precipitação máxima de 0,5 horas, em mm
$RCHRG_DP$	- Fração da percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo
$REVAPMN$	- Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação
R_i	- Quantidade diária de precipitação no dia i , em mm
$ROCK$	- Porcentagem de cascalho no solo
R_s	- Radiação solar, em MJ/m ² .dia
$SAND$	- Porcentagem de areia no solo
sed	- Produção de sedimentos em um dia i , em toneladas
$SHALLST$	- Quantidade de água inicial no aquífero raso
$SNAM$	- Nome dado à classe do solo
$SOLARAV$	- Valor diário da energia solar, em MJ/m ² .dia
SOL_ALB	- Albedo do solo
SOL_AWC	- Capacidade de água no solo
SOL_BD	- Densidade do solo
SOL_CBN	- Carbono orgânico no solo
SOL_K	- Condutividade Hidráulica Saturada
SOL_Z	- Profundidade de cada horizonte
SOL_ZMX	- Profundidade máxima de solo que a raiz alcança
$SURLAG$	- Coeficiente de atraso do escoamento superficial
SW	- Umidade do solo inicial no dia i , em mm H ₂ O
SW_t	- Umidade final de água no solo, em mm H ₂ O
t	- Tempo, em dias
$TMPMN$	- Temperatura mínima, em °C
$TMPMX$	- Temperatura máxima, em °C
$TMPSTDMN$	- Desvio da temperatura mínima
$TMPSTDMX$	- Desvio da temperatura máxima
$USLE_K$	- Fator de erodibilidade do solo
$WINDAV$	- Velocidade do vento, em m/s
Y_t^{obs}	- Evento observado

$Y_i^{obs_medio}$	- Média do evento observado
Y_i^{sim}	- Evento simulado
$Y_i^{sim_medio}$	- Média do evento simulado
α	- Coeficiente da distância euclidiana

ABREVIATURAS

<i>ha</i>	- Hectares
<i>hm</i>	- Hectômetro
<i>km</i>	- Quilômetro
<i>MJ</i>	- Megajoule
<i>MW</i>	- Megawatt
<i>mm</i>	- Milímetros
<i>n°</i>	- Número
°C	- Graus Celsius

SIGLAS

<i>ANEEL</i>	- Agência Nacional de Energia Elétrica
<i>ANA</i>	- Agência Nacional das Águas
<i>APP</i>	- Área de Preservação Permanente
<i>ARS</i>	- <i>Agricultural Research Service</i>
<i>BH</i>	- Bacia Hidrográfica
<i>CEMIG</i>	- Companhia Energética de Minas Gerais
<i>CGH</i>	- Central Geradora Hidrelétrica
<i>CN</i>	- Número da Curva do <i>Soil Conservation Service</i>
<i>COE</i>	- <i>Nash-Sutcliffe efficiency</i>
<i>COPASA</i>	- Companhia de Saneamento de Minas Gerais
<i>CREAMS</i>	- <i>Chemicals, Runoff, and Erosion form Agricultural Managment Systems</i>
<i>EMBRAPA</i>	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

<i>EPIC</i>	- <i>Erosion-Productivity Impact Calculator</i>
<i>EUA</i>	- Estados Unidos das Américas
<i>GLEAMS</i>	- <i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems</i>
<i>HRU</i>	- Unidade de Resposta Hidrológica
<i>IBAMA</i>	- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
<i>IBGE</i>	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas
<i>INMET</i>	- Instituto Nacional de Meteorologia
<i>INPE</i>	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>IPD</i>	- Inverso Ponderado da Distância
<i>LV</i>	- Latossolo vermelho
<i>MapBiomass</i>	- Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil
<i>MDT</i>	- Modelo Digital de Terreno
<i>MUSLE</i>	- Equação Universal de Perda de Solo Modificada
<i>MGB-IPH</i>	- Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
<i>MMA</i>	- Ministério do Meio Ambiente
<i>OLI</i>	- <i>Operational Land Imager</i>
<i>PCH</i>	- Pequena Central Hidrelétrica
<i>PBIAS</i>	- <i>Percent bias</i>
<i>PSA</i>	- Pagamento por Serviços Ambientais
<i>RMR</i>	- <i>Observation Standard Derivation Ratio</i>
<i>ROTO</i>	- <i>Routing Outputs to Outlet</i>
<i>SHE</i>	- Sistema Hidrológico Europeu
<i>SIG</i>	- Sistema de Informação Geográfica
<i>SRTM</i>	- <i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
<i>SWAT</i>	- <i>Soil and Water Assessment Tool</i>
<i>SWAT-CUP</i>	- <i>SWAT- Calibration and Uncertainty Programs</i>
<i>SWRRB</i>	- <i>Simulator for Water Resources in Rural Basin</i>
<i>TOPMODEL</i>	- <i>Topography Based Hydrological Model</i>
<i>UFG</i>	- Universidade Federal de Goiás
<i>UFU</i>	- Universidade Federal de Uberlândia
<i>USDA</i>	- <i>United States Department of Agriculture</i>
<i>USGS</i>	- <i>United States Geological Survey</i>

USLE - Equação Universal de Perda de Solo
UTM - *Universal Transversa de Mercator*
WEPP - *Water Erosion Prediction Project*



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 – Parte do barramento da CGH Piçarrão.....	22
Figura 2 - Ciclo hidrológico	25
Figura 3 - Exemplo de uma bacia hidrográfica	27
Figura 4 - Esquema da história de desenvolvimento do SWAT.....	35
Figura 5 - Distribuição dos 102 estudos identificados na literatura da SWAT brasileira em porcentagem por ano durante o período de 14 anos da pesquisa.....	42
Figura 6 - Fluxograma da metodologia desenvolvida	48
Figura 7 - Localização da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.....	49
Figura 8 – Rede de drenagem da bacia hidrográfica do Ribeirão Piçarrão	50
Figura 9 - Distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas na área de estudo	57
Figura 10 – Mapa hipsométrico e delimitação da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.	65
Figura 11 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.....	67
Figura 12 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão de 2018 ...	69
Figura 13 - Classificação das estações conforme disponibilidade de dados	72
Figura 14 - Hietogramas para os três cenários fictícios de interpolação	74
Figura 15 - Sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão	75
Figura 16 - Curvas-chave para a seção transversal no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão	77
Figura 17 - Comportamento da curva-chave de sedimentos na estação CGH Piçarrão Montante.....	79
Figura 18 - Resultado da simulação de situação "A" (sem calibração).....	81

Figura 19 - Resultado da simulação de situação "B" (sem calibração).....	82
Figura 20 - Resultado da simulação de situação "C" (sem calibração).....	83
Figura 21 - Análise de sensibilidade dos parâmetros	86
Figura 22 - Gráficos pontilhados (<i>dotty plots</i>) de valores testados x Coeficiente de Nash-Sutcliffe	89
Figura 23 - Hidrograma calibrado obtido pelo SWAT-CUP.....	90
Figura 24 - Descarga sólida total (antes da calibração).....	94
Figura 25 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à sedimentação	96
Figura 26 - Produção de sedimentos na calibração e validação	97
Figura 27– (a) Sedimentos totais produzidos no cenário inicial (t/mês), em escala mensal; (b) Sedimentos totais produzidos para cenário simulado (t/mês), em escala mensal.....	100

TABELAS

Tabela 1 - Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo.....	51
Tabela 2 - Valores dos parâmetros físicos do solo inseridos no SWAT	54
Tabela 3 - Estações pluviométricas consideradas no IPD	56
Tabela 4 - Classificações gerais de desempenho para estatísticas recomendadas por um período de tempo mensal.....	62
Tabela 5 - Uso e ocupação do solo no alto curso do rio Piçarrão.....	63
Tabela 6 - Classificação da declividade e respectivas áreas.....	66
Tabela 7 - Área referente a cada classe de uso e ocupação do solo de agosto de 2018.....	68
Tabela 8 - Fatores de cobertura e manejo do solo	70
Tabela 9 - Distâncias das estações pluviométricas ao centroide	71
Tabela 10 - Parâmetros climáticos calculados para a estação fictícia	73
Tabela 11 - Média mensal da produção de sedimentos para cenários simulados.....	99

QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos modelos hidrológicos	30
Quadro 2 - Novos valores de CN adotados no SWAT	52

Quadro 3 - Parâmetros dos solos utilizados pelo modelo SWAT	53
Quadro 4 - Parâmetros climáticos utilizados para simulação no SWAT	55
Quadro 5 - Campanhas sedimentométricas no ribeirão Piçarrão	79
Quadro 6 - Parâmetros testados na análise de sensibilidade	85
Quadro 7 - Valores adotados na calibração e validação da vazão	92
Quadro 8 - Parâmetros utilizados na calibração de sedimentos	95



SUMÁRIO

1. Introdução	19
1.1 Justificativas	21
1.2 Objetivos	22
2. Revisão bibliográfica	24
2.1 Ciclo hidrológico.....	25
2.2 Bacias hidrográficas: planejamento e gestão	26
2.3 Transporte de sedimentos	27
2.4 Modelagem hidrológica de bacias	29
2.5 Modelos hidrológicos	32
2.5.1 Modelos hidrológicos disponíveis	32
2.6 Modelo SWAT	34
2.6.1 Desenvolvimento do modelo SWAT	35
2.6.2 Aspectos gerais do modelo SWAT	37
2.6.3 Fase do terreno do ciclo hidrológico	37
2.6.4 Fase de propagação do ciclo hidrológico	40
2.6.5 Equação de propagação de sedimentos	41
2.5.6 Aplicação do modelo SWAT	41
2.7 <i>SWAT-Calibration and Uncertainty Programs (SWAT-CUP)</i>	45
3. Materiais e métodos	47
3.1 Caracterização da área de estudo	47
3.2 Levantamento dos dados necessários	50
3.2.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)	50
3.2.2 Mapa de uso e ocupação do solo	51
3.2.3 Mapa de solos	52

3.2.4 Dados climáticos	54
3.3 Criação das HRUs	57
3.4 Obtenção dos valores observados de vazão e sedimentos	58
3.5 Calibração e validação	59
3.5.1 Análise de sensibilidade.....	59
3.5.2 Calibração e validação	60
3.6 Simulação de cenários	63
4. Resultados e discussões	64
4.1 MDT	64
4.2 Base de dados	66
4.2.1 Mapa de declividade	66
4.2.2 Base cartográfica de uso e ocupação do solo	68
4.2.3 Base cartográfica de solos	71
4.2.4 Dados climatológicos	71
4.3 Geração das sub-bacias e HRUs	74
4.4 Monitoramento de vazão e sedimentos totais	75
4.4.1 Vazão	75
4.4.2 Sedimentos totais	78
4.5 Simulações na ferramenta SWAT	80
4.5.1 Simulação hidrológica na pré-calibração	80
4.5.2 Análise de sensibilidade de valores relacionados a vazão	84
4.5.3 Processo de calibração e validação das vazões	89
4.5.4 Processo de calibração e validação de sedimentos totais	93
4.6 Análise de cenário	98
5. Conclusões	102
Referências bibliográficas.....	103

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Um tema amplamente discutido entre geólogos, ambientalistas, biólogos, engenheiros, entre outras classes de pesquisadores, é a interação entre o homem e a natureza e, com isso, os efeitos que essa relação gera nos ambientes e como afeta a vida do homem. O aquecimento global, a poluição do solo, da água, do ar, o desmatamento, a chuva ácida são alguns exemplos de temas comumente citados e debatidos a nível global.

Nota-se que processos que sempre ocorreram de forma natural têm tido seus ciclos alterados a partir da interferência antrópica, como é o caso do ciclo hidrológico e também do ciclo hidrossedimentológico em bacias hidrográficas. Dentro deste último ciclo citado, pode-se fazer referência a um fenômeno que sempre esteve presente na natureza, que é a erosão dos solos. Este fenômeno tem tomado maiores proporções a partir da interferência humana no meio ambiente.

A erosão, conforme Bastos, Milititsky e Gehling (2000), é um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são degradados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, tais como as geleiras, os rios, os mares, o vento ou a chuva. Embora possa parecer um fenômeno de simples concepção,

apresenta uma complexidade de mecanismos envolvidos. Pode-se citar quatro grupos de fatores responsáveis: climáticos (chuva, temperatura, radiação solar e vento); topográfico (declividade); vegetação (cobertura vegetal); e erodibilidade do solo.

A erosão é um assunto de bastante preocupação no que se tange às bacias hidrográficas. Nesse sentido, Carvalho (2014) recorda que a erosão é um problema de duas faces: a primeira relaciona-se à perda das camadas férteis de solo, prejudicando terrenos utilizados para agricultura; e a segunda atribui-se à geração, ao transporte e à deposição dos materiais erodidos em leitos de cursos de águas e reservatórios, interferindo nas funções e usos dos mesmos.

Sobre a primeira face desse problema, Neitsch *et al.* (2011) descreveram como os fazendeiros tiveram que alterar as práticas da lavoura e colheita nos primeiros sistemas de agricultura. Antes, um dos propósitos primários dos fazendeiros era remover o máximo de resíduo de planta para que as pragas não tivessem fonte de alimento para sustentá-las até a próxima estação de crescimento. Entretanto, como pesquisas ligam a erosão com a falta de vegetação no solo, os fazendeiros começaram a realizar menos operações de lavoura e alteraram os métodos de colheita para deixar mais resíduos com o objetivo de minimizar os efeitos da erosão.

Em relação à segunda face, Shen e Julien (1992) descrevem que a acumulação de sedimentos em um reservatório pode reduzir o volume útil de armazenamento de água, alterar a qualidade da água nas proximidades da barragem, aumentar o nível de inundação a montante da barragem devido à desagregação de sedimentos.

Devido a erosão, com o passar do tempo, no fundo do reservatório haverá uma alteração em seu relevo, geralmente tendo como consequência a perda da capacidade de armazenamento. Sendo assim, o levantamento topográfico prévio ao enchimento do reservatório não será mais condizente com a atualidade e quanto maior a idade do reservatório, menor será a fidelidade do dado com a condição real. Segundo Estigoni *et al.* (2012), no Brasil, um grande passo no estudo dos problemas de assoreamento foi dado com a Resolução Conjunta N° 003 (ANEEL – ANA, 2010), a qual prevê o monitoramento hidrossedimentométrico, bem como

a realização de levantamentos batimétricos periódicos para a determinação das reais condições de assoreamento dos reservatórios nacionais.

Sendo assim, a partir da problemática descrita anteriormente, tem se desenvolvido uma série de estudos em bacias hidrográficas com o objetivo de melhor compreender a dinâmica do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e os impactos causados sobre os corpos hídricos devido às alterações no uso do solo e na cobertura vegetal. Nesse sentido, a modelagem ambiental tem sido amplamente adotada com o intuito de se representar a dinâmica da água e do transporte de sedimentos e nutrientes nas bacias hidrográficas (SOUZA, 2016).

Segundo Arnold *et al.* (1998), o desenvolvimento e gerenciamento de recursos hídricos de grandes áreas requer uma compreensão dos processos hidrológicos básicos e das capacidades de simulação na escala da bacia hidrográfica. Blainski, Acosta e Nogueira (2017) escreveram que os modelos hidrológicos se consolidaram como ferramentas de representação desses processos com alto potencial para a simulação de cenários de mudanças climáticas, de alterações do uso do solo e de intervenções antrópicas em diferentes escalas espaciais e temporais.

Neste estudo foi empregado o modelo de uso livre *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) que, conforme Souza (2016), é um modelo computacional que conjuga uma série de parâmetros físicos, tais como tipo e uso do solo, cobertura vegetal e relevo da região em estudo, e que permite a simulação de cenários de uso e ocupação do solo. Segundo Gassman *et al.* (2007), dentre os modelos hidrológicos utilizados ao redor do mundo, o modelo SWAT tem obtido destaque devido à sua aplicação na compreensão de fenômenos hidrológicos, avaliação da poluição, impacto do uso e gestão do solo na qualidade da água, entre outros.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, foco deste estudo, está localizada na região do Triângulo Mineiro, cujo ribeirão Piçarrão é o principal afluente do rio Jordão que, por sua vez, deságua no médio curso do rio Paranaíba em sua margem esquerda. A escolha por esta bacia se deu por sua importância ambiental, econômica e social para o município de

Araguari. Diversos são os problemas observados na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão como, por exemplo, a retirada da mata ciliar ao longo dos cursos de água, a existência de vários processos erosivos e de assoreamento do curso de água. De acordo com Sousa (2014), a paisagem local se transformou nas últimas três décadas, adequando-se aos interesses econômicos, com o aumento da área destinada para a agricultura em detrimento das áreas nativas de cerrado.

Outro fator que justifica este estudo é a possibilidade de acúmulo de sedimentos na Central Geradora Hidrelétrica Piçarrão (CGH Piçarrão), administrada pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Esta CGH possui uma barragem de comprimento e altura máxima de, respectivamente, 34,8 m e 3,1 m (ver parte do barramento na Figura 1) e está localizada à aproximadamente 38,6 km a montante da confluência do ribeirão Piçarrão com o rio Paranaíba. O reservatório possui volume total máximo de 0,2 hm³ e a casa de força tem duas unidades geradoras com potência instalada total de 0,8 MW (CACHAPUZ, 2006).

Figura 1 – Parte do barramento da CGH Piçarrão



Fonte: Cachapuz (2006)

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar dois cenários de produção de sedimentos devido ao uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, Triângulo Mineiro. Os objetivos específicos incluem: calibração e validação hidrológica a partir de uma estação

fluviométrica localizada na foz da bacia hidrográfica; calibração e validação da descarga sólida total, utilizando como base de comparação os valores simulados e monitorados na mesma estação localizada na foz da bacia hidrográfica; avaliação do comportamento do ciclo hidrossedimentológico desta bacia por meio de modificações no uso e ocupação do solo.

Este trabalho é constituído de cinco capítulos, organizados da seguinte maneira:

- Capítulo 1: apresenta a Introdução deste trabalho, a qual aborda a problemática da erosão em bacias hidrográficas e apresenta os objetivos gerais e específicos.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica, elucida alguns conceitos sobre o ciclo hidrológico e o transporte de sedimentos, bem como apresenta a importância da modelagem hidrológica de bacias hidrográficas, cita alguns modelos hidrológicos e discorre sobre o modelo SWAT.
- Capítulo 3: Materiais e métodos, onde está a caracterização da área de estudo, apresenta como foi feito o levantamento dos dados necessários para simulação no modelo SWAT (climáticos, hidrológicos, tipo de solos e uso e ocupação dos solos). Além disso, apresenta como foi delimitada a bacia hidrográfica e os passos para a seleção dos parâmetros e a calibração do modelo e, por fim, o balanço hídrico da bacia por meio de cenários de uso e ocupação do solo.
- Capítulo 4: Resultados e discussão, apresenta os resultados obtidos da simulação hidrológica.
- Capítulo 5: é dedicado às conclusões finais obtidas por esta pesquisa.
- Referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

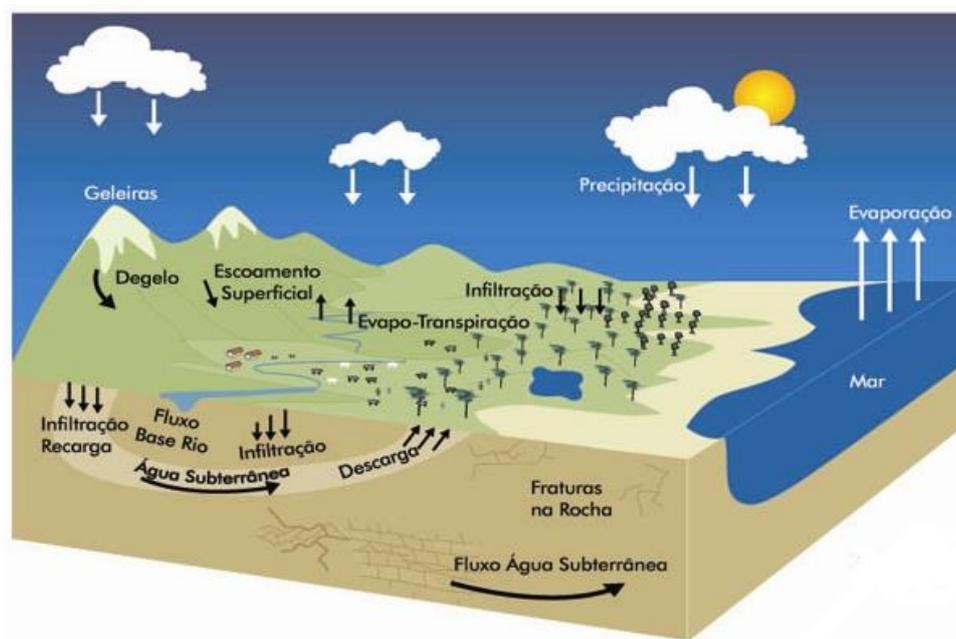
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A água da Terra está sempre em movimento, e o ciclo natural da água, também conhecido como ciclo hidrológico, descreve o movimento contínuo da água sobre, acima e abaixo da superfície da Terra. A água está sempre mudando estados entre líquido, vapor e gelo, com esses processos acontecendo rapidamente e ao longo de milhões de anos (USGS, 2017).

Segundo Righetto (1998), denomina-se ciclo hidrológico o processo natural de evaporação, condensação, precipitação, retenção e escoamento superficiais, infiltração, percolação da água do solo e nos aquíferos, escoamento fluviais e interações entre esses componentes. Ademais, Tucci (2013), diz que o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. A Figura 2 apresenta uma esquematização do ciclo hidrológico.

Figura 2 - Ciclo hidrológico



Fonte: MMA (2019)

De acordo com Dalbianco (2013), dois grandes sistemas estão envolvidos no ciclo hidrológico, sendo eles o sistema terrestre e o sistema atmosférico. No sistema terrestre, tem-se a superfície coberta pelos mares, com fluxo negativo no sentido vertical (maior evaporação que precipitação), e a superfície continental, que tem fluxo positivo (precipitação maior que a evaporação), o que origina as vazões dos rios em direção aos oceanos.

O vapor de água produzido pela evaporação de corpos de água e pela evapotranspiração da biosfera é transportado pelo movimento de massas de ar, resultando na formação de nuvens quando se atingem altitudes suficientes para que, na baixa temperatura ambiente, ocorra a condensação do vapor. A precipitação se dá pela aglutinação de gotículas de água em torno de núcleos de condensação, quando as massas das gotas atingem magnitudes suficientes para vencer, pela gravidade, as forças de sustentação (RIGHETTO, 1998; PINTO *et al.*, 1976).

No trajeto em direção à superfície terrestre a precipitação já sofre evaporação. Caindo sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado sofre interceptação em folhas e caules, de onde evapora. Excedendo a capacidade de armazenar água na superfície dos vegetais, ou por ação dos ventos, a água interceptada pode-se reprecipitar para o solo (TUCCI, 2013).

Ainda de acordo com Tucci (2013), a água que atinge o solo segue diversos caminhos. Como o solo é um meio poroso, há infiltração de toda a precipitação que chega ao solo, enquanto que a superfície no solo não se sature. A partir do momento da saturação superficial, o excesso não infiltrado da precipitação gera escoamento superficial. A umidade do solo realimentada pela infiltração é aproveitada em parte pelos vegetais, que a absorvem pelas raízes e a devolvem, quase toda, à atmosfera por transpiração; e o que os vegetais não aproveitam, percola para o lençol freático que normalmente contribui para o escoamento de base dos rios. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que erode partículas de solo em seu trajeto; essa erosão aliada à topografia preexistente, molda, por sua vez, uma microrrede de drenagens efêmera que converge para a rede de cursos de água mais estável, formada por rios.

De acordo com Righetto (1998), nas aplicações de engenharia hidrológica, toma-se um domínio local ou regional onde se considera, em geral, a bacia hidrográfica como sendo a área principal de estudo. Nesse domínio, são abordados apenas os componentes mais relevantes do ciclo hidrológico; por exemplo, para o balanço hídrico, são considerados a evapotranspiração, a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração e a percolação profunda.

2.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS: PLANEJAMENTO E GESTÃO

De acordo com Pires, Santos e Del Prette (2002), o conceito de Bacia Hidrográfica (BH) tem sido cada vez mais expandido e utilizado como unidade de gestão e planejamento ambiental. Na perspectiva de um estudo hidrológico, o conceito de BH envolve explicitamente o conjunto de terras drenadas por um corpo de água principal e seus afluentes e representa a unidade mais apropriada para o estudo qualitativo e quantitativo do recurso água e dos fluxos de sedimentos e nutrientes.

A bacia hidrográfica, conforme descrita por Tucci (2013), é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório (Figura 3).

Figura 3 - Exemplo de uma bacia hidrográfica



Fonte: adaptado de Tucci (2013)

A utilização da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento ambiental não é recente; há muito tempo os hidrólogos têm reconhecido as ligações entre as características físicas de uma bacia hidrográfica e a quantidade de água que chega aos corpos hídricos (PIRES; SANTOS; DEL PRETTE, 2002). Esta mesma caracterização pode ser usada com respeito aos sedimentos. As vertentes “produzem” os sedimentos por fenômenos de erosão e estes são transportados com a água pela rede de drenagem, junto com a carga significativa de sedimentos produzida nos próprios leitos dos rios (TUCCI, 2013).

2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

De acordo com Shen e Julien (1992), os processos naturais de erosão, transporte e deposição dos sedimentos ocorreram ao longo dos tempos geológicos e moldaram a paisagem do mundo em que vivemos. A erosão causa frequentemente danos graves nas terras agrícolas, reduzindo a fertilidade e a produtividade dos solos. O transporte de sedimentos afeta a qualidade da água e sua adequação ao consumo. O solo erodido das terras altas é a fonte da maioria dos sedimentos transportados pelos rios para os reservatórios. Os problemas

associados com a deposição de sedimentos são variados. A deposição de sedimentos nos canais da bacia reduz a capacidade de transporte da onda de cheia, resultando em maior dano por inundação nas propriedades adjacentes.

Atividades humanas aumentaram a taxa de erosão sobre a taxa normal de erosão, também chamada de taxa de erosão geológica. Algumas práticas no solo como, por exemplo, as lavouras perturbam a estrutura do solo tornando-o mais vulnerável à erodibilidade. As atividades humanas também influenciam as características naturais das vazões no canal natural, por meio da estabilização de canais e estruturas hidráulicas (SHEN; JULIEN, 1992).

Em épocas chuvosas o transporte é maior, principalmente em chuvas de maior intensidade. Segundo Taveira (2016) e Tucci (2013), a partícula de sedimento passa pelos processos de erosão, deslocamento, transporte, deposição e compactação. Esses processos, em conjunto, constituem o ciclo hidrossedimentológico, são eles:

- Desagregação: se refere ao desprendimento de partículas sólidas do meio do qual fazem parte; ela pode se dar sob o efeito de reações químicas, flutuações de temperatura, ações mecânicas ou outros fatores naturais que não envolvem diretamente o ciclo hidrológico.
- Erosão: processo de deslocamento de seu local de origem das partículas sólidas de superfície do solo ou das paredes dos leitos dos córregos e rios, sob o efeito do escoamento.
- Transporte: o transporte do material erodido pela água pode se dar de várias maneiras. As partículas mais pesadas deslocam-se sobre (ou junto ao) o fundo por rolamento, deslizamento ou, eventualmente, por saltos curtos. As mais leves deslocam-se no seio do escoamento e constituem a descarga sólida em suspensão.
- Decantação: processo pelo qual as partículas mais finas transportadas em suspensão tendem a restabelecer contato com o fundo do leito sob o efeito da gravidade.
- Depósito: parada total da partícula em suspensão recém decantada sobre o fundo, ou daquela transportada por arraste.

- Consolidação: acúmulo de partículas sobre o fundo e a compactação do depósito resultante sob efeito do próprio peso dos sedimentos, da pressão hidrostática ou qualquer outro fenômeno que venha aumentar a densidade dos depósitos.

A produção de sedimentos depende fundamentalmente do ciclo da água na bacia hidrográfica. Desta forma, a vertente – produtora de água – também vai ser produtora de sedimentos, e a rede de drenagem será a transportadora tanto de água como de sedimentos. Para representar os processos envolvidos no ciclo hidrológico são elaborados vários modelos hidrológicos, cada um com suas pressuposições (DALBIANCO, 2013).

2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA DE BACIAS

Segundo Nunes (2016), a modelagem de bacias hidrográficas é realizada, dentre outros motivos, para identificação de problemas ambientais em áreas frágeis e avaliação das alterações na disponibilidade dos recursos ocasionadas pelas mudanças de uso e cobertura do solo. Dentre os objetivos da aplicação de modelos, cita-se o estudo de bacias hidrográficas, a quantidade e qualidade da água, sedimentos, estimativa de cargas de poluição por fontes difusas, evapotranspiração, mudanças no uso do solo, aplicação de práticas sustentáveis e medidas de gestão, gerenciamento dos recursos hídricos, dentre outros.

Compreender e avaliar os processos naturais em bacias hidrográficas levando em consideração suas deficiências ainda são desafios para pesquisadores e cientistas. Os modelos matemáticos de simulação de bacias são ferramentas úteis na compreensão desses processos assim como para avaliar soluções e melhores práticas de gestão (BORAH; BERA, 2003).

Os modelos hidrológicos são classificados com base em diferentes aspectos, tais como: o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relação entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência da dependência temporal (estáticos ou dinâmicos) (PEREIRA, 2013; RENNÓ; SOARES, 2019). A escolha de um determinado tipo de modelo deve ser

feita com base na aplicação que se deseja e na disponibilidade de dados básicos. O Quadro 1 apresenta um resumo da classificação dos modelos.

Quadro 1 - Classificação dos modelos hidrológicos

Aspectos	Classificação	Descrição
Variáveis utilizadas	Estocásticos	Possui pelo menos uma variável aleatória
	Determinísticos	Negligenciados os conceitos de probabilidade
Representação de processos físicos	Conceituais	Base teórica na representação do fenômeno
	Empíricos	Utilizam funções baseadas em análises estatísticas
Variabilidade Espacial	Concentrados	Não consideram a variabilidade espacial das variáveis
	Distribuídos	Consideram a variabilidade das variáveis da bacia
Dependência Temporal	Estacionários	Parâmetros não variam com o tempo
	Dinâmicos	Parâmetros são funções do tempo
Relação entre Variáveis	Discretos	Modelam períodos isolados da série
	Contínuos	Representam longos períodos da série

Fonte: adaptado de Nunes (2016)

Sobre a classificação dos modelos, Rennó e Soares (2019) definem:

- Quando se tem a consideração de conceitos de probabilidade na formulação dos modelos devido à aleatoriedade de alguma variável, ou seja, quando a probabilidade de ocorrência de uma variável é considerada, o modelo é dito estocástico, caso contrário, determinístico.

- Os modelos podem ser empíricos quando utilizam relações baseadas em observações. Em geral, estes modelos são bastante simples e úteis no dia a dia. No entanto, são pouco robustos, uma vez que são específicos para a região e condições para as quais foram estimadas. Os modelos podem ser também baseados em processos e, em geral, são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado. Os modelos baseados em processo podem ser subdivididos em modelos conceituais e físicos. Os conceituais são modelos que fazem uso de equações empíricas – por isso também são chamados de modelos semiempíricos – mas que descrevem o sistema segundo as leis da física. Já os modelos físicos, utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos e seus parâmetros possuem um significado físico e, portanto, podem ser estimados através de medidas reais.

- Os modelos podem ser classificados ainda como concentrados ou distribuídos. Em modelos pontuais, considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo.

- Os modelos podem ser estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo. Já modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.

- Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos. A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados.

A principal vantagem da aplicação de modelos reside na possibilidade do estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada a seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional são ordens de magnitude menos do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade (como uma bacia hidrográfica), além dos custos operacionais mais elevados relativos às pesquisas de campo (PESSOA *et al.*, 1997).

Nunes (2016) afirma que dentre os fatores importantes na utilização dos modelos, a aquisição de dados é fundamental no processo de modelagem, pois o levantamento das características da bacia e o monitoramento dos processos nela ocorridos permitem o ajuste do modelo às condições da bacia hidrográfica.

O mapeamento das características e dos processos de uso e ocupação do solo estão entre os aspectos fundamentais na análise e elaboração de estudos de planejamento em bacias hidrográficas, pois possibilita tanto a espacialização dessas características quanto a

quantificação e categorização dos elementos funcionais existentes e os seus reflexos no equilíbrio ambiental da paisagem (NUNES, 2016).

2.5 MODELOS HIDROLÓGICOS

Segundo Arnold *et al.* (1998), o desenvolvimento e gerenciamento de recursos hídricos de grandes áreas requer uma compreensão dos processos hidrológicos básicos e das capacidades de simulação na escala da bacia hidrográfica. As preocupações que estão motivando o desenvolvimento da modelagem hidrológica de grandes áreas incluem mudanças climáticas, gerenciamento de abastecimento de água em regiões áridas, inundações em grande escala e impactos externos do manejo da terra. Os avanços em *hardwares* e *softwares* de computador, incluindo o aumento de velocidade e armazenamento, assim como as ferramentas avançadas de depuração de softwares de análise espacial, permitiram que a simulação de grandes áreas se tornasse viável.

O desafio é, então, desenvolver um modelo de escala de bacia que: seja computacionalmente eficiente; permita detalhes espaciais consideráveis; requeira entradas prontamente disponíveis; seja tempo contínuo; seja capaz de simular cenários de gerenciamento de terra; e que dê resultados razoáveis. O modelo deve refletir corretamente as mudanças no uso da terra e gestão agrícola no escoamento do canal e produção de sedimentos (ARNOLD *et al.*, 1998).

De acordo com Dixon e Earls (2012), para qualquer modelo hidrológico, o domínio e o período de estudo desempenham um papel crítico, pois influenciam as condições climáticas a longo prazo, bem como as estações úmidas, normais e secas associadas.

2.5.1 Modelos hidrológicos disponíveis

- SHE: o Sistema Hidrológico Europeu (SHE) foi desenvolvido por consórcio europeu de institutos de hidrologia (BATHURST, 1986) e consiste, segundo Santos (2007), num modelo distribuído, de base física e cujas equações físicas são resolvidas por meio de um esquema de diferenças finitas. A bacia é discretizada por meio de uma grade horizontal e vertical. A sua versão melhorada, SHETRAN, considera os processos de erosão, transporte e deposição de sedimento e poluentes. Devido à sua concepção, o modelo requer grande número de

informações e uma estrutura computacional onerosa, o que inviabiliza a sua utilização em nível pessoal.

- TOPMODEL: o *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL) é um modelo semiconceitual e semidistribuído que utiliza relações físicas para representar os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica (BEVEN; KIRKBY, 1979). Segundo Pereira (2013), a sua estrutura é baseada na discretização da bacia em sub-bacias utilizando um índice topográfico, sendo composta por: armazenamentos, escoamentos e a propagação desses na sub-bacia.

- MGB-IPH: o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido para a simulação de grandes bacias (áreas maiores que 10.000 km²) e permite simular o comportamento físico dos processos que ocorrem na bacia de forma distribuída, seja na descrição determinística ou na forma de estimativa dos parâmetros (COLLISCHONN; TUCCI, 2001).

- Modelo CSU: usa um sistema de canais e planos para discretizar a bacia. De acordo com Santos (2009), este modelo calcula a erosão e o transporte de sedimentos separadamente para o fluxo superficial e nos canais, e propaga o fluxo por meio do modelo de onda cinemática. O modelo pode representar grandes e pequenas áreas. Alguns parâmetros devem ser calibrados.

- Modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*): é um modelo desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado à grandes bacias. Esse modelo é conceitual e inclui componentes de clima, dinâmica da neve, irrigação, hidrologia, balanço de água, solos, crescimento de culturas, manejo e decomposição de resíduos, impactos do preparo do solo, erosão, deposição de sedimentos e liberação e capacidade de transporte de sedimentos (SANTOS, 2009; LATUF; SILVA, 2008)

2.6 MODELO SWAT

Segundo Neitsch *et al.* (2011), SWAT é o acrônimo para Ferramenta de Avaliação de Solo e Água, um modelo em escala de uma bacia hidrográfica desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold,

do Serviço de Pesquisa Agrícola. O modelo SWAT foi desenvolvido para prognosticar o impacto das práticas de gestão de solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos e aplicação de produtos químicos nas plantações dentro dos grandes complexos de bacias hidrográficas, com diversos tipos de solo, uso do terreno e condições de gestão, após um longo período de tempo. Para atender este objetivo, o modelo possui algumas características, tais como:

- É baseado fisicamente. Ao invés de incorporar equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, o modelo SWAT requer informações específicas sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gestão do solo que ocorram na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados à movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento da colheita, ciclo de nutrientes etc. São diretamente moldados pelo modelo SWAT usando estes dados de entrada.

- Utiliza entradas prontamente disponíveis. Enquanto que o modelo SWAT pode ser usado para estudar processos mais especializados, tal como o transporte de bactérias, os dados mínimos necessários para análise geralmente estão disponíveis nas agências governamentais.

- É eficiente no quesito computacional. A simulação de bacias hidrográficas muito grandes ou de várias estratégias de gestão pode ser realizada sem um alto investimento de tempo ou dinheiro.

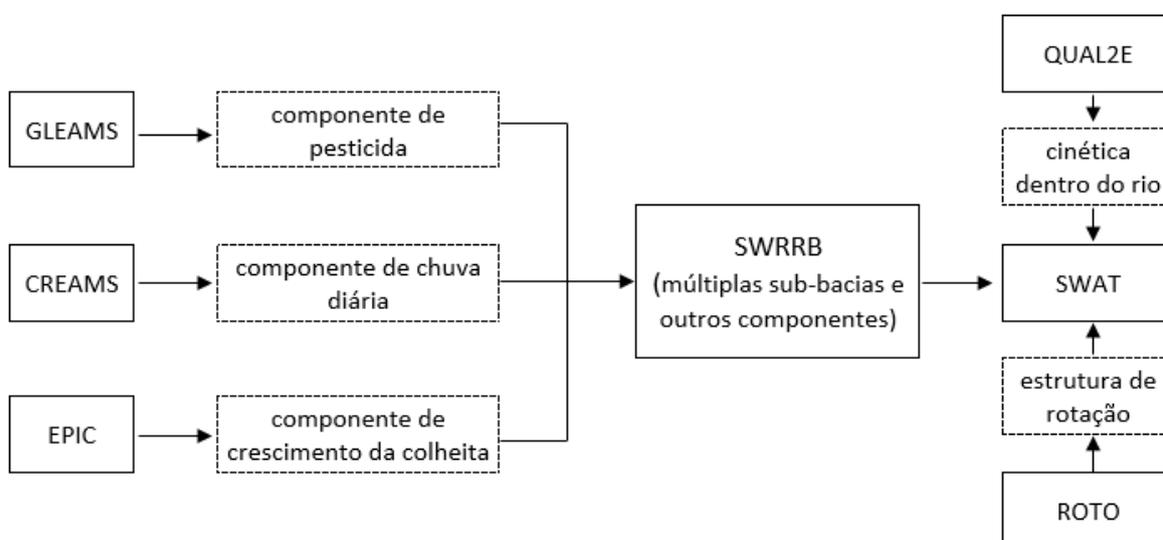
- Permite que usuários possam estudar impactos de longo prazo no solo. Muitos dos problemas que atualmente são abordados pelos usuários envolvem o crescimento gradual dos poluentes e o impacto nas jusantes dos corpos de água. Para estudar estes tipos de problemas, são necessários resultados de análises que se estendem por várias décadas.

2.6.1 Desenvolvimento do modelo SWAT

Segundo Gassman *et al.* (2007) e Neitsch *et al.* (2011), o desenvolvimento do modelo SWAT é uma continuação da experiência em modelagem do Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), que abrange um período de aproximadamente 30 anos. As origens iniciais da SWAT podem ser atribuídas a modelos

USDA-ARS previamente desenvolvidos (Figura 4), incluindo o modelo CREAMS (Produtos Químicos, Escoamento e Erosão dos Sistemas de Gestão Agrícola) (KNISEL, 1980), os Efeitos de Descargas Subterrâneas nos Sistemas de Gestão Agrícola (GLEAMS) (Leonard *et al.*, 1987) e o Calculador de Impacto Erosão-Produtividade (EPIC) (WILLIAMS; JONES; DYKE, 1984). O atual modelo SWAT é um descendente direto do modelo do Simulador para Recursos Hídricos de Bacias Rurais (SWRRB), que foi projetado para simular impactos de manejo sobre o movimento de água e sedimentos para bacias rurais não ocupadas nos EUA.

Figura 4 - Esquema da história de desenvolvimento do SWAT



Fonte: adaptado de Gassman *et al.* (2007)

Segundo Neitsch *et al.* (2011), a divisão da bacia hidrográfica no SWRRB era limitada a dez sub-bacias e o modelo traçava a rota de transporte da água e de sedimentos da sub-bacia diretamente para a descarga da bacia hidrográfica. Essas limitações levaram ao desenvolvimento de um modelo chamado ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) (ARNOLD; WILLIAMS; MAIDMENT, 1995), que assumiu os resultados de diversas análises SWRRB e traçou a rota das correntes por canais e reservatórios. O ROTO forneceu uma ampla abordagem de caminhos e superou as limitações do SWRRB para as sub-bacias, conectados múltiplas análises SWRRB.

O modelo SWAT passou por revisões contínuas de capacidades desde que foi criado no início dos anos 90. As melhorias mais significantes feitas no modelo são descritas por Neitsch (2011):

- SWAT94.2: Incorporação de Unidades de Respostas Hidrológicas Múltiplas (HRUs).
- SWAT96.2: Auto-fertilização e auto-irrigação adicionados às opções de gerenciamento; incorporado ao armazenamento na copa das árvores; adição de um componente CO₂ ao modelo de crescimento de colheita para os estudos de mudança climática; a equação da evapotranspiração potencial de Penman-Monteith foi acrescentada; fluxo lateral da água no solo baseado no modelo de acúmulo cinemático; adição de equações de QUAL2E do fluxo de nutrientes e qualidade de água; rota do fluxo de pesticidas.
- SWAT98.1: Melhoria nas rotinas de derretimento de neve; aprimoramento da qualidade do fluxo da água; expansão das rotinas de ciclo de nutrientes; pastagem, aplicações de adubo, e telha de drenagem adicionados como opção de gerenciamento; modelo modificado para uso no hemisfério sul.
- SWAT99.2: Melhoria nas rotinas do ciclo de nutrientes; rotinas de arroz e pântanos foram aprimoradas, adição do processo de decantação para remoção de nutrientes em reservatórios/açudes/pântanos; adição do acúmulo de água nas margens em toda sua extensão; inclusão da rota dos metais por toda a extensão do rio; todas as referências de ano nos modelos mudaram de dois últimos dígitos por ano para quatro dígitos por ano.
- SWAT2000: Rotinas de transporte de bactérias foram incluídas; infiltração de Green & Ampt foi adicionada; gerador de clima aperfeiçoado; permissão para radiação solar diária, umidade relativa e velocidade do vento, para ser lida ou gerada; permissão de leitura ou cálculo de valores potenciais ET para bacias hidrográficas; todos os métodos potenciais ET foram revisados; melhoria nos processos de elevação de faixa; possibilidade de simulação de uma quantidade ilimitada de reservatórios; adição do método de rotas Muskingum; alteração dos cálculos inativos por simuladores apropriados às áreas tropicais.
- SWAT2009: Melhoria nas rotinas de transporte de bactérias; cenários de previsão do tempo adicionados; geradores de pressão sub-diários acrescentados; o parâmetro de retenção usado no cálculo diário do Número da Curva (CN) pode ser uma função de presença de água no solo ou evapotranspiração das plantas; aprimoramento para o modelo de filtro por faixas de vegetação; melhoria da deposição úmida e seca do nitrato e da amônia; modelagem dos sistemas locais de esgoto.

2.6.2 Aspectos gerais do modelo SWAT

O modelo SWAT é um modelo matemático que é capaz de realizar simulações de um variado conjunto de processos ocorrentes numa bacia hidrográfica com o objetivo de diagnosticar ou prever os impactos das alterações da bacia sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água em bacias não instrumentadas. Dentre os principais componentes do modelo estão a hidrologia, clima, sedimentação, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e manejo agrícola (NUNES, 2016).

De acordo com Romagnoli *et al.* (2017) e Neitsch *et al.* (2011), no modelo SWAT, uma bacia é dividida em múltiplas sub-bacias, que são então subdivididas em HRU que consistem em uma combinação única de solo, inclinação, uso da terra e gerenciamento de terras. O equilíbrio da água é o principal componente de todos os processos e o HRU é o menor componente utilizado para a computação dos processos hidrológicos. Esses processos são divididos em duas fases: uma fase do terreno em que o modelo simula as cargas de captação de fluxo, sedimentos, nutrientes e pesticidas de cada HRU, que são então ponderados pela área ao nível sub-bacias; e uma fase onde o SWAT encaminha as cargas de captação de cada sub-bacia através da rede de canais.

2.6.3 Fase do terreno no ciclo hidrológico

Segundo Arnold *et al.* (1998), o modelo de hidrologia é baseado na equação do balanço hídrico (Equação 1).

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Onde SW_t é a umidade final de água no solo (mm H₂O), SW é a umidade do solo inicial no dia i (mm H₂O), t é tempo em dias e R , Q , ET , P e QR são as quantidades diárias de precipitação, escoamento, evapotranspiração, percolação e vazão de retorno; todas as unidades estão em mm.

2.6.3.1 Clima

As variáveis climáticas para a condição do equilíbrio hidrológico são precipitação diária, temperatura máxima/mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Se a precipitação diária e os dados de temperatura máxima e mínima estiverem disponíveis,

eles podem ser inseridos diretamente. A radiação solar, a velocidade do vento e a umidade relativa são sempre simuladas. Um conjunto de variáveis climáticas pode ser simulado para toda a bacia, ou um clima diferente pode ser simulado para cada sub-bacia (ARNOLD *et al.*, 1998).

- Precipitação: o modelo de precipitação desenvolvido por Nicks é um modelo de cadeia de Markov de primeira ordem. Assim, a entrada no modelo deve incluir probabilidades mensais de receber precipitação se o dia anterior estiver seco e se o dia anterior estiver molhado. Dado o estado úmido-seco, o modelo determina a probabilidade se a precipitação ocorre ou não. Quando ocorre um evento de precipitação, a quantidade é determinada pela geração de uma distribuição de precipitação diária normal. A quantidade de precipitação diária é dividida entre precipitação e queda de neve, utilizando a temperatura diária média do ar.

- Temperatura do ar e radiação solar: a temperatura máxima e mínima diária do ar e a radiação solar são geradas a partir de uma distribuição normal corrigida para o estado de probabilidade úmida-seca. Os fatores de correção são calculados para garantir que os desvios-padrão de longo prazo das variáveis diárias sejam mantidos.

- Velocidade do vento e umidade relativa: a velocidade diária do vento é simulada usando uma equação exponencial modificada, dada a velocidade média do vento mensal como entrada. O modelo de umidade relativa simula a umidade relativa média diária da média mensal usando uma distribuição triangular. Tal como acontece com a temperatura e a radiação, a umidade relativa diária média é ajustada para explicar os efeitos do tempo de dias secos ou úmidos.

- Temperatura do solo: a temperatura média diária do solo é simulada no centro de cada camada do solo para uso em hidrologia e degradação de resíduos. A temperatura da superfície do solo é estimada usando a máxima e mínima temperatura diária do ar e a cobertura de neve, planta e resíduos para o dia de interesse mais os quatro dias imediatamente anteriores. A temperatura do solo é simulada para cada camada usando uma função de umidade por profundidade, temperatura da superfície e temperatura média anual do ar. A profundidade de amortecimento depende da densidade aparente e da água do solo.

2.6.3.2 Hidrologia

Quando as chuvas caem, elas podem ser interceptadas e presas nas árvores ou cair na superfície do solo. A água infiltrará na superfície até o perfil do solo ou descerá por terra como escoamento superficial. O escoamento superficial ocorre relativamente rápido na direção do canal e, assim, contribui para o aumento da vazão no curso de água em curto prazo. Já a água que é infiltrada, poderá ser retirada do solo pelos vegetais e depois evapotranspirar ou, poderá infiltrar-se para o interior do solo, alimentando os lençóis freáticos (NEITSCH, 2011).

2.6.3.3 Modelo de Crescimento de Cultivo

Conforme Arnold (1998), o modelo de cultura é uma simplificação do modelo denominado Política Ambiental de Clima Integrado (*Environmental Policy Integrated Climate – EPIC*). O SWAT usa conceitos EPIC de desenvolvimento de culturas fenológicas com base em unidades de calor acumuladas diárias, índice de colheita para dividir o rendimento de grãos, abordagem de Monteith para a biomassa potencial e ajustes relativos à água e temperatura. Um modelo único é usado para simular todas as culturas consideradas e o SWAT é capaz de simular o crescimento das culturas tanto para plantas anuais como perenes. As culturas anuais crescem desde a data de plantação até a data de colheita ou até as unidades de calor acumuladas serem iguais às unidades de calor potenciais para a safra. As culturas perenes mantêm seus sistemas radiculares ao longo do ano, embora a planta possa ficar adormecida após a geada.

2.6.3.4 Erosão

De acordo com Neitsch *et al.* (2011), a erosão e a produção de sedimento são calculadas para cada HRU com a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). O modelo de hidrologia provê estimativas de volume de escoamento e taxa de escoamento máximo que, com a área da sub-bacia, são usadas para calcular a variável de energia erosiva de escoamento. Isto é uma função de biomassa acima do solo, resíduo na superfície do solo e o fator C_{USLE} mínimo para a planta.

2.6.3.5 Nutrientes

- Nitrogênio: as quantidades de NO_3-N contidas no escoamento e percolação são estimadas como os produtos do volume de água e da concentração média. A lixiviação e a vazão

subterrânea nas camadas inferiores são tratadas com a mesma abordagem utilizada na camada superior, exceto que o escoamento superficial não é considerado (ARNOLD *et al.*, 1998).

- Fósforo: a abordagem do SWAT para estimar a perda de fósforo solúvel no escoamento superficial baseia-se no conceito de partição de pesticidas nas fases de solução e sedimento (ARNOLD *et al.*, 1998).

2.6.3.6 Pesticidas

De acordo com Neitsch *et al.* (2011), embora o modelo SWAT não simule tensão/deficiências no crescimento de uma planta devido a presença de sementes, insetos prejudiciais e outras pragas, pesticidas podem ser aplicados a uma HRU para estudar o movimento de substâncias químicas na bacia hidrográfica. O modelo SWAT simula o movimento dos pesticidas para dentro dos rios através do escoamento superficial (em solução e sorvidos ao sedimento transportado pelo escoamento), e para dentro do perfil do solo e do aquífero pela percolação (na solução).

2.6.3.7 Gerenciamento

O componente de manejo agrícola fornece submodelos que simulam sistemas de plantio, aplicação de água de irrigação, fertilizantes e pesticidas e sistemas de pastoreio (ARNOLD *et al.*, 1998).

2.6.4 Fase de propagação do ciclo hidrológico

Uma vez que o modelo SWAT determina os acúmulos de água, sedimento, nutrientes e pesticidas para o canal principal, os acúmulos são encaminhados através da rede de drenagem de água da bacia hidrográfica (NEITSCH *et al.*, 2011). A propagação pode se dar no canal principal ou então em um reservatório.

Ainda de acordo com Neitsch *et al.* (2011), a propagação no canal principal pode ser dividida em água, sedimento, nutrientes e químicos orgânicos.

- Propagação de cheias: como a água flui para jusante, uma porção pode ser perdida devido à evaporação e transmissão através do leito do canal. Outra perda potencial é a retirada de

água do canal pela utilização agrícola ou humana. O fluxo pode ser suplementado pela queda de chuva diretamente no canal e/ou adição do ponto da vazão de uma nascente.

- Propagação de sedimentos: o transporte de sedimentos no canal é controlado pela operação simultânea dos processos de deposição e degradação. A energia do curso da água disponível é utilizada para retransportar material solto depositados até que todos os materiais sejam removidos. O excesso de energia do curso de água causa a degradação do leito.

- Propagação do nutriente: os nutrientes dissolvidos no curso da água são transportados com água enquanto aqueles sorvidos aos sedimentos podem ser depositados com o sedimento no leito do canal.

- Propagação de pesticida: enquanto um número ilimitado de pesticidas pode ser aplicado nas HRUs, somente um pesticida pode ser encaminhado através da rede de canal da bacia hidrográfica devido à complexidade do processo simulado.

2.6.5 Equação de propagação de sedimentos

A erosão causada pela chuva e pelo escoamento é computada pela Equação Modificada de Perdas de Solo (MUSLE), desenvolvida por Williams (1975). A MUSLE (Equação 2), na verdade, é uma equação modificada da Equação Universal de Perda de Solo (USLE).

$$sed = 11,8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{HRU})^{0,56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2)$$

Na qual: *sed* é a produção de sedimentos em um determinado dia, em toneladas; Q_{surf} é o volume de escoamento superficial, em mmH₂O/ha; q_{peak} é o índice máximo de escoamento, em m³/s; $area_{HRU}$ é a área de HRU, em ha; K_{USLE} é o fator de erodibilidade do solo USLE; C_{USLE} é o fator de cobertura e gestão USLE; P_{USLE} é o fator de prática de apoio USLE; LS_{USLE} é o fator topográfico USLE; $CFRG$ é o fator de fragmento bruto.

2.6.6 Aplicação do modelo SWAT

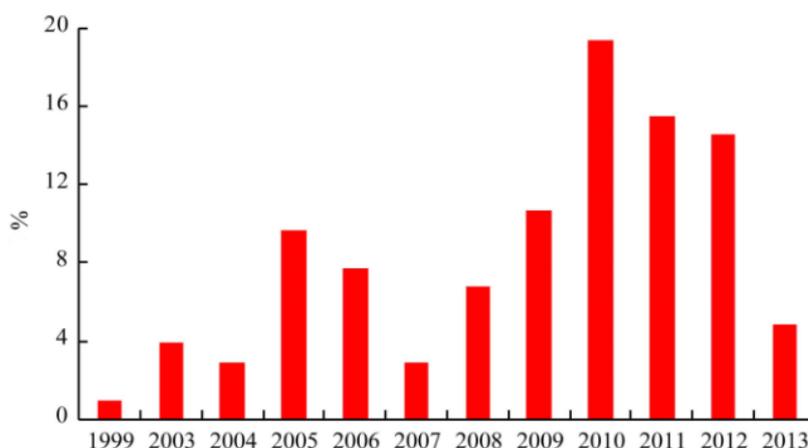
Segundo Gassman *et al.* (2007), a aplicação do modelo SWAT se expandiu em todo o mundo na última década. Muitas das aplicações têm sido impulsionadas pelas necessidades de várias agências governamentais, particularmente nos EUA e na União Europeia, que exigem

avaliações diretas de mudanças antropogênicas, mudanças climáticas e outras em uma ampla gama de recursos hídricos ou avaliações exploratórias das capacidades do modelo para possíveis futuras aplicações.

No Brasil, o modelo SWAT tem sido bastante utilizado para avaliação hidrológica e de qualidade das águas. Bressiani *et al.* (2015) fez uma revisão da aplicação do SWAT no Brasil e apresenta na Figura 5 a distribuição dos estudos por ano ao longo do período de 14 anos da pesquisa. O primeiro estudo no Brasil foi feito por Oliveira e Medeiros (1999), onde o modelo SWAT foi aplicado na avaliação de impactos decorrentes na modificação do uso do solo em bacias hidrográficas. A conscientização das capacidades do modelo através do site do SWAT são fatores que influenciam o aumento do uso do SWAT no Brasil. O uso crescente do modelo no Brasil é ainda mais evidenciado pelos resultados preliminares relatados para as condições das bacias hidrográficas brasileiras em mais de 45 estudos relacionados ao SWAT apresentado na Conferência Internacional do SWAT de 2014.

De acordo com Bressiani *et al.* (2015), a região do Brasil que contém o maior número de estudos com a aplicação do modelo SWAT é a região sul, possuindo mais de 34% das publicações, seguida da Região Sudeste com 28%. Os estudos restantes (38%) dividem-se entre a Região Nordeste (22%), Região Centro-Oeste (11%) e Região Norte (1%).

Figura 5 - Distribuição dos 102 estudos identificados na literatura da SWAT brasileira em porcentagem por ano durante o período de 14 anos da pesquisa (janeiro de 1999 a março de 2013)



Fonte: Bressiani *et al.* (2015)

Easton *et al.* (2010), fizeram uma análise no SWAT de escoamento e sedimentação na Bacia do Nilo Azul, Etiópia. A análise dos resultados do modelo indica que a erosão da montanha dominou a distribuição de sedimentos para a calha principal do rio Nilo Azul na parte inicial da estação de crescimento quando a lavoura ocorre e antes do solo ser molhado e a cobertura vegetal ser estabelecida.

Abbaspour *et al.* (2015) utilizaram o modelo SWAT para uma modelagem hidrológica e análise de qualidade da água para todo o continente europeu. Para a calibração e análise de incertezas, utilizaram o *software* SWAT-CUP onde discutiram questões como disponibilidade de dados, calibração de modelos distribuídos em larga escala e esboçaram procedimentos para calibração de modelos e análise de incertezas, os quais se tornam um protocolo que pode ser seguido em todas as regiões do mundo.

Malagó *et al.* (2007) utilizaram o modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Rio Danúbio para fazerem uma modelagem de fluxos de água e nutrientes a fim de mostrar o impacto que teriam novas práticas de manejo e apoiar a implementação das Diretrizes Ambientais Europeias.

Baker e Miller (2013) utilizaram o SWAT para avaliar o impacto do uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Njoro, Quênia, já que a mudança do uso do solo estava alterando o ciclo hidrológico na bacia deste rio. Os resultados da simulação mostraram que as mudanças ocorridas provocavam um aumento no escoamento superficial e diminuição da recarga da água subterrânea.

Romagnoli *et al.* (2017) utilizaram o SWAT para estudo com dados limitados disponíveis na província de Santa Fé, região dos Pampas da Argentina. Realizaram um processo combinado de calibração e validação manual e automatizada que incorporou uma análise de sensibilidade e incertezas. A qualidade geral do ajuste foi considerada satisfatória tendo em conta as limitações dos dados de entrada.

No Brasil, Durães, Mello e Naghettini (2011), aplicaram o modelo SWAT para simular o comportamento hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, Estado de Minas Gerais, sob diferentes usos e ocupação do solo, visando a subsidiar ações de manejo na bacia

hidrográfica. O modelo SWAT apresentou resultados satisfatórios na simulação do comportamento hidrológico sob diferentes cenários de mudanças no uso do solo, mostrando que pode ser aplicado para a previsão de vazões na referida bacia.

Baldissera (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT para simulação de vazões líquidas mensais nas condições da Bacia do Rio Cuiabá, localizado em Mato Grosso, Brasil. Utilizou-se o sistema de manejo de bacias hidrográficas, com a integração que une a flexibilidade do Sistema de Informação Geográfica (SIG) aplicados a modelos hidrológicos. Concluiu que o SWAT demonstrou aplicabilidade satisfatória para as condições da região.

Ainda no Brasil, Nunes (2016), realizou um estudo hidrológico e de qualidade de água na Bacia do Lago Paranoá em Brasília. A utilização do modelo para determinação do balanço hídrico das sub-bacias afluentes ao lago Paranoá mostrou-se eficiente o que proporcionou, por sua vez, a determinação do balanço hídrico do Lago Paranoá.

Lelis e Calijuri (2010) fizeram uma modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, localizada em Viçosa – MG. Os resultados de campo e das simulações alcançados mostraram a eficiência do SWAT na caracterização da produção de sedimentos e que as perdas de solo podem ser reduzidas significativamente pela substituição de culturas com melhor manejo.

Bonumá *et al.* (2010) avaliaram o balanço hídrico e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Lino, localizada no Rio Grande do Sul, utilizando o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Com apenas três anos de dados, chegaram a bons resultados na calibração do modelo em escala mensal considerando o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe, enquanto que a nível diário não obtiveram resultados satisfatórios.

Blainski e Garbossa (2009), aplicaram o modelo SWAT à bacia hidrográfica do rio Araranguá para simular o regime hidrológico dentre os anos de 2005 a 2007, considerando um evento de precipitação intensa. Fizeram uma avaliação das alterações no regime hidrológico ocasionadas pela alteração de paisagem por meio de cenários. Os resultados demonstraram que as mudanças no uso e ocupação das terras influenciaram significativamente a vazão da bacia hidrográfica.

Santos (2018) utilizou o modelo SWAT para simular as cargas de nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito e fósforo que são carregadas na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim, em Uberlândia – MG, para diferentes cenários de uso do solo, além de propor diretrizes conservacionistas para a implantação de programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Martins (2018) simulou a quantidade de sedimentos afluentes na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim por meio do modelo SWAT. Por meio da alteração do uso do solo, analisou-se a sua influência na produção de sedimentos totais nesta mesma sub-bacia. Concluiu-se que a substituição de agricultura e pastagem por florestas, menor será a produção de sedimentos.

Mendes (2018) avaliou o comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do rio São Marcos por meio da modificação no uso e ocupação do solo no modelo SWAT. Analisou-se dois cenários possíveis para esta bacia hidrográfica, a qual considerou-se o crescimento de áreas ocupadas por agricultura e o reflorestamento por vegetação nativa em substituição às áreas destinadas à pastagem.

2.7 SWAT-CALIBRATION AND UNCERTAINTY PROGRAMS (SWAT-CUP)

Conforme Abbaspour (2015), a abordagem determinística da calibração agora está desatualizada e inaceitável. Um exemplo de otimização determinística é o da tentativa e erro. Isso significa que se deve ajustar os parâmetros até se obter uma correspondência razoável entre simulação e observação. Em contrapartida, o autor defende o uso da calibração estocástica, onde se reconhece os erros e incertezas nas modelagens e tenta-se capturar, até certo ponto, a ignorância e falta de entendimento dos processos nos sistemas naturais.

Sendo assim, optou-se por utilizar o *software* SWAT-CUP, que é um programa independente capaz de lidar com arquivos de texto de saída SWAT. Além disso, integra diferentes algoritmos de otimização, como SUFI-2 (ABBASPOUR; JOHNSON; VAN GENUCHTEN, 2004), GLUE (BEVEN; BINLEY, 1992), ParaSol (VAN GRIENSVEN; BAUWENS, 2003) e Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

Entre estes algoritmos, destaca-se o algoritmo de ajuste de incerteza sequencial (SUFI-2) devido à sua capacidade de contabilizar todas as fontes de incerteza dentro dos intervalos de parâmetros, por exemplo incerteza na condução de variáveis, modelo conceitual, parâmetros e dados medidos (ABBASPOUR *et al.*, 2007; ABBASPOUR *et al.*, 2015).

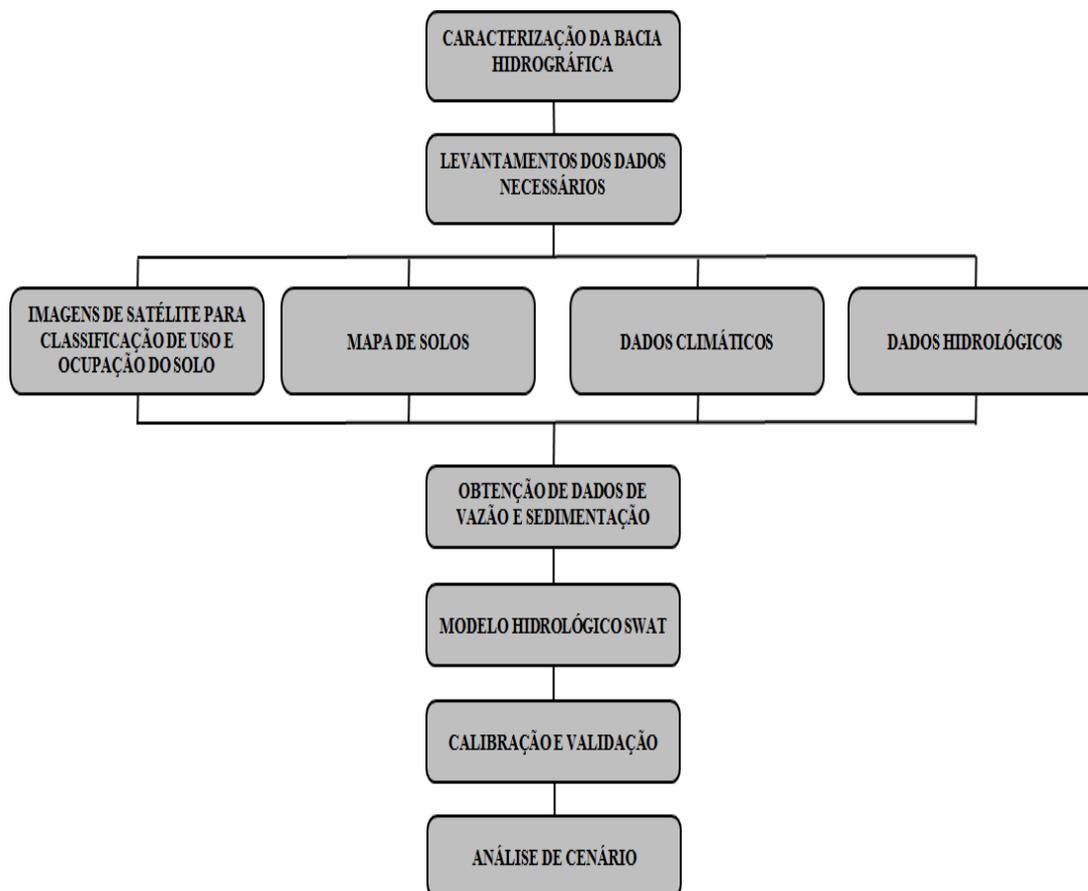
Ainda conforme Abbaspour (2015), no SUFI-2, a incerteza nos parâmetros, expressa em intervalos (distribuições uniformes), é responsável por todas as fontes de incertezas. A propagação das incertezas nos parâmetros leva a incertezas nas variáveis de saída do modelo, que são expressas como a distribuição de probabilidade de 95%. Estes são calculados nos níveis de 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída gerada pela propagação das incertezas dos parâmetros usando a amostragem em hipercubo latino.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos – simulação hidrológica e hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão – o presente capítulo está subdividido em seis etapas, sendo elas: caracterização da área de estudo, criação de uma base de dados, criação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), obtenção dos valores de vazão e sedimentos, calibração e validação e, por fim, simulação de cenário. A Figura 6 apresenta um fluxograma que indica as etapas que serão cumpridas neste trabalho.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia desenvolvida



Fonte: Autor (2018)

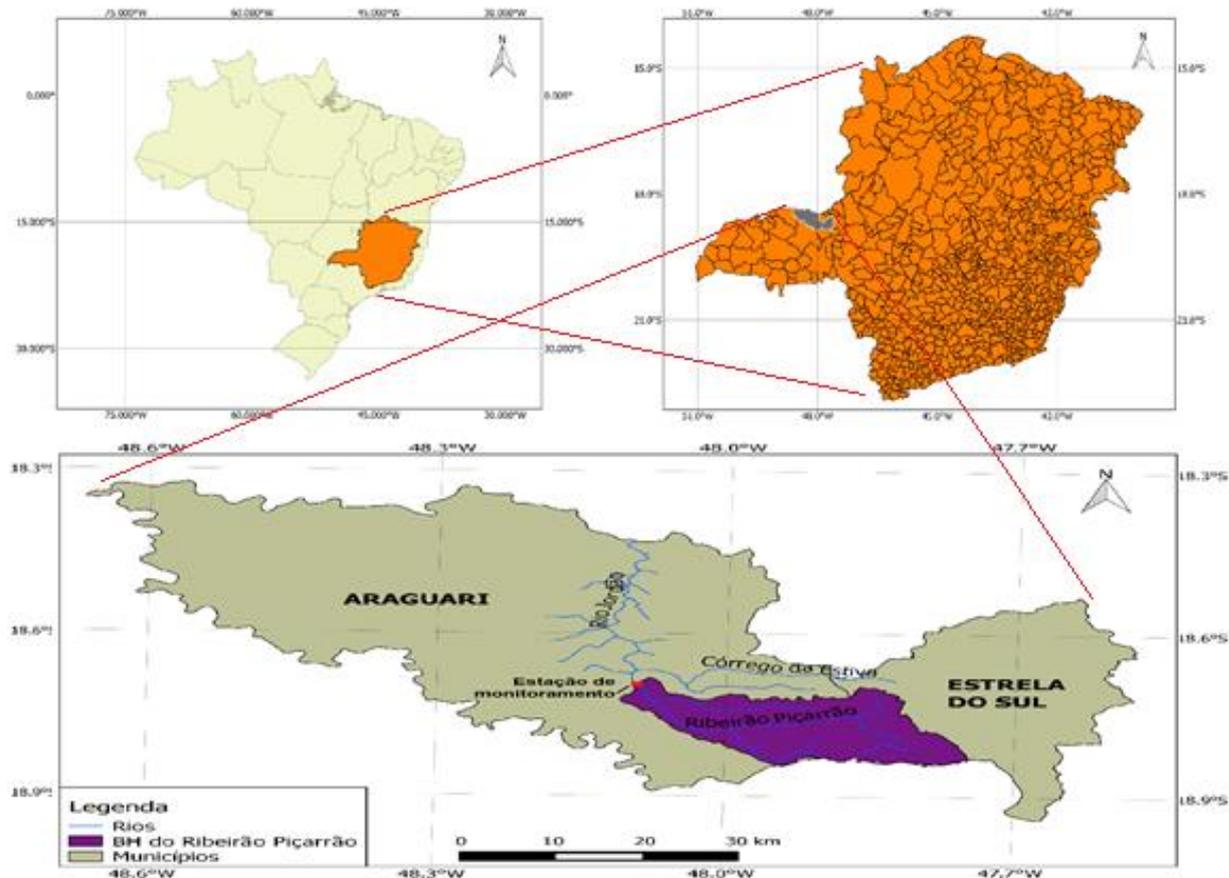
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, localizada entre os paralelos $18^{\circ}40'54,95''$ e $18^{\circ}50'33,23''$ de latitude sul, e os meridianos $48^{\circ}7'28,18''$ e $47^{\circ}46'34,33''$ de longitude oeste, situada a Oeste do Estado de Minas Gerais – Triângulo Mineiro. O ribeirão Piçarrão possui um comprimento de aproximadamente 44,33 km, desde a nascente à sua foz no Rio Jordão. A Figura 7 apresenta a localização da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.

A bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão está situada entre os municípios mineiros de Araguari e Estrela do Sul, sendo que a maior parte localiza-se dentro dos limites do primeiro município citado. Segundo dados do IBGE (2019), Araguari é considerada como a 25ª cidade mineira em número de habitantes e ocupa o 4º lugar quando se considera apenas a região do Triângulo Mineiro, tendo um número estimado de 116.691 habitantes no ano de 2018.

O clima do município de Araguari, de acordo com a classificação de Köppen, é caracterizado como clima tropical de savana (cerrado) com estação seca no inverno, Aw. Conforme Reboita *et al.* (2015), a temperatura média anual é de 24,5 °C e a pluviosidade média anual é de 1550 mm.

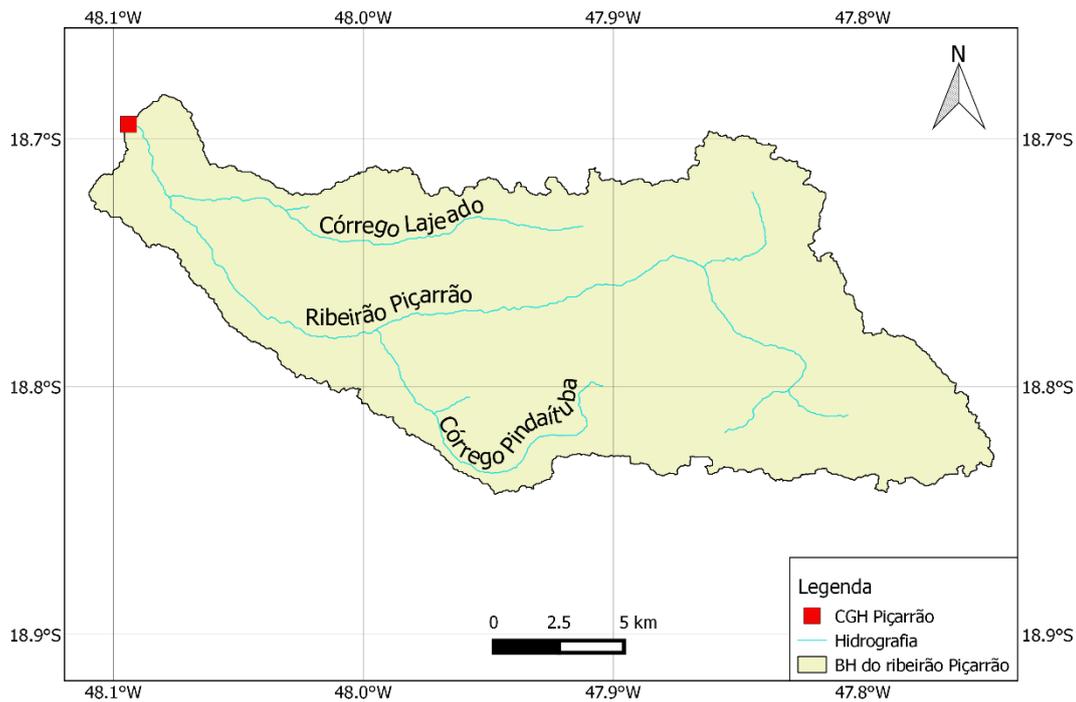
Figura 7 - Localização da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão



Fonte: Autor (2019)

A bacia em estudo possui uma área de 361,57 km², com um perímetro de 154,4 km. Os principais afluentes do ribeirão Piçarrão são o córrego Lajeado e o córrego Pindaituba. A Figura 8 apresenta os principais cursos de água que compõem a rede de drenagem desta bacia.

Figura 8 – Rede de drenagem da bacia hidrográfica do Ribeirão Piçarrão



Fonte: Autor (2019)

3.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS NECESSÁRIOS

A estruturação da base de dados constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de um trabalho científico relacionado à modelagem hidrológica (NUNES, 2016). Com o intuito de representar a heterogeneidade dos sistemas modelados, o SWAT exige o modelo digital do terreno - MDT, a base cartográfica de uso e ocupação do solo, o mapa de tipos de solos, os dados climatológicos (precipitação, temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e insolação diária) e os dados hidrológicos da bacia hidrográfica estudada.

3.2.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), oferece, por meio do projeto Topodata, o MDT de todo território brasileiro em algumas derivações locais básicas. Os dados do Topodata estão todos estruturados em quadrículas compatíveis com a escala 1:250.000.

Para este estudo fez-se o *download* das folhas nomeadas de 18S485 e 18S48, as quais cobrem a bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão. Com o objetivo de impedir a diferença radiométrica

entre as duas folhas referentes ao ribeirão Piçarrão, utilizou-se o QGIS para a realização do mosaico destas imagens, no qual definiu-se os arquivos de entrada e, em seguida, um único arquivo de saída.

As imagens fornecidas pelo Topodata são distribuídas com “datum arbitrário”, sendo assim, fez-se o recorte desta imagem, o qual contemplou a área de estudo e fixou-se esta imagem no Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) SIRGAS 2000 / UTM zona 22S.

3.2.2 Mapa de uso e ocupação do solo

Os dados referentes às características de uso e ocupação do solo utilizados foram obtidos por meio de uma classificação supervisionada realizada por meio dos programas Multispec e Quantum GIS – QGIS 2.6.1. Para isto, foram selecionadas imagens do satélite LANDSAT-8, instrumento OLI, do dia 12 de agosto de 2018.

No Multispec foi realizada a junção de todas as imagens recortadas das diferentes bandas para a realização de uma classificação supervisionada, na qual identificou-se as classes de uso e ocupação do solo expressas na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo

Classe	Uso e Ocupação do Solo
1	Eucalipto
2	Formação campestre
3	Agricultura
4	Pastagem
5	Mata de galeria
6	Cerrado

Fonte: Autor (2019)

De acordo com Meneses e Almeida (2012), a classificação supervisionada requer conhecimentos prévios das classes de alvos, a fim de classificar a imagem nas classes de interesse pré-fixadas pelo analista. Nesse processo o analista escolhe pequenas áreas de amostras na imagem, contendo poucas centenas de *pixels* que sejam bem representativos, espectralmente, de padrões ou feições dos alvos por ele reconhecidos, ou que podem ser identificados com a ajuda de outras fontes, tais como dados coletados no campo ou de mapas.

O modelo SWAT utiliza, durante seu processamento, um grande número de informações para realizar suas iterações e, em seu banco de dados, há valores para a realidade dos Estados Unidos. Assim, alguns valores importantes para a simulação hidrológica dos dados podem ser adaptados para a realidade brasileira, mais especificamente, para o cerrado brasileiro.

Dentro do SWAT foram criadas as classes “mata de galeria” e “cerrado”, conforme também feito por Castro (2013). Para a criação dessas novas classes, utilizou-se de algumas classes já estabelecidas no SWAT e adaptou-as alterando o valor do Número de Curva (CN). Os novos valores adotados para o CN foram extraídos do trabalho de Sartori (2004) e estão demonstradas no Quadro 2. Para a classe de uso e ocupação do solo “cerrado”, utilizou-se dos dados disponíveis no SWAT para savana.

Quadro 2 - Novos valores de CN adotados no SWAT

Classe	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Eucalipto	36	60	73	79
Formação Campestre	30	48	65	73
Agricultura	65	75	82	86
Pastagem	49	69	79	84
Mata de Galeria	25	40	49	52

Fonte: adaptado de Sartori (2004)

3.2.3 Mapa de solos

O mapa de solos disponível foi obtido por meio da EMBRAPA (1999), elaborado com base no novo sistema brasileiro de classificação de solos e publicado pelo IBGE. Por meio do mapa de solos fornecido pela EMBRAPA foi possível identificar a classe de solo presente na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, sendo esta o latossolo vermelho (LV). O Quadro 3 apresenta os parâmetros considerados pelo SWAT.

Quadro 3 - Parâmetros dos solos utilizados pelo modelo SWAT

Parâmetro	Significado do parâmetro
SNAM	Nome dado a classe do solo
NLAYERS	Número de horizontes
HYDGRP	Grupo de mínima saturação hidráulica
SOL_ZMX	Profundidade máxima de solo que a raiz alcança
ANIOM_EXCL	Fração de porosidade do solo
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte
SOL_BD	Densidade do solo
SOL_AWC	Capacidade de água no solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo
CLAY	Porcentagem de argila do solo
SILT	Porcentagem de silte no solo
SAND	Porcentagem de areia no solo
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo
SOL_ALB	Albedo do solo
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo

Fonte: adaptado de Baldissera (2005)

Os latossolos vermelhos (LV), conforme classificado por Sartori (2004), pertencem ao grupo de solo hidrológico A. Castro (2013) elenca que os solos deste grupo hidrológico possuem baixo potencial de escoamento, contendo alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Estes solos têm uma alta taxa de transmissão de água (taxa mínima de infiltração > 7,62 mm/h).

Os valores inseridos no SWAT referentes ao latossolo vermelho foram extraídos do trabalho de Lima *et al.* (2013), que desenvolveram uma base de dados para a aplicação do modelo SWAT em bacias hidrográficas no bioma cerrado. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros físicos adicionados ao SWAT.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros físicos do solo inseridos no SWAT

Classe	Latossolo Vermelho		
NLAYERS	3		
HYDGRP	A		
SOL_ZMX	300		
ANION_EXCL	0,5		
SOL_Z 1 2 3	300	1000	3500
SOL_BD 1 2 3	0,9	0,94	0,94
SOL_AWC 1 2 3	0,12	0,14	0,14
SOL_K 1 2 3	612,20	461,07	142,32
SOL_CBN 1 2 3	1,67	1,01	1,01
CLAY 1 2 3	53,93	66,28	66,28
SILT 1 2 3	28,37	22,93	22,93
SAND 1 2 3	12,94	10,79	10,79
ROCK 1 2 3	0	0	0
SOL_ALB 1 2 3	0,15	0,15	0,15
USLE_K 1 2 3	0,018	0,015	0,015
SOL_EC 1 2 3	0	0	0

Fonte: adaptado de Lima *et al.* (2013)

3.2.4 Dados climáticos

O SWAT possui em seu banco de dados informações sobre as estações climatológicas dos EUA, entretanto o mesmo não ocorre para o Brasil. Logo, torna-se necessário inserir manualmente, no banco de dados do SWAT, alguns dados climáticos diários e anuais médios específicos para a bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.

Os dados climáticos foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e se referem às estações de Uberlândia (Código 86776), localizada a $-18,91^\circ$ de latitude, $-48,25^\circ$ de longitude e 875 m de altitude. A série histórica utilizada compreende o período de janeiro de 2014 a novembro de 2019, a seleção das estações climatológicas levou em consideração a confiabilidade dos dados, ou seja, a extensão do período de coleta das informações com falhas reduzidas e a proximidade com a área de estudo.

Há uma ferramenta disponibilidade pelo SWAT (2019) que trabalha com dados climáticos chamada *WGN Parameters Estimation Tool*. Para ser utilizada, é preciso fornecer dados de chuva (mm), temperatura máxima e mínima ($^\circ\text{C}$), velocidade do vento (m/s), radiação solar ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$) e umidade relativa do ar (%). Recomenda-se a utilização de pelo menos 20 anos

destes dados climáticos. Com esta ferramenta, são gerados os dados estatísticos sobre o clima, solicitados pelo SWAT, apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros climáticos utilizados para simulação no SWAT

Nome adotado pelo SWAT	Significado do parâmetro
PCPMM	Precipitação média (mm)
PCPSTD	Desvio da precipitação (mm)
PCPD	Número de dias de precipitação (dias)
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas (mm)
TMPMX	Temperatura máxima (°C)
TMPMN	Temperatura mínima (°C)
TMPSTDMX	Desvio da temperatura máxima (°C)
TMPSTDMN	Desvio da temperatura mínima (°C)
SOLARAV	Valor diário da energia solar (MJ/m ² .dia)
WDAV	Velocidade do vento (m/s)
DEWPT	Temperatura no ponto de orvalho (°C)
PR_W1	Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de seca (%)
PR_W2	Probabilidade de dias de chuva seguidos de dias de chuva (%)
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação máxima

Fonte: Autor (2019)

Segundo Carvalho (2014), o modelo SWAT possui uma metodologia peculiar de espacialização dos dados de chuva dentro da bacia hidrográfica: considera a série de precipitação por sub-bacia, vinculando os valores de determinada estação à sub-bacia mais próxima. Essa relação é estabelecida em relação à localização da estação pluviográfica e o centroide de cada sub-bacia.

Como a estação climática adotada com dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação e precipitação, está aproximadamente a 38 km de distância do centroide da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, optou-se por também considerar dados de mais três estações pluviométricas mais próximas à bacia hidrográfica (Tabela 3). Para espacializar melhor os dados de chuva obtidos, conforme feito por Santos (2018) e Martins (2018), utilizou-se o método de interpolação do Inverso Ponderado da Distância (IPD) para interpolar os dados históricos de precipitação, visto que dentro da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão não há uma série confiável de dados.

Tabela 3 - Estações pluviométricas consideradas no IPD

Nome	Código	Responsável	Latitude (°)	Longitude (°)
Araguari	1848010	ANA	-18,65	-48,21
Fazenda Letreiro	60381001	CEMIG OESTE	-18,99	-48,19
Cascalho Rico	1847046	COPASA	-18,57	-47,88

Fonte: Autor (2019)

O IPD é um modelo determinístico bastante utilizado como método de interpolação espacial. É um método relativamente rápido, fácil de computar e simples de interpretar. O princípio do IPD é que o valor de um ponto sem amostragem é a média ponderada de valores conhecidos dentro da vizinhança. Mas a semelhança entre esses pontos é inversamente relacionada com a distância entre eles (LU; WONG, 2008). O IPD é dado pela Equação 3.

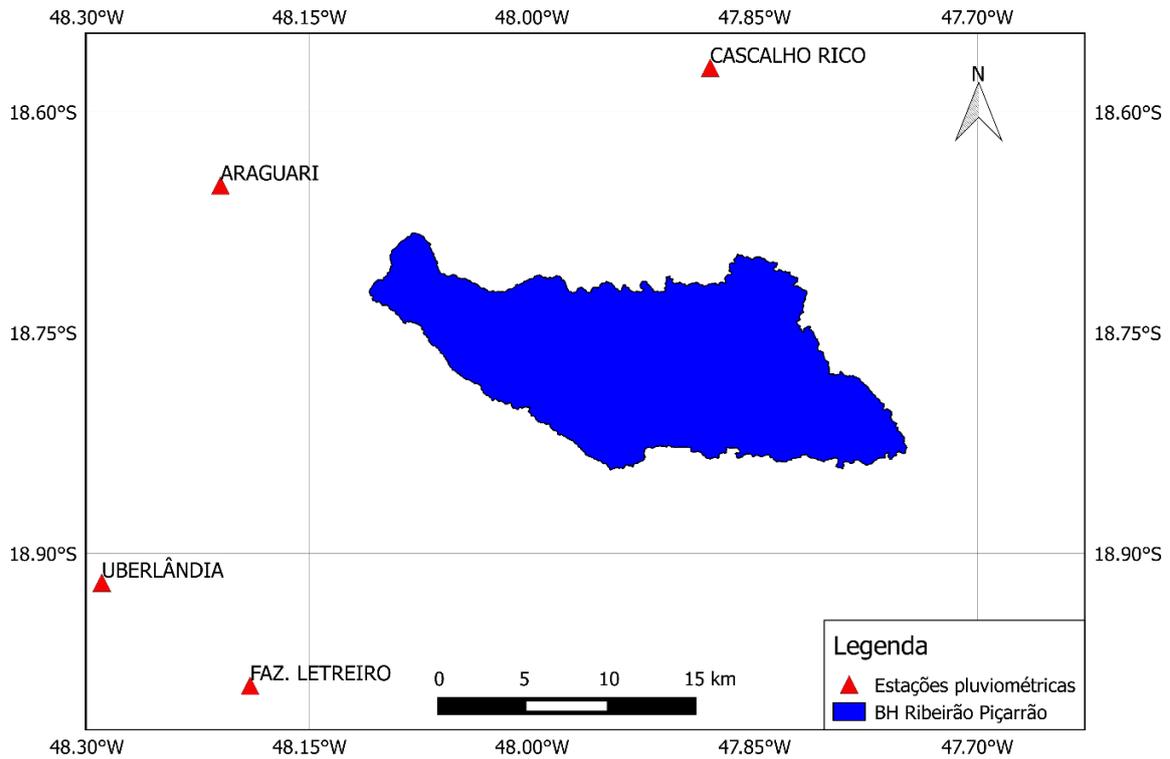
$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^\alpha} \times P_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^\alpha} \right)} \quad (3)$$

Na qual: P_i é o valor interpolado da precipitação; P'_i é o valor amostrado da precipitação; d_i é a distância euclidiana entre o ponto amostrado e o estimado; n é o número de pontos vizinhos utilizados na interpolação; α é o expoente ponderador da distância euclidiana.

Segundo Lu e Wong (2008), o valor ótimo do expoente ponderador geralmente varia, quando aplicado no método IPD, de 1 a 5. Lloyd (2005) adota o valor do expoente igual a 2, que é o mais frequentemente usado para interpolar precipitação. Nesse estudo foi adotado o valor 2 para o expoente.

A Figura 9 elenca a distribuição da estação climática e estações pluviométricas que tiveram seus dados utilizados em arquivos de entrada do SWAT.

Figura 9 - Distribuição espacial das estações pluviométricas utilizadas na área de estudo



Fonte: Autor (2019).

3.3 CRIAÇÃO DAS HRUs

Segundo Neitsch *et al.* (2011) e Arnold *et al.* (1998), o ciclo hidrológico baseia-se na equação de balanço hídrico. O modelo SWAT faz a subdivisão da bacia hidrográfica para mostrar as diferenças na evapotranspiração para diversas culturas e tipos de solo. O escoamento é intencionalmente separado para cada HRU e somados dentro de uma sub-bacia. Este valor total é direcionado à próxima sub-bacia para que se obtenha um valor total de escoamento para a bacia hidrográfica, aumentando a precisão e fornecendo uma melhor descrição física do equilíbrio hídrico.

Sendo assim, o modelo automaticamente seleciona algumas seções considerando-as como exutórios de sub-bacias, além disso permite ao operador também adicionar ou remover exutórios. Como as HRUs correspondem às áreas homogêneas de uso do solo, tipo de solo e declividade dentro da bacia para a sua distribuição na bacia hidrográfica, é necessário inserir os dados referentes a essas três características.

3.4 OBTENÇÃO DOS VALORES OBSERVADOS DE VAZÃO E SEDIMENTOS

Para que se possa cumprir os objetivos deste estudo, são fundamentais a obtenção dos dados de vazão do ribeirão Piçarrão e da descarga sólida total para, pelo menos, uma seção específica deste curso d'água, a qual deverá coincidir com o exutório da bacia hidrográfica em estudo a fim de se fazer a calibração e validação dos resultados gerados pelo SWAT.

A obtenção dos valores observados de vazão do ribeirão deu-se por meio da elaboração de uma curva-chave. De acordo com Selfione (2002), curva-chave é o termo usado na hidrologia para designar a relação entre cota (nível d'água) e a vazão que escoa numa dada seção transversal de um curso d'água e que permite o cálculo indireto da vazão na referida seção a partir da leitura da cota num dado momento.

Há três métodos para representação de uma curva-chave, podendo ser a forma gráfica, a equação matemática e a tabela de calibragem. Dentre esses métodos, as equações matemáticas possuem duas formas mais utilizadas, sendo a forma de potência (Equação 4) e a forma polinomial (Equação 5) (SELFIONE, 2002).

$$Q = a \times (H - H_0)^b \quad (4)$$

No qual: Q corresponde à vazão; a e b são coeficientes de ajuste para cada curva-chave; H é a cota referente a uma vazão; e H_0 é a cota referente a uma vazão nula.

$$Q = a_0 + a_1H + a_2H^2 + \dots + a_nH^n \quad (5)$$

Sendo Q igual a vazão; a_0 , a_1 , a_2 e a_n e n coeficientes de ajuste para cada curva-chave; e H , cota referente a uma vazão.

Conforme Santos (2001), as medições diretas de vazão costumam definir apenas um trecho central da curva, existindo, em geral, níveis de água observados menores que o mínimo medido e maiores que o máximo medido. Para isto, costuma-se utilizar métodos de extrapolação dessas curvas tanto na sua parte inferior quanto superior. O autor cita sete métodos mais comumente utilizados para extrapolar estas curvas.

Um dos métodos citados por Santos (2001) e que será utilizado neste estudo é o da extrapolação logarítmica. O princípio deste método é aplicar uma equação de ajustamento de uma expressão matemática exponencial, conforme a Equação 4. Plota-se as medições num papel com escala logarítmica e determina-se graficamente o valor que retifica melhor a parte da curva e extrapola-se esta reta até a cota máxima observada.

De acordo com Phillips *et al.* (2009), traçar uma curva-chave de sedimentos é estabelecer uma relação entre vazão e concentração de sedimentos instantânea para, então, estimar o fluxo de sedimentos. A descarga sólida em suspensão, é por definição, o produto da concentração de sedimentos em suspensão pela vazão líquida medida no momento da amostragem.

Esta curva-chave é gerada a partir do monitoramento de eventos de diferentes magnitudes. Com o estabelecimento da curva-chave, a descarga sólida é estimada a partir dos dados monitorados de vazão. Dessa forma, segundo Carvalho (2014), a curva-chave de sedimentos representa uma relação empírica entre a descarga líquida (Q) e a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) ou a descarga sólida total (Q_{st}).

Peixoto (2019) desenvolveu um estudo de transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jordão, no qual elaborou uma curva-chave de sedimentos para quatro seções monitoradas ao longo do rio Jordão. Neste estudo, a primeira seção estudada coincide com o exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, localizada nas coordenadas de latitude 18°41'31.70"S e longitude 48°05'36.2"W. Portanto, seus resultados servirão para a obtenção dos valores de descarga sólida total para fazer a calibração e validação do modelo, subitem a seguir.

Adib e Tagavifar (201) afirmam que geralmente as curvas-chave de sedimento são expressas em formato de potência, como ilustra a Equação 6. Para se fazer a extrapolação desta curva-chave em seu limite superior, Piest (19--?) e Carvalho (2014) consideram uma alteração desta curva, transformando-a para linear. Entretanto, reconhece-se que este método, como qualquer outro método de extrapolação, pode induzir a erros.

$$Q = a \times Q_{st}^b \quad (6)$$

Sendo: Q igual a vazão do rio (m^3/s), a e b são coeficientes de ajustes da curva e Q_{st} é a descarga sólida total (t/dia).

3.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

3.5.1 Análise de sensibilidade

Segundo Nunes (2014) e Arnold *et al.* (2012), o primeiro passo para o processo de calibração e verificação do modelo é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica em estudo, que deve ser realizada com base em opinião especializada e/ou análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade foi realizada com diversos parâmetros que o SWAT utiliza para os cálculos de estimativa de vazão diretamente ou indiretamente, permitindo identificar quais parâmetros influenciam significativamente na dinâmica hidrológica. A análise de sensibilidade foi realizada automaticamente pelo uso da ferramenta SWAT-CUP 2009 versão 4.3.7.1, software desenvolvido por Abbaspour (2011).

3.5.2 Calibração e validação

O processo de calibração de modelos hidrológicos geralmente é feito realizando-se primeiramente uma análise de sensibilidade dos parâmetros, seguida de calibração dos parâmetros mais importantes (SALLES, 2012).

Existem duas formas de calibração, tidas como manual e automática. Segundo Muleta e Nicklow (2005), a calibração manual consome muito tempo e é muito subjetiva, e seu sucesso depende muito da experiência do modelador e de seus conhecimentos sobre a bacia hidrográfica do estudo, juntamente com as premissas do modelo e seus algoritmos. Já a calibração automática envolve o uso de um algoritmo para determinar os parâmetros de melhor ajuste do modelo e oferece várias vantagens sobre a calibração manual. A calibração automática é rápida, é menos subjetiva e, como faz uma teste uma grande gama de possíveis valores para os parâmetros existentes, é altamente provável que os resultados sejam melhores do que os que poderiam ser obtidos manualmente.

No início da simulação, há algumas incertezas sobre o estado do sistema, devido ao desconhecimento de todas as suas condições iniciais. Isso acontece principalmente em

relação à umidade do solo (MELLO *et al.*, 2008). Assim, os valores simulados para os primeiros dias (ou meses, ou anos, dependendo da escala temporal escolhida) podem não ser confiáveis. Por isso, recomenda-se a utilização de um período de aquecimento do modelo.

O primeiro passo de uma calibração é dividir os valores medidos em duas séries temporais, sendo uma para calibração e outra para validação. Na calibração, os dados de entrada são ajustados até que se obtenha uma resposta satisfatória de saída. Uma vez realizado tal procedimento, o modelo é executado usando os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação (ARNOLD *et al.*, 2000).

A série histórica dos dados de nível de água no ribeirão Piçarrão foi obtida por meio do portal HidroWeb da ANA (BRASIL, 2005) em uma estação operada pela CEMIG e compreende o período de janeiro de 2017 a novembro de 2019. Em relação aos sedimentos na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão foi realizada uma primeira campanha de coleta de dados em agosto de 2017, onde gerou-se uma curva-chave de sedimentos que foi utilizada na obtenção dos valores observados.

Para a calibração da vazão e da descarga sólida total, foram utilizados os dados disponíveis de 24 meses, correspondentes a janeiro de 2017 até dezembro de 2018, enquanto que o período utilizado na etapa de validação foi de onze meses, o qual compreendeu janeiro de 2019 a novembro de 2019.

Na literatura é possível encontrar outros trabalhos que utilizam séries de dados curtas, como Blainiski e Garbossa (2009) que utilizaram três anos, Bonumá *et al.* (2010) que utilizaram dois anos, Lelis e Calijuri (2010) que utilizaram três anos e Castro (2013) utilizou um período de cinco anos. Lopes e Kobayama (2008) analisaram o equilíbrio hidrossedimentológico e as características geomorfológicas, com a utilização do modelo SWAT, em uma microbacia experimental em Santa Catarina, para um período de dois anos de dados.

Conforme Bonumá *et al.* (2010) e Abbaspour (2012), para simular satisfatoriamente a produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT, primeiramente deve ser feita a análise do equilíbrio hídrico da bacia e a calibração dos componentes hidrológicos que controlam o aporte de sedimentos. Uma vez que os sedimentos e outros poluentes são transportados pela

água, se a resposta hidrológica não for aceitável, os outros processos também não serão. O principal componente hidrológico do modelo é o escoamento.

Portanto, neste trabalho foram calibrados primeiro os dados de vazão e, posteriormente, os dados da produção de sedimentos. Para avaliar o desempenho do SWAT, foram utilizadas algumas funções objetivos, sendo elas: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliff (COE), indicado pela Equação 7, é utilizado para mensurar a magnitude da variância residual; o PBIAS, dado na Equação 8, mede a tendência percentual média dos dados simulados serem maiores ou menores aos correspondentes mensurados.

$$COE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{medio})^2} \right] \quad (7)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{Y_i^{obs}} \right] \quad (8)$$

Nas quais: Y_i^{obs} é o evento observado; Y_i^{sim} é o evento simulado; $Y_i^{obs_medio}$ é a média do evento observado; $Y_i^{sim_medio}$ é a média do evento simulado; n é o número de eventos.

Para efeitos da verificação de performance dos resultados obtidos da simulação hidrológica e produção de sedimentos, estes valores foram classificados por meio dos valores limítrofes apresentados por Moriasi *et al.* (2007) e indicados na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificações gerais de desempenho para estatísticas recomendadas por um período de tempo mensal

Performance	COE	PBIAS (%)	
		Vazão	Sedimento
Muito bom	$0,75 < COE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$
Bom	$0,65 < COE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$
Satisfatório	$0,50 < COE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$
Insatisfatório	$COE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$

Fonte: Moriasi *et al.* (2007).

Os valores definidos por Moriasi *et al.* (2007) são considerados para modelos que utilizem dados mensais para a modelagem. Green e Van Griensven (2008) consideraram que para uma calibração com dados diários valores de COE superiores a 0,4 e R² superiores a 0,5 são considerados satisfatórios para a simulação de vazões.

3.6 SIMULAÇÃO DE CENÁRIO

Sousa (2014) fez um estudo sobre a ocupação do alto curso da bacia do rio Jordão, bacia da qual faz parte o ribeirão Piçarrão. Dentro de seu trabalho, a autora comparou o uso e ocupação do solo para três anos diferente, sendo 1984, 1994 e 2013. A Tabela 5 possui algumas informações extraídas deste trabalho, relacionadas com a área ocupada nesta bacia de vegetação nativa (cerrado), agricultura e silvicultura.

Tabela 5 - Uso e ocupação do solo no alto curso do rio Piçarrão

Ano	Cerrado (%)	Agricultura (%)	Silvicultura (%)	Outros (%)
1984	13	30	26,2	30,8
1994	2,5	45	25	27,5
2013	1,7	*	26	**

* não informado; ** não foi possível calcular

Fonte: adaptado de Sousa (2014)

Nota-se que houve uma tendência em permanecer estável a área destinada a silvicultura, enquanto que a área destinada a agricultura apresentou significativo aumento. Também se analisa que o Cerrado acabou cedendo espaço para outras atividades.

A fim de verificar o aumento percentual na produção de sedimentos, após a etapa de calibração e validação de vazão e dos sedimentos e seguindo os resultados apresentados por Sousa (2014), foi realizada uma simulação que considerou o aumento da agricultura nesta bacia hidrográfica. Optou-se por realizar a substituição da área destinada ao eucalipto por agricultura, visando analisar um cenário de maior produção de sedimentos.

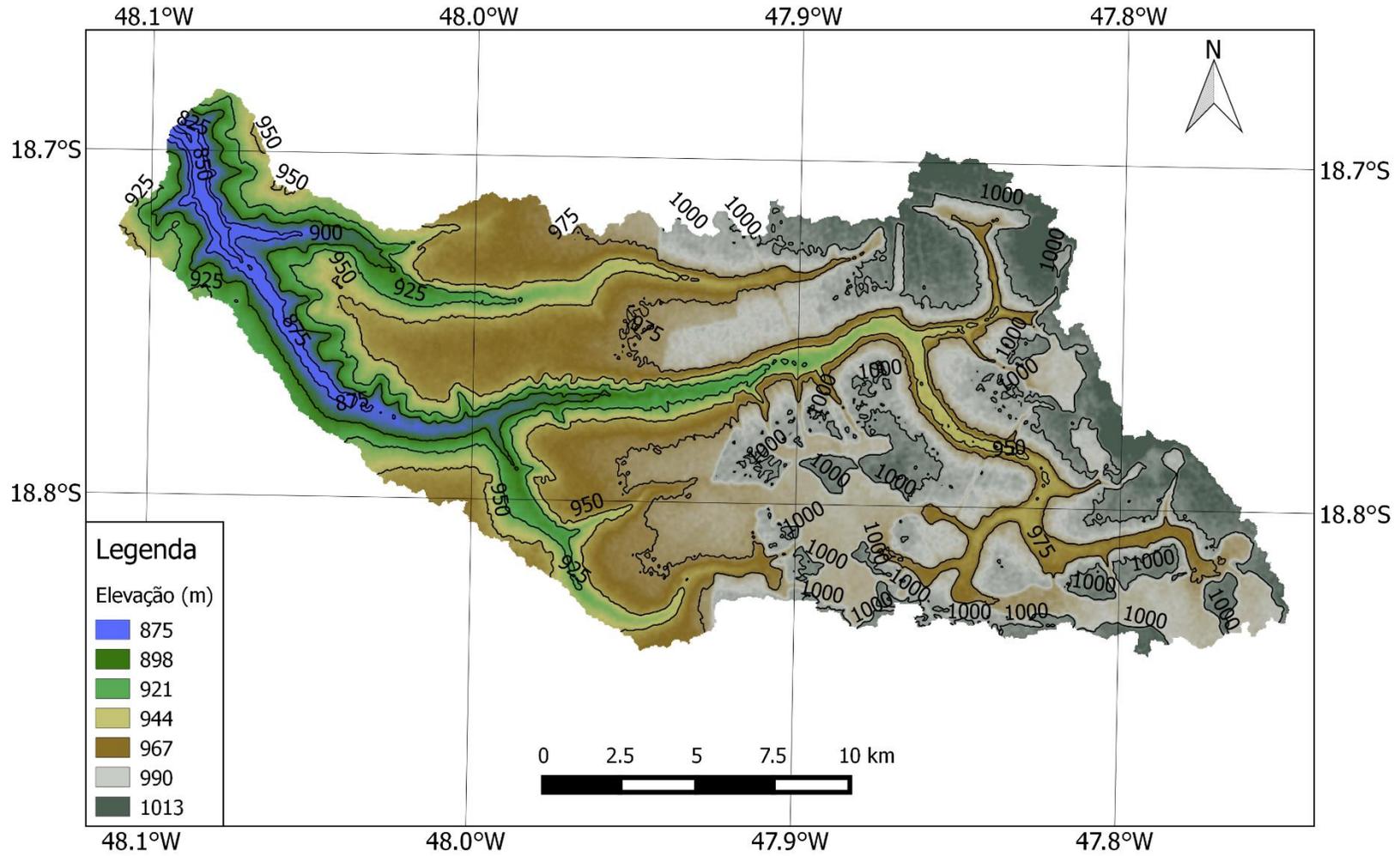
CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MDT

A geração do MDT da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão constituiu um importante processo para o cumprimento dos objetivos propostos. Por meio da definição dos limites desta bacia, tornou-se possível definir uma camada máscara para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, mapa de solos, definição da rede de drenagem, das sub-bacias e das HRUs. A Figura 10 apresenta um mapa hipsométrico com curvas de nível a cada 25 metros com a bacia em estudo delimitada.

Figura 10 – Mapa hipsométrico e delimitação da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão



Fonte: Autor (2019)

4.2 BASE DE DADOS

4.2.1 Mapa de declividade

Conhecer a declividade de um terreno é importante para estudos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, etc. (SÁ, 2014). O mapa de declividade gerado, Figura 11, foi elaborado com as variações de cores entre verde e vermelho, passando pelo amarelo. De acordo com a classificação de Uberti *et al.* (1991), a declividade foi dividida em três classes, indicadas na Tabela 6, a qual também apresenta a área de cada classe.

Tabela 6 - Classificação da declividade e respectivas áreas

Faixa de declividade (%)	Classe	Área (km ²)	Área (%)
0 – 8	Plano e suavemente ondulado	315,41	85,34
8,01 – 20	Ondulado	51,00	13,80
> 20,01	Fortemente ondulado, montanhoso e escarpado	3,18	0,86

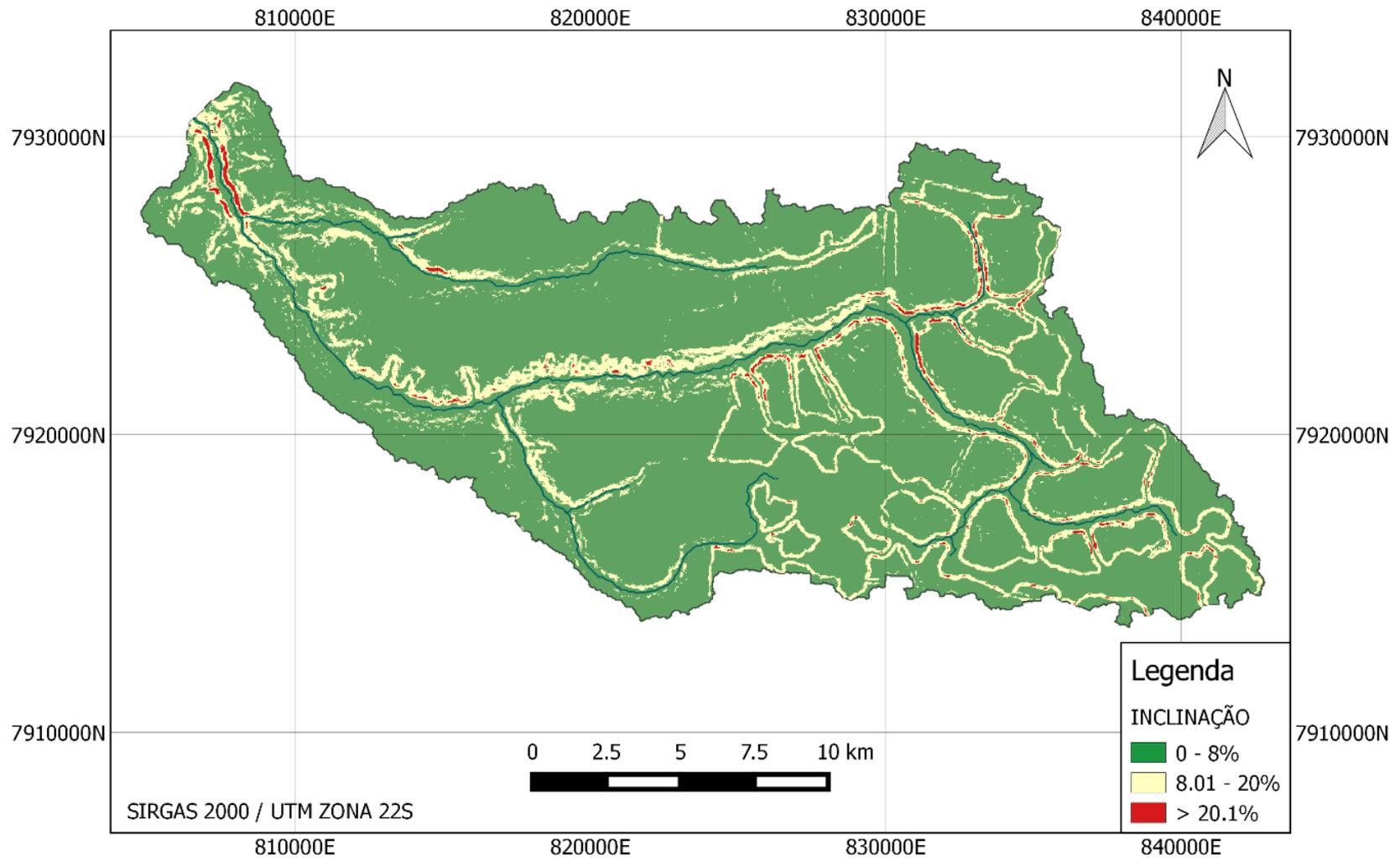
Fonte: adaptado de Uberti *et al.* (1991)

O mapa de declividade revela que grande parte da bacia se classifica como plana ou suavemente ondulada. Maiores faixas de declividade são encontradas próximas à rede de drenagem. De acordo Lepsch *et al.* (2001), terrenos com essa faixa de declividade apresentam escoamento superficial mais lento. Além disso, o declívio do terreno não oferece dificuldade ao uso de máquinas agrícolas, sendo, portanto, mais propício para atividades relacionadas à agricultura; ademais, considerando-se esta declividade, não é esperada uma erosão hídrica significativa.

Pela análise do mapa de declividades, nota-se que os locais de maiores inclinações são onde predomina-se pastagens e onde ainda se nota a presença da vegetação nativa do bioma Cerrado, por corresponderem a Áreas de Preservação Permanente (APP).

Sousa (2014) estudou a evolução do uso das terras nesta bacia hidrográfica e ao fazer análises comparativas entre os anos de 1984, 1994 e 2013, verificou-se a expansão de áreas agrícolas em detrimento da vegetação natural. Parte disso se deve aos programas de incentivo para o desenvolvimento da agricultura na região, bem como características físicas do terreno, tipo de solo e clima da região. A grande presença de agricultura será demonstrada no próximo subitem, bem como da silvicultura.

Figura 11 - Mapa de declividade da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão



SIRGAS 2000 / UTM ZONA 22S

Fonte: Autor (2019)

4.2.2 Base cartográfica de uso e ocupação do solo

Como o banco de dados do SWAT é composto por dados referentes às bacias estudadas nos Estados Unidos, se fez necessário adicionar a este banco de dados informações referentes a bacia em estudo. A Figura 12 apresenta o mapa de uso e ocupação do solo desta bacia hidrográfica e a Tabela 7 a área referente a cada classe, bem como a porcentagem de área referente a cada tipo de uso e ocupação.

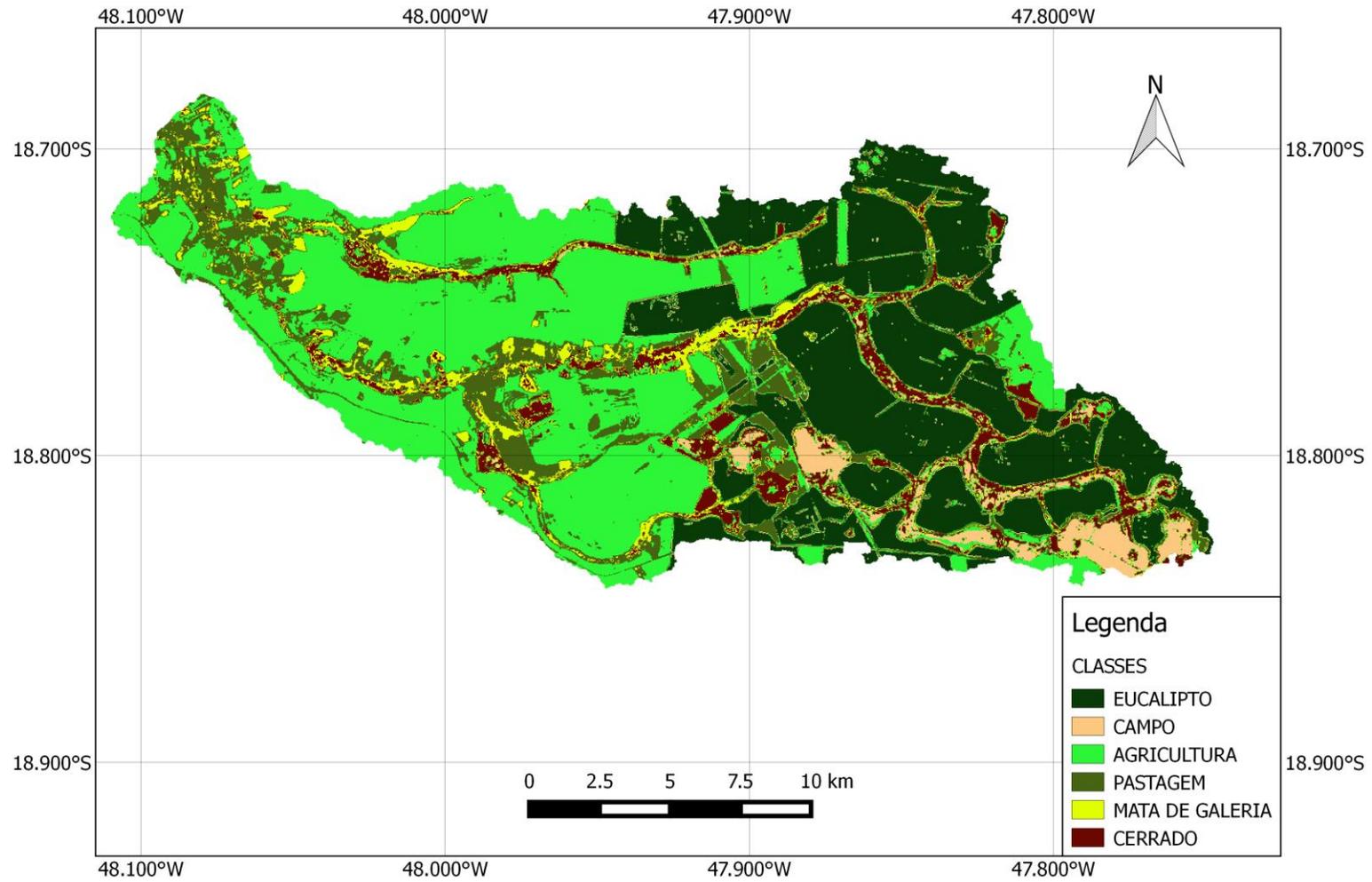
O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MAPBIOMAS, 2015) apresenta imagens anuais da cobertura do solo no Brasil desde o ano de 1985 até o ano de 2018. Em análise das imagens disponibilizadas por este projeto, vê-se a presença do eucalipto desde o primeiro ano analisado. Ao longo dos anos, percebe-se facilmente a diminuição da área de vegetação natural, no mesmo passo em que se aumenta a área do solo destinada à agricultura, verificando-se uma bacia altamente antropizada.

Tabela 7 - Área referente a cada classe de uso e ocupação do solo de agosto de 2018

Uso e Ocupação do Solo	Área (km²)	Área (%)
Eucalipto	110,42	29,88
Campo	15,66	4,24
Agricultura	141,24	38,22
Pastagem	57,08	15,45
Mata de galeria	20,94	5,67
Cerrado	24,23	6,56

Fonte: Autor (2019).

Figura 12 - Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão de 2018



Fonte: Autor (2019)

Nas análises de erodibilidade dos solos levam-se em consideração o chamado fator C_{USLE} , que é o fator de cobertura e manejo do solo. Este fator, de acordo com Rodrigues *et al.* (2017), varia de 0 a 1, onde valores próximos de 1 representam áreas com cobertura vegetal quase nula, e, portanto, mais vulneráveis à erosão hídrica. Os valores considerados no SWAT para o cálculo de sedimentos estão expressos na Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores de cobertura e manejo do solo

CLASSE	C_{USLE}
Eucalipto	0,001
Campo	0,003
Agricultura	0,2
Pastagem	0,003
Mata de Galeria	0,001
Cerrado	0,003

Fonte: Autor (2019)

Pela análise da Tabela 8, espera-se que as sub-bacias que produzirão maior quantidade de sedimentos são as que estão predominantemente ocupadas pela agricultura. Como pode-se perceber pela Figura 12, essas áreas correspondem ao médio e baixo curso do ribeirão Piçarrão, ou seja, mais próximo do exutório e, portanto, da CGH Piçarrão.

Silva *et al.* (2011) e Rodrigues *et al.* (2017) demonstraram que áreas reflorestadas, como exemplo, com eucalipto, apresentam menor erodibilidade do solo quando comparadas às áreas destinadas à agricultura. Portanto, em estudos de análise de erodibilidade, um dos fatores que podem ser considerados para a diminuição da produção de sedimentos é o reflorestamento dessas áreas.

4.2.3 Base cartográfica de solos

No banco de dados de solos do modelo SWAT não há valores para os solos desta bacia. Sendo assim, fez-se necessário inserir manualmente as características físicas do tipo de solo presente, que é o Latossolo Vermelho (LV).

Na equação MUSLE, considera-se o parâmetro K_{USLE} no cálculo da produção de sedimento, parâmetro este que está relacionado com o tipo de solo. Como no banco de dados do SWAT não apresenta as características para o LV, adotou-se os valores obtidos por Lima *et al.* (2013). No que se refere ao K_{USLE} do LV, tem-se 0,018 numa escala que varia entre 0 e 0,65, conforme indica alguns autores, como Bertoni e Lombardi Neto (1999), o LV é classificado como de baixa erodibilidade. Portanto, não se espera altos índices de sedimentação relacionados ao tipo de solo.

4.2.4 Dados climatológicos

Os dados climatológicos de precipitação (mm), radiação solar (MJ/m².dia), temperatura máxima e mínima do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s) foram obtidos pelo site do INMET para a estação climatológica de Uberlândia, MG. Utilizou-se uma série histórica de quase onze anos (janeiro de 2009 a novembro de 2019) para o cálculo dos parâmetros climáticos necessários para a simulação no SWAT.

Além disso, para o cálculo da precipitação na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão, utilizou-se do método de interpolação IPD considerando a estação climatológica de Uberlândia e as estações pluviométricas de Araguari, Cascalho Rico e Fazenda Letreiro. Calculou-se o centroide da bacia em estudo e efetuou-se o cálculo da distância entre cada estação pluviométrica ao centroide (Tabela 9).

Pela Equação 3 no item 3.2,4, que será reescrita, utilizada para esta interpolação, conclui-se que quanto mais próximo estiver a estação pluviométrica do centroide, maior será sua influência sobre o resultado. Desta maneira, conclui-se que a estações de Cascalho Rico e da Fazenda Letreiro serão as que mais influenciarão nos resultados.

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^a} \times P_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^a} \right)} \quad (3)$$

Tabela 9 - Distâncias das estações pluviométricas ao centroide

Distância (km)	Cascalho Rico	Araguari	Uberlândia	Fazenda Letreiro
Centroide	22,53	33,32	42,41	24,71

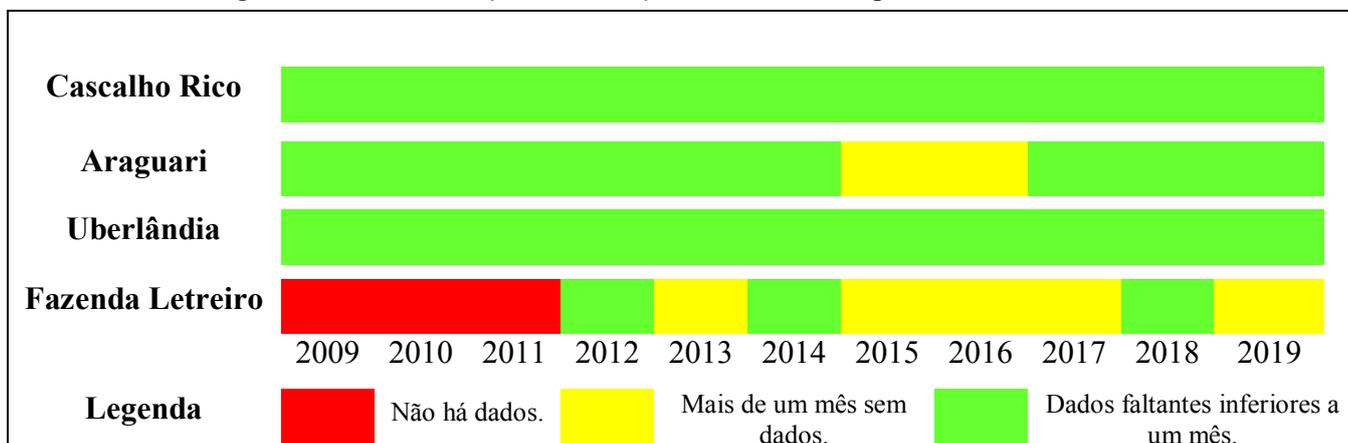
Fonte: Autor (2019)

Além de se analisar a distância de cada estação ao centroide, também se torna importante verificar a qualidade dos dados para que se tenha uma melhor simulação. Abbaspour *et al.* (2015) recomendam que, ao montar o banco de dados para o SWAT, realizem várias simulações alterando os dados das fontes disponíveis para que na calibração se utilize aqueles que obtiveram resultados mais próximos aos observados. Arnold *et al.* (2012) descrevem que alguns resultados ineficientes publicados em estudos com o SWAT podem ser parcialmente atribuídos a cobertura espacial ineficaz dos dados de chuva.

Dada esta recomendação e ao analisar os dados de precipitação disponíveis, optou-se por fazer três interpolações, sendo elas: a) considerando as quatro estações; b) utilizando as estações Cascalho Rico, Araguari e Uberlândia; e c) utilizando as estações Cascalho Rico e Uberlândia.

A escolha das combinações de estações deu-se a partir da análise dos seus dados. A Figura 13 mostra uma classificação dos dados da estação para cada ano seguindo os critérios dados na legenda.

Figura 13 - Classificação das estações conforme disponibilidade de dados



Fonte: Autor (2019)

Para o centroide efetuou-se os cálculos dos parâmetros climáticos considerando-o como uma estação fictícia. Estes parâmetros foram calculados considerando os dados de 2009 a 2019 para a estação climatológica de Uberlândia e a fictícia, ambas pelo *WGN Parameters Estimation Tool*. Os parâmetros climáticos para a estação fictícia estão presentes na Tabela 10.

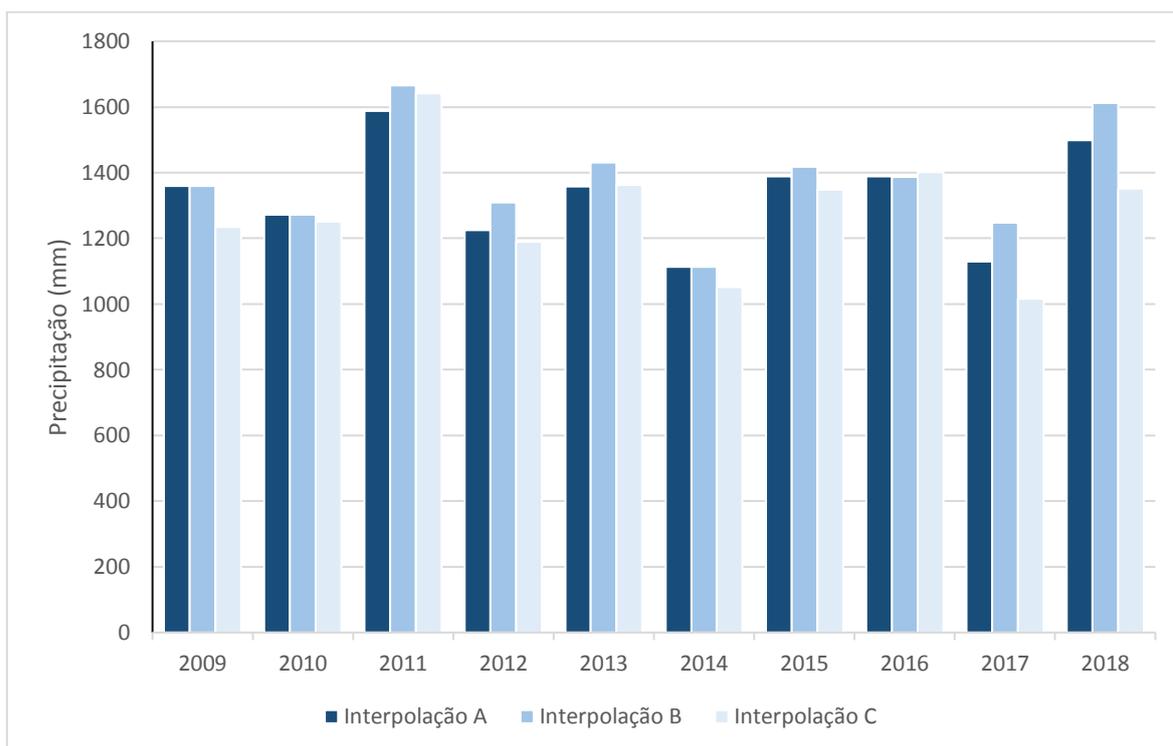
Para análise dos resultados de precipitação na estação fictícia obtidos das interpolações “a”, “b” e “c”, construiu-se um hietograma com dados anuais de chuva obtidos (Figura 14). Consta-se que, para as diferentes situações de interpolação, gera-se diferentes valores, esperando-se, portanto, resultados diferentes para a simulação a ser realizada no SWAT. A interpolação que conduzirá aos melhores resultados será verificada após estas simulações, sendo avaliadas por meio do índice de Nash-Sutcliffe.

Tabela 10 - Parâmetros climáticos calculados para a estação fictícia

Fictícia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30,64	31,19	30,66	30,06	28,45	27,81	28,32	30,43	32,61	32,40	30,76	30,79
TMPMN	19,92	19,63	19,68	17,71	14,96	13,69	13,01	14,30	17,29	19,10	19,36	20,04
TMPSTDMX	2,56	2,00	2,39	2,39	2,44	2,32	2,94	2,89	3,37	3,53	2,73	2,24
TMPSTDMN	1,15	1,17	1,24	2,42	2,96	2,78	2,86	3,06	2,64	2,28	1,68	0,99
PCPMM	299,91	185,52	237,55	110,41	50,90	29,34	9,76	11,65	49,63	130,23	250,00	245,51
PCPSTD	15,63	11,97	13,43	9,88	8,05	4,29	2,20	2,04	6,25	10,91	18,88	12,82
PCPSKW	2,42	2,59	2,46	3,40	8,92	5,37	8,32	6,14	5,86	3,66	4,40	2,50
PR_W1	0,50	0,41	0,46	0,16	0,12	0,09	0,04	0,04	0,10	0,26	0,52	0,41
PR_W2	0,74	0,65	0,68	0,61	0,37	0,32	0,28	0,35	0,38	0,47	0,57	0,70
PCPD	19,80	15,10	17,90	8,45	5,00	3,45	1,64	1,55	4,20	10,20	15,30	18,00
RAINMX	18,43	15,60	16,58	11,02	9,95	4,88	1,90	1,93	8,55	15,53	20,98	17,41
SOLARAV	11,89	12,22	10,87	10,26	8,84	8,36	8,72	10,47	11,77	12,32	10,18	9,83
DEWPT	0,72	0,70	0,73	0,68	0,65	0,63	0,55	0,47	0,47	0,58	0,72	0,74
WNDVAV	1,13	1,22	1,06	1,21	1,09	1,09	1,45	1,96	2,03	1,75	1,36	1,10

Fonte: Autor (2019)

Figura 14 - Hietogramas para os três cenários fictícios de interpolação

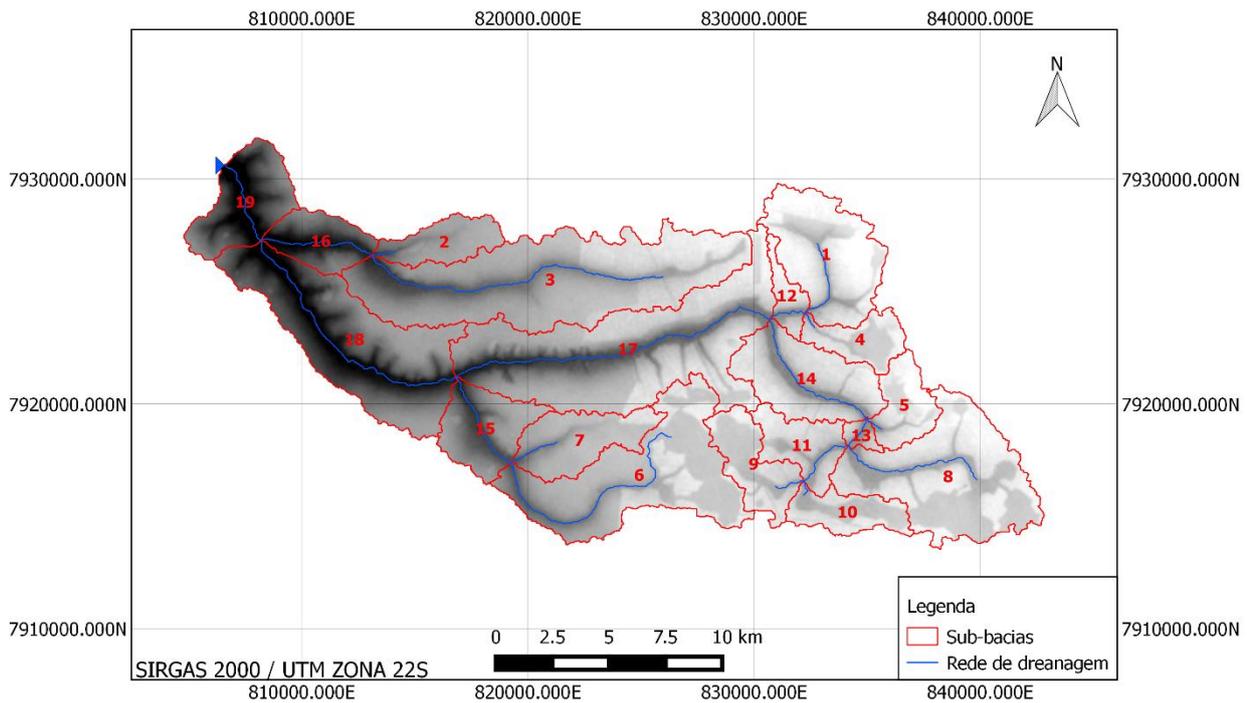


Fonte: Autor (2019)

4.3 GERAÇÃO DAS SUB-BACIAS E HRUs

No modelo SWAT, a bacia hidrográfica estudada é dividida em sub-bacias de acordo com o relevo e com a rede de drenagem, e que podem ser subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs). As HRUs consistem em áreas homogêneas de uso do solo, tipos de solo e declividade. Como resultado deste procedimento, a bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão foi subdividida em 19 sub-bacias, todas representadas na Figura 15.

Figura 15 - Sub-bacias da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão



Fonte: Autor (2019)

Após a geração destas sub-bacias, foram geradas 83 HRUs, sendo que estas HRUs não possuem ligação entre si, o que acontece dentro da rotina do programa é o cálculo das cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes etc.) e depois são somadas as cargas totais de cada HRU dentro de uma sub-bacia. As sub-bacias, sim, são relacionadas entre si, no qual o valor total obtido em uma é transferido para a sub-bacia seguinte.

Ferrigo (2014) elencou que o benefício de trabalhar com as HRUs é o aumento da precisão que contribuem para a predição das cargas, em que a consideração da diversidade da cobertura vegetal, do crescimento e do desenvolvimento das espécies, pode tornar muito mais preciso o valor líquido das cargas (escoamento, sedimentos, nutrientes etc.) de cada sub-bacia.

4.4 MONITORAMENTO DE VAZÃO E SEDIMENTOS TOTAIS

4.4.1 Vazão

A curva-chave é uma ferramenta criada a determinação dos valores de vazão a partir do nível d'água (cota) numa dada seção de um curso d'água (SEFIONE, 2012). Muitas vezes, ou por dificuldades operacionais ou por dados medidos sem considerar sem considerar períodos

chuvosos ou de estiagem, não se tem informações de cota e vazão para a construção de uma curva-chave considerando uma ampla variação de vazão em um rio.

A CEMIG vem fazendo a medição do nível de água na Estação Fluviométrica CGH Piçarrão Montante (Código 60180060) desde janeiro de 2017, entretanto os dados de vazão começaram a ser mensurados a partir de 2019. Isto quer dizer que os pares cota x vazão são limitados, os quais não cobriram toda a faixa de valores dos níveis medidos.

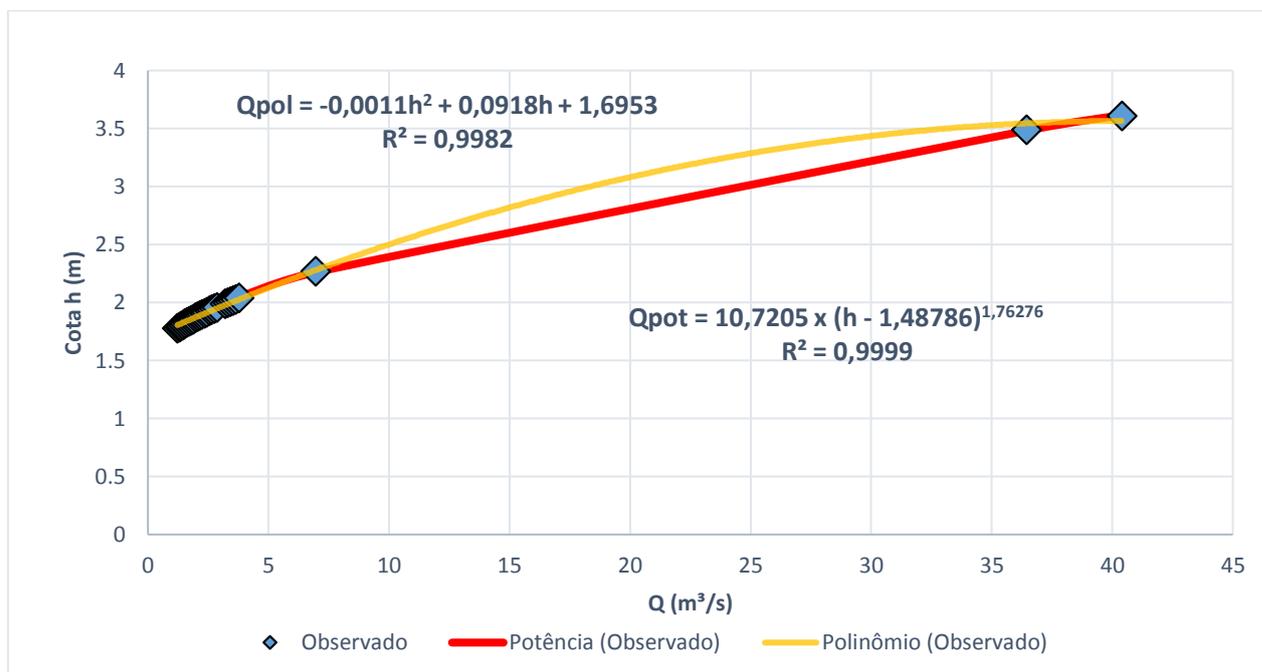
Para a geração da curva-chave com os valores disponíveis, gerou-se duas equações, sendo a primeira polinomial de ordem 2 (dois) e, a segunda, de potência. Para o cálculo da primeira (Q_{pol}), utilizou-se a função disponível no *software* Excel “adicionar linha de tendência” e selecionou-se a opção “polinomial de ordem 2”, a qual apresentou um bom ajuste, com o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9982. É válido lembrar que o coeficiente R^2 é uma opção para se avaliar a qualidade de ajuste de um modelo.

A curva-chave dada por uma equação de potência foi calculada segundo um método analítico, no qual se fez várias iterações para encontrar o valor de H_0 , presente neste formato de equação. Vale ressaltar que H_0 é um valor dado em relação a um referencial arbitrário, o qual corresponde à situação de vazão nula. Nem sempre este parâmetro corresponde a um valor de cota 0. Portanto, para calculá-lo, fez-se o uso da ferramenta *Solver* do Excel, onde se estabeleceu três condições.

- I) Minimizar o valor da soma dos desvios, dado pela somatória dos quadrados das diferenças entre as vazões calculadas (Q_{cal}) e as vazões observadas (Q_{obs}) ($\sum_{i=1}^n (Q_{cal} - Q_{obs})^2$);
- II) Alterar os valores do parâmetros a , b e H_0 ;
- III) Valor máximo de H_0 deve ser menor que o de H .

Após a aplicação destas três condições, executou-se o *Solver* e encontrou-se uma equação de potência de curva-chave com o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,999, sendo superior à primeira equação. Portanto, optou-se por utilizar esta segunda equação para o cálculo das vazões entre o período de janeiro de 2017 a novembro de 2019. Ambas as equações, assim como os dados observados, estão expressas na Figura 16.

Figura 16 - Curvas-chave para a seção transversal no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão



Fonte: Autor (2019)

Ao se analisar esta curva-chave, deve-se destacar dois aspectos: o primeiro, embora no trecho inicial da curva-chave (com cotas entre 1,78 m e 2,05 m) haja bastantes pares cota \times vazão, percebe-se que o mesmo não ocorre nem no trecho intermediário, nem no final da curva. Isto contraria o que diz Tucci (2013), pois, segundo o autor, a relação entre cota e vazão deve ser definida em todo o intervalo de variação das cotas de uma série linimétrica homogênea. Quando esta condição não se atender, recomenda-se lançar mão de técnicas de extrapolação desta curva-chave.

Dentre os métodos de utilização mais comumente utilizados, citados por Santos (2001), optou-se pela utilização do método da extrapolação logarítmica no trecho superior da curva, que, conforme este autor, é o método mais utilizado no Brasil na extrapolação da parte alta da curva. O princípio desse método é aplicar uma equação de ajustamento de uma expressão matemática exponencial, conforme a Equação 4, que será reescrita. Plota-se as medições num papel com escala logarítmica e determina-se graficamente o valor que retifica melhor a parte da curva e extrapola-se esta reta até a cota máxima observada.

$$Q = a \times (H - H_0)^b \quad (4)$$

Este procedimento foi feito no Excel, no qual verificou-se que os coeficientes da equação de Q_{pot} da curva-chave anterior atendem bem esta condição, onde obteve-se a equação $Y = X$, com o coeficiente de determinação R^2 igual a 1.

Um segundo aspecto que se apresenta é que a curva-chave definida apresenta pares cota x vazão entre 1,78 m a 3,61 m. No entanto, dentre os dados de cota observados, também se encontram valores entre 1,55 m a 1,78 m. Já era esperado obter dados inferiores a 1,78 m, uma vez que não foram feitas medições de vazão em períodos de estiagem. Logo, torna-se necessária a extrapolação no limite inferior desta curva-chave.

Para a extrapolação no limite inferior, optou-se pela extrapolação gráfica a sentimento, seguindo a tendência do trecho definido pelas medições. É um método indicado para pequenas extrapolações, superando ligeiramente os pontos medidos. Santos (2001) elenca que se o trecho a ser extrapolado for grande, este método pode levar a grandes erros. Utilizou-se deste método porque a ausência de levantamento topobatimétrico da seção inviabiliza a utilização dos outros métodos, além do que o método de extrapolação logarítmica (utilizado na extrapolação superior) não é indicado para extrapolação inferior.

4.4.2 Sedimentos totais

Peixoto (2019) realizou várias campanhas de coleta de sedimentos na seção transversal com os dados de vazão do ribeirão Piçarrão cedidos pela CEMIG. O Quadro 4 revela seus resultados obtidos em cada coleta feita, onde também foram feitas medidas de vazão (Q) e obtidas a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}), descarga em suspensão medida (Q_{ss}), descarga sólida não medida (Q_{nm}) e descarga sólida total (Q_{st}).

O Quadro 5 revela para qual faixa de vazão foram obtidos os valores de descarga sólida total, ou seja, o limite mínimo e máximo desta curva-chave de sedimentos. Assim, tem-se que esta curva-chave é válida para valores de vazão entre 0,39 m³/s a 6,12 m³/s. O valor mínimo obtido para vazões na série histórica utilizada neste estudo foi de 0,34 m³/s e de 11,72 m³/s. Sendo assim, torna-se necessário utilizar técnicas de extrapolação.

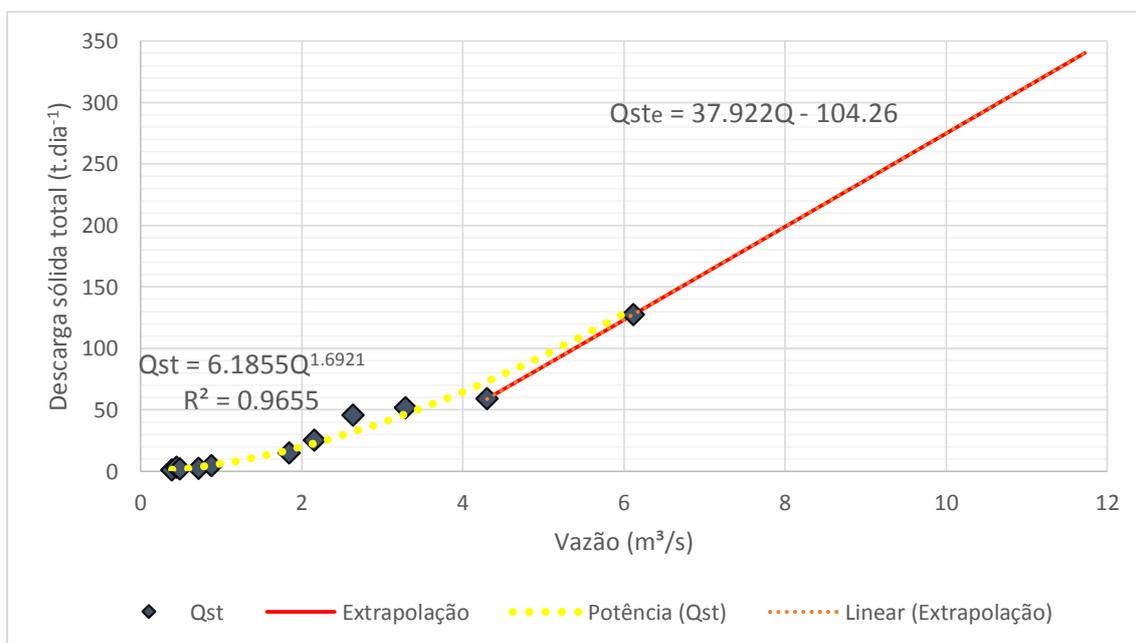
Quadro 5 - Campanhas sedimentométricas no ribeirão Piçarrão

Data	Período	Estação 1				
		Css (mg/L)	Q (m³/s)	Qss (t/d)	Qnm (t/d)	Qst (t/d)
02/08/2017	Seco	10,67	0,725	0,668	1,595	2,263
12/09/2017		32,44	0,450	1,261	1,748	3,009
18/10/2017		18,67	0,491	0,792	1,218	2,010
07/11/2017	Chuvoso	87,33	3,289	24,817	26,987	51,805
12/12/2017		113,00	6,118	59,731	67,815	127,546
23/01/2018		105,56	2,637	24,049	21,474	45,524
27/02/2018		73,00	4,300	27,121	31,845	58,966
20/03/2018		63,11	2,159	11,772	13,669	25,442
22/05/2018	Seco	35,00	1,850	5,594	9,181	14,776
17/07/2018		21,60	0,879	1,640	3,072	4,713
04/09/2018		7,83	0,392	0,265	0,627	0,893
16/10/2018		8,47	-	-	-	-
20/11/2018	Chuvoso	23,13	4,786	9,566	22,728	32,295
11/12/2019		53,25	4,598	21,154	34,332	55,486

Fonte: adaptado de Peixoto (2019)

A Figura 17 indica a extrapolação superior da chuva-chave, dada pela equação Q_{ste} , isto é, a descarga sólida total extrapolada. Para extrapolação inferior, optou-se por permanecer utilizando a equação dada por Q_{st} , visto tratar-se vazões próximas.

Figura 17 - Comportamento da curva-chave de sedimentos na estação CGH Piçarrão Montante



Fonte: Autor (2019)

Desta forma, a curva-chave de sedimentos da estação estudada terá dois comportamentos: a) para valores de vazão na faixa de 0,34 m³/s a 6,12 m³/s, a descarga sólida total é calculada para a equação do Q_{st}; b) para valores de vazão maiores que 6,12 m³/s e inferiores a 11,72 m³/s, a descarga sólida total será dada por Q_{ste}.

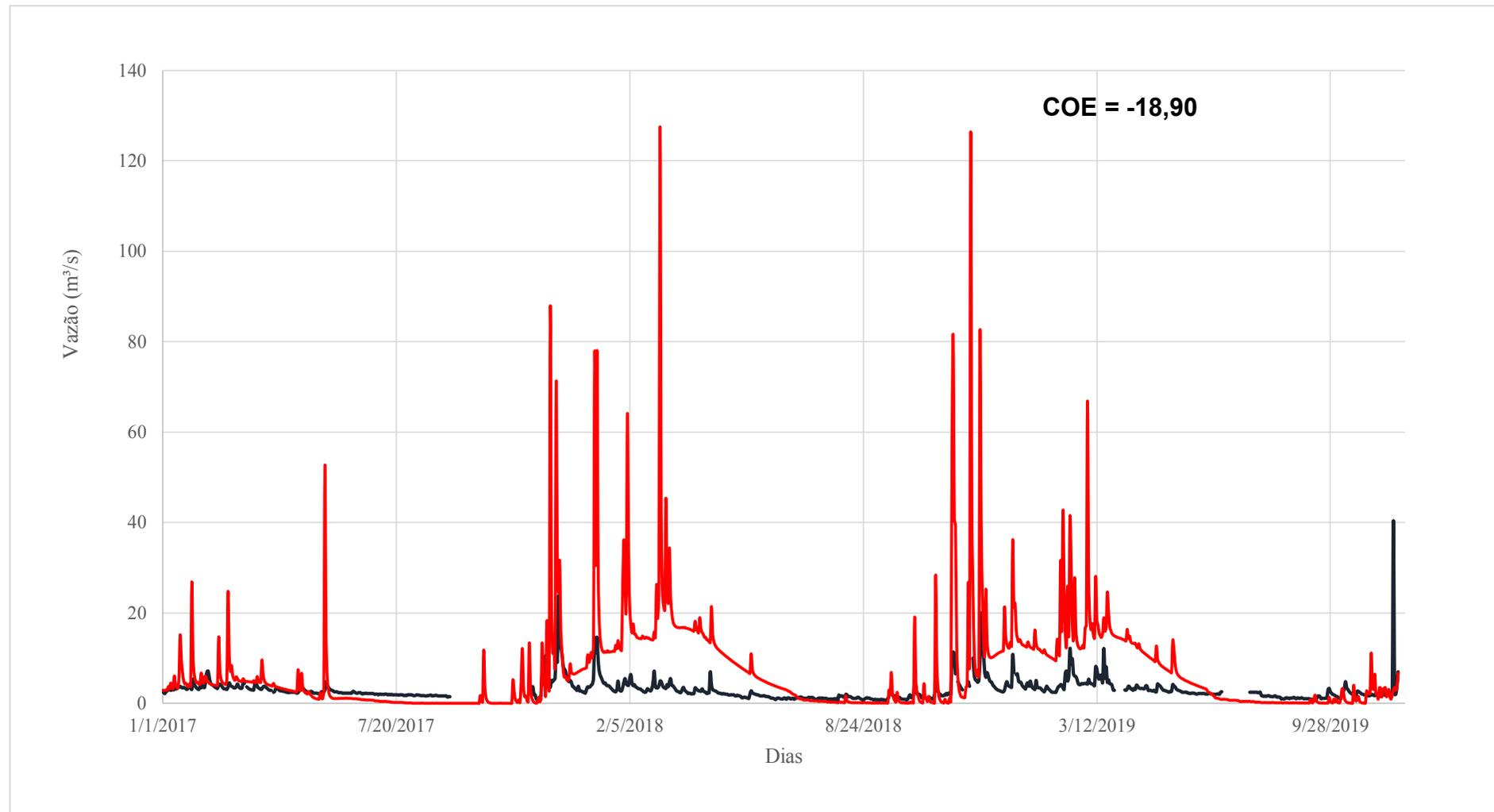
4.5 SIMULAÇÕES NA FERRAMENTA SWAT

4.5.1 Simulação hidrológica na pré-calibração

Uma vez fornecido ao modelo SWAT os arquivos de entrada necessários (MDT, uso e ocupação do solo, tipo de solo e dados climáticos), foi possível fazer a simulação do modelo hidrológico, o qual gerou as vazões no exutório de cada sub-bacia definida no item 4.3. No processo de calibração hidrológica foi utilizada a seção de monitoramento localizada no exutório da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão.

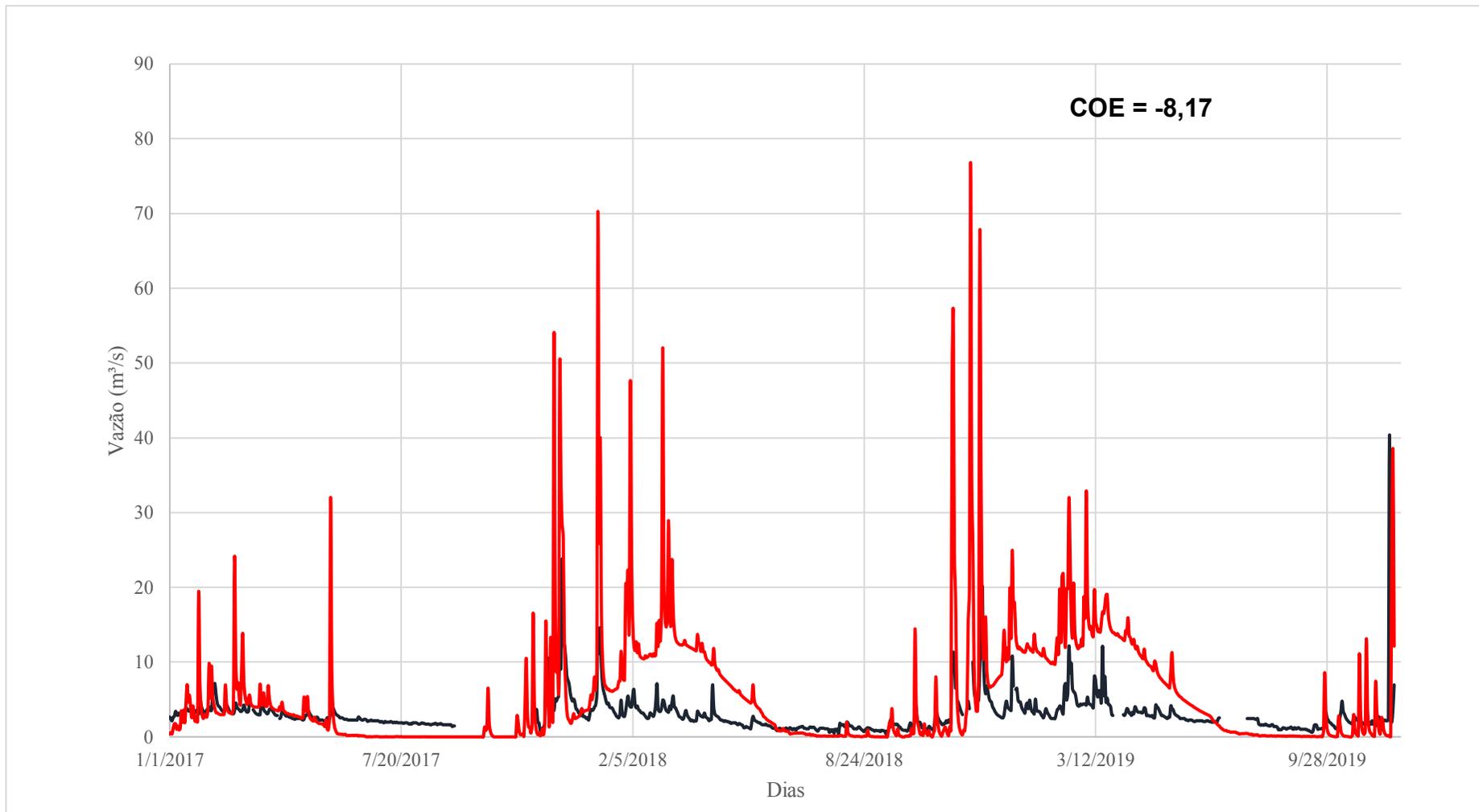
Ainda na etapa de simulação pré-calibração, foram testadas as três interpolações de precipitação definidas no item 4.2.4 e, para cada uma delas, calculou-se o índice de Nash-Sutcliffe (COE). Lembra-se aqui que este índice permite avaliar a qualidade do ajuste entre dados de vazão medidos e simulados. Os resultados destas primeiras simulações estão indicados nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18 - Resultado da simulação de situação "A" (sem calibração)



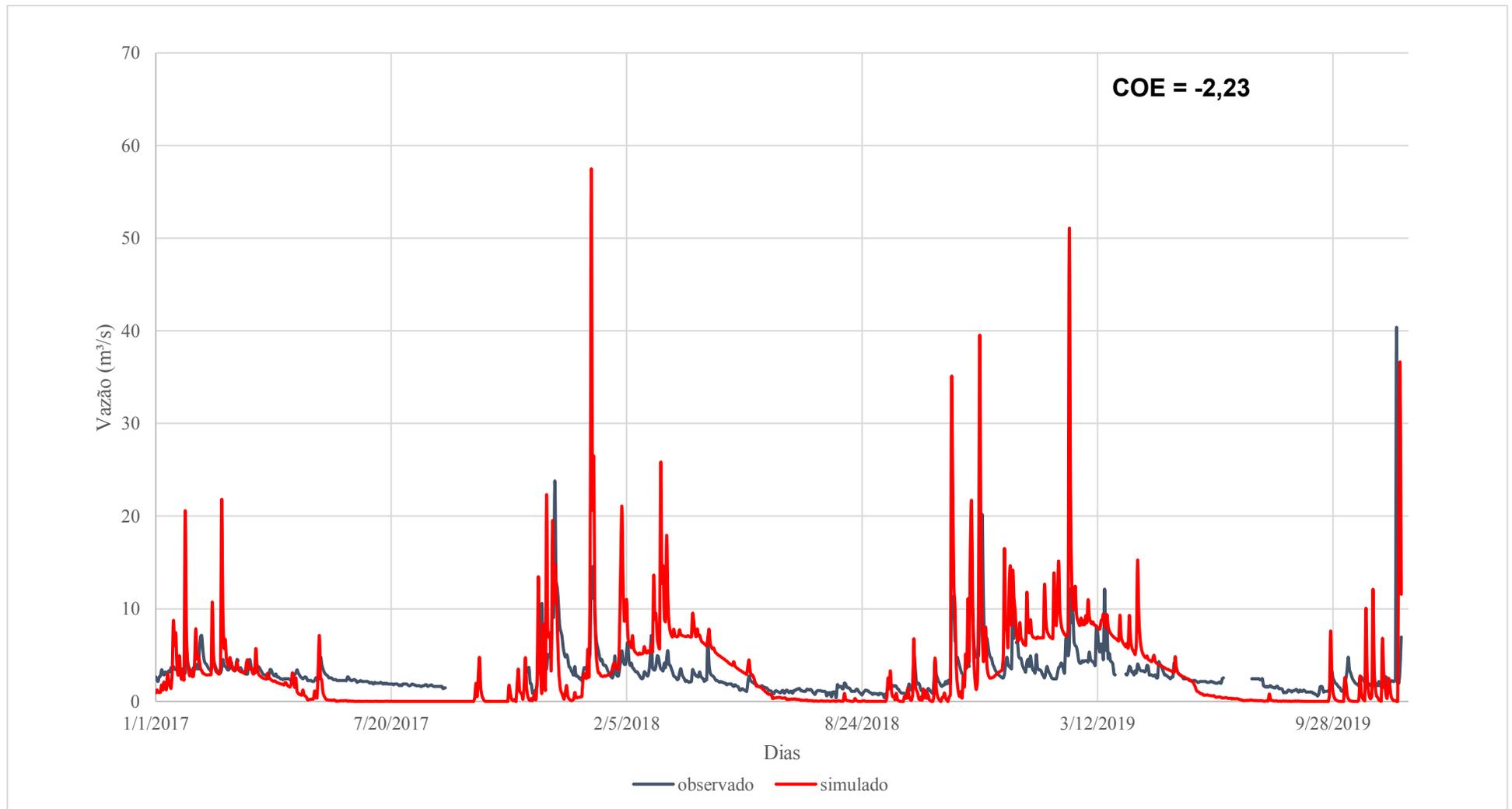
Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Resultado da simulação de situação "B" (sem calibração)



Fonte: Autor (2019)

Figura 20 - Resultado da simulação de situação "C" (sem calibração)



Fonte: Autor (2019)

A partir da análise dos hidrogramas das simulações no SWAT considerando as três interpolações, percebe-se que a simulação “C” foi a que obteve resultados mais próximos da realidade. Obteve-se um valor para o índice de Nash-Sutcliffe (COE) igual a -2,23, no entanto, este valor está abaixo do considerado como aceitável, que é de 0,4.

Ao analisar as diferenças obtidas entre as simulações, torna-se evidente a necessidade de fazer uma boa seleção dos dados das estações pluviométricas. A fim de curiosidade, foram testadas no SWAT-CUP os resultados das três simulações e não se chegou a valores aceitáveis no índice de Nash-Sutcliffe para a interpolação “a”. Em relação a interpolação “b”, obteve-se valores aceitáveis, mas com valores inferiores a da interpolação “c”.

Em análise dos hidrogramas, nota-se uma tendência do SWAT para superestimar valores de vazão pico, enquanto que também subestima valores de vazão em períodos de estiagem. Esta consideração também foi relatada por Ferrigo (2011), Salles (2012), Castro (2013) e Carvalho (2014).

Por fim, conclui-se que as simulações geradas no SWAT não obtiveram desempenhos consideráveis, sendo necessário efetuar o processo de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo. Este próximo passo foi realizado exportando os arquivos de saída do SWAT para o *software* SWAT-CUP.

4.5.2 Análise de sensibilidade de parâmetros relacionados a vazão

Na etapa de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo gerado pelo SWAT, foi feita uma busca na literatura de trabalhos desenvolvidos no cerrado brasileiro, com o objetivo de listar os parâmetros que se apresentam mais sensíveis quando se trata do cálculo de vazões superficial em curso de água. Dentre os trabalhos encontrados, foram listados estes parâmetros no Quadro 6, os quais foram utilizados para a análise de sensibilidade.

Quadro 6 - Parâmetros testados na análise de sensibilidade

Parâmetro	Descrição	Método de alteração	Limite inferior	Limite superior
CN2	Número da Curva na condição de umidade II	Multiplicação	-0,2	0,2
ALPHA_BF	Constante de recessão para o fluxo de base	Substituição	0	1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero	Substituição	30	450
GWQMN	Profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado para o canal	Substituição	0	2
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	Multiplicação	-1	1
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo	Substituição	0,8	1
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial	Substituição	0,005	5
SOL_AWC	Capacidade de água disponível na camada de solo	Multiplicação	-0,05	0,05
SHALLST	Quantidade de água inicial no aquífero raso	Substituição	2000	5000
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning	Substituição	0,015	0,040
GWHT	Altura inicial do aquífero	Multiplicação	4	10
RCHRG_DP	Fração da percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo	Multiplicação	-0,3	0,3
GW_REVAP	Coefficiente de re-evaporação da água subterrânea	Substituição	0	0,2
CANMX	Armazenamento máximo do dossel	Substituição	0	30
EPCO	Fator de compensação de retirada das plantas	Substituição	0,01	1
REVAPMN	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação	Soma	-1000	1000

Fonte: adaptado de Carvalho (2014) e Oliveira (2019)

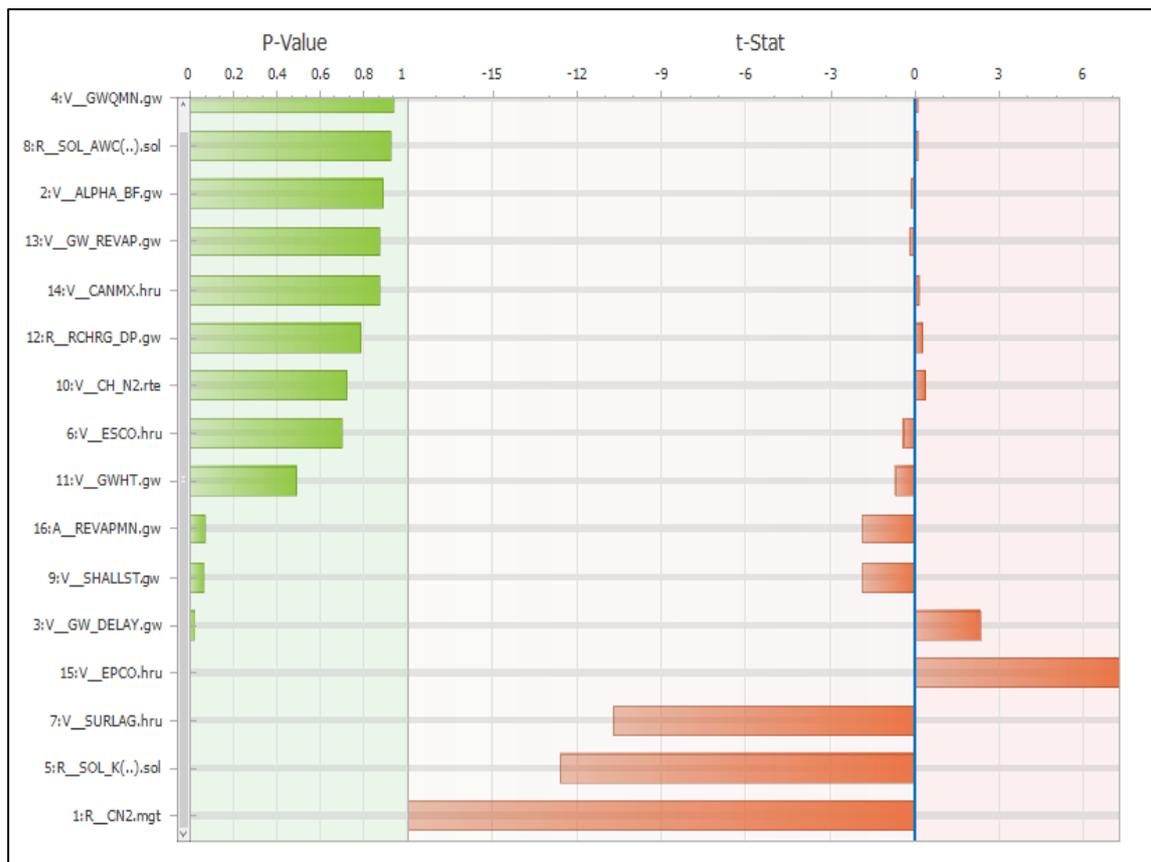
É importante ressaltar que ao adicionar estes parâmetros no SWAT-CUP há duas considerações a serem feitas:

- A primeira é que o *software* em questão pede que sejam estipuladas faixas de variação para cada parâmetro, estabelecendo um limite mínimo e outro máximo, a fim de se evitar que o modelo faça simulações e encontre resultados obtidos como satisfatórios, porém com valores de alguns parâmetros que não existiriam na prática;

- A segunda é que o modelo permite ao usuário utilizar três métodos de alteração dos valores durante as iterações. São elas: a) *replace* (substituição direta), na qual o programa altera diretamente os valores; b) *relative* (multiplicação), as alterações se dão variando o valor inicial por porcentagem, para mais ou para menos; e c) *absolute* (soma) em que algum valor (positivo ou negativo) é somado ao valor inicial do parâmetro.

Inicialmente foi feita uma simulação com 100 iterações para testar a sensibilidade dos parâmetros. Após este número, foram observados os parâmetros mais sensíveis e analisado também aqueles que pouco influenciavam no modelo. A análise de sensibilidade foi feita pelos valores de *p-value* e *t-stat* de cada parâmetro fornecidos pelo SWAT-CUP (Figura 21). Enquanto o *t-stat* fornece uma medida da sensibilidade (quanto mais distante de zero, mais sensível é o parâmetro), o *p-value* determina a significância da sensibilidade.

Figura 21 - Análise de sensibilidade dos parâmetros



Fonte: SWAT-CUP (2019)

Nota-se pela Figura 21 que os seis parâmetros que obtiveram maior sensibilidade foram, respectivamente, o CN2 (número da cuva), SOL_K (condutividade hidráulica saturada do solo), SURLAG (coeficiente de atraso do escoamento superficial), EPCO (fator de compensação de retirada das plantas), GW_DELAY (intervalo de tempo para a recarga do aquífero) e SHALLIST (quantidade de água inicial no aquífero raso).

Por outro lado, os seis que apresentaram pouca sensibilidade foram o GWQMN (profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de água é liberado para o canal), SOL_AWC (capacidade de água disponível na camada do solo), ALPHA_BF (constante de recessão para o fluxo de base), GW_REVAP (coeficiente de re-evaporação da água subterrânea), CANMX (armazenamento máximo do dossel) e RCHRG_DP (fração da percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo). Neste trabalho, ressalta-se que se optou por utilizar todos os parâmetros listados no Quadro 6.

Bonumá *et al.* (2010) encontraram os parâmetros CN2, ESCO (fator de compensação da evaporação do solo) e ALPHA_BF como os que tinham maior sensibilidade na bacia hidrográfica do rio Lino, localizada no Sul do Brasil. Ferreira e Uagoda (2016) tiveram os parâmetros ESCO, GW_DELAY, SOL_AWC e CN2 como de maior sensibilidade.

Lima *et al.* (2014) analisaram quatro bacias brasileiras em diferentes biomas e climas, sendo uma na Caatinga, outra em zona de transição entre Caatinga e Mata Atlântica e outras duas no Cerrado. Ao compararem os resultados da análise de sensibilidade destas bacias, constaram que o parâmetro CN2 se mostrou com alta sensibilidade em três das quatro bacias. Em uma das bacias do Cerrado, os três parâmetros mais sensíveis foram o SOL_K, CN2 e SOL_AWC, enquanto que na outra foram SURLAG, ALPHA_BF e CN2.

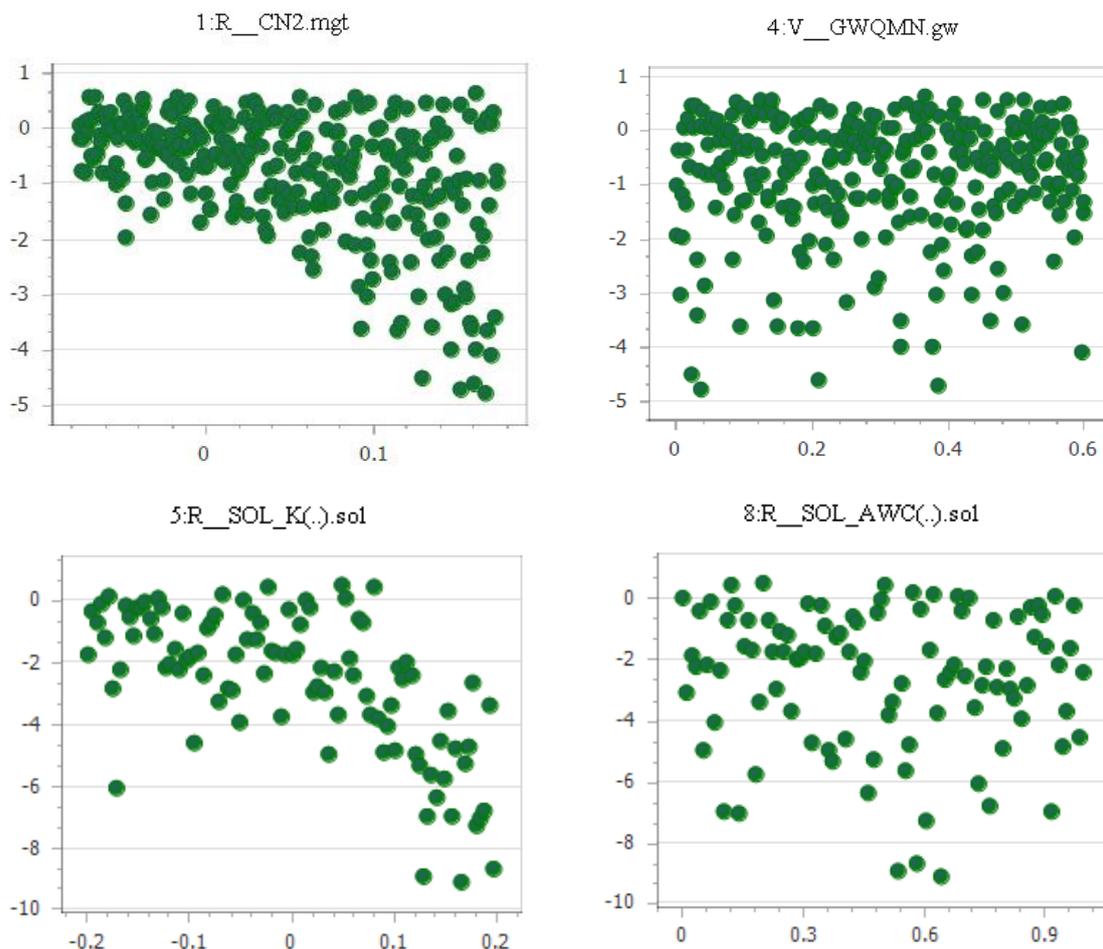
O parâmetro CN2 frequentemente é encontrado na literatura com um dos que mais influenciam nas simulações hidrológicas. Este é um parâmetro que está diretamente ligado ao escoamento superficial, no qual quanto mais alto foi este parâmetro, maior será o volume de escoamento superficial. Como nas análises dos hidrogramas obtidos pelo SWAT percebia-se grandes vazões de pico, bem superiores às observadas, sugere-se que o valor do CN2 teria grande sensibilidade nesta problemática.

Neitsch *et al.* (2011) mostraram que, para um determinado tempo de concentração, à medida que o SURLAG (coeficiente de atraso do escoamento superficial) diminui, mais água é mantida em armazenamento, sendo que o atraso na liberação do escoamento superficial suavizará o hidrograma de vazões. Isto indica que o SURLAG deverá ter seu valor diminuído na etapa de calibração com o objetivo de suavizar o hidrograma gerado pelo SWAT.

De acordo com Ferrigo (2014), o parâmetro SOL_K interfere no fluxo de base, pois é responsável pelo fluxo horizontal na zona saturada, e isso pode ser determinante na simulação da vazão em épocas de estiagem, influenciando principalmente na velocidade da drenagem do solo nessa época. Para trabalhos desenvolvidos no centro-oeste brasileiro, esse parâmetro realmente tende a ser importante e seu valor pode ser significativo na simulação do decaimento da vazão após o período chuvoso.

O SWAT-CUP gera para cada parâmetro o chamado *dotty plot*, ou gráfico pontilhado, onde cada ponto é o cruzamento entre o valor testado na iteração com o valor obtido na função objetivo. A Figura 22 mostra o gráfico pontilhado para, respectivamente, os parâmetros mais sensíveis (na coluna à esquerda) e os menos sensíveis (na coluna à direita). Em análise ao CN2 e GWQMN conclui-se que para o CN2, valores mais à esquerda levam a melhores resultados; enquanto que para o GWQMN, independente dos locais que estiverem no gráfico, apresentarão resultados semelhantes.

Figura 22 - Gráficos pontilhados (*dotty plots*) de valores testados x Coeficiente de Nash-Sutcliffe



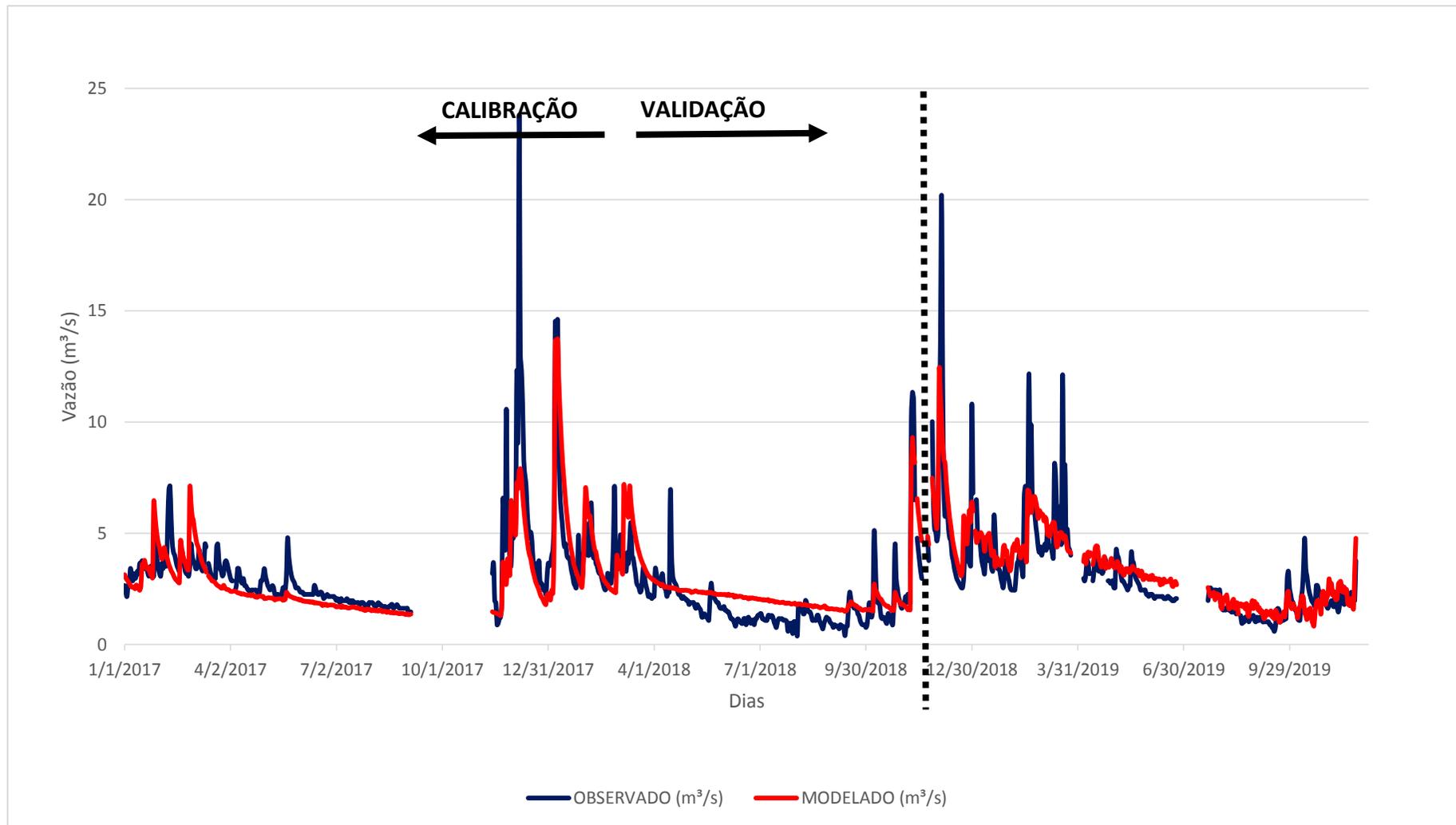
Fonte: SWAT-CUP (2019)

4.5.3 Processo de calibração e validação das vazões

Uma vez estabelecidos os parâmetros que serão utilizados na etapa de calibração e validação, definida uma faixa de variação permitida para eles e qual método de substituição será utilizado para cada um (soma, multiplicação ou substituição), foi possível iniciar este passo.

No SWAT-CUP, após o processamento, que gerou 600 iterações pôde-se obter os valores para o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) aceitáveis. No intuito de confirmar este resultado, realizou-se novas simulações, entretanto, verificou-se que não havia mais alterações no COE e, assim, foi considerada concluída a etapa de calibração do modelo. O período utilizado para a calibração foi de dois anos, contemplando janeiro de 2017 a dezembro de 2018. O resultado obtido para o hidrograma calibrado na seção exutório da BH está na Figura 23.

Figura 23 - Hidrograma calibrado obtido pelo SWAT-CUP



Fonte: Autor (2019)

Após a calibração, nota-se que os picos para a vazão simulada foram suavizados. No entanto, nota-se agora uma situação contrária, onde se apresenta maiores picos de vazão nos dados observados. Neste momento, é válido recordar que os dados observados foram extraídos de uma curva-chave, a qual teve de ser extrapolada em seus limites superior e inferior, possuindo, por tanto, algumas incertezas para os valores máximos e mínimos.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe obtido na calibração foi de 0,63, no qual, segundo a classificação de Moriasi *et al.* (2007), é tido como “satisfatório”. O valor do coeficiente de determinação obtido foi de 0,63, também tido como “satisfatório”, conforme Green e Van Griensven (2008). A calibração apresentou o coeficiente de PBIAS igual a -1,1, no qual valores negativos indicam que os dados simulados apresentaram uma superestimação em relação aos dados medidos.

Nota-se na Figura 23 que há falhas na série histórica disponível, com a ausência de níveis da água medidos durante os meses de setembro e outubro de 2017, novembro de 2018 e julho de 2019. No SWAT-CUP há a possibilidade de se trabalhar com “dados ausentes”, no qual se permite que datas que não tenham dados não sejam consideradas na calibração e validação.

O período utilizado para a validação dos resultados foi de janeiro a novembro de 2009. Foram obtidas situações semelhantes às da calibração, apresenta-se uma maior diferença entre as vazões medidas e calibradas durante os picos, apresentando vazões medidas superiores às observadas. Isto pode ter ocorrido devido às incertezas das extrapolações das curvas-chave.

Após a fase de calibração, foram gerados novos valores para os parâmetros utilizados, indicados no Quadro 7. Para fazer a etapa de validação no SWAT-CUP deve-se utilizar a mesma faixa de valores utilizada na calibração e executar o programa com a mesma quantidade de iterações utilizadas na última execução da calibração.

Quadro 7 - Valores adotados na calibração e validação da vazão

Parâmetro	Método de alteração	Limite inferior	Limite superior	Adotado
CN2	Multiplicação	-0,2	0,2	0,16
ALPHA_BF	Substituição	0	1	0,36
GW_DELAY	Substituição	30	450	305,08
GWQMN	Substituição	0	2	0,85
SOL_K	Multiplicação	-1	1	-0,96
ESCO	Substituição	0,8	1	0,98
SURLAG	Substituição	0,005	5	0,17
SOL_AWC	Multiplicação	-0,05	0,05	0,07
SHALLST	Substituição	2000	5000	1018,62
CH_N2	Substituição	0,015	0,040	0,016
GWHT	Multiplicação	4	10	6,92
RCHRG_DP	Multiplicação	-0,3	0,3	0,01
GW_REVAP	Substituição	0	0,2	0,055
CANMX	Substituição	0	30	29,59
EPCO	Substituição	0,01	1	1
REVAPMN	Soma	-1000	1000	-429,52

Fonte: Autor (2019)

A etapa de validação apresentou um COE de 0,62, R^2 igual a 0,63 e PBIAS igual -7,0. Conforme os critérios de Moriasi *et al.* (2007), tem-se que pelo COE a validação é tida como “aceitável”, classe que varia de 0,5 a 0,65; enquanto que pelo PBIAS a validação é tida como “muito boa”, sendo inferior a ± 10 . Ainda pelo PBIAS, nota-se que no período de calibração houve uma maior superestimação dos dados simulados.

Oliveira *et al.* (2019), ao utilizarem o SWAT e o SWAT-CUP para modelarem uma bacia hidrográfica no Cerrado brasileiro, obtiveram uma performance de 0,89 e 0,93, respectivamente, para calibração e validação. Os autores utilizaram uma série histórica de 18 anos, sendo três para o período de aquecimento, nove anos para calibração e seis anos para validação.

Ainda no Cerrado brasileiro, Ferreira e Uagoda (2017) obtiveram um COE de 0,53 na calibração da bacia estudada e 0,57 na validação, mostrando a capacidade de se obter resultados satisfatórios no SWAT após a calibração.

Neste estudo a calibração e validação dos dados foram feitos em escala diária, enquanto muitos autores utilizaram escala mensal. Trabalhos apresentados por Bonumá *et al.* (2010), Carvalho (2014), Oliveira *et al.* (2019), Singh *et al.* (2013) fizeram as simulações considerando período diário e mensal, para todos os casos obtiveram melhores resultados nas funções objetivo para a escala mensal.

Para que se obtenham melhores resultados na calibração e validação, recomenda-se que tenha uma maior quantidade de dados observados para a elaboração da curva-chave contemplando períodos chuvosos e de secas. Análise mais detalhada dos dados das estações pluviométricas, podendo ser adicionadas outras estações próximas à bacia. Recorda-se também que, neste estudo, a série histórica foi de apenas três anos, considerada como uma série muito curta.

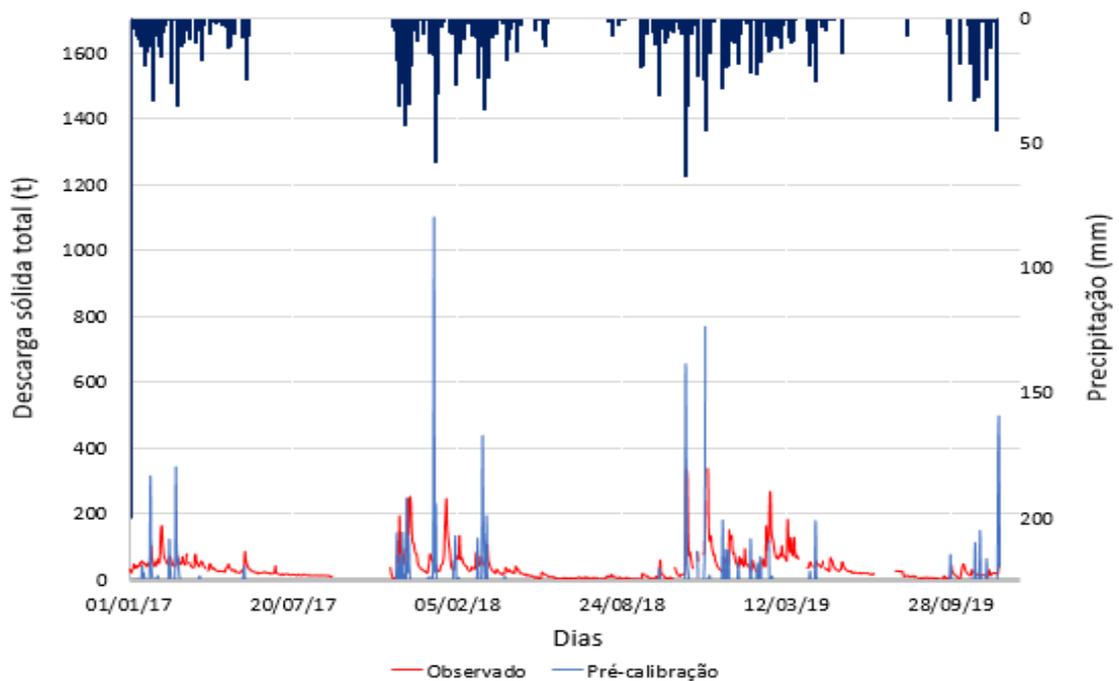
4.5.4 Processo para calibração e validação de sedimentos totais

Abbaspour (2011) recomenda que o processo de calibração e validação da produção de sedimentos seja feita após calibrada a vazão, uma vez que os processos de sedimentação estão altamente ligados ao escoamento superficial. Uma vez calibrada a vazão, espera-se que obtenha melhores resultados para os sedimentos.

Conforme relatou Carvalho (2014), são poucos os trabalhos na literatura que obtiveram bons resultados na produção de sedimentos puramente com a calibração da vazão. Seguiu-se, portanto, para o processo de calibração de sedimentos utilizando parâmetros encontrados na literatura envolvidos no ciclo hidrossedimentológico. Neste trabalho, nas simulações pré-calibração, constatou-se que o SWAT não conseguiu obter valores aceitáveis na produção de sedimentos, com um COE de -2,06.

A Figura 24 traz uma comparação entre os valores observados e os gerados, onde pode-se notar que os dias de maior produção de sedimentos foram os dias com maior volume de precipitação. Este fato se justifica devido o escoamento superficial ser considerado muitas vezes como uma grandeza diretamente proporcional à produção de sedimentos, contudo, ressalta-se a necessidade de estudos mais aprofundados como relação a esta afirmação, já que a resposta da BH para uma determinada precipitação pode oscilar muito, uma vez que depende de diversos fatores.

Figura 24 - Descarga sólida total (antes da calibração)



Fonte: Autor (2019)

Um fenômeno que foi relatado por Carvalho (2014) é que em alguns dias em que não houve precipitação, o SWAT considerou que a produção de sedimentos é nula. O mesmo aconteceu com este trabalho, o que não condiz completamente com a realidade, visto que também há produção de sedimentos dentro do canal e também pode haver produção proveniente do escoamento subsuperficial.

O Quadro 8 indica os parâmetros que foram utilizados, o método de alteração, a faixa de valores adotada e o melhor valor encontrado. Os limites superior e inferior foram extraídos do estudo de Carvalho (2014).

Quadro 8 - Parâmetros utilizados na calibração de sedimentos

Parâmetro	Forma de alteração	Limite inferior	Limite superior	Melhor valor encontrado
ADJ_PKR	Substituição	0,5	2	1,137
CH_COV1	Substituição	0	1	0,053
CH_COV2	Substituição	0	1	0,554
PRF_BSN	Substituição	0,1	2	0,696
SPCON	Substituição	0,0001	0,1	0,016
SPEXP	Substituição	1	1,5	1,108
USLE_P	Substituição	0	1	0,054
USLE_K	Substituição	0	100	0,577
LAT_SED	Substituição	0	20	13,913
SLSUBBSN	Substituição	10	150	126,801

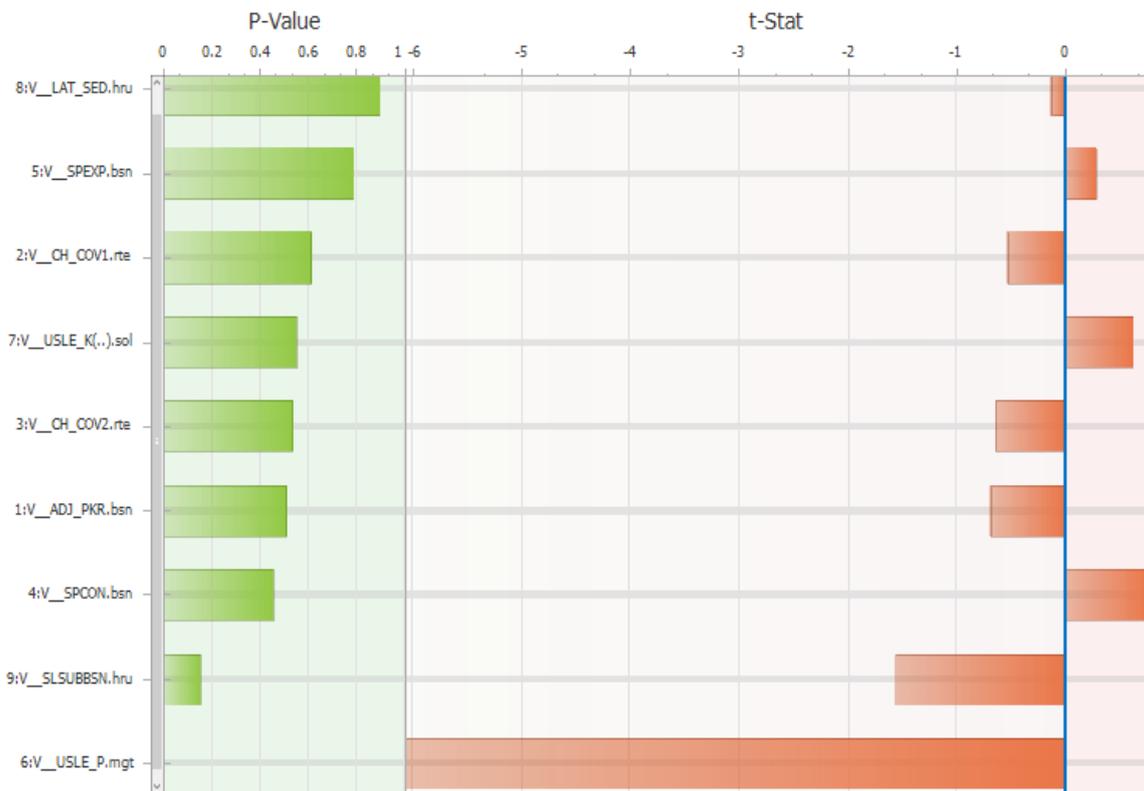
ADJ_PKR o fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos no canais tributários;
 CH_COV1 é o fator de erodibilidade do canal;
 CH_COV2 é o fator de cobertura do canal;
 PRF_BSN é o fator de ajuste da taxa de pico para transporte de sedimentos no canal principal;
 SPCON é o parâmetro linear para reentrada de sedimento durante o transporte no canal;
 SPEXP é o parâmetro exponencial para reentrada de sedimento durante o transporte no canal;
 USLE_P é o fator P da MUSLE;
 USLE_K é o fator K da MUSLE (fator de erodibilidade do solo);
 LAT_SED é a concentração de sedimento no escoamento subsuperficial;
 SLSUBBSN é o comprimento médio da encosta.

Fonte: Autor (2019)

Seguiu-se para a análise de sensibilidade de cada parâmetro, a fim de identificar quais parâmetros mais influenciavam o sistema. A Figura 25 mostra a sensibilidade observada de cada parâmetro, a qual revela que todos possuem algum grau de sensibilidade. Foram identificados os parâmetros USLE_P, SLSUBBSN, SPCON de maior sensibilidade.

Na calibração apresentada por Bonumá et al. (2010), o fator de práticas conservacionistas (USLE_P) foi o que apresentou maior sensibilidade. Já Carvalho (2014) obteve o comprimento médio da encosta (SLSUBBSN) como parâmetro de maior sensibilidade. Assim como apresentado nestes trabalhos, os parâmetros que apresentam maior sensibilidade estão diretamente relacionados com a equação MUSLE.

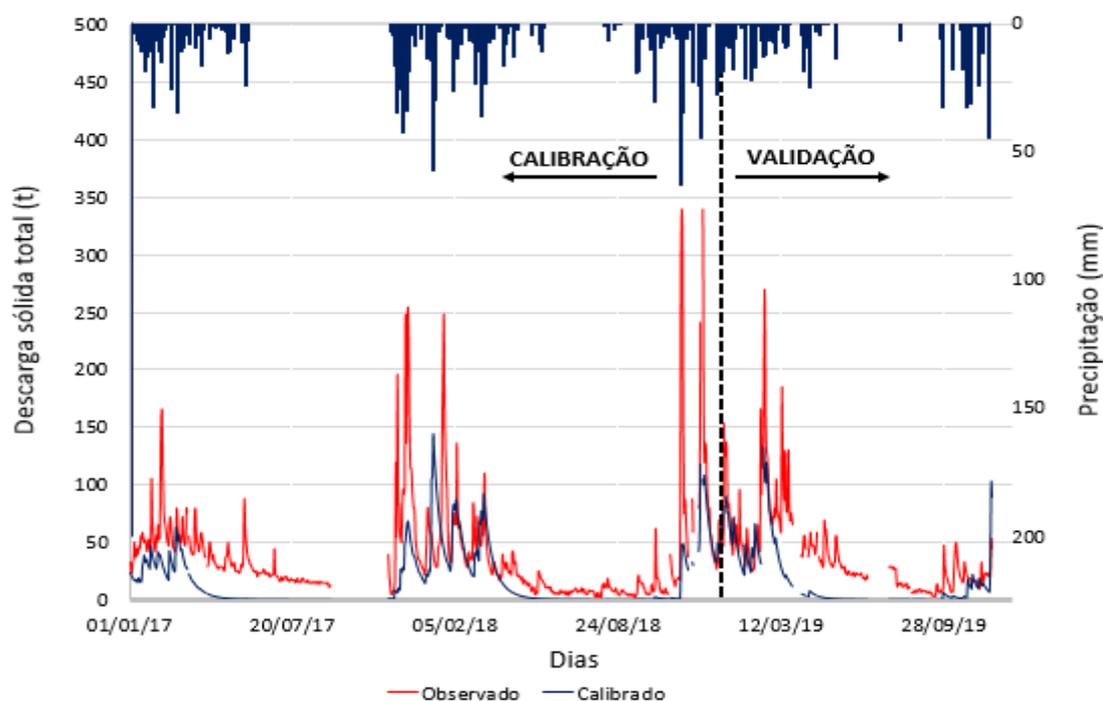
Figura 25 - Análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados à sedimentação



Fonte: SWAT-CUP (2019)

O processo de calibração de sedimentos utilizou-se do período de janeiro de 2017 a dezembro de 2018, enquanto que na validação utilizou-se o período de janeiro a novembro de 2019. Obteve-se como resultados na calibração um valor de COE, R² e PBIAS de, respectivamente, 0,14, 0,35 e 52,8; enquanto que na validação foram obtidos os valores 0,13, 0,48 e 55,6. A Figura 26 mostra a comparação entre os valores observados e os simulados.

Figura 26 - Produção de sedimentos na calibração e validação



Fonte: Autor (2019)

Moriasi *et al.* (2007) apresentaram uma classificação para a análise da modelagem de sedimentos pelo índice PBIAS e, segundo este critério, obteve-se uma classificação de “satisfatório” para a calibração ($\pm 30 \leq \text{PBIAS} \leq \pm 55$), enquanto que na validação o resultado foi tido como “insatisfatório” por ter obtido $\text{PBIAS} > \pm 55$. No entanto, é importante recordar que esta classificação é dada para período de tempo mensal e este trabalho foi desenvolvido com período diário e que, de maneira geral, melhores resultados são esperados para simulações com períodos mensais do que para diários.

Outra consideração deve ser feita, assim como para a calibração e validação da vazão, os dados observados de descarga de massa foram obtidos a partir de uma curva-chave de sedimentos. Na construção desta curva-chave se tinha poucos dados observados, o que diminui a confiabilidade da mesma. Além disso, a curva utilizada foi extrapolada no seu limite superior e inferior.

As maiores incertezas são dadas no seu limite superior, uma vez que o valor máximo mensurado de vazão era de 6,12 m³/s na construção desta curva, enquanto que havia dados medidos de vazão iguais a 11,72 m³/s, ou seja, um valor 91,5% maior do que o medido. Tomkins (2012) relatou que, se houver vazões maiores do que às mensuradas durante a construção da curva, geram incertezas que podem prejudicar a predição de bons resultados na produção de sedimentos.

O valor positivo do PBIAS obtido na calibração e validação de 52,8 e 55,6, respectivamente, revelam que a produção de sedimentos foi subestimada, o que se percebe facilmente em análise da Figura 26. Como já dito anteriormente, o motivo desta produção pode vir de dificuldades do modelo no cálculo da produção de sedimentos, como relatado por Bonumá *et al.* (2010), Strauch *et al.* (2013) e Carvalho (2014).

4.6 ANÁLISE DE CENÁRIO

A fim de se obter o impacto na produção de sedimentos devido ao uso e ocupação do solo e uma vez que a área destinada à agricultura se tem ampliada ao passar dos anos, conforme relatado por Sousa (2014), fez-se uma análise da substituição de toda a área ocupada por eucalipto para agricultura.

Ao longo deste trabalho foi constatado que a declividade e o tipo de solo na bacia são favoráveis à não erosão do solo. Ao se buscar analisar o impacto do uso e ocupação do solo, tornou-se importante considerar o fator C_{USLE} (relacionado à cobertura e manejo do solo). Tem-se que, dentro das classes presentes, a agricultura é a que possui maior magnitude (0,2), aproximadamente 67 vezes maior do que os de segunda maior categoria, que são o campo, a pastagem e o cerrado. Assim, para análise, considerou-se que as outras classes não sofreram mudanças.

Para esta análise considerou-se a sub-bacia que corresponde ao exutório da bacia hidrográfica, a qual teve sua vazão calibrada e validada. Torna-se importante destacar que na produção de sedimentos alcançou-se uma calibração aceitável, porém não atingiu valores aceitáveis na validação. A Tabela 11, em escala mensal, expressa os valores na produção de sedimentos, em toneladas, obtidos do cenário atual e do cenário simulado (substituição de eucalipto por agricultura).

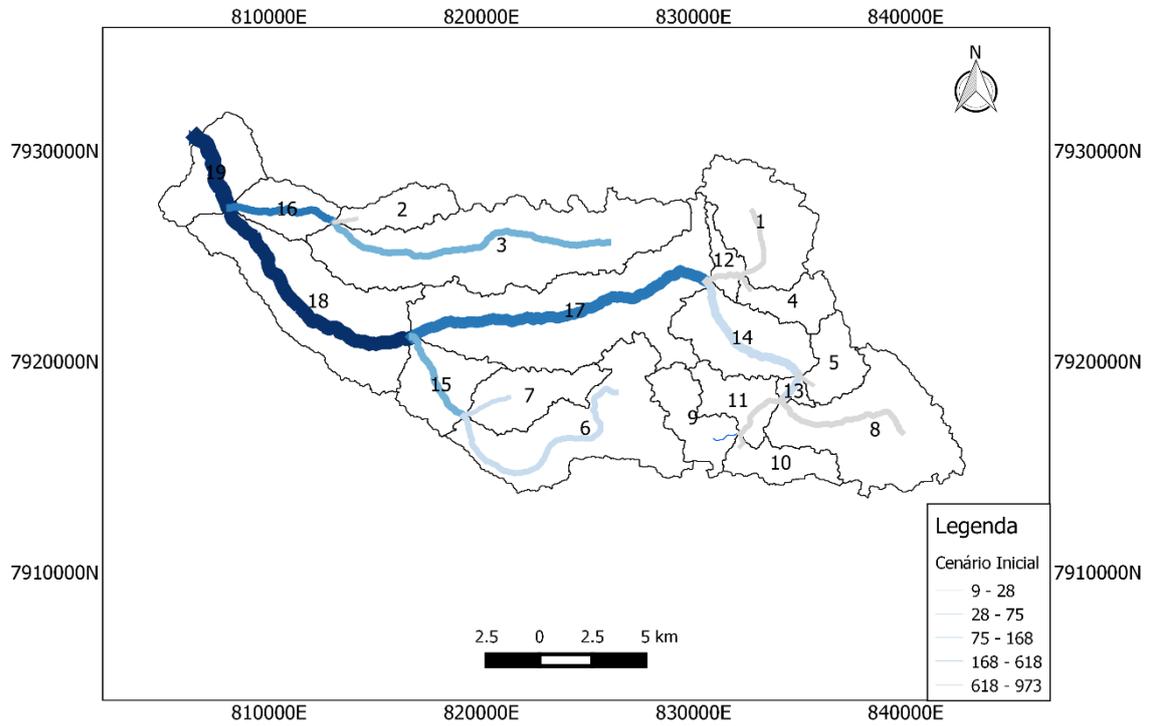
Tabela 11 - Média mensal da produção de sedimentos para cenários simulados

ANO	MÊS	Média Mensal Cenário Inicial	Média Mensal Cenário 1	Variação Porcentual
2017	1	46,884	60,068	28,120
	2	61,086	77,454	26,795
	3	49,052	57,900	18,039
	4	15,027	15,767	4,925
	5	13,058	13,516	3,508
	6	11,510	11,577	0,579
	7	9,464	9,474	0,106
	8	8,003	7,999	-0,052
	9	7,520	7,516	-0,053
	10	11,347	13,374	17,865
	11	23,274	36,833	58,262
	12	55,161	79,926	44,895
2018	1	20,190	26,706	32,274
	2	34,354	51,618	50,255
	3	20,094	27,490	36,812
	4	7,278	9,038	24,182
	5	5,537	6,043	9,135
	6	4,467	5,198	16,357
	7	3,664	4,579	24,958
	8	3,565	4,033	13,149
	9	4,347	4,831	11,142
	10	8,358	12,118	44,990
	11	51,446	89,544	74,055
	12	99,790	138,861	39,153

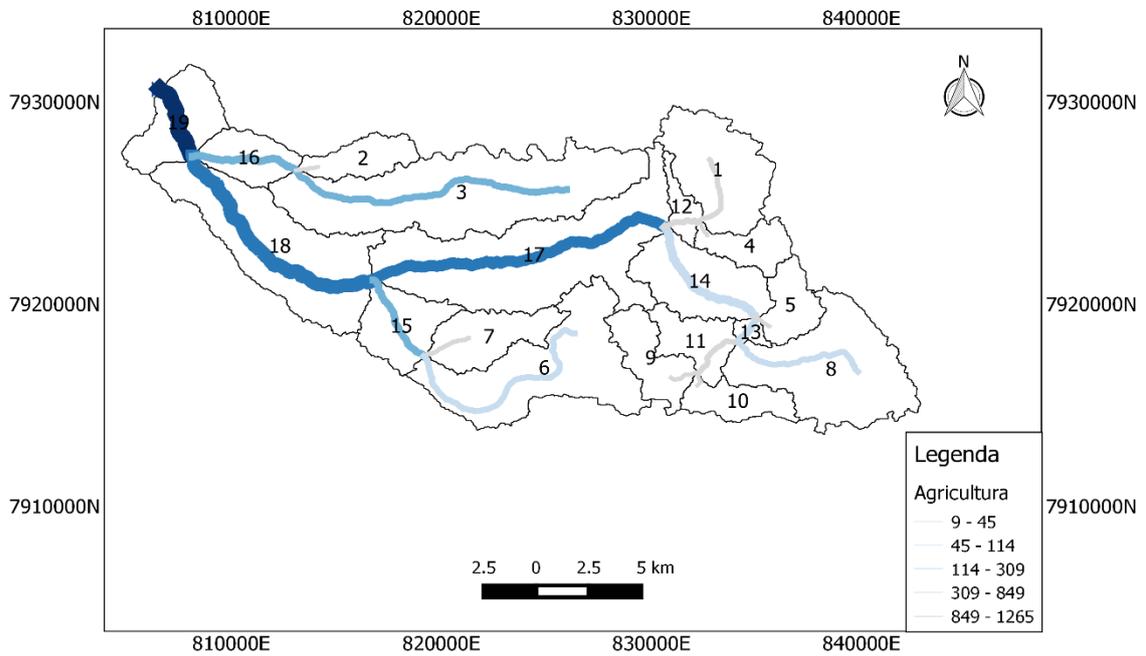
Fonte: Autor (2019)

Ao se analisar as informações apresentadas na Tabela 11, verifica-se que houve o aumento na produção de sedimentos ao fazer a alteração de eucalipto por agricultura. Tratando-se de uma média anual, obteve-se para o ano de 2017 e 2018, respectivamente, um aumento de 202,99% e 376,46%. A Figura 27 apresenta os mapas gerados no SWAT com dados médios mensais de sedimentos totais produzidos, na qual pode-se constatar que para ambos os cenários, o exutório da bacia é onde recebe maior quantidade de sedimentos totais.

Figura 27– (a) Sedimentos totais produzidos no cenário inicial (t/mês), em escala mensal;
 (b) Sedimentos totais produzidos para cenário simulado (t/mês), em escala mensal



(a)



(b)

Fonte: Autor (2019)

Ao analisar uma cobertura de eucalipto, Valente (2018) observou que o menor volume de escoamento superficial e geração de sedimentos ocorria para este cenário, onde se obteve menores picos de descarga e menos concentração de sedimentos em suspensão. Segundo a autora, isto pode ser associada à interceptação das chuvas pelo dossel (estrato superior da floresta), o que reduz a quantidade de água que chega ao exutório e a infiltração de água no solo, como favorecido por um sistema de enraizamento mais profundo.

Faz-se importante recordar que embora o reflorestamento por eucalipto seja capaz de reduzir a produção de sedimentos nesta bacia, uma alteração indiscriminada de agricultura para eucalipto pode acarretar outros problemas. Visto que essa cultura absorve muita água, este cenário majoritário de eucalipto pode provocar significativa redução da vazão do ribeirão Piçarrão, sobretudo em períodos de seca.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Este estudo tem como objetivo analisar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão sob a influência do uso e ocupação do solo. Após o desenvolvimento da metodologia, conclui-se como fundamental a análise detalhada dos dados pluviométricos para que se obtenha uma melhor cobertura espacial de chuva, retratando melhor a realidade.

A falta de dados para elaboração de uma curva-chave contemplando longos períodos de cheia e estiagem e, portanto, a necessidade de extrapolá-la gerou incertezas no processo de calibração e validação dos dados. No que tange a calibração e validação hidrológica foi possível obter resultados satisfatórios, enquanto que se obteve uma calibração satisfatória da produção de sedimentos, o que não ocorreu durante a validação.

O mapa de declividades e o tipo de solo da bacia hidrográfica do ribeirão Piçarrão indicam que esta bacia possui baixa suscetibilidade quanto a processos erosivos. Em relação ao uso e ocupação do solo, a presença de eucalipto diminui os picos de descarga no escoamento superficial. Portanto, conclui-se que, mediante escoamento superficial, as áreas ocupadas pela agricultura são as mais suscetíveis a erosão.

Uma das grandes dificuldades encontradas neste trabalho foi a obtenção de dados em pequenas bacias, sobretudo, com séries históricas de vazão e sedimentação maiores. A bacia em estudo possui dados observados de medição de nível de água iniciados em 2017, poucos dados de descarga sólida total para elaboração de uma curva-chave de sedimentos mais confiável e sem estação pluviométrica dentro da bacia.

Por fim, ressalta-se que apesar das dificuldades apresentadas, este estudo conseguiu superá-las, no qual isto fica evidenciado pelos resultados obtidos na calibração e validação hidrológica e sedimentológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP2009: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss **Federal Institute of Aquatic Science and Technology**, Duebendorf, Switzerland, 95 p. 2012.

ABBASPOUR, K.C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 524, p.733-752, mai. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>

ADIB, A; TAGAVIFAR, A. Evaluation and comparison different methods of preparation of sediment rating curve in Telezgan Station on the Dez river. **Australian Journal of Basic Applies Sciences**, [s.l.], v. 5, n. 4, p. 717-723, 2010.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model Use, Calibration, and Validation. American Society of Agricultural and Biological Engineers, **Transactions of the ASABE**, v. 55, n.4, p. 1491-1508, mai. 2012. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. 2000. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v. 227, n. 1-4. p. 21-40, jan. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00139-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00139-0)

ARNOLD, J. G.; SRINAVAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: model development. **Journal of the American Water Resources Association: American Water Resources Association**. Medford, p. 73-89. fev. 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>

ARNOLD, J. G.; YOUSSEF, M. A.; YEN, H.; WHITE, M. J.; SHESHUKOV, A. Y.; SADEGHI, A. M.; MORIASI, D. N.; STEINER, J. L.; AMATYA, D. M.; SKAGGS, R. W.; HANEY, E. B.; JEONG, J.; ARABI, M.; GOWDA, P. H. Hydrological processes and model representation: impact of soft data on calibration. **Transactions of the ASABE**, v.

58, n. 6, p. 1637–1660, 2016. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10726>

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; MAIDMENT, D. R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, n.I., v. 121, n. 2, p.171-183, fev. 1995. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:2\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171))

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 486, p.100-111, abr. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física e Meio Ambiente, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BASTOS, C. A. B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico: pesquisas e tendências. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.17-25, nov. 2000. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br>>. Acesso em: 08 mar. 2019.

BATHURST, J. C. Physically-based distributed modelling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique European. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 87, n. 1-2, p.79-102, out. 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90116-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90116-2)

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 2.ed. São Paulo, Ícone, 355p., 1999.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.24, p. 43-69, 1979. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

BLAINSKI, E.; ACOSTA, E.; NOGUEIRA, P.C.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**, [s.l.], v. 12, n. 2, p.226-237, 22 fev. 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1951>

BLAINSKI, E., GARBOSSA, L. H. P. 2009. **Estimativa do regime hidrológico em uma bacia hidrográfica com base na modelagem hidrológica dinâmica e distribuída**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – Mato Grosso do Sul. Brasil.

BONUMÁ, N. B., REICHERT, J. M., MINELLA, J. P., BARROS, C. A. P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D. C. 2010. **Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Brasília, Distrito Federal. Brasil.

BORAH, D. K.; BERA, M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. **American Society Of Agricultural Engineers**, [s.l.], v. 45, n. 6, p.1553-1566, mai. 2003. <https://doi.org/10.13031/2013.15644>

- BRASIL. Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração. Aneel. **Relatório de acompanhamento de estudos e projetos de usinas hidrelétricas**. 2019. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 24 nov. 2019.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas. **Portal Hidroweb**. 2005. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- BRESSIANI, D. D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MEDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.09-35, mai. 2015. Disponível em: <<https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/1765/pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- CACHAPUZ, P.B.B. (Comp.). **Usinas da Cemig: a história da eletricidade em Minas e no Brasil**. Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. 304 p. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/usinas/Documents/livro_usinas.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2019.
- CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do Cerrado intensamente monitorada**. 2013. 141 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, p. 27-39, 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p27-39>
- DALBIANCO, L. **Simulação hidrossedimentológica com o modelo LISEM em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2013. 92 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Teses/LEANDRO-DALBIANCO-TESE.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2019.
- DIXON, B.; EARLS, J. Effects of urbanization on streamflow using SWAT with real and simulated meteorological data. **Applied Geography**, [s.l.], v. 35, n. 1-2, p.174-190, nov. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.06.010>
- DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the swat model for hydrologic simulation in Paraopeba River basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p.481-488, dez. 2011. Trimestral. Disponível em: <<http://cerne.ufla.br/site/index.php/CERNE/article/view/71/62>>. Acesso em: 21 set. 2017. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000400006>

EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WHITE, E. D.; COLLICK, A. S.; ASHAGRE, B. B.; McCARTNEY, M.; AWULACHEW, S. B.; AHMED, A. A.; STEENHUIS, T. S. A multi basin SWAT model analysis of runoff and sedimentation in the Blue Nile, Ethiopia. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s.l.], v. 14, n. 10, p.1827-1841, 11 out. 2010. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1827-2010>

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, 1999. 412 pp. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>. Acesso em: 10 nov. 2018.

FERREIRA, R.S.; UAGODA, R.E.S. Análise da predição do balanço hídrico da bacia do ribeirão do Gama-DF através do modelo SWAT. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.880-893, fev. 2017.

FERRIGO, S. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática**: estudo de caso da bacia do lago Descoberto - DF. 2014. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/15629/1/2014_SaraFerrigo.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future reseach directions. **American society of agricultural and biological engineers**. v. 50, n. 6726, p.1211-1250, mai. 2007. Disponível em: <https://www.card.iastate.edu/research/resource-and-environmental/items/asabe_swat.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2019. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling and Software**, v. 23, n. 4. p.422-434. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.06.002>

GUIMARÃES, T.M.H.; SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; JUSTO, B.B.; RIQUIERI, J.C. Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica. **GEOCIÊNCIAS (SÃO PAULO, ONLINE)**, v. 38, p. 229-240, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estatísticas**: Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/araguari.html?>>. Acesso em: 10 mar. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Projeto TerraClass Cerrado**: Mapeamento do Uso e Cobertura Vegetal do Cerrado. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/index.php?mais=1>>. Acesso em: 08 jul. 2018.

KNISEL, W. G. **CREAMS**: a field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. N.I: USDA, 1980.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A.F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E.O. 2012. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36. 623-634.
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200031>

LATUF, M.O.; SILVA, J.B.L. Modelagem da Erosão Hídrica Utilizando o Modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) para Cálculo de Perdas de Solo e Água. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7. Belo Horizonte: Ugb, 2008. p. 1 - 10.
Disponível em: <<http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/7/0267.pdf>>. Acesso em: 24 nov. 2019.

LEPSCH, I.F.; BELLINAZZI JUNIOR, R.; BERTOLINI, D. SPÍNDOLA, C.R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema capacidade de uso**. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 1991. 184 p.

LIMA, J. E. F. W., SILVA, E. M., STRAUCH, M., LORZ, C. (2013). Desenvolvimento de Base de Dados de Solos para a Aplicação do Modelo SWAT em Bacia do Bioma Cerrado. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves – RS.

LIMA, J. E. F. W.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; KOIDE, S. Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 7, n. 6, p.1187-1195, nov. 2014.

LLOYD, C. D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain. **Journal of Hydrology**, v. 308, n. 1-4, p. 128-150, jul. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.026>

LOPES, N. H. Y., KOBAYAMA, M. 2008. **Análise do equilíbrio hidrossedimentológico em uma microbacia experimental com o modelo SWAT e as características geomorfológicas**. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Latino-Americano de Geomorfologia. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044-1055, set. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.010>

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

MARTINS, C.S. **Influência do tipo de uso e ocupação do solo no assoreamento do reservatório Bom Jardim, Uberlândia-MG**. 2018. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

MALAGÓ, A.; BOURAOU, F.; VIGIAK, O.; GRIZZETTI, B.; PASTORI, M. Modelling water and nutrient fluxes in the Danube River Basin with SWAT. **Science of the Total Environment**, [s.l.], v. 603-604, p.196-218, dez. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.242>

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T.(Org.). **Introdução ao processamento de imagens de**

sensoriamento remoto. Brasília: Unb, 2012. 276 p.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Ciclo hidrológico.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico.html>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. V. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, [s.l.], v. 50, n. 3, p.885-900, mar. 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

MULETA, M. K.; NICKLOW, J.W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal Of Hydrology**, [s.l.], v. 306, n. 1-4, p.127-145, mai. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.09.005>

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil & Water Assessment Tool (SWAT).** Texas: Instituto de Recursos Hídricos do Texas, 2011. 634 p. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/99193/swat2009-theory-portuguese.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

NUNES, G. **Aplicação do modelo SWAT no estudo hidrológico e de qualidade da água da bacia do lago Paranoá - DF.** 2016. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

OLIVEIRA, M. Q. C.; MEDEIROS, Y. D. P. **Aplicação do modelo SWAT na avaliação de impactos decorrentes da modificação no uso do solo em bacias hidrográficas.** In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 1999.

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, [s.l.], v. 133, p.20-31, ago. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>

PAULA, L. M. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG).** 2011. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

PEIXOTO, R.A.O. **Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jordão - UPGRH-PN1.** 2019. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019

PEREIRA, D. R. **Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT.** 2013. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013. Disponível em: <<http://www.locus.ufv.br/>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

- PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83p.
- PHILLIPS, J.M.; WEBB, B.W.; WALLING, D.E.; LEEKS, G.J.L. Estimating the suspended sediment loads of rivers in the LOIS study area using infrequent samples. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 13, p. 1035-1050.1999.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199905\)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199905)13:7<1035::AID-HYP788>3.0.CO;2-K)
- PIEST, R.F. **Long term sediment yields from small wathersheds**. 19--?. Disponível em: <<http://hydrologie.org/redbooks/a065/065010.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 278 p.
- PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas: Teorias e aplicações**. Ilhéus: Editus, 2002. p. 17-36.
- PORTO, R.L.L.; ZAHED FILHO, K.; SILVA, R.M. **Medição de vazão e curva-chave**. 2001. Disponível em: <www.pha.poli.usp.br>. Acesso em: 06 dez. 2019.
- REBOITA, M.S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L.F.; ALVES, M.A. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l.], v. 17, n. 11, p.206-226, jul./dez. 2015. Semestral. <https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Capítulo 2: Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. 2019. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2019.
- RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 819 p.
- RODRIGUES, J.A.M; MELLO, C.R; VIOLA, M.R; RODRIGUES, M.C. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Cervo - MG. **Geociências**, São Paulo, v. 36, n. 3, p.531-542, 2017.
<https://doi.org/10.5016/geociencias.v36i3.11695>
- ROMAGNOLI, M.; PORTAPILA, M.; RIGALLI, A.; MAYDANA, G.; BURGUÉS, M.; GARCÍA, C. M. Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 596-597, p.437-450, out. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.041>
- SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. Estudo da autodepuração do rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 105-114, 2013.

<https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200002>

SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do rio Pípiripau**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Faculdade de Tecnologia, Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/10774/1/2012_LeandroDeAlmeidaSalles.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2019.

SANTOS, A.C. **Aporte de nutrientes na sub-bacia do ribeirão Bom Jardim (Triângulo Mineiro) e proposição de diretrizes para programas de pagamento por serviços ambientais**. 2018. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SANTOS, I.; FILL, H.D; SUGAI, M.R.V.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológico: Conceitos e aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 2, n. 3, p.01-19, set. 2009.

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**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SELFIONE, A.L. **Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave**. 2002. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SILVA, M.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; LEITE, F.P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p.765-776, out./dez. 2011.
<https://doi.org/10.5902/198050984520>

SHEN, H. W.; JULIEN, P. Y. Erosion and sediment transport. In: MAIDMENT, D. R. (Org.). **Handbook of Hydrology**. [s.l.]: Mcgraw-hill, 1992. Cap. 12, p. 12.45.

SOUSA, C. M. **Evolução do uso das terras no alto curso do rio Jordão no município de Araguari (MG)**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2014.

STRAUCH, M.; LIMA, J. E. F. W.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. **Journal of Environmental Management**, v.127, p. 24-36, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.014>

SWAT. **Software**: Weather tools. 2019. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/software/>>. Acesso em: 10 out. 2018.

TAVEIRA, B. D. A. **Processos hidrossedimentológicos em cenários climáticos na bacia hidrográfica do rio Nhundiaquara, Serra do Mar Paranaense**. 2016. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

TOMKINS, K. M. Uncertainty in streamflow rating curves: methods, controls and consequences. **Hydrological Processes**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.464-481, 16 nov. 2012.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013. 943 p.

UBERTI, A. A. A.; BACIC, I. L. Z.; PANICHI, J. A. V.; LAUS NETO, J. A.; MOSER, J. M.; PUNDEK, M.; CARRIÃO, S. L. (1991) Metodologia para classificação da aptidão de uso das terras do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: Empasc: Emater (SC), 19 p.

USGS. **The water cycle**. 2017. Disponível em: <<https://water.usgs.gov/edu/watercycle.html>>. Acesso em: 14 mar. 2019.

VALENTE, M L. **Quantifying sediment fluxes and sources in eucalyptus and grassland catchments in the Brazilian Pampa biome**. 2018. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

WILLIAMS, J.R. 1975. **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. p. 244-252. *In* Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: proceedings of the sediment yield workshop, USDA Sedimentation Lab., Oxford.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. A Modeling Approach to Determining the Relationship Between Erosion and Soil Productivity. **Transactions of the Asabe**, [s.l.], v. 27, n. 1, p.0129-0144, 1984. <https://doi.org/10.13031/2013.32748>