

ANNA PAULA SARTORI

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA MODELAGEM DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL E PERDA DE SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO CANDIDÓPOLIS
EM ITABIRA-MG**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2019

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

T

S251a
2019

Sartori, Anna Paula, 1990-

Aplicação do modelo SWAT na modelagem do escoamento superficial e perda de solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis em Itabira-MG / Anna Paula Sartori. – Viçosa, MG, 2019.
xv, 92 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Ana Augusta Passos Rezende.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 76-83.

1. Solo - Uso - Ribeirão Candidópolis, Bacia do (MG) .
2. Solos - Manejo. 3. Modelo SWAT. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.15178151

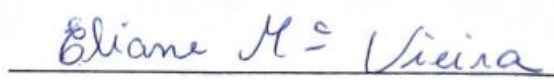
ANNA PAULA SARTORI

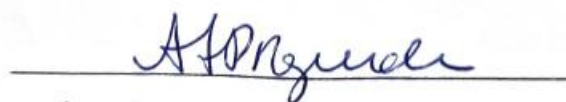
APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA MODELAGEM DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL E PERDA DE SOLO NA BACIA DO RIBEIRÃO CANDIDÓPOLIS EM
ITABIRA-MG

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

APROVADA: 25 de fevereiro de 2019.


Roberto César de Almeida Monte-Mor


Eliane Maria Vieira
(Coorientadora)


Ana Augusta Passos Rezende
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir vivenciar experiências que contribuíram muito para meu desenvolvimento acadêmico e pessoal e, principalmente, por me conduzir e fortalecer, tornando a conclusão dessa pesquisa possível.

Ao meu marido, Gegê, por todo carinho, apoio, incentivo, compreensão e paciência ao longo destes três anos de empreitada. Obrigada por estar ao meu lado durante os momentos difíceis, por entender tudo que vivenciei e me ajudar, principalmente, na reta final da pesquisa.

Aos meus pais, Pedro e Niria, pela preocupação, pelo incentivo mesmo estando longe e pelas orações a mim dedicadas. À minha irmã, Aline, que se mudou para Itabira para me ajudar no que fosse preciso e à Mila que alegrou meus dias. Obrigada por toda a ajuda, companheirismo e apoio. Ao meu irmão, Maico, pelo apoio e amizade.

À Andreiva, pela amizade, companheirismo, paciência, apoio, incentivo e pela imensa ajuda ao longo de todo o mestrado.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes pela bolsa oferecida.

À Universidade Federal de Itajubá – *Campus Itabira* pela oportunidade de utilizar os laboratórios e equipamentos do curso de Engenharia Ambiental, facilitando o desenvolvimento da pesquisa.

À Prof^a. Ana Augusta, pela orientação nesta pesquisa, pela confiança, paciência e ensinamentos.

À Prof^a. Eliane, por ter aceitado me coorientar em Itabira, por todas as horas a mim dedicada, pelos ensinamentos, ajuda, compreensão e paciência.

À Normanda, pela ajuda e disponibilização dos dados necessários para iniciar a pesquisa.

Ao SAAE de Itabira, pela disponibilização dos dados e permissão para a realização da pesquisa na ETA Pureza.

Ao Prof. Anderson pelos ensinamentos e ajuda nas análises de qualidade da água.

Ao Prof. Roberto pela solicitude e ajuda no longo processo de batimetria do reservatório.

Ao Fábio, Jesué, Nilo e Guedes por me ajudarem sempre que solicitados.

Ao Josiano e a Gisele pela ajuda nas coletas e análises da água e no levantamento batimétrico.

Á Ana Carolina, pela amizade, apoio, incentivo e orações.

Á Letícia e à Débora pela amizade, incentivo e disponibilidade em ajudar sempre.

Aos alunos e amigos do CFI, pelo incentivo e por compreenderem a minha ausência em diversos momentos.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma com a realização desta pesquisa e torceram para que tudo desse certo.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1 Hidrossedimentação em bacias hidrográficas	4
3.2 Assoreamento de reservatórios	4
3.3 Levantamento batimétrico.....	5
3.4 Modelos hidrológicos	6
3.5 Modelagem em bacias não monitoradas	7
3.6 Modelo SWAT.....	8
3.7 Aplicação do modelo SWAT	9
3.8 Aplicação do SWAT no cenário brasileiro.....	10
3.9 Processo de funcionamento do Modelo SWAT	11
3.9.1 Modelo numérico de terreno (MNT)	12
3.9.2 Mapa de uso e ocupação do solo.....	13
3.9.3 Mapa de solos.....	13
3.9.4 Dados climatológicos	14
3.9.5 Grupos hidrológicos	15
3.10 Área de estudo	16
3.10.1 Clima	18
3.10.2 Declividade.....	18
3.10.3 Solos	18
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Caracterização morfológica da bacia.....	21
4.2 Aplicação do Modelo SWAT	22

4.2.1 Manipulação e integração dos planos de informação	22
4.2.2 Definição dos planos de informação e inserção no Modelo	22
4.2.3 Elaboração e inserção do mapa de uso e ocupação do solo no Modelo SWAT	23
4.2.4 Elaboração e inserção do mapa de solos no Modelo SWAT	25
4.2.5 Obtenção e inserção modelo digital de elevação (MDE) no SWAT	26
4.2.6 Definição das unidades de resposta hidrológicas (HRU)	26
4.2.7 Obtenção e inserção dos dados climatológicos no Modelo SWAT	26
4.2.8 Avaliação do desempenho da aplicabilidade do SWAT	28
4.2.9 Calibração do Modelo SWAT	28
4.2.10 Obtenção dos dados observados para calibração do Modelo SWAT	29
4.3 Levantamento batimétrico.....	30
4.4 Análise da qualidade da água.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 Análise morfológica da bacia	37
5.2 Resultados da simulação no SWAT.....	38
5.2.1 Inserção dos PI no Modelo SWAT	38
5.2.2 Calibração do Modelo no SWAT-CUP	45
5.2.3 Simulação da vazão e aporte de sedimentos.....	51
5.3 Batimetria.....	62
5.4 Análise da qualidade da água.....	66
6 CONCLUSÃO.....	72
7 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	75
REFERÊNCIAS.....	76
ANEXO – TABELAS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSES DE SOLO	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	<i>Acoustic Doppler Profiler</i>
AGRC	<i>Agricultural land-close-grown</i>
ANION_EXCL	Porosidade do solo
APHA	<i>American Public Health Association</i>
APP	Área de Preservação Permanente
CE	Condutividade Elétrica
CLAY	Porcentagem de argila no solo
COE	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Copam	Conselho Estadual de Política Ambiental
CXbd	Cambissolo Háplico distrófico
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DEWPT	Média diária da umidade relativa no mês
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
EUA	Estados Unidos da América
FRSE	<i>Forest-evergreen</i>
Funarbe	Fundação Arthur Bernardes
GLUE	<i>Generalized likelihood uncertainty estimation</i>
GXbd	Gleissolo Háplico distrófico
HRU	<i>Hydrologic Response Units</i>
HYDGRP	Grupo hidrológico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LVAd	Latossolo Vermelho Amarelo distrófico
LVd	Latossolo Vermelho distrófico
MCMC	<i>Markov Chain Monte Carlo</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais

MNT	Modelo Numérico do terreno
ND	Não Detectado
NLAYERS	Número de horizontes do solo
NO	Não Observado
NODATA	Ausência de dados
OD	Oxigênio Dissolvido
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
ParaSol	<i>Parameter Solution</i>
PAST	<i>Pasture</i>
PCPD	Média do número de dias de precipitação no mês
PCPMM	Média mensal da precipitação total
PCPSKW	Coeficiente de inclinação para a precipitação diária no mês
PCPSTD	Desvio padrão para a precipitação diária de cada mês
PI	Planos de Informação
PR_W1	Probabilidade de um dia de chuva seguido de um dia seco no mês
PR_W2	Probabilidade de um dia de chuva seguido de um dia de chuva no mês
RAINHHMX	Valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registro para cada mês
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo
RYbe	Neossolo flúvico eutrófico
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SAND	Porcentagem de areia no solo
SCS	Serviço de Conservação do Solo
SIG	Sistema de informações geográficas
SILT	Porcentagem de silte no solo
SOL_ALB	Albedo do solo
SOL_AWC	Capacidade de água no solo
SOL_BD	Densidade do solo
SOL_CBN	Carbono orgânico do solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte

SOL_ZMX	Profundidade máxima de solo que a raiz alcança
SOLARV	Média da radiação solar diária no mês
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SUFI2	<i>Sequential uncertainty fitting</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
TMPMN	Média mensal da temperatura mínima diária
TMPMX	Temperatura máxima diária
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima diária de cada mês
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima diária de cada mês
URLD	<i>Residential-low density</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USLE_K	Fator de erodibilidade do solo
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
WATR	<i>Water</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>
WNAV	Média diária da velocidade do vento no mês

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de drenagem
C	Comprimento do canal principal
C_t	Comprimento do talvegue
D	Densidade de drenagem
E_{obs}	Evento observado
E_{sim}	Evento simulado pelo modelo
$\bar{E}$	Média dos eventos observados no período de simulação
ha	Hectares
I_c	Índice de circularidade
I_s	Índice de sinuosidade
km	Quilômetros
km^2	Quilômetros quadrados
L	Comprimento total dos cursos d'água da bacia
m	Metros
m^2	Metros quadrados
m/m^2	Metros por metro quadrado
mg/L	Miligramas por litro
ml	Mililitros
mm	Milímetros
m/s	Metros por segundo
m^3/s	Metros cúbicos por segundo
MJ/m^2	Megajoules por metro quadrado
$\mu S/cm$	Microsiemens por centímetro
n	Número de eventos
nm	Nanômetro
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
P	Perímetro
PtCo	<i>Platinum Cobalt</i>
t	Toneladas
®	Marca registrada
°C	Graus Celsius

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de funcionamento do modelo SWAT.	12
Figura 2 - Localização geográfica da bacia do Ribeirão Candidópolis.	16
Figura 3 - Vista parcial do reservatório da barragem de controle de nível da ETA Pureza.	17
Figura 4 - Etapa de delimitação da bacia hidrográfica no Modelo SWAT.	23
Figura 5 - Mapa do uso do solo na bacia do Ribeirão Candidópolis.	24
Figura 6 - Mapa das classes de solo da bacia do Ribeirão Candidópolis.	25
Figura 7 - Transectos das duas batimetrias realizadas no reservatório da barragem da ETA Pureza e identificação da tomada de água provisória, definida pelo círculo vermelho.	31
Figura 8 - Reservatório da barragem da ETA Pureza.	32
Figura 9 - Vertedouro da barragem da ETA Pureza.	33
Figura 10 - Realização da batimetria na barragem com o ADP.	33
Figura 11 - Reservatório da barragem da ETA Pureza no período seco, em agosto de 2017, com nível de água extremamente baixo.	34
Figura 12 - Tomada de água provisória da ETA Pureza.	34
Figura 13 - Localização dos pontos de coleta das amostras de água.	35
Figura 14 - Classes de declividade na bacia do Ribeirão Candidópolis.	41
Figura 15 - Etapa de definição das HRU no Modelo SWAT.	42
Figura 16 - Etapa de inserção dos dados climatológicos.	43
Figura 17 - Etapa de aquecimento e simulação do SWAT.	45
Figura 18 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada antes da calibração do Modelo.	46
Figura 19 - Janela de alteração dos valores iniciais dos parâmetros referentes ao aquífero raso.	47
Figura 20 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada após a calibração do Modelo SWAT.	49
Figura 21 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada depois da calibração do Modelo SWAT.	50
Figura 22 - Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2017.	51
Figura 23 - Mapa de uso e ocupação do solo com a presença de APPs.	54
Figura 24 - Gráfico da vazão simulada para os quatro cenários.	60

Figura 25 - Gráfico da concentração de sedimentos simulada para os quatro cenários.	61
Figura 26 - Gráfico da carga de sedimentos simulada para os quatro cenários.	62
Figura 27 - A: Interpolação da batimetria 1, utilizando o interpolador TIN. B: Interpolação da batimetria 1, utilizando o interpolador Vizinho Natural. C: Interpolação da batimetria 2, utilizando o interpolador TIN. D: Interpolação da batimetria 2, utilizando o interpolador Vizinho Natural.	63
Figura 28 - E: Diferença das interpolações utilizando os interpoladores TIN e Vizinho Natural para a batimetria 1. F: Diferença das interpolações utilizando os interpoladores TIN e Vizinho Natural para a batimetria 2.	64
Figura 29 - Lâmina de sedimentos resultante da diferença das batimetrias 1 e 2 dentro da represa empregando-se o modelo TIN e entre os transectos.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do solo para a inserção de uma nova classe no Modelo SWAT.	14
Tabela 2 - Parâmetros morfométricos analisados.	21
Tabela 3 - Dados da estação meteorológica de Belo Horizonte.	27
Tabela 4 - Parâmetros morfométricos calculados para a Bacia do Ribeirão Candidópolis.	37
Tabela 5 - Classificação no SWAT e abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis.	39
Tabela 6 - Abrangência das classes de solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis.	39
Tabela 7 - Abrangência das classes de declividade na Bacia do Ribeirão Candidópolis.	40
Tabela 8 - Parâmetros estatísticos calculados para a estação meteorológica.	44
Tabela 9 - Valores iniciais e após ajuste dos parâmetros mais sensíveis na calibração.	48
Tabela 10 - Novos valores para os parâmetros referentes ao escoamento de base.	49
Tabela 11 - Análise estatística da eficiência do Modelo.	50
Tabela 12 - Abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis após a atualização do mapa.	52
Tabela 13 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos médias para o cenário 1.	53
Tabela 14 - Abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis após a inserção de vegetação nas áreas de APP.	55
Tabela 15 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 2.	56
Tabela 16 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 3.	57
Tabela 17 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 4.	58
Tabela 18 - Variação da concentração de sedimentos para os quatro cenários.	59
Tabela 19 - Variação da carga de sedimentos para os quatro cenários.	60
Tabela 20 - Altura da lâmina depositada em cada ponto analisado.	66
Tabela 21 - Resultados das análises das amostras de água.	68

RESUMO

SARTORI, Anna Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Aplicação do Modelo SWAT na modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão Candidópolis em Itabira-MG.** Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende. Coorientadora: Eliane Maria Vieira.

As mudanças no uso e ocupação no solo de bacias hidrográficas, decorrentes de ações antrópicas comprometem a qualidade e quantidade hídrica dos cursos d'água, podendo propiciar o aumento do escoamento superficial, a ocorrência de processos erosivos e o carreamento de partículas sólidas desagregadas para os canais fluviais, causando o assoreamento desses e de reservatórios à jusante. O presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) na modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão Candidópolis, que contribuem para o assoreamento do reservatório da barragem da Estação de Tratamento de Água (ETA) Pureza, em Itabira, MG. Foi realizada a simulação do Modelo SWAT para quatro diferentes cenários: o primeiro, mantendo o uso e ocupação do solo atual; o segundo, adicionando as Áreas de Preservação Permanente (APP) nas margens dos cursos d'água, nascentes e lagos; o terceiro, alterando as áreas de pastagem do uso e ocupação do solo atual para agroflorestal, e o quarto, alterando as áreas de pastagem do uso e ocupação com APP para agrofloresta. O cenário 4 apresentou o melhor desempenho com a maior redução do escoamento superficial e da perda do solo, de maneira que ocorra a diminuição do transporte e acúmulo de sedimentos na barragem da ETA Pureza. Foi realizada a batimetria no Reservatório em dois períodos por meio de transectos empregando o *Acoustic Doppler Profiler* (ADP) e interpolando os dados levantados, para a constatação do assoreamento. A interpolação dos dados obtidos na batimetria não apresentou resultados satisfatórios na estimativa do assoreamento do Reservatório. A avaliação pontual da batimetria, por outro lado, possibilitou a constatação em campo da ocorrência do aporte de sedimentos ao longo da Bacia. As análises de amostras de água apontaram valores maiores para os parâmetros DBO e condutividade elétrica, no período seco e para cor, turbidez, coliformes totais, sólidos totais e sólidos no período chuvoso, sendo indicadores do carreamento de sedimentos. Constatou-se que a Bacia possui um formato alongado, baixa capacidade

de drenagem e canal principal mais retilíneo, a partir da análise morfométrica, favorecendo o escoamento superficial e carreamento de sedimentos.

ABSTRACT

SARTORI, Anna Paula, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Application of the SWAT model in the modeling of runoff and soil loss in the Candidópolis river basin in Itabira-MG.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende. Co-adviser: Eliane Maria Vieira.

Changes in the use and occupation in hidrografic basins, resulting from anthropogenic actions, compromise the water quality and quantity of the watercourses, which may lead to an increase in surface runoff, the occurrence of erosive processes and the carrying of disaggregated solid particles for the river channels. These solid particles can be deposited in the bed of the watercourses causing silting up of these and of downstream reservoirs. The objective of this study was to evaluate the applicability of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model to the surface runoff modeling and soil loss in the Candidópolis river basin, which contributes to the sedimentation of the dam reservoir of the Water Treatment Plant (WTP) of Pureza, in Itabira, MG. The SWAT Model simulation was performed for four different scenarios: the first scenario, maintains the current use and occupation of the soil; the second, adding the Permanent Preservation Areas (PPA) along the rivers, springs and lakes; the third, altering the pasture areas of the current use and occupation of the soil for agroforestry, and the fourth, altering the pasture areas of the use and occupation with PPA for agroforestry. Scenario 4 presented the best performance with the greatest reduction of runoff and soil loss, so that transport and sediment accumulation can be reduced in the WTP Pureza reservoir. The bathymetry in the reservoir was carried out in two periods by means of transects using the Acoustic Doppler Profiler (ADP) and interpolating the collected data, to verify the silting. The interpolation of the data obtained in the bathymetry did not present satisfactory results in the estimation of the sedimentation of the reservoir. The punctual evaluation of bathymetry, on the other hand, made it possible to verify in the field the occurrence of sediment inputs along the basin. The analysis of water samples showed higher values for BOD and electrical conductivity in the dry period and for color, turbidity, total coliforms, total solids and solids in the rainy season, being indicators of sediment loading. It was observed that the basin has an elongated shape, low drainage capacity and main channel rectilinear, from the morphometric analysis, favoring the surface runoff and sediment loading.

1 INTRODUÇÃO

As alterações no uso e ocupação do solo decorrentes de ações antrópicas provocam impactos, principalmente em bacias hidrográficas, comprometendo a qualidade e quantidade hídrica dos cursos d'água. Essas alterações podem aumentar o escoamento superficial das águas pluviais, que por sua vez favorece a ocorrência de processos erosivos, promovendo o carreamento de partículas sólidas desagregadas para os canais fluviais. As partículas mais leves são transportadas ao longo do canal e as mais pesadas se depositam no leito do curso d'água, causando assoreamento dos cursos d'água e de reservatórios.

O assoreamento de reservatórios ocorre devido à redução das velocidades de corrente e a consequente deposição das partículas sólidas. Esse processo pode causar inúmeros prejuízos, principalmente quando se trata de reservatórios para a captação de água para abastecimento público, visto que compromete a qualidade da água e a limpeza destes, tornando o tratamento oneroso e, muitas vezes, interrompendo o fornecimento de água para a população.

No município de Itabira, Minas Gerais, observa-se que o reservatório da Estação de Tratamento de Água (ETA - Pureza), responsável pelo abastecimento de aproximadamente 55% da população, vem sofrendo nos últimos anos um intenso processo de assoreamento. Além da redução da capacidade de armazenamento, o assoreamento causa entupimento das tubulações de captação da água para tratamento, reduzindo a vazão a ser captada e prejudicando o abastecimento do município.

Diante deste cenário, torna-se importante identificar os principais fatores de maior interferência e as áreas de contribuição para o processo de assoreamento do reservatório destinado ao abastecimento de água, a fim de propor ações que minimizem os impactos causados pelo mau uso e ocupação do solo, reduzindo o carreamento de partículas sólidas para os cursos d'água.

Os modelos hidrológicos simulam processos naturais de fluxo de água, sedimentos e nutrientes na bacia hidrográfica, bem como simulam e quantificam os impactos das atividades antrópicas, possibilitando estimar os impactos do uso do solo na qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas. Além disso, esses modelos permitem a visualização de diferentes cenários de uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica a um baixo custo e de forma rápida.

Nesse sentido, a utilização de modelos hidrológicos pode contribuir para o planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas, auxiliando nos processos de tomada de decisão referentes ao manejo do solo visando a promoção e manutenção dos recursos hídricos.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) consiste em um modelo hidrológico amplamente utilizado para prever o impacto das práticas de manejo de solo na geração de sedimentos em bacias hidrográficas que apresentem grande variedade de solos, de usos e ocupações do solo e de técnicas de manejo através de longos períodos de tempo.

Nesse contexto, entende-se que o modelo SWAT pode ser empregado na simulação de cenários alternativos de uso e ocupação do solo que possibilitem avaliar a influência desses impactos na produção de sedimentos responsáveis pelo assoreamento do reservatório da ETA Pureza, auxiliando na determinação de intervenções que poderiam minimizar o problema existente no local.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade do modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) na estimativa da produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Candidópolis, que causam o assoreamento do reservatório da barragem de controle de nível da Estação de Tratamento de Água Pureza, em Itabira, MG.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar a produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Candidópolis, a partir da simulação de cenários que propiciem a compreensão dos efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo;
- Verificar, estatisticamente, o desempenho do Modelo SWAT na simulação de dados hidrológicos e sedimentológicos;
- Identificar intervenções para minimizar a produção de sedimentos na bacia e assoreamento do reservatório da barragem de controle de nível.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Hidrossedimentação em bacias hidrográficas

Os fenômenos hidrossedimentológicos envolvem a produção de sedimentos e o seu transporte para o curso d'água. A produção de sedimentos resulta de uma série de processos erosivos e de deposição, bem como do carreamento das partículas sólidas pelo escoamento superficial (USEIKA, 2009).

Os problemas resultantes dos fenômenos hidrossedimentológicos aumentam em função do desenvolvimento e ocupação do espaço em que a bacia hidrográfica está inserida (SILVA *et al.*, 2004).

Os sedimentos que chegam ao canal fluvial possuem diversas granulometrias e seu processo de transporte varia de acordo com as condições locais e do escoamento. O tamanho, peso e forma das partículas sólidas influenciam nesse processo, podendo ser mantidas em suspensão ou depositadas no leito do curso d'água. A deposição de sedimentos ao longo do canal sofre influência do gradiente de velocidade do fluxo de água, que é geralmente mais lento nas porções próximas ao leito e mais rápido no centro do canal, variando conforme a geometria do curso d'água (SILVA *et al.*, 2004).

A maior quantidade de partículas sólidas carregadas durante o ano ocorre no período chuvoso. De acordo com Carvalho (1994), em torno de 70 a 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água ocorre nesse período, principalmente durante precipitações mais intensas. Silva *et al.* (2004) destacam que a maior parte dessas considerações é válida principalmente para bacias pouco degradadas, visto que a superexploração do solo e dos recursos hídricos podem distorcer os regimes fluviais e hidrossedimentológicos quando relacionados ao regime natural da bacia.

3.2 Assoreamento de reservatórios

A construção de barragem e formação de reservatório modificam as condições naturais de um curso d'água, atuando como um meio artificial de retenção de sedimentos. A deposição contínua das partículas sólidas, em função das baixas velocidades de corrente no reservatório, causa o assoreamento e, conseqüentemente, prejuízos de cunho físico e ambiental (CARVALHO, 2012).

O assoreamento pode afetar a operação de reservatórios, reduzindo sua capacidade, favorecendo a poluição física e química, bem como elevando os custos de tratamento de água para abastecimento público quando o represamento se destina a este fim (DILL, 2002).

Neste sentido, a análise do processo de assoreamento deve fazer parte das atividades de construção e manutenção de reservatórios, de modo a prevenir dificuldades fortuitas de operação, inclusive interrupções no fornecimento de água tratada para a população.

O processo de assoreamento pode ser verificado por meio do levantamento topográfico em campo do fundo do reservatório (levantamento batimétrico) e ser complementado com o emprego de modelos hidrológicos e, especificamente, por modelos hidrossedimentológicos, que permitem uma visão sistêmica dos processos que afetam a bacia e, por conseguinte, o reservatório, além de permitirem o emprego de simulações que podem prever mudanças nestes processos.

3.3 Levantamento batimétrico

O levantamento batimétrico permite realizar o mapeamento do fundo de reservatórios, sendo uma importante fonte de dados para o monitoramento operacional, visto que possibilita determinar o acúmulo de sedimentos ao longo do tempo, bem como a variação da capacidade útil.

Um método convencional utilizado para a realização da batimetria é o levantamento de transversais em seções determinadas, método este que se modernizou através do emprego de sonares montados em barcos, facilitando a execução do processo devido a tecnologia aplicada (MERWADE, 2009).

Embora o levantamento de transversais permita visualizar pontos específicos em uma determinada área, a visualização completa do mapa batimétrico pode ser realizada por meio da aplicação de interpoladores espaciais a partir dos dados observados.

A interpolação espacial permite melhorar a distribuição espacial das variáveis observadas, uma vez que estima as áreas não contempladas pela amostragem a partir da combinação da variabilidade espacial (CAMARGO *et al.*, 2000).

Existem diversos métodos de interpolação espacial descritos na literatura, como Vizinho mais próximo, Triangulação, Inverso da Distância, Krigagem, Spline, entre outros. Muitos fatores afetam a estimativa de um interpolador, podendo-se citar a existência de dependência espacial, a malha amostral empregada, não havendo assim, resultados consistentes a respeito da melhor ferramenta de interpolação a ser empregada para batimetrias (CURTARELLI *et al.*, 2015).

3.4 Modelos hidrológicos

Os processos erosivos ou hidrossedimentológicos, envolvem a produção, transporte, deposição e compactação de sedimentos, que ocorrem naturalmente. Entretanto, os diferentes tipos de uso e manejo dos solos quando aplicados incorretamente, e ainda associados à problemática da erosão nas cabeceiras de drenagem, podem acentuar tais processos, aumentando a quantidade de sedimentos acumulada no exutório de uma bacia e diminuindo a produtividade dos solos, gerando assim problemas socioeconômicos e ambientais (PINTO *et al.*, 2013).

Originalmente, os modelos hidrológicos se voltavam mais a ação das gotas da chuva como responsável pela desagregação. No entanto a ação do escoamento superficial vem ganhando mais importância sobre seu efeito de desagregação que pode ser dividido em quatro etapas, erosão laminar, erosão em sulcos, erosão em ravinas/voçorocas e erosão fluvial (MERRITT *et al.*, 2003).

A compreensão do processo hidrossedimentológico é fundamental para a tomada de decisões, do ponto de vista da gestão de bacias hidrográficas, manutenção da qualidade ambiental e reestruturação de ambientes. Desse modo, a representação do processo por meio de modelos proporciona uma melhor compreensão e previsão de determinados fenômenos ocorrentes.

Os modelos hidrológicos são ferramentas computacionais que se baseiam em equações matemáticas para reproduzir os efeitos dos principais agentes ambientais sobre um sistema. O objetivo do modelo é compreender o que ocorre em uma bacia hidrográfica, por exemplo, possibilitando a simulação de situações futuras, ou até mesmo do passado, de modo a direcionar a tomada de decisão (MACHADO, 2002).

De acordo com Moreira (2005), geralmente, os modelos são classificados

conforme uma variabilidade de parâmetros:

- estocásticos ou determinísticos: consideram o tipo de variáveis utilizadas na modelagem;
- empíricos ou conceituais: consideram o tipo de relação entre as variáveis;
- discretos ou contínuos: consideram a forma de representação dos dados;
- concentrados ou distribuídos: consideram a existência ou não de relações espaciais; e
- estacionários ou dinâmicos: consideram a existência de dependência temporal.

A principal vantagem dos modelos é a possibilidade de avaliar diversos cenários de forma rápida. Além disso, a utilização da simulação de cenários está associada a um custo baixo, sendo uma alternativa viável a pesquisas de campo que demandam custos mais elevados e são extensas quando se trata do estudo de uma bacia hidrográfica (BALDISSERA, 2005).

3.5 Modelagem em bacias não monitoradas

Os modelos hidrológicos, em geral, necessitam de dados pluviométricos e/ou fluviométricos observados. No entanto, no Brasil muitas bacias hidrográficas não são monitoradas (PÁDUA, 2015). Segundo Tucci (2009), a escassez de dados ou falta de representatividade de algumas estações dificultam a estimativa de variáveis hidrológicas para estudos e projetos envolvendo recursos hídricos.

Uma alternativa para superar a falta de dados é a regionalização hidrológica, que consiste na utilização de informações hidroclimatológicas disponíveis e informações fisiográficas de bacias da região, para condensar dados para locais não monitorados (MONTE-MOR, 2012).

De acordo com Monte-Mor (2012), a simulação de bacias não monitoradas compreende algum tipo de extrapolação do que é observado em uma bacia monitorada. Segundo o mesmo autor, as simulações de bacias pouco monitoradas apresentam incertezas nos dados e na calibração dos parâmetros que são características à abordagem do problema, uma vez que os resultados não podem ser avaliados ou verificados com plena confiança.

3.6 Modelo SWAT

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) constitui em um modelo hidrológico distribuído e contínuo que permite a realização da simulação de diferentes processos físicos em bacias hidrográficas, com o objetivo de analisar os efeitos das alterações no uso e ocupação do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água (SRINIVASAN & ARNOLD, 1994).

Arnold *et al.* (1998) descreveram as características básicas do modelo SWAT:

- requer informações específicas sobre o clima, topografia, propriedades do solo, vegetação e as práticas de manejo do solo ocorrentes na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água e sedimentos, crescimento de culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente simulados pelo modelo utilizando os dados de entrada já mencionados. Isto se deve ao fato do SWAT ter sido desenvolvido, originalmente, para ser aplicado a bacias não monitoradas;
- computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas de forma rápida;
- modelo contínuo capaz de simular os impactos das mudanças no uso do solo em longos períodos de tempo; e
- não requer calibração, caso não existam informações disponíveis e de qualidade. A calibração é uma ferramenta que possibilita a inserção dos valores dos parâmetros do modelo que melhor representam o comportamento hidrológico do sistema, não sendo possível em bacias hidrográficas não instrumentadas.

O SWAT considera a bacia dividida em sub-bacias com base na topografia, tipos de solo e uso e ocupação do solo, preservando, assim, os parâmetros espacialmente distribuídos da bacia inteira e as características homogêneas dentro da bacia (BALDISSERA, 2005).

A ferramenta de modelagem manipula vários componentes hidrológicos (evapotranspiração, evaporação do solo, escoamento superficial, recarga de aquífero, fluxo de base e fluxo subterrâneo) desenvolvidos e validados em escalas menores (Neitsch *et al.*, 2002). O volume de escoamento é estimado a partir da precipitação diária utilizando o método modificado do *Curve Number* (CN) proposto pelo *Soil*

Conservation Service, em 1972. A produção de sedimentos é estimada a partir da Equação Universal Modificada de Perda de Solo (MUSLE) para cada sub-bacia hidrográfica (WILLIAMS, 1995).

O Modelo prediz o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos e cargas de poluentes em bacias hidrográficas (SRINIVASAN e ARNOLD, 1994).

Arnold *et al.* (1998) citam a importância de ressaltar que o modelo não é capaz de simular eventos isolados, como intensidade e duração da precipitação e propagação de cheia.

3.7 Aplicação do modelo SWAT

O SWAT faz parte de uma série de modelos que são usados para prever a erosão do solo e a produção de sedimentos, contudo, é um dos poucos que simulam também o balanço hídrico (BISANTINO *et al.*, 2015, BORRELLI *et al.*, 2015, TAGUAS *et al.*, 2015).

Di Luzio *et al.* (2005), Betrie *et al.* (2011) e Hunink *et al.* (2013) descrevem que o SWAT é uma das ferramentas mais aplicadas no mundo com resultados promissores na avaliação de escoamento e produção de sedimentos, principalmente em escalas anuais e mensais.

De acordo com Gassman *et al.* (2007) e Douglas-Mankin *et al.* (2010), o SWAT tem sido utilizado para a representação dos fluxos e dinâmica do solo da perda de solo, bem como para o planejamento de bacias hidrográficas com resultados satisfatórios em todos os casos. Também a ferramenta já foi aplicada para prever descargas artificiais de reservatórios e sedimentação da bacia de contribuição (GESSESE & YONAS, 2008). Gessese & Yonas (2008), citam que em poucos casos, os rendimentos de sedimentos simulados foram comparados com observações batimétricas no reservatório para uma validação efetiva dos resultados do modelo.

Lamba *et al.* (2016) utilizaram o Modelo para identificar áreas de fonte crítica de poluentes no nível da sub-bacia hidrográfica e avaliar o impacto de práticas de manejo alternativas na redução do aporte de sedimentos e da carga de fósforo total, na bacia *Pleasant Valley*, no centro-sul de Wisconsin (EUA). Os resultados obtidos mostraram que o SWAT foi capaz de prever dados de vazão, sedimentos e carga de fósforo total em um intervalo de tempo mensal, com precisão suficiente.

Licciardello *et al.* (2016) aplicaram o Modelo SWAT na previsão do assoreamento do reservatório Ragoletto, localizado no rio Acate, na Itália e compararam os dados obtidos com o levantamento batimétrico de um período de 47 anos. Os resultados encontrados foram satisfatórios, contribuindo para a determinação dos principais fatores que determinam as taxas de sedimentação nos ambientes de clima semiárido Mediterrâneo.

3.8 Aplicação do SWAT no cenário brasileiro

No cenário brasileiro, diversos autores como Machado e Vettorazzi (2003), Neto (2013), Lelis *et al.* (2012), Marchioro *et al.* (2011) e Pereira (2013) utilizaram o modelo SWAT para descrição e predição do ciclo hidrossedimentológico, considerando cenários reais e hipotéticos de uso e ocupação do solo, em regiões brasileiras.

Segundo Machado *et al.* (2003), a modelagem foi satisfatória na predição dos valores médios de produção de sedimentos, quando comparados ao valor encontrado nos postos de observação. Dantas *et al.* (2015) também relatam sucesso nas simulações tanto hidrológica quando de sedimentos, quando simularam a bacia do Alto Rio Paraíba.

Neto (2013), Lelis *et al.* (2012) e Rosa (2016) também descrevem que o modelo foi aplicável e satisfatório para a constatação da influência da cobertura vegetal, tipo de solo e das práticas de manejo na geração do escoamento superficial e na produção de sedimentos. Enquanto, Marchioro *et al.* (2011) não tiveram simulações satisfatórias, mas atribuíram a não similaridade dos valores simulados e observados à inconsistência e/ou não robustez da base de dados utilizada.

No entanto, Pereira (2013), que utilizou o SWAT para uma análise hidrológica, fez observações para diferentes amplitudes de bacias, com isso obteve boas estimativas das vazões em bacias com área de drenagem superiores a 700 km², e para as áreas de drenagem inferior a 500 km², com baixa representatividade espacial das chuvas, observou que modelo não é aplicável nesta última situação.

Bressiani *et al.* (2015) destacam que a utilização da ferramenta SWAT, no Brasil, apresenta-se como um grande desafio, devido a inexistência de bases sólidas de dados para alimentação do programa para a realização de simulações.

Pinto (2011) aplicou o SWAT para avaliar a produção de sedimentos em dois cenários distintos na bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, na região da Serra da Mantiqueira, em Minas Gerais. No primeiro cenário, foi feita a substituição de pastagens por eucalipto e, no segundo cenário, o autor adotou o uso do solo atual, implementando mata ciliar ao longo de toda a rede de drenagem. Os resultados obtidos apresentaram que o modelo foi eficiente na previsão das variáveis vazão e sedimentos. O Modelo apresentou redução de 47% na produção de sedimentos para o primeiro cenário e de 38% para o segundo cenário.

Lelis *et al.* (2011) utilizaram o Modelo para estimar a produção de sedimentos e escoamento superficial na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, localizada em Viçosa, estado de Minas Gerais. A partir de um cenário de projeção para o aquecimento médio global na superfície da Terra, a aplicação do modelo permitiu a interpretação da variação da produção de sedimentos e escoamento superficial provocada por possíveis mudanças climáticas na Bacia, validando a utilização do modelo para este tipo de estudo.

Ainda na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Lelis e Calijuri (2010) aplicaram o SWAT para identificar as zonas de maior sensibilidade à erosão relacionando ao uso do solo. O monitoramento do escoamento superficial e das perdas do solo sob condições de chuva natural, por meio da instalação de 10 parcelas experimentais nas culturas predominantes da Bacia, permitiu a comparação dos resultados de campo e das simulações, atestando a eficiência do Modelo na caracterização da produção de sedimentos. Os resultados também mostraram que as perdas de solo podem ser reduzidas significativamente pela substituição de culturas com manejo mais adequado.

3.9 Processo de funcionamento do Modelo SWAT

No Modelo SWAT, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias que podem ser parametrizadas com a utilização de uma série de unidades de resposta hidrológica, em inglês, *Hydrologic Response Units* (HRU), de modo a representar os diferentes tipos de solo, topografia, cobertura vegetal e usos do solo, possibilitando a subdivisão de centenas a milhares de células, cada uma representando uma HRU.

Os dados de entrada do Modelo, denominados Planos de Informação (PI), são inseridos por meio de uma interface apropriada. Os PI necessários para a alimentação

do Modelo são: Modelo Numérico do Terreno (MNT), delimitação da bacia hidrográfica, mapa de uso e ocupação do solo, mapa de solo da bacia e dados tabulares como variáveis climáticas e de qualidade da água.

A alimentação do Modelo tem início com a inserção do MNT, que propicia o traçado do fluxo de escoamento da água e definição do curso d'água por meio das informações de topografia e elevação do terreno. Após a adição dos mapas de classes de solo e de uso e ocupação do solo, o Modelo cria as HRU, que possuem uma combinação única de uso e ocupação do solo, tipo do solo e declividade.

A última etapa da inserção dos dados de entrada se dá na adição dos dados climatológicos por meio da interface da base de dados do SWAT e tabelas previamente preparadas. O Modelo propicia, ao usuário, o preenchimento de falhas em séries históricas por meio de estimativa, a partir dos dados previamente inseridos.

A Figura 1 apresenta um esquema de funcionamento do Modelo SWAT.

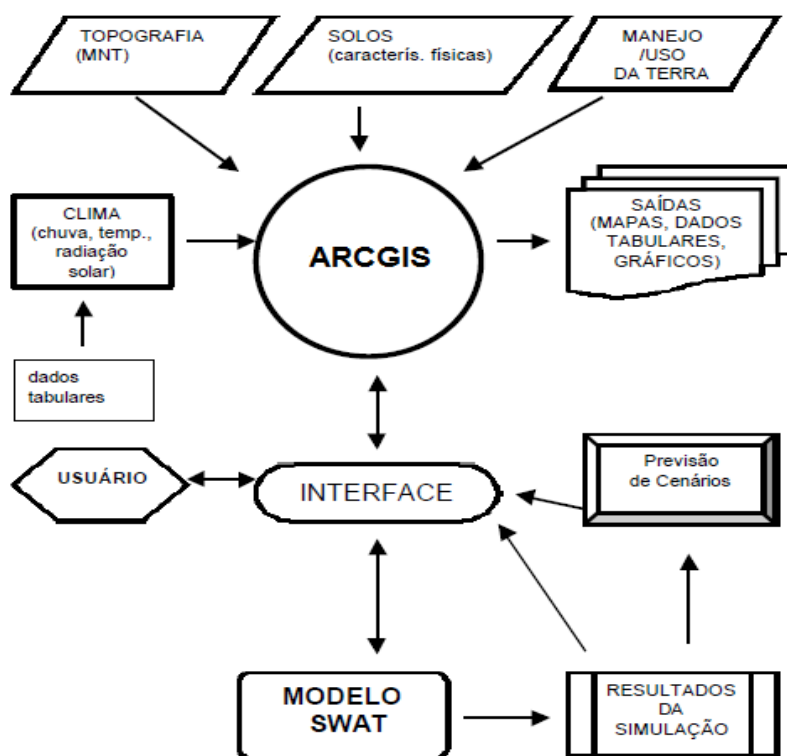


Figura 1 - Esquema de funcionamento do modelo SWAT.

Fonte: Adaptado de Machado (2002).

3.9.1 Modelo numérico de terreno (MNT)

O MNT, Modelo Numérico do Terreno, obtido a partir das curvas de nível e/ou pontos altimétricos, consiste em uma representação contínua da distribuição espacial

das variações de altitude em uma área. A altimetria é gerada e usualmente utilizada em arquivo *raster*, formado por uma grade regular de pontos, em que o valor digital se refere à média de altimetria da célula que ele representa (USEIKA, 2009).

Outro modelo empregado para representar as elevações do terreno é o Modelo Digital de Elevação (MDE), formado por uma matriz onde cada célula armazena o valor da elevação daquele local.

Segundo Chaplot *et al.* (2004), para que a produção de sedimentos não seja superestimada, deve-se definir a dimensão da malha com base na precisão do mapa de uso do solo disponível, sendo recomendada a utilização de malhas inferiores a 50m.

O emprego de modelos representativos do relevo em modelos hidrossedimentológicos fornece informações referentes à direção do escoamento e da inclinação do trajeto a ser percorrido por este, sendo, portanto, muito importante neste trabalho.

3.9.2 Mapa de uso e ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação do solo caracteriza os elementos naturais e artificiais que recobrem o solo, permitindo que os pontos vulneráveis à interferência humana sejam identificados (MORAIS e CARVALHO, 2013).

Para estudos em bacias hidrográficas, tais mapas são obtidos por meio da identificação de padrões de respostas espectrais em composições coloridas de imagens de satélites ou fotografias aéreas. Podem ser elaborados de forma manual, por meio da digitalização dos polígonos e classificação, ou de forma automatizada empregando-se algoritmos classificadores (podendo ser supervisionada ou não supervisionada).

Assim, o mapa de uso e ocupação do solo torna-se um importante elemento para a estimativa da produção de sedimentos na bacia, visto que uma determinada atividade pode influenciar em maior ou menor proporção no processo.

3.9.3 Mapa de solos

O mapa de solos exprime os tipos de solo e suas respectivas proporções em determinada área. As características de cada classe permitem identificar a

susceptibilidade à erosão de um solo, assim como os impactos que o manejo inadequado pode causar. Desta forma, a classe de solos é um fator fundamental para o planejamento territorial, visto que identifica áreas e os potenciais de utilização destas, contribuindo para o uso adequado do solo e preservação do meio ambiente.

Para que as classes de solo possam ser classificadas, no Modelo SWAT, é necessário adicionar à sua base de dados os tipos de solo com suas respectivas características, uma vez que o banco de dados do Modelo contempla apenas solos típicos dos Estados Unidos. Os parâmetros necessários para a inserção de cada classe de solo estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do solo para a inserção de uma nova classe no Modelo SWAT.

Parâmetro	Descrição
NLAYERS	Número de horizontes do solo
HYDGRP	Grupo hidrológico
SOL_ZMX	Profundidade máxima de solo que a raiz alcança
ANION_EXCL	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	Carbono orgânico do solo
CLAY	Porcentagem de argila no 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 Arnold *et al.* (2012).

3.9.4 Dados climatológicos

De acordo com Paiva (2001), as informações hidrológicas são indispensáveis para o planejamento e gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, de

modo que o monitoramento possui relação direta com a magnitude quanti-qualitativa desses recursos.

Para a simulação no SWAT são empregados os dados de precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento.

Deste modo, os dados climatológicos são importantes tanto no processo de simulação quanto para a calibração do Modelo SWAT, pois permitem que este simule o clima da área de estudo e sua respectiva interação com a bacia e, ainda, ajuste os parâmetros desta simulação empregando parte da série histórica.

3.9.5 Grupos hidrológicos

A classificação hidrológica do solo se relaciona com a suscetibilidade desse à erosão e a produção de escoamento. Mockus (1972) descreve as características dos grupos hidrológicos, apresentadas pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do *United States Department of Agriculture* (USDA):

- Grupo A: Os solos deste grupo possuem baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração. Geralmente, consistem, principalmente de argila e cascalho, sendo profundos e excessivamente drenados.
- Grupo B: Engloba solos com potencial de escoamento moderadamente baixo quando completamente molhados. Consistem, principalmente, de solos moderadamente profundos a profundos e moderadamente a bem drenados, A textura varia de moderadamente fina a moderadamente grossa.
- Grupo C: Compreende solos com potencial de escoamento moderadamente alto quando completamente molhados. A movimentação da água através das camadas destes solos é um pouco restrita. Possuem textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração.
- Grupo D: Os solos deste grupo possuem alto potencial de escoamento, sendo a movimentação da água através do solo restrita ou muito restrita. Tratam-se de solos argilosos e solos expansivos, que agem como materiais impermeabilizantes próximos da superfície.

Sartori (2004) classificou os grupos hidrológicos do solo para as condições brasileiras, conforme apresentado no Anexo (Tabelas 1A a 4A).

3.10 Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia do Ribeirão Candidópolis, situada no município de Itabira, em Minas Gerais. O município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Santo Antônio e na bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, ambas importantes contribuintes da Bacia do Rio Doce.

A bacia do Ribeirão Candidópolis, pertencente à sub-bacia do Rio Piracicaba, é constituída pelos córregos Alto e Baixo Candidópolis, Contendas, Vista Alegre, Barreiro e Lavoura (Figura 2), possuindo uma área de drenagem de aproximadamente 34 km².

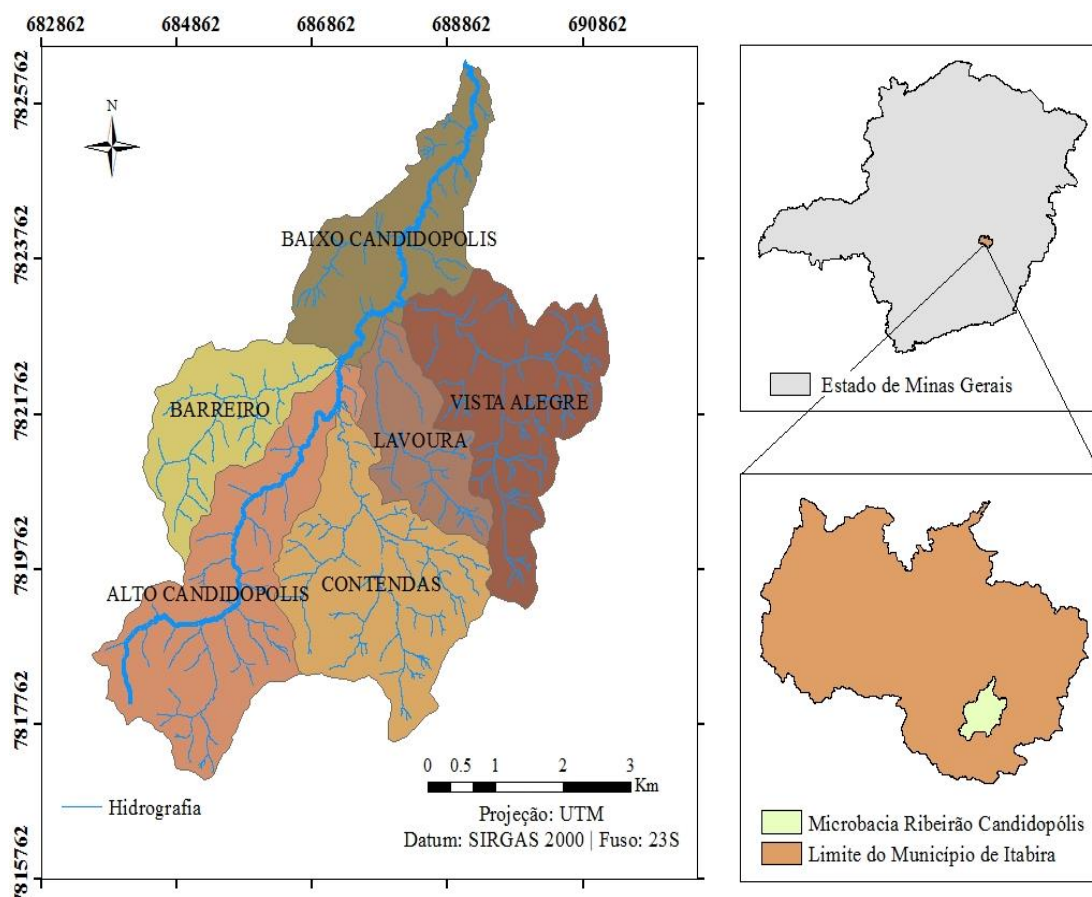


Figura 2 - Localização geográfica da bacia do Ribeirão Candidópolis.

Fonte: Nascimento *et al.* (2016).

Segundo a estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística para o ano de 2017 o município de Itabira possui 119.285 habitantes (IBGE, 2010), visto que o último Censo, até a data de realização do presente trabalho, realizado por este órgão ocorreu em 2010. A atividade econômica principal é a mineração de ferro, entretanto a pecuária extensiva ocupa a maior parcela territorial do município (SAAE, 2015).

Na bacia do Ribeirão Candidópolis, a ocupação do solo se dá, principalmente, por vastas áreas de pastagens implantadas sem planejamento, em solos suscetíveis a processos erosivos e regiões de relevo acidentado, o que contribui para a formação de focos de erosão e compactação de extensas áreas, favorecendo, portanto, a redução dos percentuais de infiltração das águas pluviais e aumento do escoamento superficial, bem como o carreamento de sedimentos (SAAE, 2010).

O Ribeirão Candidópolis é um manancial de grande importância para o município de Itabira, visto que é utilizado como fonte de captação de água para o abastecimento público, pela Estação de Tratamento de Água Pureza, de aproximadamente 55% da população urbana. O reservatório da barragem de controle de nível da ETA (Figura 3) está situado na foz da bacia, recebendo, deste modo, a soma das contribuições do aporte de sedimentos de toda a malha hidrográfica.



Figura 3 - Vista parcial do reservatório da barragem de controle de nível da ETA Pureza.

Fonte: Adaptado de Martins (2006).

3.10.1 Clima

A região onde se situa a bacia estudada encontra-se na faixa tropical do hemisfério sul. Considerando esta localização, pode-se dizer que a mesma é influenciada por três massas de ar: Tropical Atlântica, Polar Atlântica e as Correntes de Oeste, cujas influências variam ao longo do ano (ITABIRA, 2014).

Nos vales dos principais cursos d'água da bacia do rio Doce, o clima é do tipo Cwa, de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), ou seja, verões chuvosos, com período seco acentuado coincidindo com o inverno (ITABIRA, 2014).

Com relação à umidade, o município de Itabira apresenta, com maior predominância, o índice de umidade B1 – Úmido, conforme a classificação de Thornthwaite. O índice de umidade desta classe varia entre 20 e 40, o que significa que o padrão de chuvas acumulada durante o ano tem média aproximada de 1.500 mm e a temperatura média anual oscila de 18 a 23°C (SCOLFORO *et al.*, 2008).

3.10.2 Declividade

A bacia do Ribeirão Candidópolis apresenta predomínio de declividades características de relevo ondulado a forte ondulado em mais de 80% da área e aproximadamente 13% possui características de classes com menores declividades.

Considerando que a declividade de uma bacia hidrográfica exerce influência em processos hidrológicos como escoamento superficial, umidade do solo, infiltração, dentre outros, o predomínio das formas de relevo ondulado a forte ondulado indicam que a maior parte da bacia apresenta elevada susceptibilidade à erosão (FUNARBE, 2014).

3.10.3 Solos

O levantamento de solos na bacia do Ribeirão Candidópolis foi realizado pela Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE, 2014). Foram encontradas cinco classes de solo: Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, Cambissolo Háplico, Neossolo Flúvico e Gleissolo Háplico, assim descritos:

- Latossolos Vermelho Amarelos (LVA) e Latossolos Vermelhos (LV) - solos constituídos por materiais minerais muito intemperizados, sendo a cor, a principal distinção entre os Latossolos Vermelho Amarelos e os Latossolos Vermelhos. Essa variação ocorre principalmente devido à composição mineralógica, evidenciando assim aspectos físicos e químicos que influenciam as transformações pedogenéticas. Uma diferença evidente no ambiente de ocorrência das duas classes é que os LV ocorrem em cotas mais elevadas (média de 900 m), enquanto os LVA ocupam sempre colinas mais suavizadas em cotas comumente inferiores a 800 m.
- Cambissolos Háplicos – solos encontrados na área mapeada em diferentes contextos, sendo as principais variações atribuídas a aspectos geológicos e de relevo. Primeiramente, encontra-se estes solos associados a Latossolos em áreas de relevo montanhoso. Contudo são encontrados também em áreas de relevo forte ondulado e associados a Latossolos Vermelho Amarelos. A textura dos Cambissolos encontrados na área é sempre argilosa. Estes solos são muito importantes no contexto de estudo da bacia do Ribeirão Candidópolis, pois representam áreas em potencial para o desenvolvimento de processos erosivos de grande porte, visto que quase sempre estão em zonas de concentração do escoamento superficial onde facilmente se atinge o horizonte C em solos rasos.
- Neossolos Flúvicos - solos derivados de sedimentos aluviais. O ambiente onde é encontrada esta classe de solo é sempre um ambiente deposicional mais atual, constituído de sedimentos muito recentes do ponto de vista do tempo geológico. Sendo assim, a maioria destes solos ocupa uma porção da paisagem denominada de leito maior, que comporta as águas do rio em períodos de cheia. A textura dos solos encontrados é predominantemente média, com teores de argila variando entre 15 a 30%. Evidenciando realmente a presença de uma fertilidade natural melhor, destacam-se os valores de cálcio e magnésio trocáveis, que também são apreciáveis. Nesta mesma tendência têm-se os valores de pH que variam de 6,0 a 6,7 caracterizando solos moderadamente ácidos a praticamente neutros. São solos muito utilizados com pastagem e considerados como áreas de utilização nobre, devido às condições de relevo plano em que se desenvolvem. Geralmente apresentam restrições quanto à drenagem, mas sempre nas camadas mais subsuperficiais. Estes

solos ocorrem em associação com Gleissolos Háplicos, e a unidade de mapeamento em que são o componente principal ocupa cerca de 2% da bacia do Ribeirão Candidópolis.

- Gleissolos Háplicos - solos constituídos por material mineral, estão sempre associados a posições baixas na paisagem, que por sua vez podem ocorrer em cotas muito distintas dentro da bacia. Portanto, existem Gleissolos em cotas mais baixas na região central da bacia, porém esses mesmos solos ocorrem em pequenas manchas de solo que ocupam cotas mais elevadas principalmente na porção sul da bacia. São solos que apresentam marcante variação textural, sendo predominantes os argilosos e muito argilosos. Além disso, são essencialmente distróficos e caracterizados como fortemente ácidos devido aos valores de pH que comumente estão abaixo de 5,3.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização morfológica da bacia

Para a análise morfométrica da bacia realizou-se os cálculos dos seguintes parâmetros: índice de circularidade, densidade de drenagem e índice de sinuosidade. A Tabela 2 apresenta os parâmetros, bem como suas descrições e fórmulas.

Tabela 2 - Parâmetros morfométricos analisados.

Parâmetro	Descrição	Fórmula
Índice de circularidade	Refere-se à relação entre a área da bacia e a área do círculo de perímetro igual ao da área total da bacia.	$I_c = 12,57 \cdot \frac{A}{P^2}$ I_c: índice de circularidade A: Área de drenagem (m²) P: Perímetro (m)
Densidade de drenagem	Este índice constitui um indicativo muito importante do escoamento superficial da água, o que reflete uma maior ou menor intensidade dos processos erosivos na esculturação dos canais.	$D = \frac{L}{A}$ D: Densidade de drenagem (m/m²) L: o comprimento total dos cursos da bacia (m) A: área de drenagem (m²).
Índice de sinuosidade	O índice de sinuosidade é um fator controlador da velocidade de escoamento e relaciona o comprimento real do canal com a distância vetorial do mesmo.	$I_s = \frac{C}{C_t}$ I_s: índice de sinuosidade C: comprimento do canal principal (km). C_t: comprimento do talvegue (km).

Fonte: a autora.

4.2 Aplicação do Modelo SWAT

4.2.1 Manipulação e integração dos planos de informação

A manipulação e integração dos planos de informação que alimentam o Modelo SWAT foram realizadas por meio do Sistema de Informações Geográficas (SIG), no formato de mapas digitais e tabelas. Deste modo, os sistemas computacionais utilizados para a realização do projeto foram:

- Software ArcGis/ESRI® (versão 10.2), para a geração de dados espaciais;
- Modelo hidrológico SWAT® 2012 integrado ao ArcGis 10.2, para a modelagem da bacia;
- Microsoft Excel (MICROSOFT EXCEL® 2010), para a tabulação dos dados e análises estatísticas;
- SWAT-CUP®, para a calibração do Modelo SWAT.

4.2.2 Definição dos planos de informação e inserção no Modelo

Para a definição dos PI, foi verificada a existência de dados disponíveis na literatura, sempre que possível, e a atualização destes, empregando uma imagem mais atual, a fim de minimizar o tempo e os custos necessários para o levantamento de campo. Os mapas não existentes foram gerados utilizando imagens de satélite atuais.

Dando início ao processo de inserção, criou-se uma geodatabase para realizar a simulação do SWAT. Para a delimitação da bacia hidrográfica do Ribeirão Candidópolis o MDE foi inserido, sendo este um recorte do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com 30m de resolução espacial, dando base à definição dos cursos d'água existentes.

Definiu-se a área de direção e acumulação do fluxo em 65 hectares para definir a ramificação do Ribeirão, de modo que esta abrangesse toda a bacia. Assim, foram criados os cursos d'água e exutórios da bacia hidrográfica. Foi inserido manualmente um ponto de exutório, definindo a localização do reservatório da Estação de Tratamento de Água Pureza, a partir de suas coordenadas geográficas. Para cada

exutório uma sub-bacia foi criada automaticamente, totalizando 23 sub-bacias, para realizar o cálculo de diferentes parâmetros dentro do *software* (Figura 4).

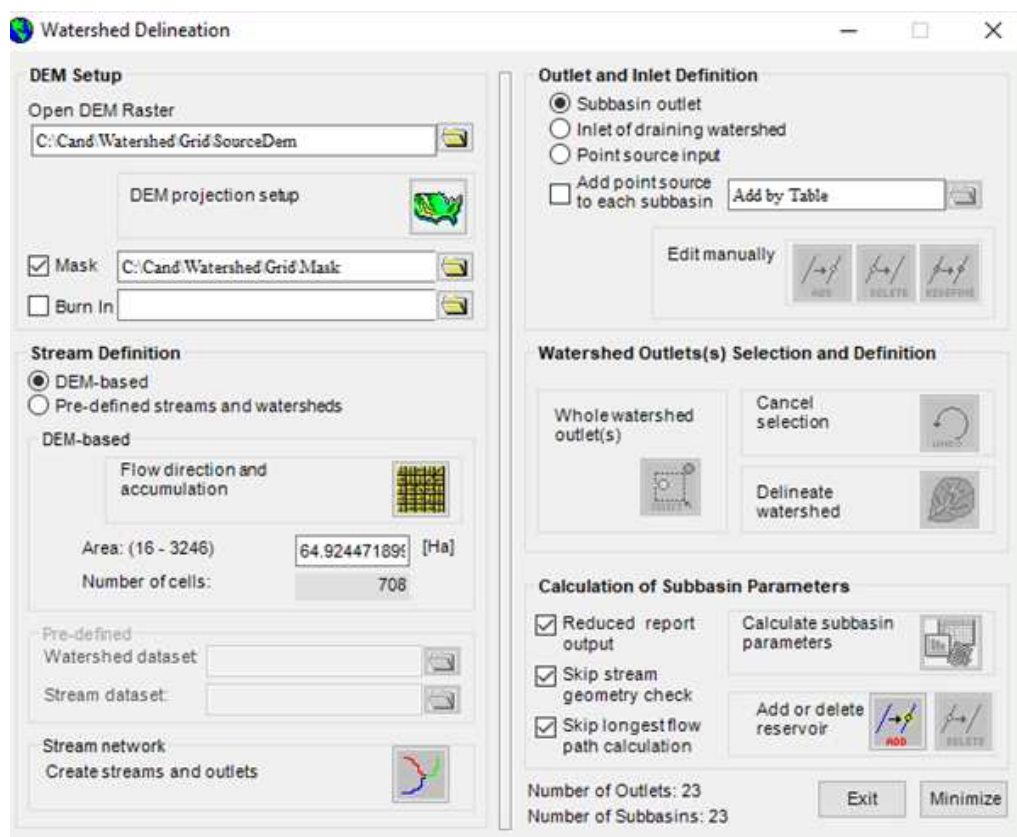


Figura 4 - Etapa de delimitação da bacia hidrográfica no Modelo SWAT.

4.2.3 Elaboração e inserção do mapa de uso e ocupação do solo no Modelo SWAT

O mapa de uso e ocupação do solo utilizado no trabalho é resultante do estudo de Nascimento *et al.* (2016). Este se refere ao uso e ocupação na Bacia no ano de 2015.

O mapa de uso do solo (Figura 5) foi inserido no Modelo e a classificação dos usos determinada de acordo com a base de dados do SWAT, dando início à análise das HRU.

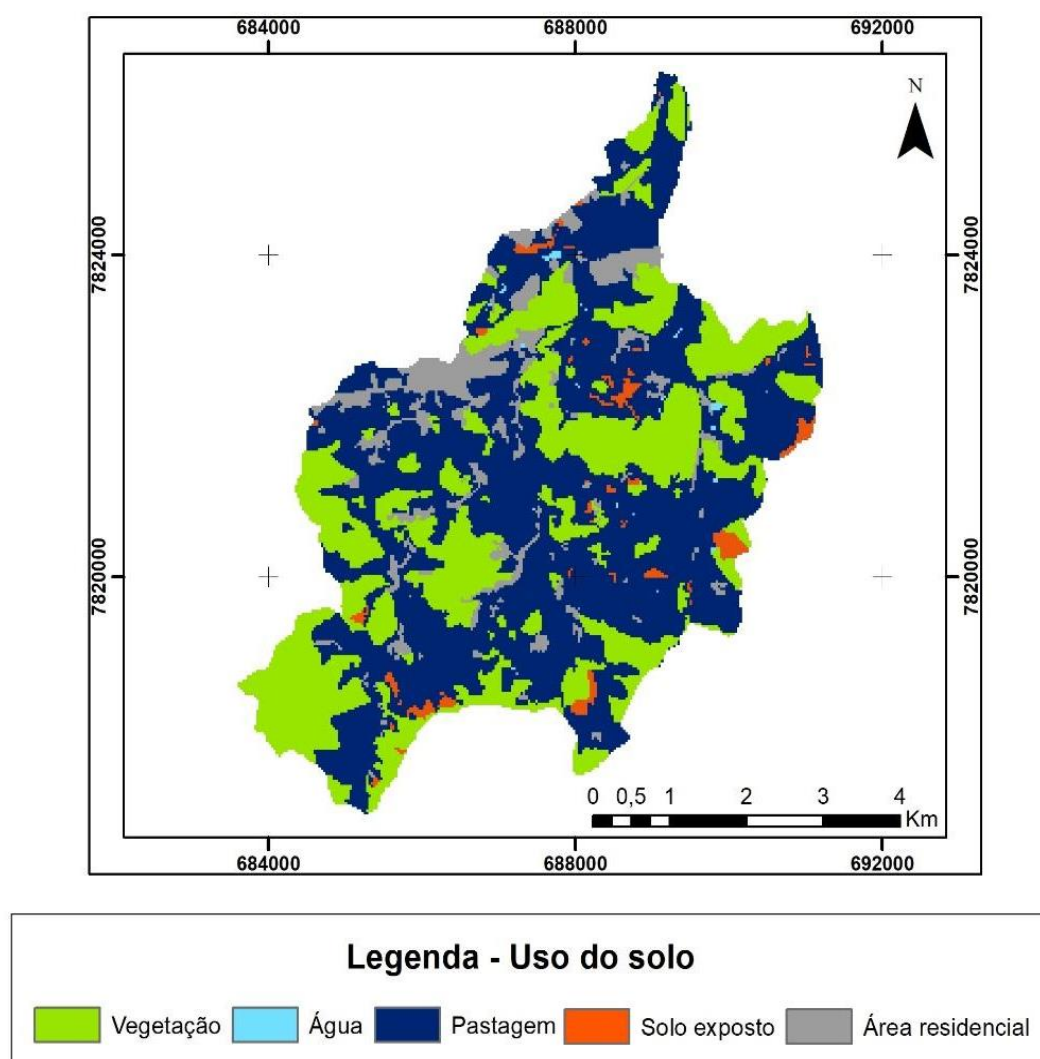


Figura 5 - Mapa do uso do solo na bacia do Ribeirão Candidópolis.

Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2016).

Também foi elaborado um mapa de uso e ocupação do solo empregando as imagens disponíveis no *Google Earth* para o ano de 2017 para a simulação do primeiro cenário.

Foram delimitadas as Áreas de Preservação Permanentes (APP) de rios, nascentes e lagos, seguindo as diretrizes do novo Código Florestal, Lei nº 12.651 de 25 de maio de 2012, para a simulação dos demais cenários.

4.2.4 Elaboração e inserção do mapa de solos no Modelo SWAT

O mapa de solos utilizado na pesquisa é proveniente do estudo de Nascimento *et al.* (2016), adaptado de Funarbe (2014). Os solos identificados foram: Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd), Cambissolo Háplico distrófico (CXbd), Gleissolo Háplico distrófico (GXbd) e Neossolo Flúvico eutrófico (RYbe).

As características físicas dos solos foram determinadas de acordo com os dados apresentados por Baldissera (2005). Os grupos hidrológicos foram estabelecidos segundo Sartori (2004). O mapa das classes de solo, apresentado na Figura 6, também foi inserido no Modelo SWAT.

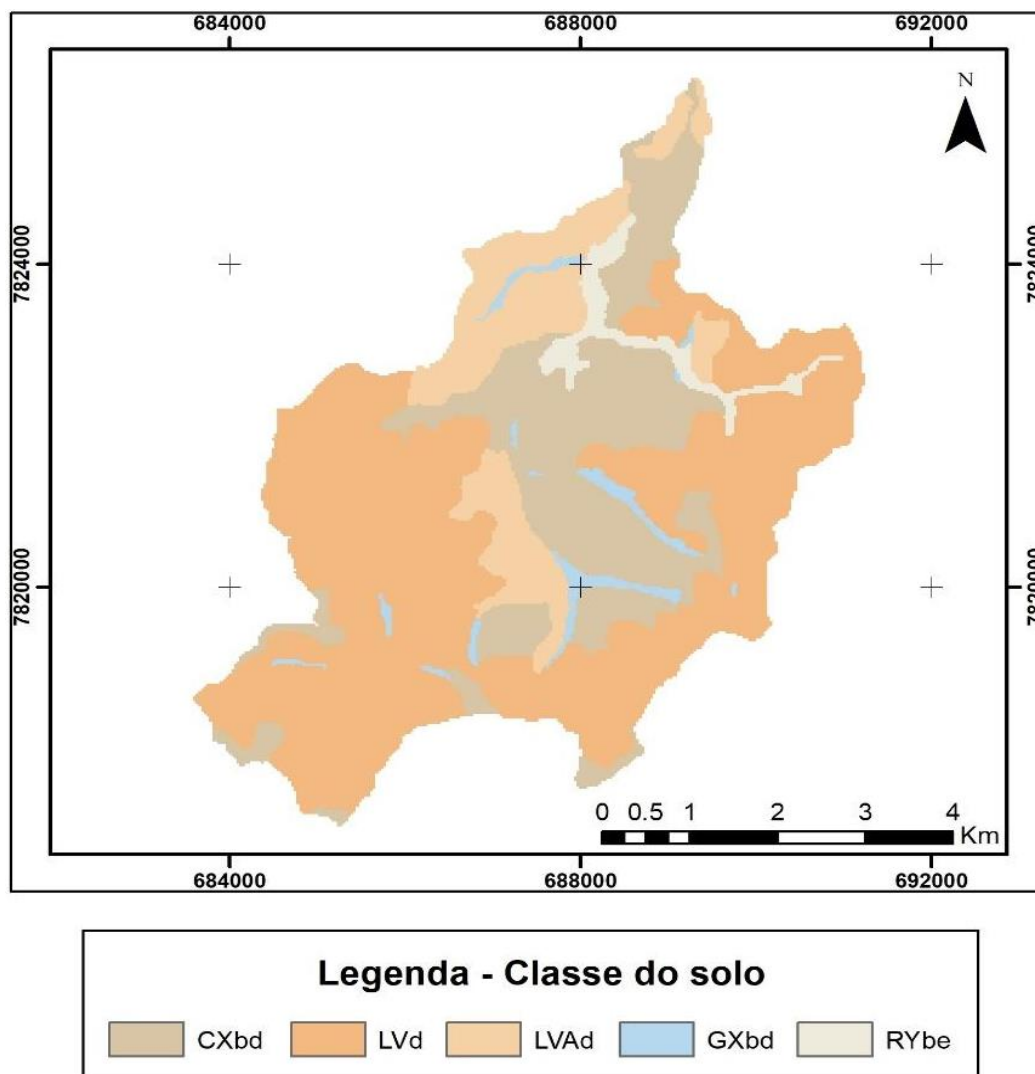


Figura 6 - Mapa das classes de solo da bacia do Ribeirão Candidópolis.
Fonte: Adaptado de Nascimento *et al.* (2016).

4.2.5 Obtenção e inserção modelo digital de elevação (MDE) no SWAT

O MDE do terreno foi gerado pelo *United States Geological Survey* (USGS), com resolução espacial de 30 metros, que se apresenta no Sistema de Coordenadas Geográficas e Datum WGS84, convertido para coordenadas planas empregando como sistema de projeção UTM, fuso 23S e Datum Sirgas2000.

4.2.6 Definição das unidades de resposta hidrológicas (HRU)

A definição das HRU é a etapa subsequente à inserção dos planos de informação iniciais. O Modelo SWAT oferece duas opções principais para essa definição:

- *dominant* HRU: a combinação de uso do solo e tipo de solo é avaliada para cada sub-bacia, deste modo a combinação dominante, ou seja, o uso e o tipo de solo de maior proporção, é considerada para toda a extensão da sub-bacia analisada, sendo os demais arranjos descartados;
- *multiple* HRU: múltiplas HRU são definidas. Várias combinações de uso e tipo de solo são criadas para cada sub-bacia definida, considerando os limites máximos definidos pelo usuário.

A fim de evitar a alteração das informações reais relacionadas ao uso e tipo de solo encontrados na bacia, realizou-se a definição por *multiple* HRU.

4.2.7 Obtenção e inserção dos dados climatológicos no Modelo SWAT

A ferramenta *Weather Generator*, presente na extensão SWAT, utiliza séries de dados diários de precipitação (mm), temperatura (°C), umidade relativa do ar (fração), radiação solar (MJ/m²) e velocidade do vento (m/s).

Os dados diários foram obtidos da estação meteorológica nº 83587 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no município de Belo Horizonte, Minas Gerais (Tabela 3).

Cabe ressaltar que há uma estação meteorológica em Itabira, da empresa Vale. Os dados desta foram analisados e constatou-se a presença de muitas falhas na série histórica. Apesar das falhas existentes, foi realizada uma tentativa de simulação empregando os dados da série após a inserção do valor -99 para que o SWAT as

considerasse como NODATA. Entretanto, devido ao grande número de ocorrências, estas falhas foram compreendidas como precipitações nulas, consequentemente o período de vazões nulas foi aumentado, havendo inclusive a ocorrência de vazões nulas no mês de janeiro. Deste modo, optou-se por não empregar os dados da estação de Itabira e adotou-se a série histórica de Belo Horizonte, localizada a cerca de 120 km de distância de Itabira.

Tabela 3 - Dados da estação meteorológica de Belo Horizonte.

Estação	Latitude	Longitude	Elevação	Nº de anos da série histórica
Belo Horizonte	-19,93416°	-43,95222°	915 m	56

Fonte: a autora.

Os arquivos foram preparados conforme o formato de trabalho exigido pelo Modelo SWAT, assim o valor -99 foi inserido nas falhas da série histórica, de acordo com as orientações de Arnold *et al.* (2012), para que fosse considerada a ausência de dados (NODATA).

Ao inserir a estação meteorológica no banco de dados do modelo SWAT é necessário informar também: localização geográfica, altitude e número total de anos da série histórica da estação, média mensal da temperatura máxima diária (TMPMX), desvio padrão da temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX), média mensal da temperatura mínima diária (TMPMN), desvio padrão da temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN), média mensal da precipitação total (PCPMM), desvio padrão para a precipitação diária de cada mês (PCPSTD), coeficiente de inclinação para a precipitação diária no mês (PCPSKW), probabilidade de um dia de chuva seguido de um dia seco no mês (PR_W1), probabilidade de um dia de chuva seguido de um dia de chuva no mês (PR_W2), média do número de dias de precipitação no mês (PCPD), valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registro para cada mês (RAINHHMX), média da radiação solar diária no mês (SOLARV), média diária da umidade relativa no mês (DEWPT), média diária da velocidade do vento no mês (WNDV).

4.2.8 Avaliação do desempenho da aplicabilidade do SWAT

O desempenho da aplicabilidade do Modelo SWAT foi avaliado por meio de análise estatística. A eficiência do Modelo é medida a partir do emprego da análise estatística para avaliar o ajuste dos dados observados e simulados, obtidos após a etapa de calibração.

Deste modo, para medir a eficiência do Modelo foi utilizado o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), desenvolvido por Nash e Sutcliffe (1970), que pode variar de menos infinito a 1, sendo 1 indicativo de um ajuste perfeito.

O COE pode ser expresso por:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - E_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{obs} - \bar{E})^2} \quad (1)$$

sendo,

E_{obs} = evento observado;

E_{sim} = evento simulado pelo modelo;

$\bar{E}$ = média dos eventos observados no período de simulação;

n = número de eventos.

4.2.9 Calibração do Modelo SWAT

A calibração do Modelo SWAT compreende o ajuste de parâmetros para que os dados simulados se aproximem dos observados, imprimindo resultados melhores à simulação.

Esta etapa pode ser realizada manualmente ou de forma semiautomática utilizando o software *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP), desenvolvido especificamente por Abbaspour *et al.* (2007).

A calibração manual pode ser efetuada dentro do próprio Modelo, no qual é possível alterar o parâmetro em questão somando um determinado valor ao valor inicial, multiplicando um certo valor ou mesmo substituindo o valor inicialmente proposto para o parâmetro.

O *SWAT-CUP* possui cinco procedimentos de calibração e análise de incerteza semiautomáticos: SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol, e MCMC para a interface do modelo SWAT (BRIGHENTI *et al.*, 2015).

Para esta etapa o *SWAT-CUP* foi utilizado, a partir do procedimento de calibração SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) que se vale do método do hipercubo latino para definição dos parâmetros de análise, sendo estabelecidos dentro de um intervalo determinado pelo usuário (ABBASPOUR *et al.*, 2007).

Por meio do *SWAT-CUP* pode-se realizar, ainda, a análise de sensibilidade e validação dos parâmetros do modelo SWAT. O Software permite a inserção de vários parâmetros simultaneamente e uma visualização mais ampla e detalhada do efeito da alteração de cada parâmetro inserido a partir do resultado da simulação do Modelo.

4.2.10 Obtenção dos dados observados para calibração do Modelo SWAT

Para verificar o desempenho do Modelo a partir dos dados simulados, é necessário realizar a inserção dos dados observados no *SWAT-CUP*, e a partir deles, realizar a calibração. O Software permite a introdução de dados de vazão e concentração de nutrientes.

Para o presente estudo realizou-se a inserção dos dados de vazão medidos na ETA Pureza, fornecidos pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Itabira, para os anos de 2010 a 2017.

4.2.11 Simulação de cenários

Com o intuito de testar a aplicabilidade do Modelo na quantificação de sedimentos e na influência das alterações no uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Candidópolis, quatro cenários foram considerados com base na disponibilidade de dados, na realidade da bacia e na pesquisa de Passos (2017):

- cenário 1: considerando o uso e ocupação do solo atual;
- cenário 2: considerando a presença de APP ocupadas por vegetação densa, conforme determinação do novo Código Florestal, que prevê faixas marginais de 30 m de APP para cursos d'água com menos de 10 m de largura, raio mínimo de 50 m de APP para nascentes e olhos d'água e 50 m de APP no

entorno de lagos e lagoas naturais com superfície inferior a 20 ha (BRASIL, 2012);

- cenário 3: considerando o uso e ocupação do solo atual com a modificação do tipo de uso das áreas de pastagem para agrofloresta;
- cenário 4: considerando a presença de APPs ocupadas por vegetação densa, conforme determinação do novo Código Florestal (BRASIL, 2012), com a modificação do tipo de uso das áreas de pastagem para agrofloresta.

4.3 Levantamento batimétrico

Para o levantamento batimétrico do reservatório foi empregado o *Acoustic Doppler Profiler* (ADP), com o aparelho *RiverSurveyor®*, M9, da SonTek, realizando transectos ao longo do reservatório da barragem da Estação de Tratamento de Água Pureza, com o auxílio de um barco.

O perfilador M9 possui um sistema de nove feixes com dois conjuntos de quatro feixes perfiladores (cada conjunto com sua própria frequência) e um feixe vertical. O M9 tem um alcance máximo de até 40 m para medição de velocidade de perfil e um alcance máximo de 80 m para medições de vazão (utilizando como referência o GPS e o feixe vertical).

O funcionamento do ADP é baseado no princípio do efeito Doppler, que consiste na mudança de frequência de uma onda sonora quando a fonte está se movendo em relação ao observador, ou vice e versa. Deste modo, o ADP realiza a medição da vazão a partir da emissão de ondas sonoras na corrente de água e da reflexão de uma parcela destas para a fonte emissora. As profundidades são medidas por sonar, a partir do tempo de propagação, da velocidade do barco em relação ao fundo fixo e da velocidade da massa líquida, gerando o perfil batimétrico de uma seção.

Os dados coletados com o M9 foram interpolados empregando os interpoladores TIN e Vizinheiro Natural, no SIG ArcGIS, tendo como barreira o limite do reservatório.

A batimetria foi realizada no reservatório da barragem da ETA Pureza, construído em 1974 e gerido pelo SAAE de Itabira.

A primeira batimetria foi realizada no dia 19/04/2017 e a segunda no dia 13/12/2017, ambas iniciadas pela manhã e encerradas no período da tarde, realizando

transectos em “ZigZag”, com um espaçamento não superior a 2 m, atendendo à classificação de Ordem Especial e da 1ª Ordem da OHI (DHN, 2008), sendo percorrido todo reservatório que possuía calado para o ADP e não estava tomado por vegetação. A Figura 7 apresenta os transectos realizados nas duas batimetrias e identifica a tomada de água provisória por meio do círculo vermelho.

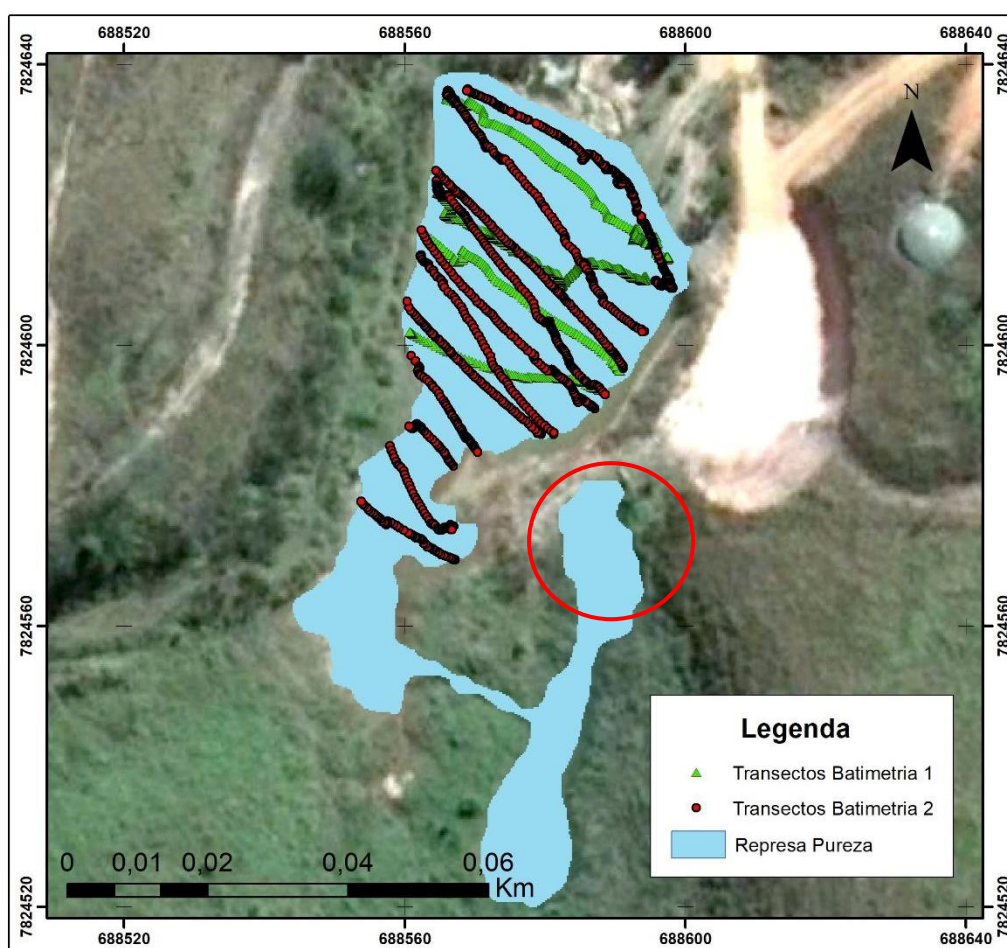


Figura 7 - Transectos das duas batimetrias realizadas no reservatório da barragem da ETA Pureza e identificação da tomada de água provisória, definida pelo círculo vermelho.

Fonte: a autora.

Na primeira batimetria foram realizados 4 transectos e na segunda 11 transectos. A diferença significativa no número de transectos se deu devido a diferença de nível de água na barragem nos dois períodos, bem como a presença de vegetação dentro da área do reservatório na primeira batimetria, impedindo o avanço do barco para medição. Destaca-se que o levantamento batimétrico não se estendeu a toda a mancha alagada devido à dificuldade de acesso as áreas não monitoradas.

Percebe-se também uma diferença na localização dos transectos das duas batimetrias, que ocorreram em função da movimentação do barco dentro de reservatório devido a corrente de água em direção ao vertedouro, localizado à jusante da represa, e ao vento.

O limite do reservatório foi obtido por meio da digitalização em tela, tendo por base a imagem do *Google Earth* de 08/09/2017, visto que foi a melhor imagem disponível e data mais próxima ao levantamento que se obteve.

Na área de remanso da barragem existe uma tomada de água provisória que é utilizada apenas nos períodos secos, quando o nível de água no reservatório fica extremamente baixo.

As figuras 8 a 12 apresentam imagens da primeira batimetria realizada em 19/04/2017, e do reservatório no período seco e da tomada d'água provisória.



Figura 8 - Reservatório da barragem da ETA Pureza.

Fonte: a autora.



Figura 9 - Vertedouro da barragem da ETA Pureza.

Fonte: a autora.



Figura 10 - Realização da batimetria na barragem com o ADP.

Fonte: a autora.



Figura 11 - Reservatório da barragem da ETA Pureza no período seco, em agosto de 2017, com nível de água extremamente baixo.
Fonte: a autora.



Figura 12 - Tomada de água provisória da ETA Pureza.
Fonte: a autora.

4.4 Análise da qualidade da água

Foram realizadas duas campanhas de coleta e análise de caracterização de amostras de água em quatro pontos do reservatório (Figura 13), uma em abril e outra

em dezembro de 2017, datas em que também foram realizados os levantamentos batimétricos.

As análises físicas, químicas e biológicas das amostras de água foram realizadas conforme o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 2012). Os parâmetros analisados foram:

- oxigênio dissolvido (OD), temperatura, pH e condutividade elétrica (CE), determinados por meio de sonda multiparâmetro;
- turbidez, determinada por meio de turbidímetro;
- cor aparente, determinada com auxílio de um espectrofotômetro a 455 nm;
- sólidos totais (ST) e sólidos sedimentáveis (SSed);
- demanda bioquímica de oxigênio (DBO), determinada pelo método de Winkler;
- coliformes termotolerantes, quantificados por meio da técnica de tubos múltiplos, teste presuntivo.

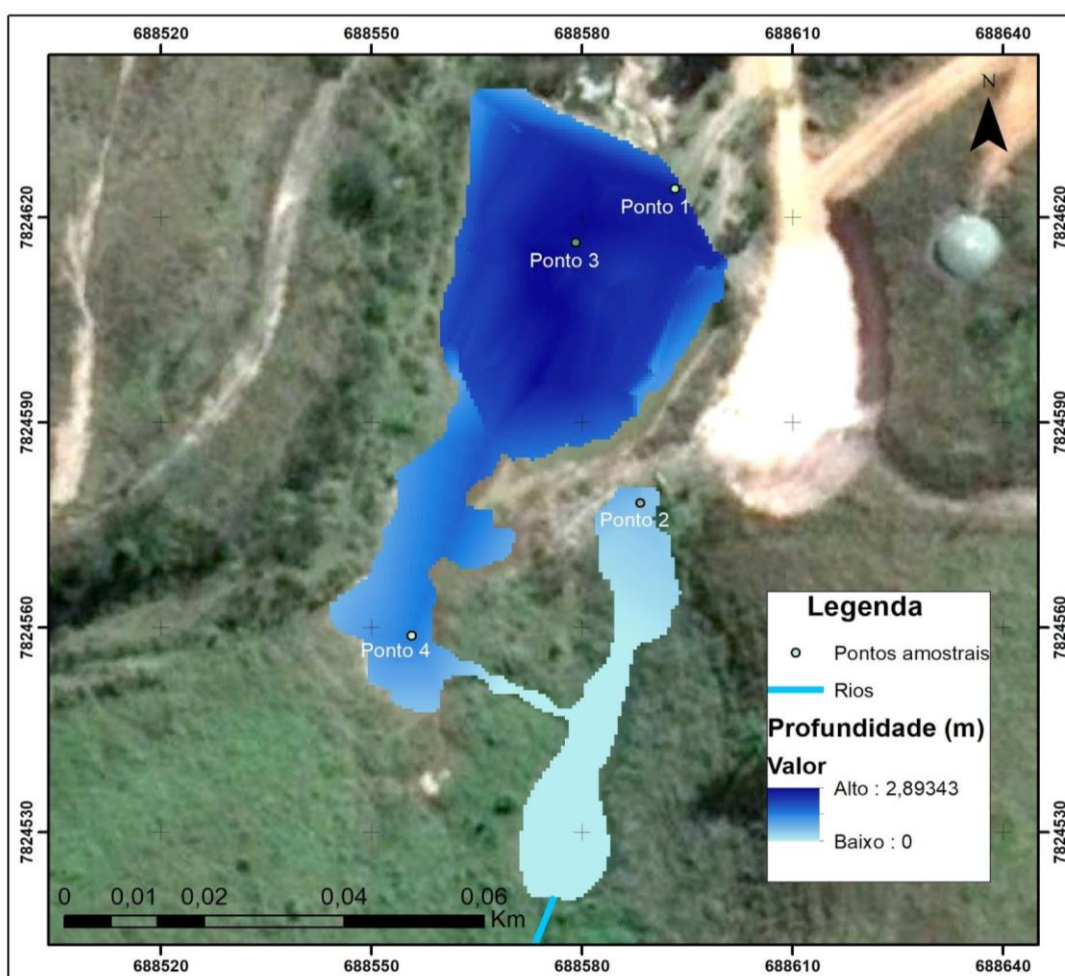


Figura 13 - Localização dos pontos de coleta das amostras de água.

Fonte: a autora.

Em agosto de 2017, uma amostra de água foi coletada apenas no ponto P2, na tomada de água provisória, uma vez que não foi possível efetuar a batimetria e coleta de amostra nos demais pontos, devido ao baixo nível de água na barragem. Para esta amostra foram realizadas as análises de turbidez, cor, sólidos totais, sólidos sedimentáveis, DBO e coliformes totais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise morfológica da bacia

Para realizar a análise morfológica da bacia, foram calculados os parâmetros de índice de circularidade, densidade de drenagem e índice de sinuosidade, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros morfométricos calculados para a Bacia do Ribeirão Candidópolis

Parâmetros	Valor	Unidade
Índice de circularidade	0,39	-
Densidade de drenagem	1,86	km/km ²
Índice de sinuosidade	0,85	-

A partir dos resultados obtidos, pode-se constatar que a Bacia do Ribeirão Candidópolis possui um formato alongado, expressado pelo índice de circularidade inferior a 0,5. Tal fato contribui para que não haja picos de cheias e favorece o escoamento superficial e o aporte de sedimentos.

A densidade de drenagem obtida foi de 1,86 km/km². Conforme Villela e Mattos (1975), este parâmetro pode variar de 0,5 km/km², em bacias com drenagem pobre, a 3,5 km/km² ou mais em bacias muito bem drenadas. Deste modo, a Bacia do Ribeirão Candidópolis apresenta baixa capacidade de drenagem.

O índice de sinuosidade do curso d'água principal da Bacia, apresentou o valor de 0,85. Lana *et al.* (2001) definem que valores próximos a 1 indicam que o canal é mais retilíneo, já valores superiores a 2 sugerem canais tortuosos e valores intermediários revelam formas transicionais.

A sinuosidade dos canais afeta a velocidade de escoamento do canal principal, visto que quanto maior a sinuosidade, maior será a dificuldade de se atingir o exutório do canal, portanto, a velocidade de escoamento será menor (Santos *et al.* 2012). Conforme definição de Lana *et al.* (2001), o curso d'água principal da Bacia é considerado mais retilíneo, favorecendo assim o escoamento superficial e o carreamento de sedimentos ao longo do canal.

Assim, apesar da bacia possuir baixa densidade de drenagem, os sedimentos que atingem os cursos d'água e chegam ao rio principal são direcionados à barragem, contribuindo para o seu assoreamento.

O índice de sinuosidade leva em consideração todo comprimento do rio, sendo, portanto, um indicativo do rio como um todo. Contudo, como pode ser observado na Figura 3, o Ribeirão Candidópolis apresenta muitos meandros próximo à represa, podendo atuar na retenção de parte dos sedimentos carregados neste trecho especificamente.

5.2 Resultados da simulação no SWAT

5.2.1 Inserção dos PI no Modelo SWAT

Para definir as unidades de resposta hidrológicas (HRU), o SWAT combina as informações do uso e ocupação do solo, dos tipos de solo e da declividade, realizando uma reclassificação dos planos de informação, a partir da associação das classes de cada PI com o banco de dados oferecido pelo SWAT.

Quando os dados disponíveis não são compatíveis com a região estudada deve-se realizar a adição de novos dados na biblioteca do Modelo, como procedeu-se com os dados dos solos.

Para a classificação do uso do solo foi necessário apenas relacionar os usos já existentes no banco de dados com os encontrados na Bacia.

A classificação no SWAT e a abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia pode ser observada na Tabela 5, bem como a sigla referente a classificação dos usos do banco de dados do modelo. O uso predominante é a pastagem, seguido de vegetação, área residencial, solo exposto e água.

Tabela 5 - Classificação no SWAT e abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis.

Uso do solo	Classificação SWAT	Sigla SWAT	Área (%)
Vegetação	<i>Forest-evergreen</i>	FRSE	32,87
Água	<i>Water</i>	WATR	0,24
Pastagem	<i>Pasture</i>	PAST	56,52
Área residencial	<i>Residential-low density</i>	URLD	8,45
Solo exposto	<i>Agricultural land-close-grown</i>	AGRC	1,93

Foi adotada a classe AGRC para as regiões de solo exposto por serem áreas de agricultura com fases iniciais de cultivo (ou em fase de preparação para estes) e regiões desprovidas de vegetação.

Conforme o levantamento dos tipos de uso do solo realizado por Nascimento *et al.* (2016), as pastagens representam a forma de uso dominante na área de estudo, abrangendo aproximadamente 56,52% do terreno. As áreas vegetadas ocupam cerca de 32,87% da região, seguidas das áreas edificadas com 8,45%, solo exposto com 1,93% e água com 0,24%.

A abrangência das classes de solo na Bacia é apresentada na Tabela 6. A classe predominante é a do Latossolo Vermelho distrófico, ocupando pouco mais que 50% do território da Bacia.

Tabela 6 - Abrangência das classes de solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis.

Classe de solo	Sigla	Área (%)
Latossolo Vermelho distrófico	LVd	55,74
Latossolo Vermelho Amarelo distrófico	LVAAd	12,63
Cambissolo Háplico distrófico	CXbd	25,85
Gleissolo Háplico distrófico	GXbd	2,54
Neossolo Flúvico eutrófico	RYbe	3,24

De acordo com o mapeamento das classes de solo realizado por Funarbe (2014), o Latossolo Vermelho é o tipo de solo predominante na área de estudo, cobrindo aproximadamente 55,74% do local. O Cambissolo Háplico ocupa cerca de 25,85% do terreno e o Latossolo Vermelho Amarelo cerca de 12,63%, sendo as classes de maior predominância na área estudada. Os demais solos, Neossolo Flúvico (3,24%) e Gleissolo Háplico (2,54%), são as classes de menor contribuição no local.

As características físicas dos solos descritos acima, utilizadas para a adequação do banco de dados do SWAT, são apresentadas nas tabelas do Anexo (Tabelas 5A a 9A). A diferença no número de camadas dos solos ocorreu devido à dificuldade de encontrar as informações específicas para cada tipo de solo.

Para a determinação do mapa de declividades da Bacia do Ribeirão Candidópolis, definiu-se cinco classes conforme determinação da Embrapa (1979). A Tabela 7 apresenta a abrangência das classes de declividade na Bacia. A classe de declividade dominante na Bacia é a de relevo ondulado com intervalo de declive de 8 a 20%.

Tabela 7 - Abrangência das classes de declividade na Bacia do Ribeirão Candidópolis.

Classe de declividade	Intervalo de declive (%)	Área (%)
Plano	0-3	2,69
Suave ondulado	3-8	11,03
Ondulado	8-20	42,96
Forte ondulado	20-45	39,51
Montanhoso	< 45	3,81

A Figura 14, gerada pelo SWAT, a partir das classes de declividades inseridas, ilustra o domínio de cada classe na Bacia.

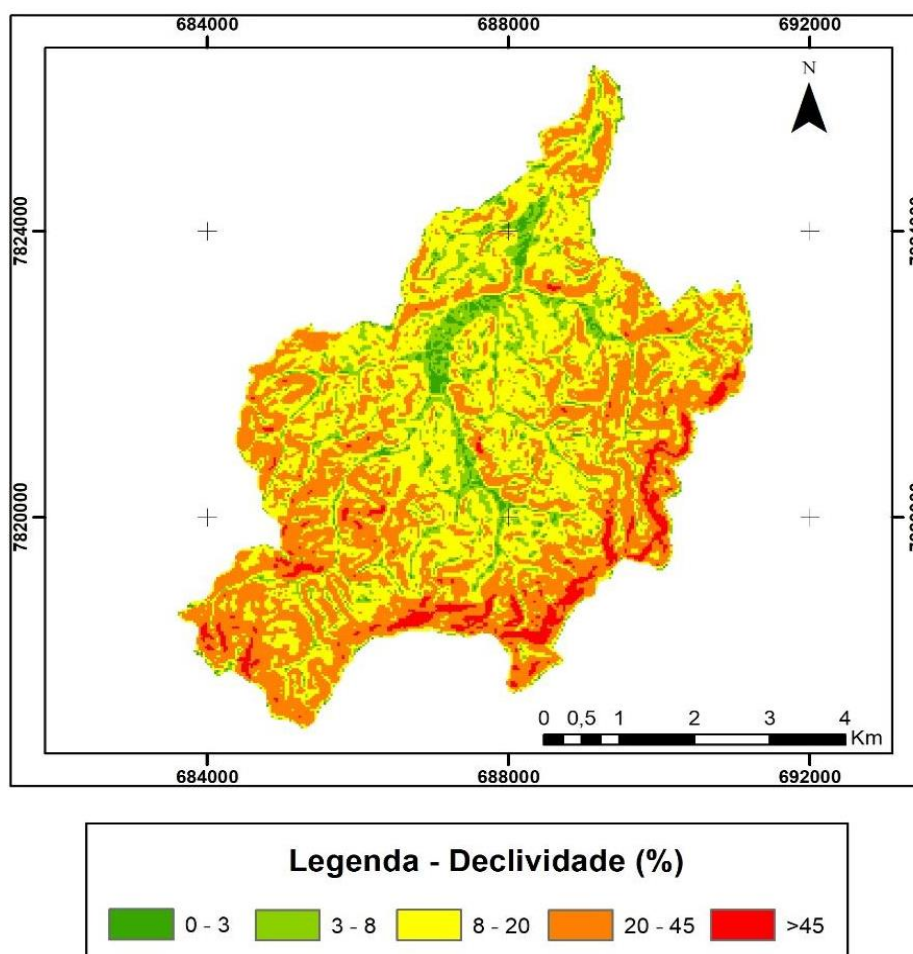


Figura 14 - Classes de declividade na bacia do Ribeirão Candidópolis.

Na etapa subsequente, definiu-se as HRU a partir dos limites inseridos para múltiplas HRU. Foram utilizados os limites sugeridos por Arnold *et al.* (2012): 20% para o uso do solo sobre a área da bacia, 10% para classe de solo sobre a área de uso do solo e 20% para classe de declividade sobre a área da classe de solo, como pode ser observado na Figura 15. Assim, foram criadas 180 HRU com diferentes combinações baseadas nos limites empregados.

Para a inserção dos dados climatológicos diários obtidos da estação meteorológica nº 83587 do INMET, localizada em Belo Horizonte, considerou-se a série histórica dos últimos 10 anos disponíveis, 2007 a 2017, havendo o preenchimento das falhas com o valor -99 e preparação dos arquivos no formato exigido pelo modelo. Deste modo, foi criado um arquivo *.txt* para cada parâmetro inserido.

Figura 15 - Etapa de definição das HRU no Modelo SWAT.

Para a inserção dos dados climatológicos diários obtidos da estação meteorológica nº 83587 do INMET, localizada em Belo Horizonte, considerou-se a série histórica dos últimos 10 anos disponíveis, 2007 a 2017, havendo o preenchimento das falhas com o valor -99 e preparação dos arquivos no formato exigido pelo modelo. Deste modo, foi criado um arquivo *.txt* para cada parâmetro inserido.

Além disso, foi necessário inserir previamente os parâmetros estatísticos dos dados mensais da estação utilizada para que pudessem ser adicionados à ferramenta *Weather Generator*, como pode ser observado na Figura 16.

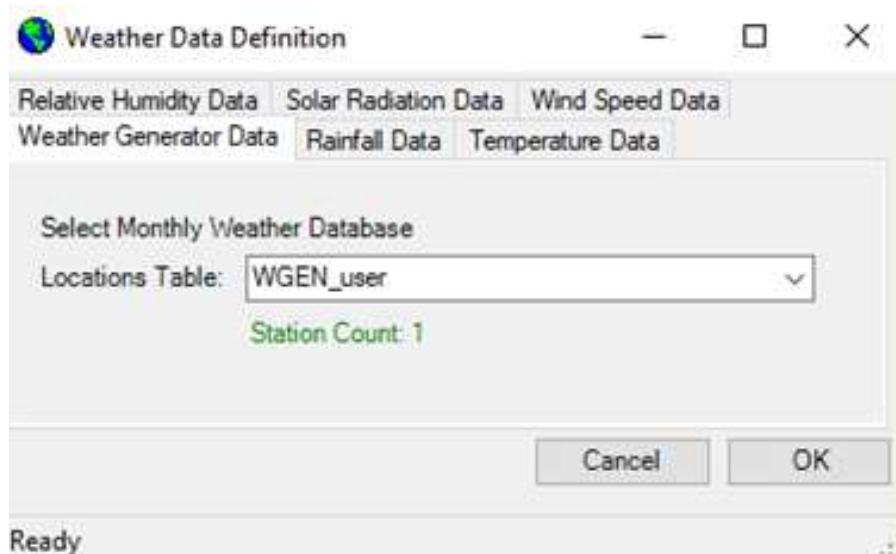


Figura 16 - Etapa de inserção dos dados climatológicos.

Os parâmetros estatísticos dos dados mensais da estação relacionados a precipitação foram calculados por meio do programa pcpSTAT.exe, disponibilizado pelo SWAT. Os demais parâmetros foram calculados por meio de média aritmética simples. Os valores obtidos para cada parâmetro são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros estatísticos calculados para a estação meteorológica.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX (°C)	28,40	28,89	28,52	27,58	25,80	24,90	24,72	26,34	27,58	27,99	27,59	27,76
TMPMN (°C)	19,36	19,56	19,26	18,01	15,74	14,38	14,08	15,10	16,73	18,10	18,51	18,95
TMPSTDMX (°C)	2,80	2,33	2,22	2,05	2,26	2,21	2,50	2,85	3,35	3,46	3,12	2,94
TMPSTDMN (°C)	1,50	1,43	1,42	2,04	2,28	2,26	2,17	2,09	2,13	2,09	1,82	1,54
PCPMM (mm)	288,38	181,12	169,94	74,97	36,04	20,31	20,98	21,47	51,69	121,58	229,88	308,37
PCPSTD (mm)	16,71	13,76	12,08	7,04	4,02	2,52	2,41	2,66	5,59	9,34	13,98	17,35
PCPSKW (mm)	2,95	3,78	3,44	4,63	6,73	7,15	5,98	6,94	5,49	3,76	3,15	3,91
PR-W1	0,24	0,24	0,25	0,17	0,1	0,05	0,05	0,05	0,12	0,24	0,36	0,39
PR-W2	0,79	0,71	0,67	0,55	0,56	0,62	0,65	0,65	0,56	0,59	0,68	0,74
PCPD	18,16	13,44	14,12	8,91	5,98	4,16	4,21	4,12	6,88	11,89	16,79	19,42
RAINHHMX (mm)	52,23	58,18	38,83	24,23	22,78	13,22	9,60	12,58	24,09	27,81	55,38	56,26
SOLARAV (MJ/m ² .dia)	23,39	23,83	15,56	44,36	10,31	10,15	12,54	14,92	16,89	16,20	22,61	24,46
DEWPT (%)	0,73	0,70	0,71	0,69	0,68	0,66	0,63	0,58	0,59	0,65	0,71	0,74
WNDVAV (m/s)	1,19	1,21	1,39	0,48	1,20	1,21	1,49	1,64	1,84	1,68	1,48	1,40

Após a inserção de todos os planos de informação, procedeu-se a simulação do Modelo, utilizando um período de aquecimento de 3 anos com os dados climáticos, de 2007 a 2009, anteriormente ao início do processo (Figura 17).

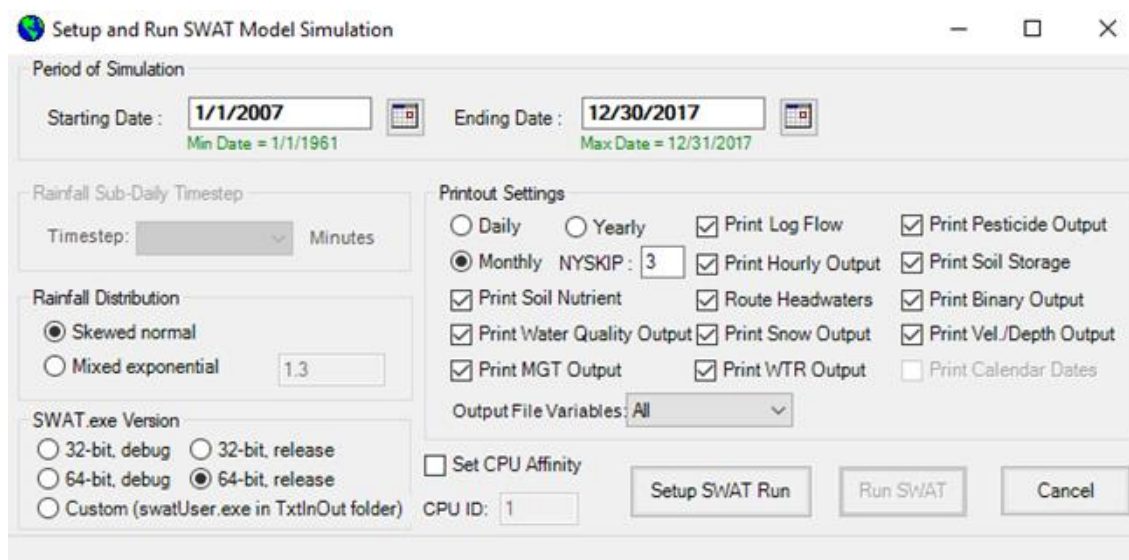


Figura 17 - Etapa de aquecimento e simulação do SWAT.

5.2.2 Calibração do Modelo no SWAT-CUP

A calibração do Modelo foi realizada a partir da inserção dos dados obtidos na simulação do SWAT, no *software* SWAT-CUP, bem como a definição dos parâmetros calibráveis e seus limites mínimos e máximos. Os limites foram determinados conforme os valores sugeridos pelo próprio *software* para cada parâmetro.

Foram realizadas diversas tentativas de calibrações para que o ajuste dos dados simulados permitisse uma maior aproximação dos dados observados, destacam-se 2 que obtiveram os melhores resultados. A Figura 18 apresenta o gráfico dos valores observados e simulados para vazão, gerado pelo SWAT-CUP.

Com a primeira simulação no SWAT, pode-se perceber que as vazões foram subestimadas nos meses simulados. Também pode-se observar que houve um adiantamento em alguns picos de vazões (entre os meses 10 e 15) e um retardo em outros (entre os meses 45 e 55). Além destas observações ainda há a simulação de vazões nulas em diversos meses, sendo estes coincidentes com os meses do período seco (de junho a setembro).

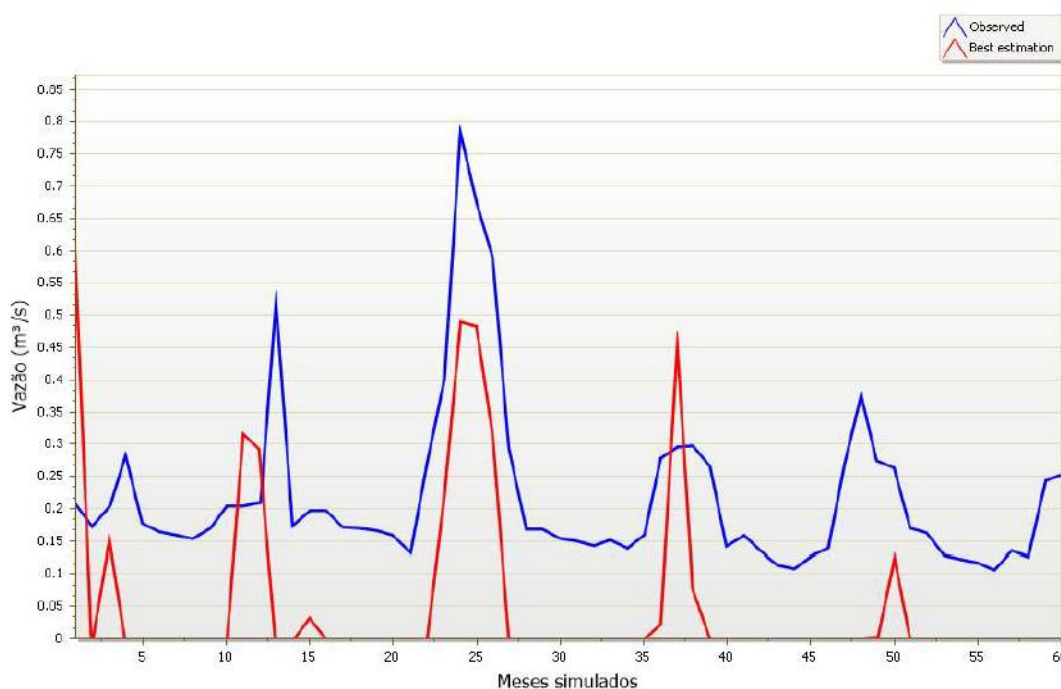


Figura 18 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada antes da calibração do Modelo.

A partir da sugestão do *SWAT-CUP* dos valores ideais para o ajuste da simulação, foi realizada a alteração manual dos valores iniciais dos parâmetros mais sensíveis na calibração do SWAT, baseado na performance do Modelo SWAT, segundo Abbaspour *et al.* (2015).

Como pode-se observar na Figura 18, o escoamento de base da vazão simulada, bem como os picos de vazão foram menores do que o esperado. Segundo Abbaspour *et al.* (2015), para estas condições, os parâmetros mais sensíveis são: CN2, SOL_AWC, ESCO, GWQMN, GW_REVAP e REVAPMN.

O CN2 é um número adimensional que é função da permeabilidade, do tipo de uso e das condições antecedentes de água no solo. O valor de CN2 é importante no cálculo do volume do escoamento superficial.

O parâmetro SOL_AWC é usado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação. Tem uma relação inversamente proporcional com componentes como o fluxo de base e o escoamento superficial, de modo que quando o parâmetro é aumentado, o fluxo de base e o escoamento superficial diminuem.

O ESCO é o fator de compensação da água do solo. Percentuais maiores significam maior evaporação na camada superior do solo e percentuais menores maior evaporação na camada inferior do solo.

O parâmetro GWQMN é a profundidade limite do nível de água acima do qual o fluxo de base é liberado para o canal. Quando o parâmetro é alto uma parte do fluxo de base é retardada. Já quando o valor é baixo, é produzido mais fluxo de base. Só ocorre fluxo de base se o nível de água no aquífero supera o valor estabelecido para o parâmetro.

O GW_REVAP é utilizado para calcular a quantidade máxima de água que se move na zona de saturação do solo para suprir as deficiências de água, processo designado como *Revap* pelo SWAT. Um valor elevado do parâmetro confere maior quantidade de água no solo para suprir as deficiências existentes.

O parâmetro REVAPMN controla o limite de água no aquífero raso para que o *Revap* ocorra. É usado no cálculo da quantidade de água que será removida do aquífero.

A Figura 19 apresenta uma das janelas de alteração manual dos valores iniciais calculados pelo SWAT a partir da combinação dos dados de entrada.

Groundwater Parameters				
SHALLST (mm)	DEEPST (mm)	GW_DELAY (days)	ALPHA_BF (days)	GWQMIN (mm)
1000	2000	31	0.048	1000
GW_REVAP	REVAPMN (mm)	RCHRG_DP (fraction)	GWHT (m)	GW_SPYLD (m3/m3)
0.02	750	0.05	1	0.003
SHALLST_N (mg N/l)	GWSOLP (mg P/l)	HLIPE_NGW (days)	LAT_ORGN (mg/l)	LAT_ORGP (mg/l)
0	0	0	0	0
ALPHA_BF_D (days)	0.01			

Extend Parameter Edits
☐ Extend ALL GW Parameters
☒ Extend Edits to Current HRU
☐ Extend Edits to All HRUS
☐ Extend Edits to Selected HRUS

Selected HRUs
 Subbasins:
 Land Use:
 Soils:
 Slope:

Figura 19 - Janela de alteração dos valores iniciais dos parâmetros referentes ao aquífero raso.

Os valores iniciais destes parâmetros, e após ajuste, fornecidos pelo *SWAT-CUP* podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores iniciais e após ajuste dos parâmetros mais sensíveis na calibração.

Parâmetro ajustado	Descrição	Valor inicial	Valor após ajuste
CN2	Curva número na condição II de umidade	70	35
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O/mm solo)	0,15	0,34
ESCO	Coeficiente de compensação de evaporação de água no solo	0,95	0,1
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer o fluxo de retorno (mm H ₂ O)	1000	0,36
GW_REVAP	Coeficiente de ascensão de água da zona de saturação	0,02	0,146
REVAPMN	Profundidade de água limite no aquífero raso para que ocorra a movimentação de água para a zona insaturada (mm H ₂ O)	750	270

Após a alteração dos parâmetros acima descritos, uma nova simulação foi realizada. A Figura 20, apresenta o novo ajuste dos dados de vazão observados e simulados.

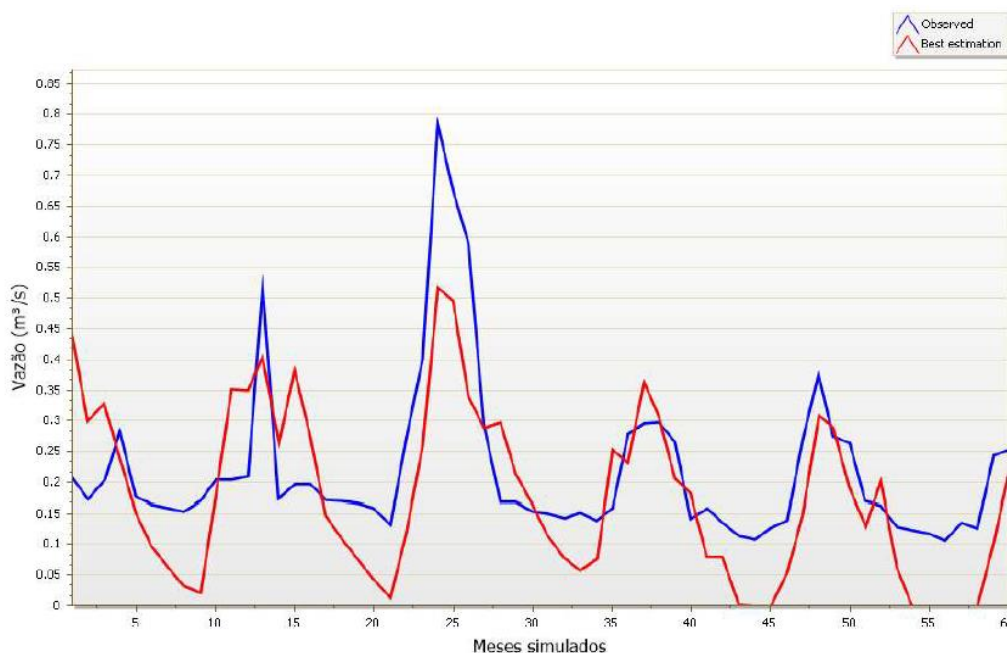


Figura 20 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada após a calibração do Modelo SWAT.

Com a calibração, o ajuste melhorou entre os picos de vazões, tanto em termos de magnitude quanto em tempo de ocorrência. Contudo o modelo ainda apresentou vazões muito baixas nos períodos secos, quando comparadas às vazões observadas nestes períodos.

Com base nesta nova performance do Modelo, novamente foram alterados os parâmetros mais sensíveis referentes ao escoamento de base (GWQMN, GW_REVAP e REVAPMN), utilizando os valores sugeridos pelo *SWAT-CUP* e uma nova simulação foi realizada (Tabela 10).

Tabela 10 - Novos valores para os parâmetros referentes ao escoamento de base.

Parâmetro ajustado	Novo valor
GWQMN	0,30
GW_REVAP	0,185
REVAPMN	124,99

Pode-se observar na Figura 21 que os resultados da simulação melhoraram sensivelmente após a última calibração.

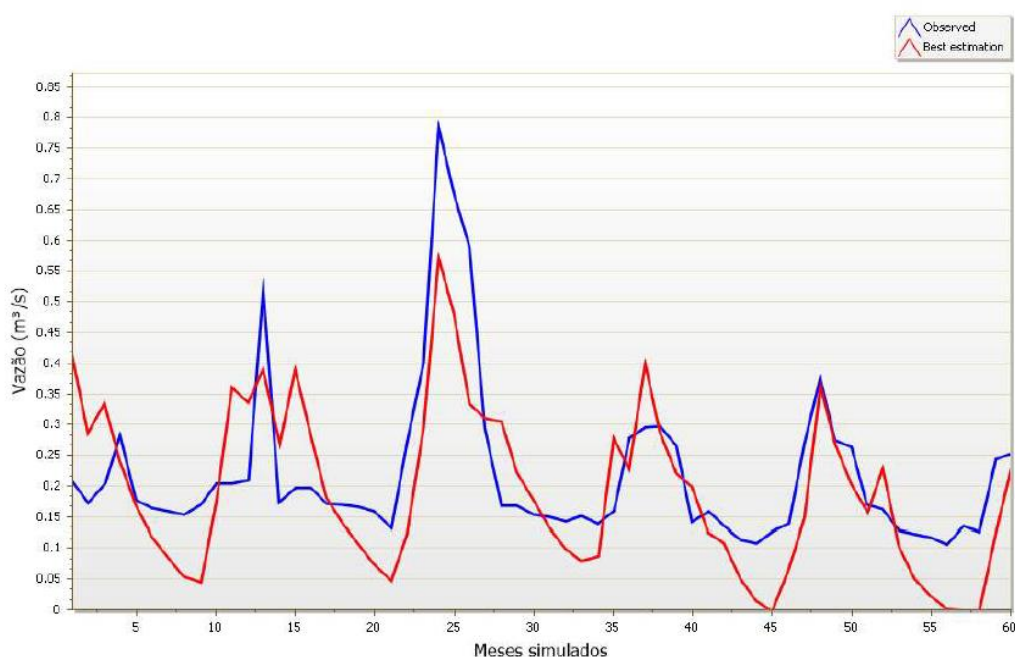


Figura 21 - Gráfico da vazão observada e vazão simulada depois da calibração do Modelo SWAT.

Além do gráfico de ajuste dos valores observados e simulados, o SWAT-CUP fornece a análise estatística de cada simulação, permitindo que a eficiência do Modelo seja medida e sua aplicabilidade avaliada.

Nesta pesquisa, utilizou-se o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) para verificar a eficiência de cada simulação. A Tabela 11 apresenta os valores do COE para as simulações realizadas. O COE pode variar de menos infinito a 1, sendo 1 indicativo de um ajuste perfeito.

Tabela 11 - Análise estatística da eficiência do Modelo.

Simulação	COE
1	-1,36
2	0,30
3	0,41

Embora tenha-se conseguido bons resultados, o ajuste poderia ter sido melhor se os dados climatológicos fossem locais. Apesar dos dados da estação localizada em Belo Horizonte apresentarem um comportamento semelhante à de Itabira, não são os ideais, pois pode haver variações em função da localização geográfica, como uma

maior incidência de precipitação, por exemplo. No entanto, optou-se por utilizar a estação de Belo horizonte, devido a esta ser a mais próxima com dados disponíveis.

5.2.3 Simulação da vazão e aporte de sedimentos

Posteriormente a calibração, realizou-se a simulação dos cenários. Para a simulação do Cenário 1, um novo mapa de uso do solo foi criado, considerando a ocupação na bacia para o ano de 2017 (Figura 22). A simulação foi realizada empregando os mesmos dados meteorológicos e o mesmo mapa das classes do solo, bem como, os mesmos períodos de aquecimento e simulação.

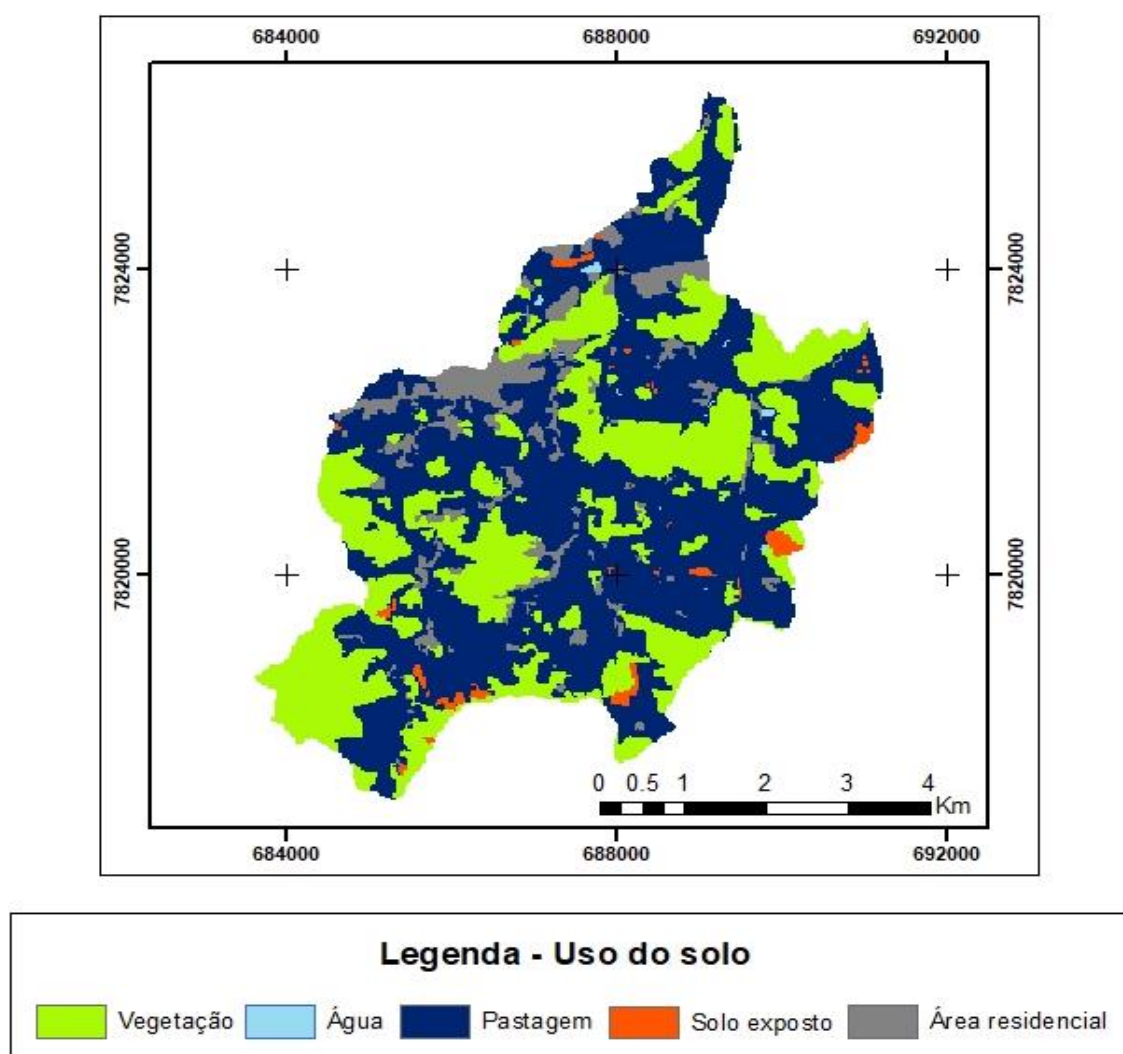


Figura 22 - Mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2017.

A Tabela 12 apresenta a nova abrangência de cada uso do solo após a atualização do mapa considerando a ocupação da bacia para o ano de 2017. Nota-se

que a variação na abrangência dos tipos de uso foi muito pequena em relação ao uso do solo no ano de 2015, havendo um aumento nas áreas de vegetação e pastagem e redução dos demais usos.

Tabela 12 - Abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis após a atualização do mapa.

Uso do solo	Classificação SWAT	Sigla SWAT	Área (%)
Vegetação	<i>Forest-evergreen</i>	FRSE	33,26
Água	<i>Water</i>	WATR	0,23
Pastagem	<i>Pasture</i>	PAST	56,79
Área residencial	<i>Residential-low density</i>	URLD	8,30
Solo exposto	<i>Agricultural land-close-grown</i>	AGRC	1,42

A Tabela 13 apresenta a média mensal dos valores de vazão, concentração e carga de sedimentos simulados para o primeiro cenário. Como pode-se observar, houve um aporte maior de sedimentos no período chuvoso, sendo a maior carga decorrente do mês de dezembro e a menor do mês de agosto. Tal comportamento já era esperado, visto que em torno de 70 a 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água ocorre nesse período, principalmente durante precipitações mais intensas, como afirmado por Carvalho (1994).

Tabela 13 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos médias para o cenário 1.

Cenário 1			
Mês simulado	Vazão (m³/s)	Concentração de sedimentos (mg/L)	Carga de sedimentos (t)
Janeiro	0,553	189,89	2415,10
Fevereiro	0,408	167,06	1173,39
Março	0,393	191,09	1622,54
Abril	0,216	151,16	750,86
Maiο	0,099	100,23	249,70
Junho	0,000	73,69	120,49
Julho	0,000	52,02	37,65
Agosto	0,000	37,59	11,64
Setembro	0,000	53,51	92,05
Outubro	0,160	99,21	428,18
Novembro	0,412	164,01	1520,21
Dezembro	0,528	193,09	2627,23
Total anual	-	1472,55	11049,04

Embora não haja escoamento superficial nos meses de junho a setembro (vazão nula), há o aporte de sedimentos. Este fato pode ser explicado, em parte, pelos sedimentos suspensos na água dos rios da Bacia e os carregados do próprio leito.

Para a simulação do Cenário 2, um novo mapa de uso do solo foi criado, considerando a ocupação das regiões de APP de nascentes e rios ocupadas por vegetação (Figura 23). Novamente, a simulação foi realizada empregando os mesmos dados meteorológicos e o mesmo mapa das classes do solo, bem como os mesmos períodos de aquecimento e simulação.

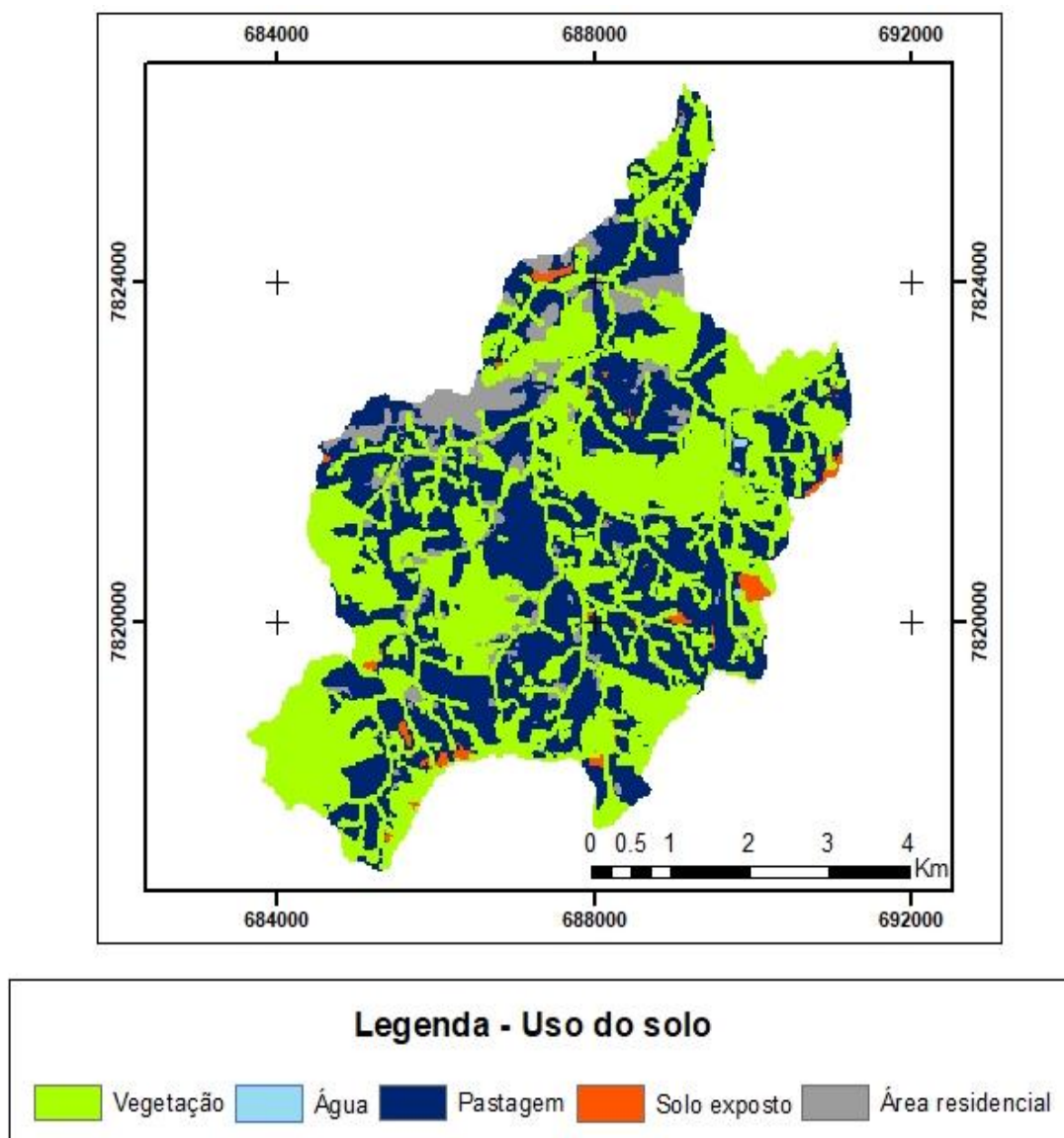


Figura 23 - Mapa de uso e ocupação do solo com a presença de APPs.

A Tabela 14 apresenta a nova abrangência de cada uso do solo após a inserção de vegetação nas áreas de APP.

A área total delimitada como regiões de APPs, foi de 8,15 Km², o que corresponde à 24,11% da área da bacia, somando a área de vegetação (mata e florestas plantadas) com as áreas de APPs temos uma área de 17,32 Km², o que corresponde à 51,28% da área da bacia.

Tabela 14 - Abrangência dos tipos de uso do solo na Bacia do Ribeirão Candidópolis após a inserção de vegetação nas áreas de APP.

Uso do solo	Classificação SWAT	Sigla SWAT	Área (%)
Vegetação	<i>Forest-evergreen</i>	FRSE	51,28
Água	<i>Water</i>	WATR	0,07
Pastagem	<i>Pasture</i>	PAST	41,05
Área residencial	<i>Residential-low density</i>	URLD	6,48
Solo exposto	<i>Agricultural land-close-grown</i>	AGRC	1,12

A Tabela 15 apresenta a média mensal dos valores de vazão, concentração e carga de sedimentos simulados para o segundo cenário. Como pode-se observar, o Cenário 2 manteve o mesmo desempenho do Cenário 1, exprimindo um aporte maior de sedimentos no período chuvoso. Entretanto, houve uma redução considerável na média de concentração e carga de sedimentos em todos os meses simulados. Com base nisso, pode-se dizer que a presença de vegetação nas áreas de APP contribui para a redução da perda de solo em consequência da interceptação de precipitação e da proteção do solo, uma vez que ele não está exposto e suscetível à erosão.

Para a simulação do Cenário 3, utilizou-se o mesmo mapa de uso do solo empregado no Cenário 1, alterando a associação das classes de uso do SWAT. Desta forma, a classe anteriormente definida como pastagem, que corresponde a aproximadamente 57% da área da bacia, passou a ser agrofloresta. Mais uma vez, a simulação foi realizada empregando os mesmos dados meteorológicos e o mesmo mapa das classes do solo, bem como, os mesmos períodos de aquecimento e simulação.

Tabela 15 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 2.

Cenário 2			
Mês simulado	Vazão (m³/s)	Concentração de sedimentos (mg/L)	Carga de sedimentos (t)
Janeiro	0,554	160,24	2046,05
Fevereiro	0,411	157,08	1108,15
Março	0,396	166,33	1441,89
Abril	0,220	111,27	596,81
Maio	0,057	65,48	173,45
Junho	0,000	51,22	84,93
Julho	0,000	37,92	28,97
Agosto	0,000	29,00	8,79
Setembro	0,000	46,92	74,46
Outubro	0,160	84,63	365,69
Novembro	0,411	138,73	1289,74
Dezembro	0,527	151,56	2205,56
Total anual	-	1200,38	9424,49

A Tabela 16 apresenta a média mensal dos valores de vazão, concentração e carga de sedimentos simulados para o terceiro cenário. Como pode-se observar, o Cenário 3 manteve o mesmo comportamento dos cenários anteriores. No entanto, houve uma redução ainda maior na média de concentração e carga de sedimentos em todos os meses simulados. Diante do observado, pode-se dizer que a mudança no uso do solo antes ocupado por pastagem para agroflorestal, contribuiu significativamente para a redução da perda de solo, em função da proteção do solo pela presença de vegetação. De acordo com Zigomar e Alves (2003), embora proporcionem uma boa cobertura do solo quando bem manejadas, as áreas de pastagem se caracterizam por menores valores de infiltração de água no solo e condutividade hidráulica, além de maior valor de resistência do solo à penetração, quando comparadas à vegetação natural.

Tabela 16 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 3.

Cenário 3			
Mês simulado	Vazão (m³/s)	Concentração de sedimentos (mg/L)	Carga de sedimentos (t)
Janeiro	0,552	84,04	1071,70
Fevereiro	0,411	76,26	599,71
Março	0,393	86,76	791,30
Abril	0,222	57,70	292,21
Maiο	0,059	38,15	101,20
Junho	0,000	30,77	55,10
Julho	0,000	21,10	13,76
Agosto	0,000	16,22	4,60
Setembro	0,000	27,19	45,98
Outubro	0,152	46,94	183,38
Novembro	0,405	71,69	611,66
Dezembro	0,521	75,18	937,73
Total anual	-	632	4708,33

Para a simulação do Cenário 4, utilizou-se o mesmo mapa de uso do solo empregado no Cenário 2, alterando a associação da classe de uso previamente definida como pastagem, para agrofloresta. Novamente, a simulação foi realizada empregando os mesmos dados meteorológicos e o mesmo mapa das classes do solo, bem como, os mesmos períodos de aquecimento e simulação.

Segundo Silva *et al.* (2005), a cobertura completa do solo evita a desagregação provocada pelo impacto das gotas de chuva e a formação do selamento superficial, favorecendo a infiltração da água no solo e a redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, o transporte das partículas sólidas desagregadas aos cursos d'água.

A Tabela 17 apresenta a média mensal dos valores de vazão, concentração e carga de sedimentos simulados para o quarto cenário. Como pode-se observar, o Cenário 4 manteve o mesmo desempenho dos cenários anteriores. Neste pode-se observar uma redução considerável na concentração de sedimentos e na carga de sedimentos nos meses simulados, apresentando-se como o melhor cenário simulado para a redução de perda do solo e conseqüentemente diminuição do transporte e acúmulo de sedimentos no reservatório da barragem da ETA Pureza, localizada próximo ao exutório da Bacia.

Tabela 17 - Vazão, concentração de sedimentos e carga de sedimentos para o cenário 4.

Cenário 4			
Mês simulado	Vazão (m³/s)	Concentração de sedimentos (mg/L)	Carga de sedimentos (t)
Janeiro	0,553	71,12	921,34
Fevereiro	0,413	64,30	509,80
Março	0,395	82,93	752,90
Abril	0,225	57,28	287,75
Maio	0,062	37,91	101,02
Junho	0,000	28,09	51,63
Julho	0,000	18,63	12,12
Agosto	0,000	14,44	4,17
Setembro	0,000	23,47	41,34
Outubro	0,149	42,01	163,74
Novembro	0,403	65,95	546,48
Dezembro	0,520	66,23	836,34
Total anual	-	572,36	4228,63

As tabelas 18 e 19 apresentam a variação da concentração e da carga de sedimentos para os quatro cenários simulados.

Tabela 18 - Variação da concentração de sedimentos para os quatro cenários.

Variação da Concentração de sedimentos (%)				
Meses	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Janeiro	100,00	84,39	44,26	37,45
Fevereiro	100,00	94,03	45,65	38,49
Março	100,00	87,04	45,40	43,40
Abril	100,00	73,61	38,17	37,89
Maio	100,00	65,33	38,06	37,82
Junho	100,00	69,51	41,76	38,12
Julho	100,00	72,90	40,56	35,81
Agosto	100,00	77,15	43,15	38,41
Setembro	100,00	87,68	50,81	43,86
Outubro	100,00	85,30	47,31	42,34
Novembro	100,00	84,59	43,71	40,21
Dezembro	100,00	78,49	38,94	34,30

Tabela 19 - Variação da carga de sedimentos para os quatro cenários.

Variação da carga de sedimentos (%)				
Meses	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Janeiro	100,00	84,72	44,37	38,15
Fevereiro	100,00	94,44	51,11	43,45
Março	100,00	88,87	48,77	46,40
Abril	100,00	79,48	38,92	38,32
Maio	100,00	69,46	40,53	40,46
Junho	100,00	70,49	45,73	42,85
Julho	100,00	76,95	36,55	32,19
Agosto	100,00	75,52	39,52	35,82
Setembro	100,00	80,89	49,95	44,91
Outubro	100,00	85,41	42,83	38,24
Novembro	100,00	84,84	40,24	35,95
Dezembro	100,00	83,95	35,69	31,83

A Figura 24 apresenta o gráfico da vazão simulada para os quatro cenários. Pode-se observar que, de acordo com a simulação, os dados de vazão não apresentaram uma alteração significativa nos valores com a modificação dos cenários.

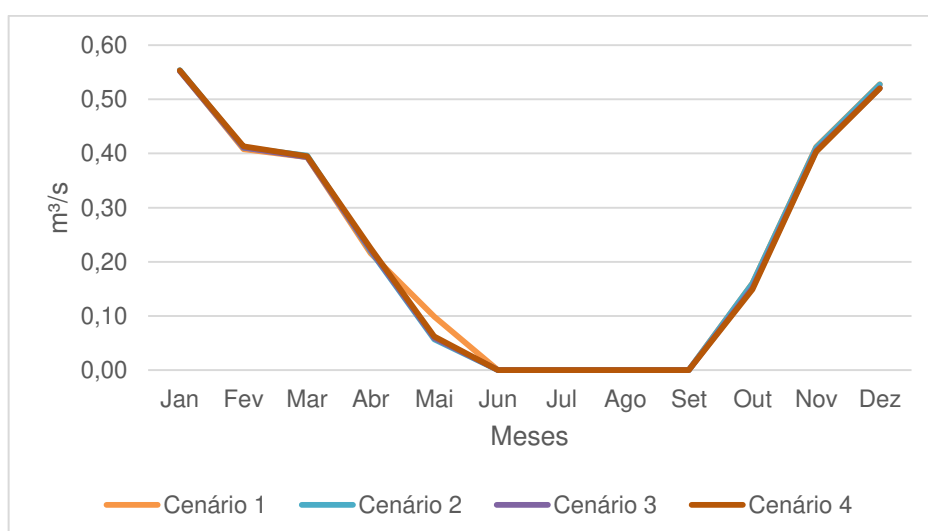


Figura 24 - Gráfico da vazão simulada para os quatro cenários.

A Figura 25 apresenta o gráfico da concentração de sedimentos simulada para os quatro cenários. Pode-se observar uma alteração significativa nos valores simulados para cada cenário em todos os meses analisados. O Cenário 4 apresenta uma redução média de 60,99% na concentração de sedimentos em relação ao Cenário 1, exibindo o melhor desempenho considerando a redução de perda do solo na Bacia.

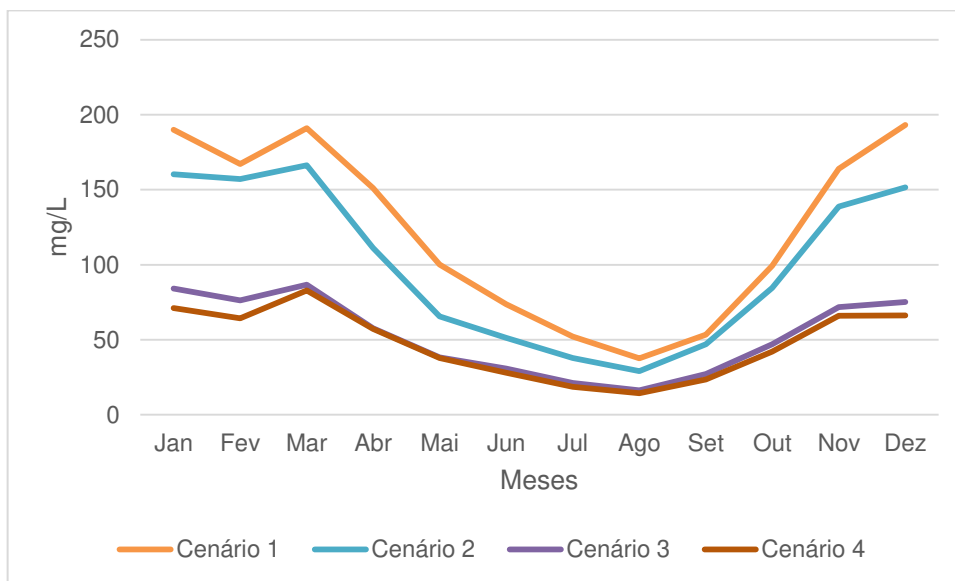


Figura 25 - Gráfico da concentração de sedimentos simulada para os quatro cenários.

A Figura 26 apresenta o gráfico da carga de sedimentos simulada para os quatro cenários. Pode-se observar uma variação considerável nos valores simulados para cada cenário nos meses do período chuvoso (outubro a março). O Cenário 4 apresenta uma redução média de 60,95% na carga de sedimentos em relação ao Cenário 1.

Com base no desempenho dos cenários simulados, pode-se dizer que a simulação do Cenário 4 apresentou os melhores resultados, mostrando-se como cenário ideal para a redução da concentração e carga de sedimentos ao longo da bacia do Ribeirão Candidópolis.

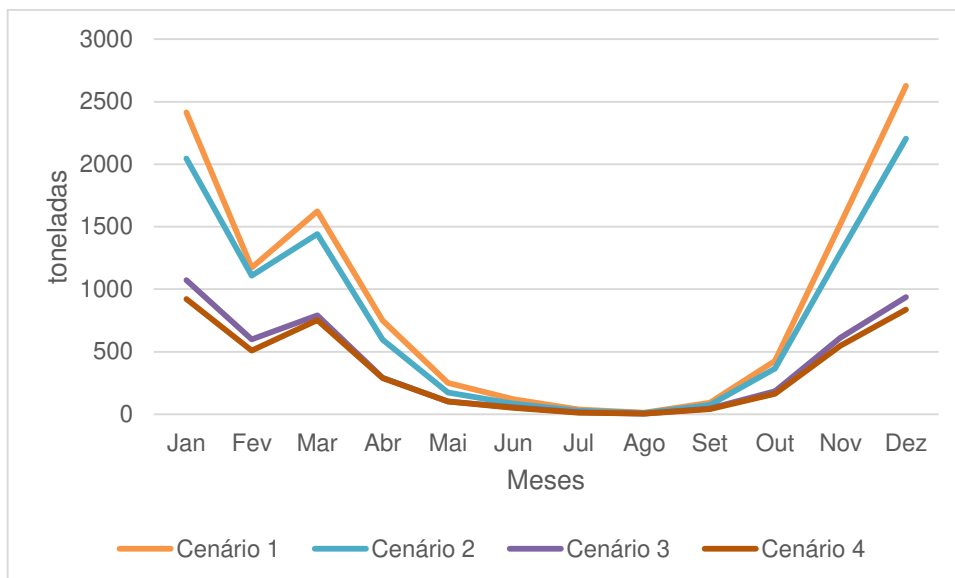


Figura 26 - Gráfico da carga de sedimentos simulada para os quatro cenários.

De maneira geral, o aumento das áreas de vegetação na bacia, de acordo com as simulações realizadas, contribuiu consideravelmente para a minimização da produção de sedimentos na bacia, sendo esta uma intervenção que poderia ser executada para reduzir o assoreamento do reservatório da barragem da ETA Pureza.

5.3 Batimetria

A interpolação dos dados do levantamento batimétrico é apresentada na Figura 27. O círculo amarelo delimita a área principal da barragem e a região fora dele, a área de remanso, formada em períodos em que há maior fluxo de água para o reservatório.

A partir dos modelos gerados da batimetria do reservatório, empregou-se a ferramenta calculadora de *raster* com a função subtração do SIG ArcGIS, com o propósito de encontrar a diferença entre estes e obter a altura da lâmina sedimentada entre os períodos de leitura, apresentada na Figura 28. A cor vermelha indica as regiões de menor profundidade e a verde as regiões de maior profundidade.

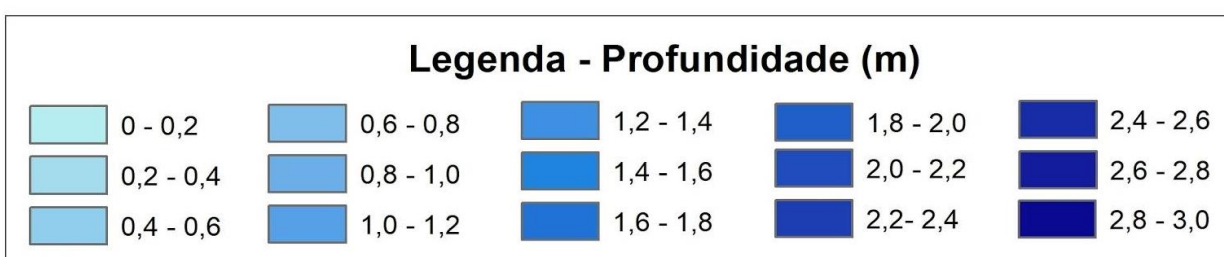
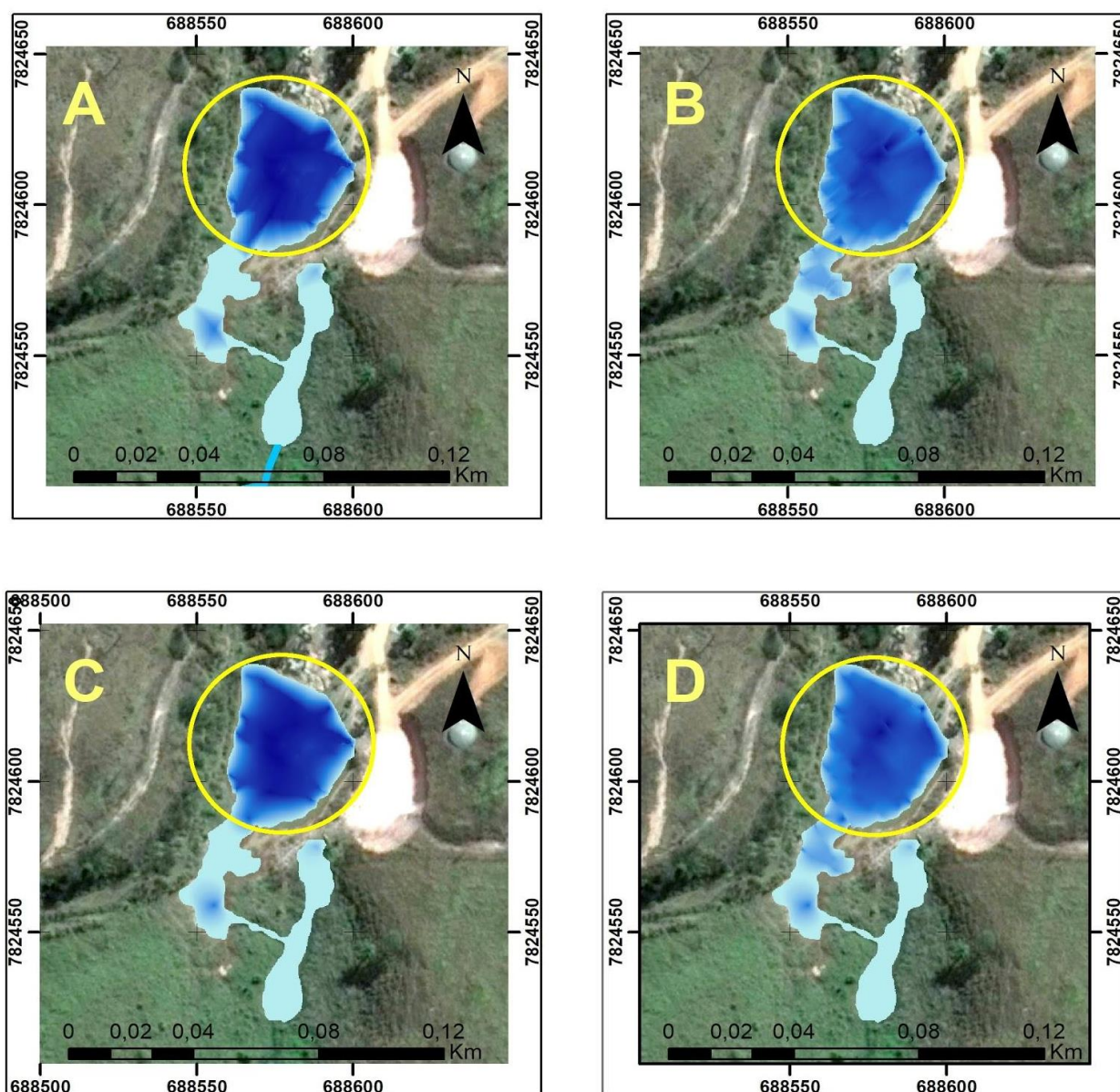


Figura 27 - A: Interpolação da batimetria 1, utilizando o interpolador TIN. B: Interpolação da batimetria 1, utilizando o interpolador Vizinho Natural. C: Interpolação da batimetria 2, utilizando o interpolador TIN. D: Interpolação da batimetria 2, utilizando o interpolador Vizinho Natural.

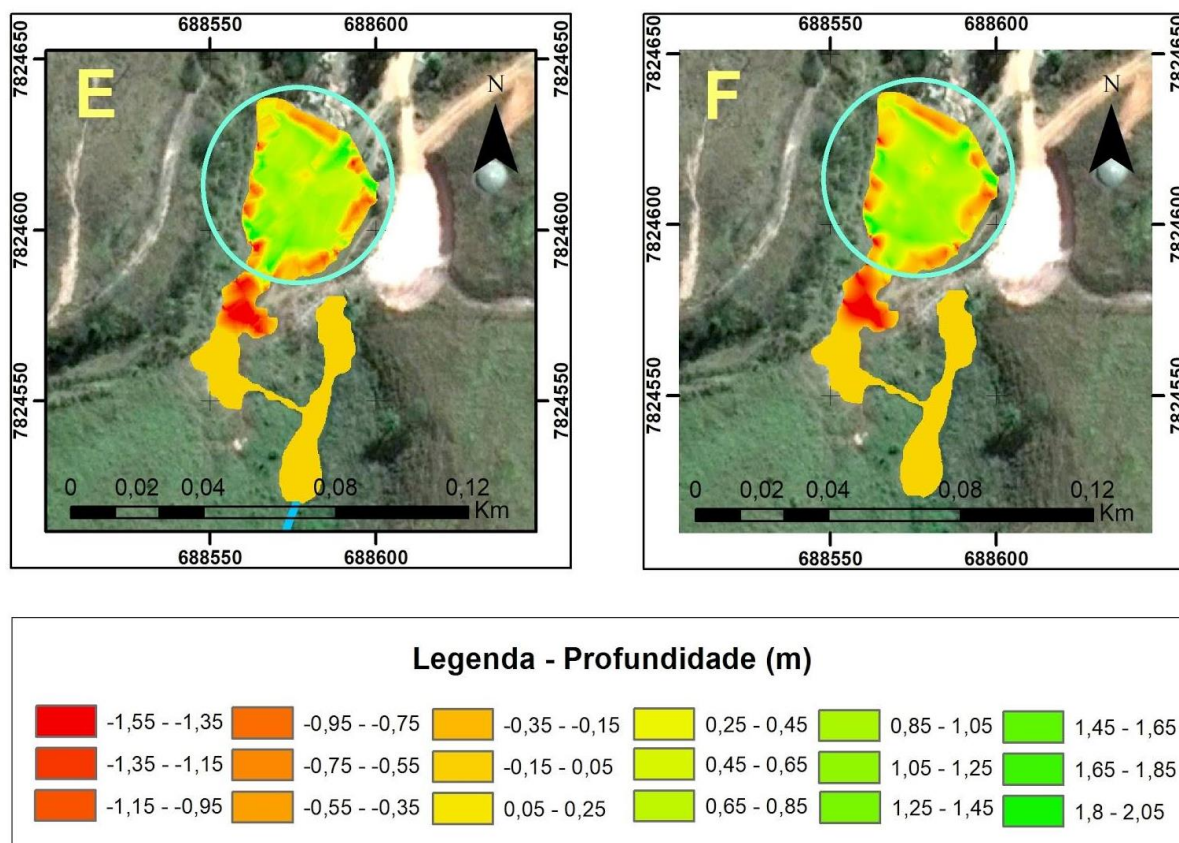


Figura 28 - E: Diferença das interpolações utilizando os interpoladores TIN e Vizinho Natural para a batimetria 1. F: Diferença das interpolações utilizando os interpoladores TIN e Vizinho Natural para a batimetria 2.

Pode-se perceber que a diferença da interpolação empregando tanto o interpolador TIN quanto o Vizinho Natural, apresentou valores que podem ser considerados incoerentes com a realidade. Uma vez que mostrou valores negativos nas extremidades do reservatório indicando que não houve deposição de partículas no período analisado e sim um aprofundamento do leito. Percebe-se ainda valores superiores a 1 m, chegando a 2,05 m de assoreamento em alguns pontos do reservatório, fatos não verificados em campo.

Diante de tais constatações, identificou-se os pontos onde os transectos se sobrepuseram (Figura 7) e realizou-se a diferença pontual nesses locais para obter-se valores mais condizentes com o observado em campo. O resultado é apresentado na Figura 29.

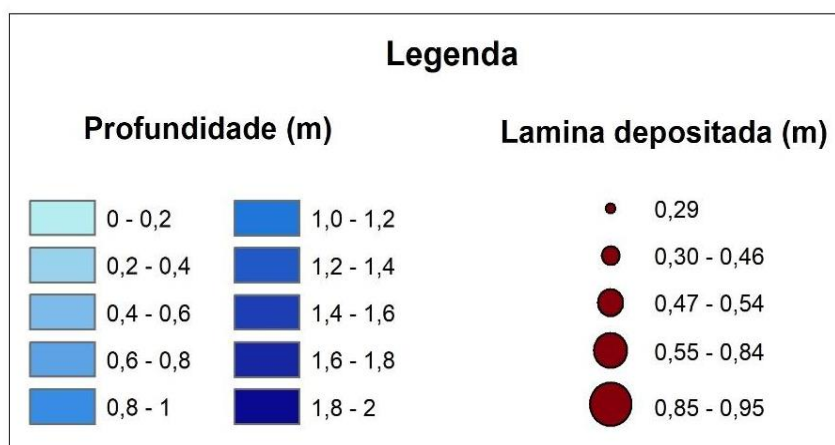
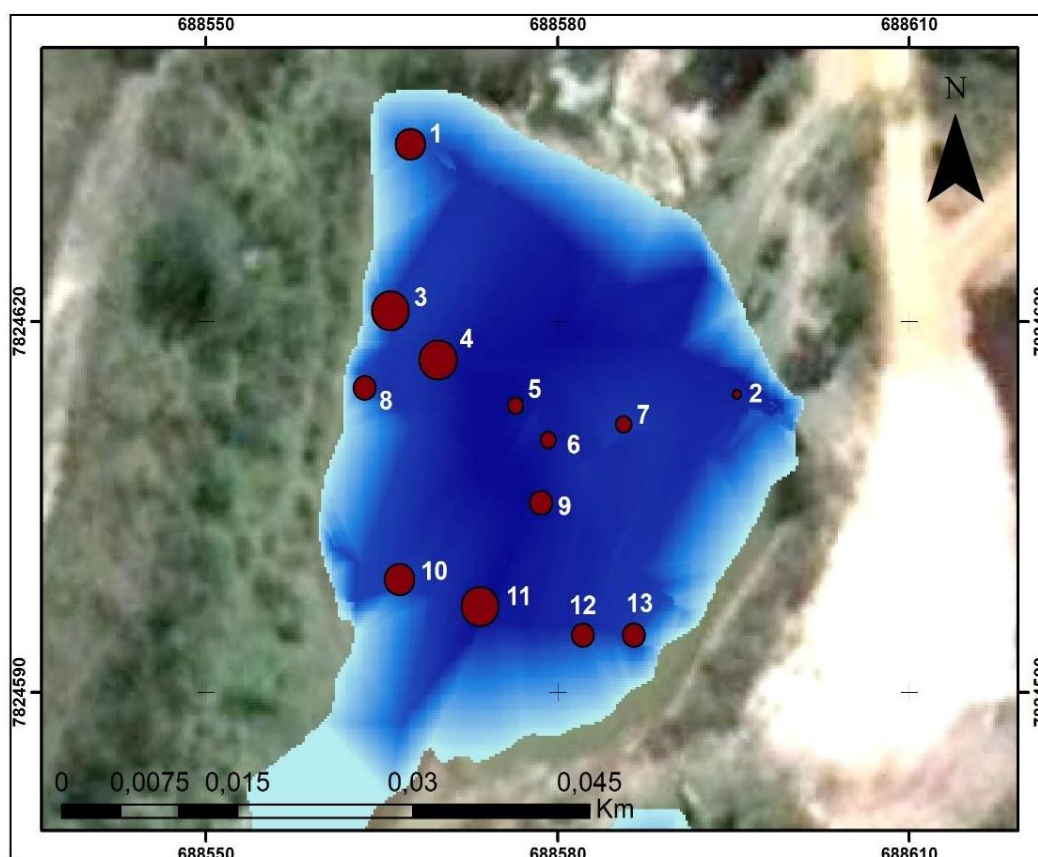


Figura 29 - Lâmina de sedimentos resultante da diferença das batimetrias 1 e 2 dentro da represa empregando-se o modelo TIN e entre os transectos.

A Tabela 20 apresenta a altura da lâmina depositada em cada ponto analisado. Pode-se perceber, analisando a Figura 29 e a Tabela 20, que as diferenças de profundidade entre os transectos não chegaram a 0,54 m na maior parte dos pontos. A discrepância de valores entre a análise pontual e a interpolação indicam que o processo de interpolação da diferença de profundidade empregando transectos (que

neste caso possuem distâncias não superiores a 2 m, portanto transectos próximos) não retratam bem a batimetria do reservatório.

Tabela 20 - Altura da lâmina depositada em cada ponto analisado.

Ponto	Altura da lâmina (m)
1	0,84
2	0,29
3	0,94
4	0,94
5	0,45
6	0,46
7	0,41
8	0,53
9	0,53
10	0,73
11	0,95
12	0,54
13	0,53

Os valores encontrados na diferença pontual, mostram que há uma lâmina sendo depositada neste reservatório, e que esta varia ao longo de sua extensão. Com base nisso, pode-se constatar que a simulação do Modelo SWAT apresentou resultados contundentes, uma vez que se verificou a ocorrência do aporte de sedimentos na bacia ao longo dos meses e essa pode ser verificada a partir da lâmina depositada no reservatório da barragem entre uma batimetria e outra, ou seja, num espaço de tempo de 8 meses.

5.4 Análise da qualidade da água

O resultado das análises das amostras dos pontos de coleta, definidos na Figura 13, é apresentado na Tabela 21, para as campanhas realizadas nos meses de

abril (.1) e dezembro (.2) de 2017. É importante destacar que o período chuvoso na região ocorre entre outubro e março, e o período seco entre abril e setembro.

A sigla ND presente nas tabelas se refere às análises em que não foi detectado um resultado, devido a este estar abaixo do limite mínimo de detecção do método empregado. Já a sigla NO se refere às análises não observadas, ou seja, não realizadas devido à algum fator relacionado à coleta, ou mesmo à análise, que inviabilizou a obtenção dos resultados necessários.

No mês de agosto de 2017, realizou-se a coleta de amostra de água, apenas no ponto P2, na tomada d'água provisória, devido ao nível de água extremamente baixo apresentado pelo reservatório da barragem da ETA Pureza, como pode ser observado na Figura 11, não sendo possível realizar o levantamento batimétrico ou a coleta das amostras nos demais pontos.

As análises desta amostra apontaram um valor de 7,50 NTU para turbidez, 73 PtCo para cor, 29 mg/L ST para sólidos totais, 6,6 mg/L para DBO e valor >1600 para coliformes. De maneira geral, os resultados se mostraram semelhantes aos obtidos na primeira campanha, com exceção dos sólidos totais que foram mais elevados e da DBO que foi mais baixa.

Buscou-se comparar os resultados encontrados para os parâmetros analisados com os limites máximos e mínimos permitidos pela Resolução CONAMA 357 de 2005 (BRASIL, 2005), aplicada a nível nacional, e a Deliberação Normativa nº 1 do COPAM/CERH-MG (MINAS GERAIS, 2008), aplicada a nível estadual, para águas doces de Classe II - águas destinadas para o consumo humano após tratamento convencional. As legislações que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes. Tanto a Resolução CONAMA, quando a Deliberação Normativa do COPAM determinam os mesmos limites para os parâmetros analisados neste estudo.

Tabela 21 - Resultados das análises das amostras de água.

Parâmetros	P1.1	P1.2	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2	P4.1	P4.2
OD (mg/L O ₂)	3,57	5,45	6,30	6,65	5,99	4,95	4,24	4,29
Temperatura (°C)	21,26	22,42	21,46	22,64	21,28	22,50	21,42	22,49
pH	7,53	7,70	8,11	7,79	7,28	7,78	7,09	7,93
Condutividade elétrica (µS/cm)	69	53	60	54	70	53	70	55
Turbidez (NTU)	7,86	37,8	6,97	43,5	8,21	37,2	7,39	38,9
Cor (PtCo)	77	308	64	352	81	314	73	326
DBO (mg/L O ₂)	13,1	7,35	9,65	7,21	NO	7,01	13,32	7,18
Coliformes termotolerantes NMP/100 ml	>1600	>1600	900	>1600	NO	NO	NO	NO
Sólidos totais (mg/L ST)	3	51	5	72	3	84	7	60
Sólidos sedimentáveis (mg/L)	ND	ND	ND	0,1	ND	0,3	ND	0,1

Os valores de oxigênio dissolvido obtidos nos pontos P1 e P4, no período seco, e P3 e P4, no período chuvoso, foram inferiores ao limite mínimo de 5 mg/L O₂, estabelecido pelas legislações. Além disso, os resultados para DBO para os mesmos pontos, foram os mais altos e excederam o limite máximo de 5 mg/L O₂. Notou-se também que no período seco os valores foram mais elevados que no período seco. Isso demonstra que houve um consumo maior de oxigênio para a degradação de matéria orgânica presente na água.

Os resultados para turbidez no período seco foram relativamente baixos quando comparados ao limite máximo permitido de 100 NTU, uma vez que estes variaram entre 6,97 e 8,21 NTU por se tratar de um período sem a ocorrência de precipitação e baixo carreamento de partículas sólidas pelo Ribeirão. Já no período chuvoso, encontrou-se valores de turbidez moderadamente altos quando comparados aos valores das coletas anteriores, dado que estes variaram entre 37,2 e 43,5 NTU devido a ocorrência de precipitação nos dias anteriores à coleta, proporcionando o carreamento de partículas sólidas para dentro do curso d'água e consequentemente para o reservatório.

Os resultados da análise de Cor aparente foram avaliados tomando por base o limite máximo de 75 PtCo, determinado pelas legislações para cor verdadeira, de forma que os valores dos pontos P1 e P3 foram superiores ao limite máximo.

A cor é geralmente um indicador da presença de metais, húmus, plâncton, dentre outras substâncias dissolvidas na água. Ambos os pontos que excederam o limite eram próximos à barragem de controle de nível, podendo sofrer influência do acúmulo de material ali depositado, em função da barreira exercida pela estrutura da barragem. A presença de extensas áreas de pastagem também pode ter contribuído para este resultado.

Os resultados de cor aparente para o período chuvoso excederam o limite máximo estabelecido pelas legislações e são pelo menos três vezes maiores do que os resultados encontrados nas análises anteriores, variando de 308 a 352 PtCo.

A faixa de temperatura medida foi a mesma tal para o mês de abril (21°C), como para o mês de dezembro (22°C). A pequena diferença entre os meses analisados pode-se dar ao fato do mês de abril ser um pouco mais frio que o mês de dezembro, devido a diferença de estações, outono e verão, de modo que a temperatura ambiente exerceu influência na temperatura da água.

Os valores de pH para os quatro pontos, tanto no período seco quanto no chuvoso, se mantiveram dentro do limite estabelecido pelas legislações, entre 6 e 9. Na primeira análise os resultados variaram entre 7,09 e 8,11, já na segunda análise a variação ocorreu entre 7,70 e 7,93.

A condutividade elétrica está relacionada à concentração de íons dissolvidos no curso d'água, deste modo, quanto maior a concentração de íons, maior a condutividade elétrica. Pode-se observar que os valores para condutividade elétrica na primeira campanha variaram entre 60 e 70 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sendo superior aos resultados obtidos na segunda campanha, que variaram entre 53 e 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nota-se que no período chuvoso ocorreu uma diluição na concentração de íons, reduzindo os valores de condutividade elétrica.

A presença de coliformes na água indica poluição, com possibilidade de haver a existência de organismos patogênicos. A quantidade de coliformes encontrada no período chuvoso pode ser considerada maior do que no período seco, devido ao valor máximo determinado pela análise de tubos múltiplos ser de 1600 NMP/100 ml. Para ambos os pontos analisados na segunda campanha o valor foi superior a 1600 NMP/100 ml, provavelmente em consequência do material carregado pelo escoamento superficial das áreas de pastagem da bacia, bem como de áreas residenciais devido à ausência de um sistema de esgoto adequado, visto que a área da bacia é predominantemente rural.

Os sólidos totais são determinados pela quantidade de sólidos suspensos e dissolvidos em uma amostra de água. Observa-se que a quantificação dos sólidos foi maior no período chuvoso, visto que os resultados variaram entre 51 e 84 mg/L ST e no período seco entre 3 e 7 mg/L ST.

Para a análise de sólidos sedimentáveis, na primeira campanha não foi detectado um valor mínimo para as amostras analisadas. Entretanto, na segunda campanha os valores variaram entre 0,1 e 0,3 mg/L, enfatizando a maior presença de sólidos no período chuvoso.

Assim, as análises realizadas confirmam o aporte de sedimentos ao reservatório e demonstram a maior intensidade desta deposição no período chuvoso, estando em consonância com os dados simulados.

Ressalta-se que existe uma relação direta entre o uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas e a qualidade da água dos mananciais. Menezes *et al.* (2016) identificou que áreas de vegetação preservadas proporcionam a manutenção da

qualidade da água atuando como uma espécie de filtro. O autor constatou que em áreas mais preservadas, sem a influência antrópica, os valores para OD eram mais elevados e os valores para parâmetros como DBO, condutividade elétrica e sólidos totais eram mais baixos.

Diante do exposto, pode-se dizer que os cenários 3 e 4 simulados proporcionariam uma melhora da qualidade da água na bacia, visto que os cenários possuem maiores áreas de vegetação a partir da introdução das áreas de APP e da alteração das áreas de pastagem por agrofloresta.

6 CONCLUSÃO

Embora o Modelo SWAT tenha sido desenvolvido nos Estados Unidos e possua um banco de dados mais específico para os usos e tipos de solo do País, é possível realizar a inserção de novas informações e ainda associar algumas das classificações existentes de forma que se adequem à realidade da área estudo.

A calibração do Modelo foi de fundamental importância para o ajuste dos dados, embora não tenha sido perfeito, de forma que o Modelo SWAT pudesse simular os cenários propostos tendo como base informações mais aproximadas das observadas, e, conseqüentemente, gerando resultados mais coerentes à realidade da bacia estudada.

Analisando os resultados obtidos na simulação dos quatro cenários, foi possível perceber que o tipo uso e ocupação do solo exerceu grande influência na geração de sedimentos na Bacia do Ribeirão Candidópolis. O Cenário 1, quando comparado com os demais cenários, apresenta as maiores concentrações e cargas de sedimentos, em virtude do emprego do uso do solo atual, que possui predominância de pastagens em mais de 50% da área da Bacia. Portanto, as áreas de pastagens podem ser consideradas mais suscetíveis à erosão, propiciando o carreamento de partículas sólidas desagregadas na ocorrência de eventos de precipitação.

Esta suposição pode ser embasada pelos resultados obtidos a partir da simulação do Cenário 3, em que o uso das áreas de pastagem foi alterado para agrofloresta e a redução da produção de sedimentos foi maior do que a observada no Cenário 2, em que foi inserido áreas de APP nas margens dos cursos d'água e nascentes. Foi possível perceber que apesar da inserção de vegetação densa para proteção dos canais da Bacia, a alteração da pastagem proporcionou melhor desempenho devido ao tamanho da área de uso alterada.

Deste modo, o Cenário 4, em que se combinou as áreas de APP e a alteração das áreas de pastagem por agrofloresta, mostrou-se o melhor cenário visando a redução do escoamento superficial e da perda do solo, de maneira que possa haver a diminuição do transporte e acúmulo de sedimentos no reservatório da barragem da ETA Pureza, em Itabira – MG.

Fundamentado nos resultados gerados pelas simulações realizadas, verificou-se a aplicabilidade do Modelo SWAT na estimativa da produção de sedimentos a partir da alteração de cenários em função do uso e ocupação do solo, sendo o Modelo

SWAT uma ferramenta importante para o planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas, auxiliando nos processos de tomada de decisão referentes ao manejo do solo visando a promoção e manutenção dos recursos hídricos. Diante do exposto, tem-se o embasamento necessário para que o setor público do município de Itabira possa analisar os impactos causados pela intensa pressão imobiliária em direção à Bacia do Ribeirão Candidópolis e as consequências geradas para este principal manancial de abastecimento público da cidade.

A interpolação dos dados obtidos na batimetria não apresentou diferenças significativas entre os modelos gerados pelos interpoladores empregados para quantificar a lâmina de sedimentos depositada no reservatório entre uma batimetria e outra, e ambos não apresentaram um bom resultado, gerando profundidades que não são reais.

O levantamento batimétrico possibilitou a constatação em campo da ocorrência do aporte de sedimentos ao longo da Bacia, a partir da análise de diferença pontual dos pontos de sobreposição dos transectos realizados nas duas batimetrias, a primeira em abril e a segunda em dezembro, uma vez que a interpolação dos dados obtidos não foi satisfatória. Com base na diferença pontual, constatou-se a deposição de sedimentos no reservatório da barragem ao longo dos meses analisados.

As análises de amostras de água apontaram uma variação dos dados obtidos em consequência da sazonalidade definida para a coleta das amostras. As amostras coletadas no período seco apresentaram valores maiores para os parâmetros DBO e condutividade elétrica, devido à maior concentração de matéria orgânica e íons na água, respectivamente. Os parâmetros cor, turbidez, coliformes totais, sólidos totais e sólidos sedimentáveis foram mais elevados no período chuvoso, em função do escoamento superficial e carreamento de sedimentos ocasionados em função da ocorrência de precipitação.

Ressalta-se a existência de uma relação direta entre o uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas e a qualidade da água dos mananciais. Áreas mais preservadas, sem a influência antrópica, propiciam o aumento da concentração de OD e a redução dos valores para parâmetros como DBO, condutividade elétrica e sólidos totais. Diante do exposto, pode-se dizer que os cenários 3 e 4 simulados proporcionariam uma melhora da qualidade da água na Bacia, visto que estes cenários possuem maiores áreas de vegetação a partir da introdução das áreas de APP e da alteração das áreas de pastagem por agrofloresta.

A análise das características morfométricas possibilitou o entendimento do comportamento do escoamento superficial e aporte de sedimentos na Bacia do Ribeirão Candidópolis. Constatou-se que a Bacia possui um formato alongado, favorecendo o escoamento superficial e carreamento de sedimentos. Foi possível constatar também que a bacia possui baixa capacidade de drenagem. O índice de sinuosidade demonstrou que o canal principal da bacia é mais retilíneo, permitindo que a velocidade de escoamento do canal não seja afetada por meandros e assim propiciando o alcance do exutório do canal de forma mais rápida, o que contribui para a deposição de sedimentos no reservatório da barragem localizado próximo ao exutório, ocasionando o assoreamento do mesmo.

A pesquisa atingiu os objetivos propostos na medida em que foi possível avaliar a aplicabilidade do modelo SWAT na estimativa da produção de sedimentos na Bacia do Ribeirão Candidópolis, causa o assoreamento do reservatório da barragem de controle de nível da ETA Pureza, a partir da simulação de cenários que propiciassem a compreensão dos efeitos das mudanças no uso e ocupação do solo.

Foi possível também verificar, estatisticamente, o desempenho do Modelo SWAT na simulação de dados hidrológicos e sedimentológicos e identificar intervenções para minimizar a produção de sedimentos na Bacia e assoreamento do reservatório da barragem, a partir do melhor cenário simulado.

7 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Pôde-se perceber a grande influência nos resultados da simulação com o emprego de séries históricas contendo muitas falhas, tendo sido necessário utilizar os dados de uma estação meteorológica localizada em outra bacia, por serem mais consistentes. A utilização de dados locais que representassem melhor o comportamento climatológico da área de estudo, proporcionaria resultados mais próximos entre os valores observados e simulados.

A redução no espaçamento dos transectos, ou mesmo a fixação de marcadores que possibilitassem a execução do mesmo trajeto em ambas as batimetrias poderia melhorar os resultados gerados pela interpolação. Também seria interessante a adoção de pontos de controle a fim de se verificar a precisão do mapa batimétrico em cada levantamento.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SNIRIVASAN, R. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, 2007, p. 413-430.

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, 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**, v. 524, 2015, p. 733-752.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, 2013, p. 711-728.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22nd ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2012.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEISTCH, S. L. **Soil and Water Assessment Tool**: Input/output documentation. Texas Water Resources Institute, 2012, 650p.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modelling and assessment. Part 1: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 14, 1998, p. 73-89.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação de Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BETRIE, G. D.; MOHAMED, Y. A.; VAN GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, 2011, p. 807-818.

BISANTINO, T.; BINGNER, R.; CHOUAIB, W.; GENTILE, F.; TRISORIO, L. G. Estimation of runoff, peak discharge and sediment load at the event scale in a medium-size Mediterranean watershed using the ANNAGNPS model. **Land Degradation & Development**, v. 26, 2015, p. 340-355.

BORRELLI, P.; MÄRKER, M.; SCHÜTT, B. Modelling Post-Tree-Harvesting soil and sediment deposition potential in the Turano river basin (Italian central Apennine). **Land Degradation & Development**, v. 26, 2015, p. 356–366.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências - Conama. 2005.

_____. **Lei nº 2914, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, 2012.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **Int J Agric & Biol Eng.**, v. 8, 2015, 27 p.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 21, 2016, p. 53-64.

CAMARGO, E; DRUCK, S; CAMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: DRUCK, S. *et al.* (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2000. cap. 3, p. 1-37.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994, 372 p.

CARVALHO, N. O. **Assoreamento de reservatórios**. 2012. Disponível em: <http://www2.td.utfpr.edu.br/enes/arquivos/Minicurso_NEWTON.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2016.

CHAPLOT, V.; SALEH, A.; JAYNES, D. B.; ARNOLD, J. G. Predicting water, sediment and NO₃-N loads under scenarios of land-use management practices in a flat watershed. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 154, 2004, p. 271-293.

CURTARELLI, M.; LEÃO, J.; OGASHAWARA, I.; LORENZZETTI, J.; STECH, J. Assessment of spatial interpolation methods to map the bathymetry of an Amazonian hydroelectric reservoir to aid in decision making for water management. **International Journal of Geo-Information**, v. 4, 2015, p. 220-235.

DANTAS, J. C.; MEDEIROS, I. C.; OLIVEIRA, N. M.; SILVA, R. M. Modelagem hidrossedimentológica para a bacia do Alto Rio Paraíba. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, XXI, 2015, Brasília. Anais.

DI LUZIO, M.; ARNOLD, J. G.; SRIVANSAN, R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. **Hydrological Processes**, v. 19, 2005, p. 629–650.

DILL, P. R. J. **Assoreamento do reservatório do Vacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da bacia hidrográfica contribuinte**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

DNH. DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **ESPECIFICAÇÕES DA OHI PARA LEVANTAMENTOS HIDROGRÁFICOS**. 5ª Edição, 2008.

DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model: current developments and applications. **Transactions of the ASABE**, v. 53, 2010, p. 1423–1431.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83 p.

FUNARBE. INSTITUTO ARTHUR BERNARDES. **Elaboração de diagnósticos socioambientais na bacia do Ribeirão Candidópolis, bem como o cálculo de valoração econômica do serviço ambiental a ser pago aos produtores rurais**. Viçosa, 2014. Relatório final. Capítulo 2. 251 p.

GASSMAN, P.; REYES, M.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, 2007, p. 1211–1250.

GESSESE, A.; YONAS, M. Prediction of sediment inflow to legedadi reservoir using SWAT watershed and CCHE1d sediment transport models, Nile basin. **Nile Water Engineering Scientific Magazine**, v. 1, 2008, p. 65–74.

HUNINK, J. E.; NIADAS, I. A.; ANTONAROPOULOS, P.; DROOGERS, P.; DE VENTE, J. Targeting of intervention areas to reduce reservoir sedimentation in the Tana catchment (Kenya) using SWAT. **Hydrological Sciences Journal**, v. 58, 2013, p. 1–15.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: Itabira**. Disponível em:

<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=313170&search=minas-gerais|itabira|infograficos:-informacoes-completas>>. Acesso em: 16 nov. 2016.

ITABIRA. **Plano Diretor Participativo do Município de Itabira**. Itabira: Prefeitura Municipal de Itabira, Fundação Israel Pinheiro, 2014. Disponível em: <http://www.itabira.mg.gov.br/portal/wp-content/uploads/2014/10/PDM_ITA_leitura-tecnica_R00.compressed.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

LAMBA, J.; THOMPSON, A. M.; KARTHIKEYAN, K. G.; PANUSKA, J. C.; GOOD, L. W. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model. **International Journal of Sediment Research**, 2016, p. 1-9.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Análise Morfométrica da Bacia do Rio do Tanque, MG-BRASIL. **Revista Escola de Minas**, v. 54, 2001, p. 121-126

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambi-Agua**, v. 5, 2010, p. 158-174.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; FONSECA, A. S.; LIMA, D. C. Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: Simulação de cenários. **Ambi-Agua**, v. 6, 2011, p. 282-294.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. 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, 2012, p. 623-634.

LICCIARDELLO, F.; TOSCANO, A.; CIRELLI, G. L.; CONSOLI, S.; BARBAGALLO, S. Evaluation of sediment deposition in a Mediterranean reservoir: comparison of long term bathymetric measurements and SWAT estimations. **Land Degradation & Development**, 2016, p. 1-13.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, 2003, p.727-733.

MARCHIORO, E; FERNANDES, N. F; MACEDO, J. R.; BHERING, S. B; GONÇALVES, A. O; CAIADO, M. A. C. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2011, p. 29-38.

MARTINS, M. P. **Atlas de Itabira**. Itabira: Prefeitura Municipal, 2006. 162 p.

MENEZES, J. P. C.; BITTENCOURT, R. P.; FARIAS, M. S.; BELLO, I. P.; FIA, R.; OLIVEIRA, L. F. C. Relações entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Eng. Sanit. Amb.**, v. 21, 2016, p. 519-534.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, 2003, p. 761-799.

MERWADE, V. Effect of spatial trends on interpolation of river bathymetry. **Journal of Hydrology**, v. 371, 2009, p. 169-181.

MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. 2008.

MOCKUS, V. Hydrologic Soil Groups. In: **USDA-SCS**. National Engineering Handbook: Section 4, Chapter 7, Hydrology. 1972.

MONTE-MOR, R. A. **Análise de Processos Hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro**. 307 f. 2012. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas gerais, Belo Horizonte, 2012.

MORAIS, R. P.; CARVALHO, T. M. Cobertura da terra e parâmetros da paisagem no município de Caracaraí - Roraima. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, 2013, p. 46-59.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NASCIMENTO, N. S.; VIEIRA, E. M.; GONÇALVES, J. A. C.; CUNHA, G. P. Q. Estudo da vulnerabilidade ambiental em uma bacia hidrográfica empregando hierarquia nominal e operador local. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, 2016, p. 897-916.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hidrolody**, v. 10, 1970, p. 282-290.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J.; KINIRY, J. R.; WILLIAM, J. R. **Soil and Water Assessment Tool User's Manual**, Version 2000. Blackland Research Center: Temple TX. 2002.

NETO, J. O. M. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 149 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

PÁDUA, L. H. R. **Regionalização de hidrogramas unitários em bacias não monitoradas do estado de Minas Gerais**. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

PAIVA, E. M. C. Evolução do processo erosivo acelerado em trecho do Arroio Vacacai Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, 2001, p. 129-135.

PASSOS, F. O. **Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da bacia do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT**. 2017. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal Itajubá, Itajubá, 2017.

PEREIRA, D. R. **Simulação Hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Pomba, usando o modelo SWAT**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2013.

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

PINTO, C. S. B.; FERNANDES, N. F.; BHERING, S. B. 2013. Modelagem hidrossedimentológica e manejo do solo: aplicação do SWAT na bacia de drenagem

experimental do córrego Barro Branco, RJ. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, XVI, 2013, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu, 2013, INPE.

ROSA, D. R. Q. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

SAAE. SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ITABIRA. **Relatório da implantação e dos resultados do Projeto Mãe D'água de Itabira-MG**. Itabira, 2010.

SAAE. SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE ITABIRA. **Projeto Mãe D'água: Revitalização do manancial da bacia do Ribeirão Candidópolis**. Itabira, 2015.

SANTOS, A. M.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. **Ambiente & Água**, v. 7, 2012, p. 195-211.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

SCOLFORO, J. R. S.; CARVALHO, L. M. T.; OLIVEIRA, A. D. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais: Componentes Geofísico e Biótico**. 22a ed. Lavras: Editora UFLA, 2008.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2004, 140 p.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; AMORIM, R. S. S.; PAIVA, K. W. N. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, v. 25, 2005, p. 409-419.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, v. 30, 1994, p. 453-462.

TAGUAS, E. V.; GÓMEZ, J. A.; DENISI, P.; MATEOS, L. Modelling the rainfall runoff relationships in a large olive orchard catchment in southern Spain. **Water Resources Management**, v. 29, 2015, p. 2361–2375.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: MMA, 2009, 302 p.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

WILLIAMS, J. R. The EPIC model. In: SINGH. V. P (ed.). **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1995. cap. 11, p. 909-1000.

ZIGOMAR, M. S.; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v .7, 2003, p. 18-23.

ANEXO – TABELAS DE CARACTERIZAÇÃO E CLASSES DE SOLO

Tabela 1A - Características e classes de solos brasileiros integrantes do Grupo hidrológico A.

Grupo hidrológico A
Características dos solos
• Muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); • Alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; • Porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); • Textura média; • Textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; • Bem drenados ou excessivamente drenados; • Argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; • Textura dos horizontes superficial e subsuperficial: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa.
Solos integrantes
Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho (ambos de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade); Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo (ambos de textura média, mas com horizonte superficial não arenoso).

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

Tabela 2A - Características e classes de solos brasileiros integrantes do Grupo hidrológico B.

Grupo hidrológico B
Características dos solos
• Profundos (100 a 200 cm); • Moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; • Porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; • Textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; • Textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; • Argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; • Textura dos horizontes superficial e subsuperficial: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa.
Solos integrantes
Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo (ambos de textura média, mas com horizonte superficial de textura arenosa); Latossolo Bruno; Nitossolo Vermelho; Neossolo Quartzarênico; Argissolo Vermelho ou Vermelho Amarelo (de textura arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta).

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

Tabela 3A - Características e classes de solos brasileiros integrantes do Grupo hidrológico C.

Grupo hidrológico C
Características dos solos
• Profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); • Baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; • Gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; • Associados a argila de atividade baixa (Tb); • Textura nos horizontes superficial e subsuperficial: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.
Solos integrantes
Argissolo (pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta) ou Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo (ambos profundos e apresentando mudança textural abrupta); Cambissolo (de textura média) e Cambissolo Háplico ou Húmico (mas com características físicas semelhantes aos Latossolos - Latossólico); Espodossolo Ferrocárbico; Neossolo Flúvico.

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

Tabela 4A - Características e classes de solos brasileiros integrantes do Grupo hidrológico D.

Grupo hidrológico D
Características dos solos
• Taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância à erosão; • Rasos (prof. < 50 cm); • Pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; • Argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); • Orgânicos.
Solos integrantes
Neossolo Litólico; Organossolo; Gleissolo; Chernossolo; Planossolo; Vertissolo; Alissolo; Luvissolo; Plintossolo; solos de mangue; afloramentos de rocha; demais Cambissolos que não se enquadram no grupo C; Argissolo Vermelho Amarelo e Argissolo Amarelo (ambos pouco profundos e associados à mudança textural abrupta).

Fonte: Adaptado de Sartori (2004).

Tabela 5A - Características físicas da classe Latossolo Vermelho.

Latossolo Vermelho					
NLAYERS	5		HYDGRP	A	
SOL_ZMX	1500		ANION_EXCL	0,30	
Característica	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
SOL_Z	110	290	670	940	1500
SOL_BD	1,60	1,50	1,70	1,40	1,50
SOL_AWC	0	0,10	0	0	0,10
SOL_CBN	0,80	0,50	0,30	0,30	0,20
SOL_K	90	90	90	12,50	12,50
CLAY	12,60	14,50	19,80	24	23,80
SILT	9,40	5,60	9,40	11,10	9,80
SAND	78	79,90	70,80	64,90	66,40
ROCK	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0,15	0,15	0
USLE_K	0,12	0,13	0,13	0,14	0

Fonte: Adaptado de Baldissera (2005).

Tabela 6A - Características físicas da classe Latossolo Vermelho Amarelo.

Latossolo Vermelho Amarelo				
NLAYERS	4	HYDGRP	A	
SOL_ZMX	1500	ANION_EXCL	0,38	
Característica	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
SOL_Z	360	760	1210	1500
SOL_BD	1,5	1,7	1,7	1,6
SOL_AWC	0,30	0,30	0,40	0,40
SOL_CBN	1,10	0,20	0,50	0,40
SOL_K	12,50	12,50	12,50	12,50
CLAY	30,30	29,80	29,50	35,60
SILT	16	14,30	13,80	15,90
SAND	53,70	55,90	56,70	48,50
ROCK	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K	0,13	0,14	0,14	0,14

Fonte: Adaptado de Baldissera (2005).

Tabela 7A - Características físicas da classe Cambissolo.

Cambissolo					
NLAYERS	5		HYDGRP	C	
SOL_ZMX	1170		ANION_EXCL	0,47	
Característica	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5
SOL_Z	300	600	800	1100	1170
SOL_BD	1,60	1,40	1,40	1,80	1,40
SOL_AWC	0,15	0,18	0,18	0,18	0,18
SOL_CBN	1,40	0,60	0,40	0,40	0,30
SOL_K	12,50	12,50	12,50	40	12,50
CLAY	36,30	34	28,40	26,80	27
SILT	18	35,70	37,70	43,70	39,30
SAND	45,70	30,30	33,90	29,50	33,70
ROCK	0	0	0	0	0
SOL_ALB	0,15	0,15	0	0,15	0
USLE_K	0,05	0,16	0,17	0,18	0

Fonte: Adaptado de Baldissera (2005).

Tabela 8A - Características físicas da classe Gleissolo.

Gleissolo				
NLAYERS	4	HYDGRP	D	
SOL_ZMX	1300	ANION_EXCL	0,39	
Característica	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
SOL_Z	80	450	750	1300
SOL_BD	1,4	1,5	1,6	1,7
SOL_AWC	1	0,1	0,7	0,5
SOL_CBN	2,80	0,7	0,3	0,3
SOL_K	12,50	5	40	12,50
CLAY	26,40	37,80	25,60	21,50
SILT	71,50	56,30	62,40	57,30
SAND	2,10	5,90	12	21,20
ROCK	0	0	0	0
SOL_ALB	0,16	0,16	0,16	0,16
USLE_K	0,31	0,30	0,26	0,21

Fonte: Adaptado de Baldissera (2005).

Tabela 9A- Características físicas da classe Neossolo.

Neossolo			
NLAYERS	1	HYDGRP	C
SOL_ZMX	1270	ANION_EXCL	0,5
Característica		Camada 1	
SOL_Z		1270	
SOL_BD		1,3	
SOL_AWC		0,19	
SOL_CBN		10	
SOL_K		9	
CLAY		17	
SILT		9,9	
SAND		73	
ROCK		0	
SOL_ALB		0,15	
USLE_K		0,13	

Fonte: Adaptado de Baldissera (2005).