



Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA

FLÁVIA DANIELLE DE SOUZA MENDES

**Avaliação da aplicação do modelo SWAT para simulações hidrológicas na
bacia hidrográfica do rio Bicudo, em Minas Gerais**

Itabira - Minas Gerais

2021



Flávia Danielle de Souza Mendes

Avaliação da aplicação do modelo SWAT para simulações hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Bicudo, em Minas Gerais

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Metodologia para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Aprovada em 20 de maio de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Neves Lima

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas / Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Prof.^a Dr.^a. Lilia Maria de Oliveira

Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental / Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Prof. Dr. Roberto César Almeida Monte-Mor (Orientador)

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas / Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Professora Convidada:

Prof.^a Dr.^a. Eliane Maria Vieira (Coorientadora)

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas / Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Itabira – Minas Gerais

2021

AGRADECIMENTOS

Grata a Deus por me conceder saúde para alcançar o privilégio desta conquista e força para superar os desafios do percurso.

Agradeço aos meus irmãos, pelo apoio técnico e emocional.

Aos meus pais, por me ensinarem o valor dos estudos.

Ao incentivo e à motivação de minha família e meus amigos.

Aos ensinamentos e orientações dedicados pelos professores Roberto e Eliane.

Aos companheiros de trabalho da Agência Peixe Vivo, pela compreensão e pelas contribuições ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas de turma que proporcionaram boas lembranças das viagens semanais para Itabira/MG e aos colegas dos demais polos do mestrado ProfÁgua, pelas enriquecedoras trocas de experiências e conhecimentos.

Aos professores do polo mineiro do Mestrado ProfÁgua, por compartilharem seu conhecimento e experiência, com tanta dedicação.

À banca examinadora por contribuir com a consolidação deste trabalho.

Às entidades e aos pesquisadores do país, que compartilham livremente dados e informações, potencializando o desenvolvimento científico e tecnológico brasileiro.

Agradeço a todos que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a materialização deste projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE N°. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado.

Perto de muita água, tudo é feliz.

João Guimarães Rosa

RESUMO

MENDES, Flávia Danielle de Souza. *M. Sc.* 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021.

A escassez hídrica e o intenso uso da água pelo setor agropecuário têm provocado conflitos sociais e problemas ambientais na bacia hidrográfica do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas, em Minas Gerais. A bacia hidrográfica do rio Bicudo possui alguns rios intermitentes, fazendo com que a disponibilidade hídrica nos períodos de seca seja um dos maiores desafios para a sua população, predominantemente rural, que utiliza a água na produção agrícola e pecuária. No ano de 2015 foram construídas 308 bacias de contenção (barraginhas) na bacia hidrográfica do rio Bicudo, no território dos municípios de Corinto/MG e Morro da Garça/MG. Essas obras foram financiadas com o recurso da cobrança pelo uso da água na bacia do rio das Velhas. Nesse contexto, este estudo tem por objetivo investigar se os projetos de recuperação de áreas degradadas, neste caso as barraginhas, foram capazes de impactar no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Bicudo. Para isto, a bacia em análise foi modelada com o auxílio do *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT no intuito de simular os efeitos da implantação das bacias de contenção no fluxo das águas do rio Bicudo. Os parâmetros do modelo foram ajustados, empregando-se os registros da estação fluviométrica “Ponte do Bicudo” no período de 2002 a 2014. Com o apoio do *software* SWAT-CUP, foram obtidos o coeficiente de Nash e Sutcliffe (NS) de 0,67 e 0,75 e o percentual de tendência (PBIAS) de -5,1% e 9,5%, respectivamente, para as etapas de calibração e validação do modelo. Esses resultados dos índices NS e PBIAS demonstram que o modelo elaborado para a bacia do rio Bicudo apresentou um desempenho considerado bom com base no índice NS e muito bom com relação ao índice PBIAS. Foi comparado o cenário com a presença das bacias de contenção construídas em 2015, com o cenário simulado que apresenta a ausência dessas intervenções. Constatou-se que o modelo hidrológico construído para a bacia do rio Bicudo demonstrou sensibilidade às alterações realizadas no modelo digital de elevação – MDE, no qual foram representadas as bacias de contenção. O cenário com a presença das barraginhas apresentou vazões de pico menores que as simuladas no cenário sem essas intervenções, o que indica que a presença dessas intervenções em conjunto é capaz de promover a redução das vazões de pico em eventos chuvosos críticos, favorecendo a permanência da água no interior dos limites da bacia hidrográfica por um tempo maior. Apesar das incertezas existentes no uso de ferramentas de simulação hidrológica, os resultados gerados neste trabalho são úteis para gestores de recursos hídricos, para os membros dos comitês de bacias hidrográficas e para os representantes das Agências de Bacias Hidrográficas brasileiras. Este estudo poderá contribuir para que essas entidades desenvolvam estratégias orientadas para a preservação dos recursos hídricos e dos solos em bacias hidrográficas com características similares às do rio Bicudo.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. SWAT. Bacias de contenção.

ABSTRACT

MENDES, Flávia Danielle de Souza. *M. Sc.* 2021. 99 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Itabira, Minas Gerais, 2021.

The scarcity of water and the intense use of this resource by agricultural sector have caused social conflicts and environmental problems in the hydrographic basin of Bicudo river, an affluent of Velhas river, in Minas Gerais. The hydrographic basin of Bicudo river has some intermittent rivers, which makes water availability one of the biggest challenges for its population in periods of drought, because they are predominantly rural and use water in agricultural and livestock production. In 2015, 308 containment basins, named “barraginhas”, were built in the cities of Corinto/MG and Morro da Garça/MG, where the basin of Bicudo river is located. These constructions were financed by tax from use of water in the basin of Velhas river. In this context, this study aims to investigate whether the projects oriented to recovery of degraded areas, in this case, the containment basins, were able to promote impact over the hydrological behavior of hydrographic basin of Bicudo river. To this purpose, the basin analyzed was modeled by using the Soil and Water Assessment Tool - SWAT to simulate the containment basins implantation effects on water flow of Bicudo river. The model parameters were adjusted using the register of fluviometric station “Ponte do Bicudo” from 2002 to 2014. With the support of SWAT-CUP software, the Nash and Sutcliffe (NS) coefficient of 0,67 and 0,75 and the trend percentage (PBIAS) of -5.1% and 9.5%, were found in calibration and validation steps, respectively. These results from the NS and PBIAS indexes demonstrate that the model elaborated for Bicudo river basin performed well, based on NS index, and very well based on PBIAS index. The scenario with the containment basins built in 2015 was compared to the simulated scenario without these interventions. After completing the simulations, it was found that the SWAT model showed sensitivity to changes executed at digital elevation model - MDE, to represent the presence of containment basins. The scenario with “barraginhas” showed lower peak flows than that simulated without them. This result indicates that the presence of these interventions together is capable of promoting peak flow reduction in critical rainy events, favoring the permanence of water within the limits of the hydrographic basin for a longer time. Despite the uncertainties of hydrological simulation tools, the results generated in this work are useful for water resource managers, for members of hydrographic basin committees and for representatives of Brazilian hydrographic basin Agencies. This study could contribute to develop strategies focused on water resources and soil preservation in hydrographic basins with characteristics similar to those of the Bicudo river.

Keywords: Hydrological modeling. SWAT. Containment basins.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - BACIA DE CONTENÇÃO “BARRAGINHA”. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2019.....	19
FIGURA 2 – FOTOS DE BACIAS DE CONTENÇÃO “BARRAGINHAS” IMPLANTADAS NO BRASIL. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO/CBH VELHAS, 2019.	22
FIGURA 3 – DADOS DE ENTRADA NO SWAT E RESUMO DE PROCESSOS. FONTE: ADAPTADO DE SWAT INPUT/OUTPUT DOCUMENTATION, 2012.	30
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2016.	43
FIGURA 5 - DIVISÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DAS VELHAS EM UNIDADES TERRITORIAIS ESTRATÉGICAS. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2016.	44
FIGURA 6 - UNIDADE TERRITORIAL ESTRATÉGICA DO RIO BICUDO, AFLUENTE DO RIO DAS VELHAS, NO ESTADO DE MINAS GERAIS. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO, 2016.	45
FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO, COM A REPRESENTAÇÃO DAS BACIAS DE CONTENÇÃO “BARRAGINHAS” INSTALADAS E DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO (FLUVIOMÉTRICO E DA QUALIDADE DA ÁGUA). FONTE DOS DADOS: SIGA CBH RIO DAS VELHAS.	47
FIGURA 8 - CLIMA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO. FONTE: AGÊNCIA PEIXE VIVO (2016).	48
FIGURA 9 – COBERTURA VEGETAL DA BACIA DO RIO BICUDO. FONTE: AUTORA.	49
FIGURA 10 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO, DO ANO DE 2016. FONTE: AUTORA.....	50
FIGURA 11 – CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO. FONTE: AUTORA.....	52
FIGURA 12 – ETAPAS SEQUENCIAIS DA MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O SWAT.....	53
FIGURA 13 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO E DAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS ANALISADAS. FONTE: AUTORA...	58
FIGURA 14 – MAPA DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO – MDE, PREPARADO COMO DADO DE ENTRADA PARA A MODELAGEM DA BACIA DO RIO BICUDO NO SWAT.....	67
FIGURA 15 – MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PREPARADO COMO DADO DE ENTRADA PARA A MODELAGEM DA BACIA DO RIO BICUDO NO SWAT.	68
FIGURA 16 – MAPA DE SOLOS PREPARADO COMO DADO DE ENTRADA PARA A MODELAGEM DA BACIA DO RIO BICUDO NO SWAT....	69
FIGURA 17 – VARIÁVEIS CALCULADAS PARA A BACIA DO RIO BICUDO (TEMPERATURAS).....	74
FIGURA 18 – VARIÁVEIS CALCULADAS PARA A BACIA DO RIO BICUDO (PRECIPITAÇÕES).....	74
FIGURA 19 – RADIAÇÃO SOLAR MÉDIA MENSAL CALCULADA PARA A BACIA DO RIO BICUDO.	74
FIGURA 20 – PRECIPITAÇÃO TOTAL ANUAL VERSUS VAZÃO MÉDIA ANUAL PARA O PERÍODO DE 2004 A 2018.....	76
FIGURA 21 – ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ANUAL DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS NA BACIA DO RIO BICUDO, PARA PERÍODOS ANTERIORES E POSTERIORES ÀS INTERVENÇÕES. FONTE DOS DADOS: CPRM/ANA – SISTEMA DE INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS – HIDROWEB.	77
FIGURA 22 – INFORMAÇÕES HIDROGRÁFICAS SIMULADAS PELO MODELO SWAT.....	79
FIGURA 23 – LIMITES DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO: SIMULADO PELO SWAT X ADOTADO PELO ÓRGÃO GESTOR IGAM.	80
FIGURA 24 – GRÁFICO DA VAZÃO OBSERVADA E DA VAZÃO SIMULADA PARA A ETAPA DE CALIBRAÇÃO DOS DADOS, QUE ENVOLVE UM PERÍODO DE 6 ANOS, ENTRE 01/01/2009 A 31/12/2014.....	83
FIGURA 25 – GRÁFICO DA VAZÃO OBSERVADA E DA VAZÃO SIMULADA PARA A ETAPA DE VALIDAÇÃO DOS DADOS, QUE ENVOLVE UM PERÍODO DE 5 ANOS, ENTRE 01/01/2004 A 31/12/2008.....	83
FIGURA 26 – GRÁFICOS DO RANKING DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS CALIBRADOS PARA A VARIÁVEL VAZÃO NA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO, PELO SWAT.	85
FIGURA 27 – GRÁFICO DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PARA TODO O PERÍODO DE ESTUDO, QUE CONTEMPLA 15 ANOS, ENTRE 01/01/2004 A 31/12/2018.....	86
FIGURA 28 – GRÁFICO DAS VAZÕES OBSERVADAS E SIMULADAS PARA O PERÍODO DOS CENÁRIOS CONSIDERADOS, ENTRE 01/01/2015 A 31/12/2018.....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – FONTE DOS DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO NA BACIA DO RIO BICUDO.....	55
TABELA 2 – DADOS DAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS ANALISADAS.	59
TABELA 3 – COMPATIBILIZAÇÃO DAS CLASSES DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA DO RIO BICUDO COM O BANCO DE DADOS DO SWAT.....	62
TABELA 4 – PERÍODOS ADOTADOS PARA SIMULAÇÃO NO MODELO SWAT.	63
TABELA 5 – CLASSIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DAS SIMULAÇÕES MENSIS DO MODELO SWAT CONFORME FUNÇÕES OBJETIVO NS E PBIAS.	65
TABELA 6 – CARACTERIZAÇÃO GERAL E DA CAMADA 1 DOS SOLOS DA BACIA DO RIO BICUDO.	70
TABELA 7 – CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA 2 DOS SOLOS DA BACIA DO RIO BICUDO.....	70
TABELA 8 – CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA 3 DOS SOLOS DA BACIA DO RIO BICUDO.....	71
TABELA 9 – CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA 4 DOS SOLOS DA BACIA DO RIO BICUDO.....	71
TABELA 10 – CARACTERIZAÇÃO DA CAMADA 5 DOS SOLOS DA BACIA DO RIO BICUDO.....	71
TABELA 11 – ESTIMATIVA DAS ESTATÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS MENSIS CALCULADAS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO.	73
TABELA 12 – AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE DADOS DAS ESTAÇÕES CLIMÁTICAS EMPREGADAS.	75
TABELA 13 – VALORES DE PRECIPITAÇÃO E VAZÃO PARA O PERÍODO DE 2004 A 2018.	76
TABELA 14 - VALORES DOS PARÂMETROS CALIBRADOS PARA A BACIA DO RIO BICUDO.	82
TABELA 15 - VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DAS SIMULAÇÕES APÓS CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO.	83
TABELA 16 – VALORES DOS ÍNDICES DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS CALIBRADOS PARA A VARIÁVEL VAZÃO NA MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO, PELO SWAT.	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite-1</i>
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ARS/USDA	<i>Agricultural Research Service/United States Department of Agriculture</i>
CBH Velhas	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas
CBH Verde Grande	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CETEC	Centro Tecnológico de Minas Gerais
CH_N2	Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal principal
CN	Curva Número
CN2	Condição de umidade II
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DAEE/CETESB	Departamento de Águas e Energia Elétrica da Companhia Ambiental Paulista
DEWPT	Média mensal da temperatura do ponto de orvalho
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCO	Fator de demanda de água pelas plantas
ESDS	<i>Earth Science Data Systems</i>
ESCO	Fator de demanda de evaporação da água do solo
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
GW_DELAY	Tempo de recarga do aquífero
GW_REVAP	Coefficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular/zona não saturada
GWQMN	Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície
HRU	<i>Hydrological Response Units</i>
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQA	Índice de Qualidade da Água
LH	<i>Latin Hypercube</i>

MDE	Modelo Digital de Elevação
MNT	Modelo Numérico de Terreno
MSE	Erro Quadrado Médio
NASA	<i>Nacional Aeronautics and Space Administration</i>
NRCS	Natural Resource Conservation Service
NS	Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe
OAT	<i>One-factor-a-time</i>
PBIAS	Percentual de tendência
PDRH	Plano Diretor de Recursos Hídricos
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
R ²	Coeficiente de determinação
REVAPMN	Limite de água no aquífero raso para ocorrer retorno para a zona radicular/zona não saturada ou percolação para o aquífero profundo
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada no solo
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SUFI-2	<i>Sequential Uncertainty Fitting</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UPGRH	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos
UTE	Unidade Territorial Estratégica
PCPD	Média de dias com precipitação no mês
PCPMM	Média da precipitação mensal
PCPSTD	Desvio padrão das precipitações diárias
PCPSKW	Coeficiente de assimetria das precipitações diárias
PET	Evapotranspiração potencial

PR-W1	Probabilidade de um dia úmido acontecer após um dia seco no mês
PR-W2	Probabilidade de um dia úmido acontecer após um dia úmido no mês
RAINHHMX	Evento extremo de chuva de 30 minutos no mês
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SOLARAV	Média da radiação solar diária no mês
TMPMN	Média mensal das temperaturas mínimas
TMPMX	Média mensal das temperaturas máximas
TMPSTDMN	Desvio padrão das temperaturas mínimas
TMPSTDMX	Desvio padrão das temperaturas máximas
WGN	<i>Weather Generator</i>
WNDV	Média mensal da velocidade do vento
95PPU	<i>95 Percent Probability Uncertainty</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	17
2.1	GERAL	17
2.2	ESPECÍFICOS.....	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	IMPACTO DOS PROCESSOS EROSIVOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.....	17
3.2	BACIAS DE CONTENÇÃO (BARRAGINHAS).....	18
3.2.1	<i>Aplicações das bacias de contenção no Brasil</i>	<i>19</i>
3.3	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	22
3.3.1	<i>Incertezas e limitações de um modelo hidrológico.....</i>	<i>23</i>
3.3.2	<i>Classificação dos modelos.....</i>	<i>24</i>
3.3.3	<i>Fases da modelagem.....</i>	<i>25</i>
3.4	MODELO SWAT	26
3.4.1	<i>Aplicações do modelo SWAT no Brasil.....</i>	<i>27</i>
3.4.2	<i>Fases da modelagem no modelo SWAT.....</i>	<i>29</i>
3.4.3	<i>Aquecimento, Calibração, Análise de Sensibilidade e Validação do Modelo SWAT.....</i>	<i>31</i>
3.4.4	<i>Indicadores de qualidade das simulações</i>	<i>34</i>
3.5	PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO MODELO SWAT	36
3.5.1	<i>Balanço hídrico.....</i>	<i>36</i>
3.5.2	<i>Escoamento superficial.....</i>	<i>37</i>
3.5.3	<i>Escoamento lateral.....</i>	<i>39</i>
3.5.4	<i>Fluxo de base.....</i>	<i>39</i>
3.5.5	<i>Percolação</i>	<i>40</i>
3.5.6	<i>Fluxo de retorno</i>	<i>40</i>
3.5.7	<i>Evapotranspiração</i>	<i>41</i>
4	METODOLOGIA.....	42
4.1	DESCRIÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA MODELADA.....	42
4.1.1	<i>Clima</i>	<i>47</i>

4.1.2	<i>Cobertura Vegetal</i>	48
4.1.3	<i>Uso e Ocupação do Solo</i>	49
4.1.4	<i>Relevo</i>	51
4.1.5	<i>Solos</i>	51
4.2	METODOLOGIA DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EMPREGADA	52
4.3	DADOS DE ENTRADA NO MODELO SWAT	54
4.4	AVALIAÇÃO DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	55
4.5	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DA BACIA DO RIO BICUDO - <i>WEATHER GENERATOR (WGN)</i>	56
4.6	ELABORAÇÃO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS PARA A MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO.....	60
4.7	CONSTRUÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO BICUDO	62
4.8	CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E SIMULAÇÕES.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1	CORREÇÃO E PREPARO DE DADOS	66
5.2	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DA BACIA – <i>WEATHER GENERATOR DATA (WGN)</i>	72
5.3	AVALIAÇÃO DAS SÉRIES HISTÓRICAS DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO	75
5.4	MODELAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BICUDO.....	79
5.4.1	<i>Delineamento das sub-bacias e HRUs</i>	79
5.4.2	<i>Calibração, validação e análise de incertezas</i>	80
5.4.3	<i>Análise de sensibilidade dos parâmetros</i>	84
5.5	SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS COM E SEM BARRAGINHAS	85
5.6	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DE BACIAS DE CONTENÇÃO NO REGIME HÍDRICO	88
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
7	PRODUTO	92
8	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

Alterações na quantidade, distribuição e qualidade dos recursos hídricos podem ameaçar a sobrevivência humana e das demais espécies do planeta. O desenvolvimento econômico e social dos países está fundamentado na disponibilidade de água de boa qualidade e na capacidade de sua conservação e proteção. No Brasil, embora a água seja considerada recurso abundante, a preocupação com sua preservação é assunto relativamente recente. Foi instituída, em 1997, a Política Nacional de Recursos Hídricos por meio da Lei nº 9.433/97, segundo a qual a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Os Comitês de Bacias Hidrográficas são órgãos normativos e deliberativos que têm por finalidade promover o gerenciamento de recursos hídricos nas suas respectivas bacias hidrográficas. O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas (CBH Velhas) é composto por representantes do Poder Público Estadual, Poder Público Municipal, Usuários de Recursos Hídricos e Sociedade Civil Organizada. As Agências de Bacia prestam apoio administrativo, técnico e financeiro aos seus respectivos Comitês de Bacia Hidrográfica. São entidades dotadas de personalidade jurídica própria, descentralizada e sem fins lucrativos. A implantação das Agências de Bacia foi instituída pela Lei Federal nº 9.433 de 1997 e sua atuação faz parte do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH.

A Agência Peixe Vivo é uma associação civil, pessoa jurídica de direito privado, criada em 2006 para exercer as funções de Agência de Bacia para o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Atualmente, a Agência Peixe Vivo está legalmente habilitada a exercer as funções de Agência de Bacia para dois Comitês estaduais mineiros, CBH Velhas (SF5) e CBH Pará (SF2), além dos Comitês Federais da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, CBHSF e da Bacia Hidrográfica do Rio Verde Grande, CBH Verde Grande.

A Agência Peixe Vivo tem como finalidade prestar o apoio técnico-operativo à gestão dos recursos hídricos das bacias hidrográficas a ela integradas, mediante o planejamento, a execução e o acompanhamento de ações, programas, projetos, pesquisas e quaisquer outros procedimentos aprovados, deliberados e determinados por cada Comitê de Bacia ou pelos Conselhos de Recursos Hídricos Estaduais ou Federais (Agência Peixe Vivo, 2019).

A bacia hidrográfica do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas, tem enfrentado problemas ambientais e conflitos sociais devido à escassez hídrica e ao intenso uso da água pelo setor agropecuário. Uma consequência deste cenário de uso e ocupação do solo é a poluição difusa, proveniente dos processos de erosão e sedimentação, que tem sido apontada como uma das principais causas da degradação dos recursos hídricos e da fertilidade dos solos em bacias hidrográficas, provocando assim o aumento dos custos de tratamento da água, conforme diagnosticado pela Agência PeixeVivo (2016).

A bacia hidrográfica do rio Bicudo possui alguns rios intermitentes, fazendo com que a disponibilidade hídrica nos períodos de seca seja um dos maiores desafios da predominante população rural da bacia, que utiliza a água na produção agrícola e pecuária. Quanto à susceptibilidade erosiva, esta bacia apresenta 52,81% de seu território com forte fragilidade à erosão e 39,68% com média fragilidade. As características naturais do terreno, a compactação do solo e a ocupação desordenada aceleram os processos erosivos (Agência Peixe Vivo, 2016).

Segundo o CBH Rio das Velhas (2019), os projetos hidroambientais são aqueles voltados para a recuperação e conservação de nascentes, cursos d'água e todo o ecossistema que alimenta e mantém vivos os rios. São projetos que buscam a manutenção da quantidade e da qualidade das águas de uma bacia hidrográfica, preservando suas condições naturais de oferta hídrica. A exemplo, se uma nascente ou pequeno riacho pode secar por estar desmatado, pisoteado ou assoreado, os projetos hidroambientais atuam para evitar ou reverter essa degradação.

As demandas por projetos de recuperação hidroambiental que o CBH Velhas, por meio de contratações realizadas pela Agência Peixe Vivo, tem implantado em diversos pontos da bacia surgiram de reivindicações comunitárias, motivadas por graves problemas de degradações ocorridas na bacia hidrográfica do rio das Velhas, tais como a poluição de mananciais e erosões, com reflexos diretos sobre a qualidade e a quantidade de água disponível.

Os projetos hidroambientais consistem em projetos de recuperação de áreas degradadas, que visam promover a recuperação e a melhoria ambiental da bacia hidrográfica do rio Bicudo, inserida na bacia hidrográfica do rio das Velhas, por meio do uso, manejo, conservação do solo e da água e de práticas socioambientais como a readequação de estradas rurais com a construção de bacias de captação de águas de enxurradas (barraginhas), com a finalidade de reduzir o escoamento superficial e consequentemente os processos erosivos, minimizar o carreamento de solo, além de armazenar temporariamente o escoamento advindo das estradas e promover a sua infiltração, tendo em vista o aumento da recarga dos aquíferos locais e o aumento da disponibilidade hídrica da região.

No ano de 2015 foram construídas 308 barraginhas nos municípios de Corinto/MG e Morro da Garça/MG, nos quais a bacia do rio Bicudo está inserida. Tais intervenções foram financiadas com o recurso da cobrança pelo uso da água na bacia do rio das Velhas. No ano de 2019, o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas - CBH Velhas promoveu a instalação de 370 barraginhas adicionais na bacia do rio Bicudo.

De acordo com a Agência Peixe Vivo (2016) os projetos hidroambientais são caracterizados por ações pontuais, e devem ser concebidos de maneira integrada, de modo que se interajam em diferentes áreas da bacia hidrográfica, especialmente em cabeceiras e áreas de recarga hídrica. Desta forma, busca-se proporcionar um efeito sistêmico, assegurando que as condições naturais destas áreas sejam preservadas. As

áreas selecionadas para a execução das barraginhas no ano de 2015 localizam-se na região da Serra Preta, situada no alto curso da Unidade Territorial Estratégica - UTE do rio Bicudo.

É importante quantificar os benefícios provenientes da aplicação do recurso arrecadado pela cobrança pelo uso das águas, prevista na Lei 9433/1997, possibilitando a priorização das ações para melhorias da qualidade e da quantidade das águas. Assim, o presente estudo tem o intuito de investigar a ocorrência de alterações na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Bicudo, decorrentes da instalação de bacias de contenção em sua área de drenagem. Para tanto, foi efetuada a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica em estudo.

Carvalho (2014) ressalta que os modelos hidrológicos computacionais vêm se tornando importantes instrumentos aos tomadores de decisão na área ambiental. Dentre os muitos modelos que tentam reproduzir a ação dos fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica, estão os conceituais distribuídos que simulam os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico. Um desses modelos é o SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*, desenvolvido para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, segundo Arnold *et al.* (1998).

O SWAT é um modelo matemático que permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica, de acordo com Arnold e Allen (1996). O SWAT tem sido adaptado, desde o seu surgimento, para algumas áreas específicas e foi integrado ao SIG possibilitando a entrada do banco de dados, a elaboração e edição de cenários ambientais e sua representação em forma de gráficos e mapas, controles e simulações, além de extrair e organizar as saídas do modelo, conforme ressaltado por Marchioro (2008). O SWAT é um modelo baseado em características físicas das bacias hidrográficas, computacionalmente eficiente para operar tanto em pequenas quanto em grandes bacias e é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos, segundo Santhi *et al.* (2001).

Estudos que visam avaliar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica são relevantes na compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico e no auxílio à tomada de decisões, no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade dos recursos naturais de determinada região, conforme Andrade *et al.* (2012).

Neste contexto, o tema de pesquisa aqui proposto é relevante, especialmente para o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH, uma vez que possibilita orientar as decisões dos órgãos e colegiados do SINGREH no que diz respeito ao planejamento, regulação e controle do uso das águas e na resolução de conflitos relacionados aos recursos hídricos.

A pesquisa desenvolvida está enquadrada na área de concentração do Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua denominada "Instrumentos da Política de Recursos Hídricos". Essa área contempla a implementação dos instrumentos de gestão em recursos hídricos previstos na Lei 9.433/97. Assim, este trabalho é aderente à área de concentração mencionada, pois os resultados provenientes

da modelagem hidrológica efetuada resulta na disponibilidade de maior quantidade de informações hidrológicas para melhor gerenciamento dos recursos hídricos.

A linha de pesquisa na qual esse projeto se enquadra é “Metodologias para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos”. Essa linha de pesquisa contempla a organização, utilização e apresentação de dados e informações, disponibilizando-os de forma a auxiliar a implementação dos instrumentos de gestão e o processo de tomada de decisões pelos órgãos do SINGREH. Portanto, o presente trabalho se enquadra nessa linha de pesquisa, visto que estabelece uma base teórica, metodológica e conceitual que permite a representação e a simulação da realidade no processo de Gestão de Bacias e subsidia a implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos. A aplicação de modelos hidrológicos, empregada neste estudo, tem o intuito de entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica por meio da simulação de seus processos hidrológicos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é a investigação da ocorrência de alterações no comportamento hidrológico do rio Bicudo, decorrentes da instalação de bacias de contenção em sua área de drenagem.

2.2 Específicos

- Avaliação do desempenho do modelo SWAT na simulação de diferentes cenários, após sua calibração e validação;
- Avaliação do impacto da construção das bacias de contenção no regime hídrico do rio Bicudo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Impacto dos processos erosivos em uma bacia hidrográfica

Andrade *et al.* (2012) relatam que as ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis no ambiente de bacias hidrográficas, tendo em vista sua influência quantitativa e qualitativa direta sobre os processos hidrológicos. De forma geral, o resultado final dessas modificações é percebido apenas quando da ocorrência de eventos hidrológicos extremos e de suas consequências, tais como, estiagens severas, inundações e destruições, produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, prejudicando drasticamente a agricultura além da possibilidade de aumento no aporte de nutrientes e poluentes em mananciais com influência direta na qualidade da água.

O ciclo hidrológico é um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer e se transformar ao longo do tempo. Paralelamente

ao ciclo hidrológico, existe outro ciclo, aberto, vinculado e dependente do ciclo hidrológico, que envolve o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície de uma bacia hidrográfica, chamado de ciclo hidrossedimentológico. Diferente das moléculas de água, os sedimentos não terão como voltar ao meio de onde provêm (TUCCI, 2001).

Pode-se estimar que no Brasil há grande perda de camadas férteis de solo em áreas cultivadas, o que gera prejuízo financeiro para o país. Esse prejuízo se intensifica, com o aporte de sedimentos e poluentes que atingem os cursos d'água, aumentando os custos de tratamento da água captada para os diversos usos.

A erosão antrópica, também chamada de erosão acelerada, ocorre quando da intervenção humana nos sistemas naturais. Esse problema encontra-se amplamente disseminado por todos os continentes: de acordo com relatório publicado em 2011 pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2011), 25% dos solos no mundo encontram-se em estágio avançado de degradação, colocando em risco os sistemas de produção agrícola e a qualidade dos recursos hídricos (ANDRADE, *et al.* 2012).

Segundo Carvalho (2014) a perda da camada superficial do solo é o maior desafio para a sustentabilidade da agricultura no mundo. O mesmo autor corrobora com a tese de que a erosão hídrica, e o conseqüente aumento da produção de sedimentos, são as principais causas da degradação dos recursos hídricos em ambientes tropicais e subtropicais úmidos.

3.2 Bacias de contenção (Barraginhas)

Os sistemas de barraginhas consistem em dotar as propriedades rurais com várias pequenas bacias de contenção dispersas, de modo que cada uma retenha uma determinada enxurrada significativa. Dessa forma, as barraginhas promovem a distribuição das enxurradas no terreno, retendo a água da chuva onde ela cai, sem deixá-la escorrer e causar danos, como erosões, assoreamentos e carreamento de poluentes veiculados pelo escoamento superficial, podendo inclusive amenizar enchentes (RODRIGUES *et al.*, 2012).

As intervenções do tipo barraginhas são construídas com o intuito de se aproveitar a água da chuva, e de se promover a recarga do lençol freático, visando a médio e longo prazo perenizar nascentes, pequenos rios e ribeirões de uma sub-bacia. As barraginhas atuam no controle de enxurradas, evitando a formação de erosão, degradação dos solos e assoreamento dos rios; na filtração da água acumulada para alimentação dos mananciais; e na umidificação do solo favorecendo o cultivo de lavouras em seu entorno (PEDREIRA *et al.*, 2014).

De acordo com Pedreira *et al.* (2014) a captação das chuvas por meio da construção do sistema de barraginhas tem se mostrado uma ferramenta eficiente para aproveitamento das águas das chuvas intensas e irregulares que ocorrem em regiões com deficiência hídrica, proporcionando a conservação dos solos por meio da contenção

de enxurradas e redução da erosão, além de possibilitar a revitalização dos cursos d'água próximos, através do afloramento do lençol freático. Ainda é observado que a construção das barraginhas aliada a outras práticas conservacionistas, como é o caso do plantio em nível e da construção de terraços, têm melhorado significativamente as condições ambientais do solo e da água nas bacias hidrográficas onde as medidas são adotadas.

É válido ressaltar que não se perdem áreas cultiváveis com a construção de barraginhas, pois, geralmente, elas são construídas em locais já degradados, solucionando não só problemas de seca, mas passando também a revitalizar esses locais, para dar lugar às lavouras, novamente.

Com o apoio técnico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Milho e Sorgo, sediada em Sete Lagoas - MG, as prefeituras de Corinto e Morro da Garça iniciaram uma parceria, juntamente com a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais - Emater local e com o CBH Rio das Velhas, com o objetivo de implantar uma série de bacias de contenção de águas pluviais (barraginhas) com o intuito de aumentar a produtividade hídrica, com o consequente aumento da capacidade de recarga do lençol freático na bacia hidrográfica do rio Bicudo. A parceria se iniciou em 2012 e se estendeu até meados de 2014.

A Figura 1 apresenta a estrutura de uma bacia de contenção ou barraginha.

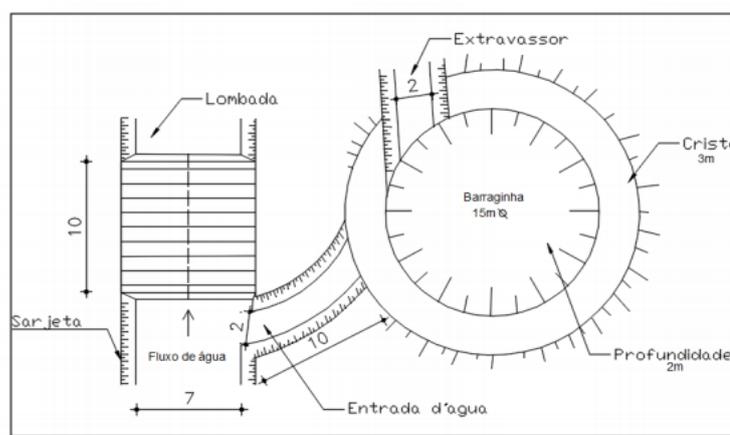


Figura 1 - Bacia de contenção “Barraginha”. Fonte: Agência Peixe Vivo, 2019.

3.2.1 Aplicações das bacias de contenção no Brasil

Segundo Embrapa (2009) a implantação do sistema de barraginhas provoca a elevação da água no solo, que pode ser percebida pela elevação da água nas cisternas próximas, pelo umedecimento dos taludes e pelo surgimento de minadouros. Assim, essas intervenções são capazes de amenizar os efeitos de estiagens, propiciar plantios de lavouras, hortas e pomares, para a produção de alimentos para as famílias rurais e a geração de excedentes comercializáveis, renda e trabalho. É ainda relatada a eliminação

da necessidade do emprego de cominhões-pipa para abastecimento humano e animal, nas regiões semi-áridas, como consequência da implantação do sistema de barraginhas.

O engenheiro agrônomo e pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas/MG) Luciano Cordoval de Barros, em 1990 reparou o resultado de duas enxurradas que formaram uma barragem natural, e notou que depois da chuva, sementes germinavam dentro do lago dessa barragem. O pesquisador ficou dez anos estudando os efeitos desses pequenos lagos artificiais até lançar o Projeto Barraginhas e desde então já recebeu incontáveis prêmios. O engenheiro estima que atualmente existam no Brasil mais de 2 milhões de barraginhas espalhadas por diversos estados brasileiros (MARONI, 2019).

Conforme relatado por Maroni (2019), o Projeto Barraginhas tem um impacto social significativo, pois muitas famílias em locais de intensa escassez hídrica conseguem sobreviver e ver a plantaçã o e o gado prosperarem graças a essa fonte de água acumulada. No semiárido, como as chuvas fortes ocorrem em um período de 3 a 4 meses, ao longo do ano as famílias e a agricultura sofrem com a escassez de água. O engenheiro agrônomo Barros explica “No semiárido, quando a chuva cai, cai duma vez só. E a água toda vai embora. Não dá tempo de ela infiltrar e ainda leva o solo junto. Com a barraginha, a água pode ir também para uma cisterna e ser usada para abastecer a família, os animais e a horta. Até o córrego mais à frente da barraginha não vai secar e terá água o ano inteiro”. Ainda segundo Barros, as barraginhas são capazes de “matar” as enxurradas, além de impedir que as águas pluviais carregem sedimentos para dentro dos rios e empobreça os solos, elas também favorecem a infiltração das chuvas no terreno, irrigando as raízes das plantas.

A difusão do sistema de barraginhas se iniciou em 1993 na região central de Minas Gerais em solos porosos e profundos. Para o semiárido, em função da menor capacidade de infiltração, foram adotados reservatórios com maior volume. Nos últimos treze anos, esta tecnologia tem sido patrocinada pela Petrobrás no projeto “Difusão das tecnologias sociais, lago de múltiplo uso e barraginhas no semiárido, sertão do São Francisco e na Zona Urbana” (EMBRAPA, 2009).

O projeto de lei (PL 3.715/2020) que cria o Programa Barraginhas e outras ecotécnicas para recuperação e perenização hídrica, na Política Nacional de Recursos Hídricos, encontra-se em tramitação no plenário da Câmara dos Deputados. Para implementar as ações propostas, o projeto prevê a utilização de recursos dos Comitês de Bacias Hidrográficas, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, do Departamento Nacional de Obras Contra a Seca – DNOCS, recursos de fundos específicos, recursos federais e doações de entidades nacionais e internacionais. A Embrapa já possui experiência na construção de sistemas de barraginhas ou bacias de contenção, e já implementou o projeto em vários municípios de Minas Gerais e do Brasil (BRASIL DE FATO, 2020).

Silva (2017) realizou um estudo dos impactos da implantação de barraginhas na comunidade Inácio Félix, localizada no município de Minas Novas/MG, na região do Vale do Jequitinhonha. Por se tratar de uma área que apresenta baixa pluviosidade e que enfrenta secas intensas, a comunidade Inácio Félix foi uma das primeiras localidades atendidas pelo Projeto Barraginhas, uma parceria da Embrapa Milho e Sorgo, com o governo municipal em combate a exeguidade do recurso hídrico. Visando investigar os benefícios e influências da tecnologia social das barraginhas na vida da comunidade, foram entrevistadas dezessete famílias.

Os resultados dos estudos de Silva (2017) demonstraram a percepção da comunidade para os benefícios adquiridos com a construção das barraginhas, em quatro vertentes: qualidade de vida, diminuição do êxodo rural, promoção e/ou complementação de renda e revitalização do meio ambiente. Foi relatado por 100,00% dos entrevistados a percepção da influência das barraginhas na recarga do lençol freático, e a restauração das nascentes. Segundo os moradores, antes da construção das barraginhas, foi identificado que 85,71% das nascentes da comunidade secavam e o que restante diminuía consideravelmente o volume de água; após a construção das barraginhas, observou-se que 100,00% das nascentes foram revitalizadas e possuem água o ano todo.

Carvalho (2017) ressalta ainda que as barraginhas têm sido utilizadas como técnica de manejo e conservação do solo e da água, principalmente no controle de erosão em estradas rurais. Programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) como o Produtor de Águas, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e parceiros, vêm empregando essa técnica não apenas para o controle do escoamento superficial da água em estradas e da consequente erosão e carreamento de sedimentos para os corpos hídricos, mas também no intuito de favorecer a infiltração de água no solo, colaborando para a elevação do nível do lençol freático e do escoamento de base em bacias hidrográficas.

A referida autora ainda avaliou a capacidade de infiltração de barraginhas em dois tipos de solos do bioma Cerrado, no Distrito Federal, o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e o Cambissolo (CX). Este estudo sugeriu que o processo de infiltração no interior das barraginhas é definido pela condição da superfície do solo, demonstrando que os programas voltados para o manejo e a conservação do solo e da água devem focar na manutenção recorrente destas estruturas físicas e na pesquisa de alternativas de aumento da capacidade de infiltração das barraginhas.

Na Figura 2 são apresentadas imagens de barraginhas implantadas no Brasil.



Figura 2 – Fotos de bacias de contenção “Barraginhas” implantadas no Brasil.
Fonte: Agência Peixe Vivo/CBH Velhas, 2019.

3.3 Modelos Hidrológicos

Para auxiliar no gerenciamento de bacias hidrográficas e, assim, minimizar os efeitos dos processos de degradação ambiental, Carvalho (2014) ressalta que modelos hidrológicos computacionais vêm sendo desenvolvidos e aprimorados. Essas ferramentas podem prever o impacto da agricultura e do uso e ocupação do solo na qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas. A utilização de modelos propicia a previsão de impactos ambientais e a otimização dos custos de gerenciamento.

Modelos são representações simplificadas de algum objeto ou sistema, numa linguagem de fácil acesso e uso. São desenvolvidos com o objetivo de entender o sistema e de prever suas respostas em diferentes circunstâncias (TUCCI, 1998).

Entre as diversas aplicações da modelagem, está a geração de conhecimentos sobre os sistemas ambientais e, entre estes, os hidrológicos. O objetivo de análises de sistemas hidrológicos é estudar o funcionamento do sistema e prever os dados de saída (CHOW, 1988) como a vazão de rios, a recarga subterrânea e os níveis de erosão. No caso desta pesquisa, os sistemas são as bacias hidrográficas.

Os modelos hidrológicos, uma vez alimentados com dados básicos da bacia hidrográfica ou região de interesse, podem fornecer uma série de informações e estimativas sobre as variáveis hidrológicas do local, tais como a vazão dos rios, a evapotranspiração, dados diversos sobre qualidade da água superficial ou subterrânea, além da produção, transporte e deposição de sedimentos.

A aplicação de modelos hidrológicos tem o intuito de entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica por meio de simulação. O seu emprego possibilita a previsão de vazões, a análise de consistência e o preenchimento de falhas, além da antecipação de cenários, tais como os impactos da urbanização de uma bacia ou de eventos extremos de precipitação, dando suporte à adoção de medidas preventivas (SARAIVA, 2010).

Um modelo ideal seria capaz de avaliar todos os fatores que interferem nos processos hidrológicos e descrever todo o procedimento físico por meio de equações

matemáticas, proporcionando um conhecimento pleno do que ocorre no sistema natural. No entanto, o uso desses modelos não é viável porque seria necessária uma ampla coleta de dados, além de que grande parte dos processos físicos que ocorrem nas bacias hidrográficas não são conhecidos completamente. Dessa forma, tornou-se recorrente o uso de modelos conceituais, que buscam uma aproximação por meio de equações cujos parâmetros possuem relação com os processos que ocorrem na bacia hidrográfica. Entretanto essas aproximações apresentam incertezas considerando a dificuldade de se definir o quão próximos da realidade estão os resultados obtidos pelas equações do modelo (SARAIVA, 2010).

De acordo com Andrade *et al.* (2012), a realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, nos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos.

O modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida para avaliação dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais. Podem ser aplicados para avaliar estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, e respostas de bacias hidrográficas a variações climáticas periódicas, cheias de projeto, cheias em tempo real, dentre outras situações. Wagener *et al.* (2004) relatam que diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos e utilizados em diferentes partes do mundo e com variadas finalidades práticas.

Carvalho (2014) ressalta ainda que os modelos hidrológicos computacionais vêm se tornando importantes instrumentos aos tomadores de decisão na área ambiental, podendo auxiliar, inclusive, na elaboração de cenários em programas de pagamento por serviços ambientais (PSA). Dentre os muitos modelos que tentam exprimir a ação dos fatores que exercem influência nas perdas de solo pela erosão hídrica, estão os conceituais distribuídos que simulam os diversos processos no ciclo hidrossedimentológico. Um desses modelos é o SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* (ARNOLD *et al.*, 1998), desenvolvido para o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

3.3.1 Incertezas e limitações de um modelo hidrológico

É importante ressaltar que os modelos hidrológicos disponibilizam grande quantidade de informações, porém não produzem números inquestionáveis, especialmente em bacias com poucos dados de monitoramento. Isso porque há uma tentativa de se representar uma versão simplificada de um sistema complexo. Sendo assim, seus resultados são imperfeitos. De qualquer modo, os modelos promovem uma melhoria na tomada de decisões ou previsões técnicas, que seriam complicadas na ausência dessas ferramentas (BARBOSA, 2006).

As incertezas sobre as variáveis de entrada envolvem a variabilidade natural e os erros de medição das mesmas. Os dados de precipitação, por exemplo, são geralmente mais extensos que os fluviométricos, no entanto, não se pode considerar que são

suficientes na maioria das bacias. A chuva apresenta uma série de fatores que interferem na sua distribuição espacial, tais como a latitude, a umidade atmosférica e a distribuição do relevo, o que dificulta a obtenção das alturas de chuva média em grandes bacias. (SARAIVA, 2010).

Portanto é necessária a etapa de verificação da calibração para estabelecer a confiança dos resultados obtidos. Os erros contidos na estrutura do modelo, nos dados utilizados, na calibração dos parâmetros e nas equações para a determinação dos parâmetros devem ser considerados, avaliando se são aceitáveis dentro do objetivo proposto no estudo. A análise de incertezas pode ser realizada qualitativamente, observando-se os resultados e os erros, por meio de coeficientes e gráficos (SARAIVA, 2010).

A calibração dos parâmetros é influenciada pelos erros dos dados, por erros na estrutura do modelo e pela presença de vários conjuntos ótimos de parâmetros (KLING e GUPTA, 2009). Por esse motivo os resultados obtidos pela calibração apresentam incertezas causadas pelos erros introduzidos no modelo.

Quando o modelo hidrológico é utilizado em local não monitorado acrescenta-se incertezas da regionalização dos parâmetros. Essa incerteza ocorre na etapa de ajuste do modelo regional que pode resultar em ajustes que acumularam todas as incertezas do estudo até a etapa de regionalização, ou seja, os erros de medição das variáveis, os erros na estrutura do modelo e os erros na calibração dos parâmetros.

Conforme ressaltado por Monte-Mor (2012), o modelo por si só não pode ser o objetivo, pois trata-se de uma ferramenta empregada para o entendimento e a representação do comportamento do sistema ou dos fenômenos estudados. Além disso, devido à grande complexidade dos fenômenos naturais, os modelos hidrológicos contêm simplificações substanciais. São constituídos de equações básicas, muitas vezes fracamente baseadas em premissas físicas, cujos parâmetros são específicos para as bacias selecionadas e aos problemas abordados.

Considerando que os programas de modelagem deixaram de ser empregados meramente para fins acadêmicos e se tornaram também uma ferramenta de suporte à gestão de recursos hídricos, Sarmiento (2010) investiga as limitações inerentes à aplicação dos resultados dos programas de modelagem como suporte à decisão dos gestores de recursos hídricos. A autora recomenda que sejam identificados os conjuntos plausíveis de valores de parâmetros na calibração e não apenas um conjunto possível, e que sejam envidados esforços na identificação e estimativa das diversas fontes de incertezas na modelagem.

3.3.2 Classificação dos modelos

Barbosa (2006) apresenta a classificação dos modelos existentes em diferentes tipos e construídos para diferentes propósitos. Em geral podem ser diferenciados como:

1. Modelos Estocásticos: são os que consideram o conceito de probabilidade em sua formulação. Geralmente esses modelos fazem uso de séries observadas de vazões em determinados pontos e, a partir de certas hipóteses sobre seu comportamento, permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de modelos de séries temporais de uso recorrente;

2. Modelos determinísticos: são aqueles que visam à representação do sistema físico natural, isto é, dos processos do ciclo hidrológico, considerando que, a partir dos dados de entrada tais como precipitação, umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, possam ser fornecidas as séries de vazões.

Com relação à representação da variabilidade espacial dos processos, os modelos podem ser:

1. Modelos distribuídos: são aqueles em que as variáveis e parâmetros dependem do espaço e do tempo. Considerando os aspectos de homogeneidade, esses modelos permitem que toda a área seja discretizada por elementos regulares ou irregulares. Possibilitam também espacializar a precipitação conforme sua variabilidade espacial, tornando a simulação mais próxima da realidade local. Carvalho (2014) pondera que, na prática, não existem modelos totalmente distribuídos. Todo modelo, dependendo de sua metodologia, ou da própria resolução e qualidade dos dados de entrada, torna-se concentrado em seu menor nível de discretização. No caso do modelo SWAT, este nível é representado por uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU, em inglês), conceito que será melhor detalhado adiante.

2. Modelos concentrados: não é levada em consideração a variabilidade espacial, e sendo assim os parâmetros físicos relacionados ao solo, à vegetação e à chuva, por exemplo, são considerados homogêneos em toda a bacia.

Os modelos são também classificados conforme suas formulações em:

1. Modelos conceituais: estão basicamente fundamentados em formulações físicas, tais como equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento;

2. Modelos empíricos: ajustam os valores calculados aos dados observados por meio de função que não tem relação com os processos físicos envolvidos.

Naghetini (2007) apresenta ainda a classificação dos modelos em discretos e contínuos, de modo consoante com as variáveis aleatórias cujo comportamento visam modelar. As variáveis hidrológicas quantitativas são aquelas cujos resultados possíveis são expressos por números inteiros ou reais, recebendo a denominação de discretas, no primeiro caso, e contínuas no segundo.

3.3.3 Fases da modelagem

Basicamente, existem três fases no processo de utilização do modelo hidrológico: (1) a calibração, ou ajuste do modelo, é a fase em que os parâmetros são

estimados; (2) a validação, ou verificação, é a simulação do modelo com os parâmetros estimados em que se verifica a validade do ajuste realizado; e (3) a previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de suas respostas a diferentes entradas.

3.4 Modelo SWAT

A escolha do modelo a ser adotado deve considerar, dentre outros aspectos, os objetivos do estudo, as limitações na representação dos processos e a disponibilidade e qualidade dos dados utilizados (BARBOSA, 2006). Dessa forma, devem-se considerar as limitações e características particulares de cada tipo de modelo hidrológico e deve-se analisar quais dados são suficientes e necessários para que a modelagem apresente resultados satisfatórios para o cenário em estudo. Nesse sentido, é preferível utilizar modelos cujos dados de entrada são mínimos, como precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial, e que apresentem um reduzido número de parâmetros a serem estimados.

Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) os modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos e aplicados com maior embasamento físico uma vez que o uso de um SIG possibilita a representação dos parâmetros dos modelos, de forma distribuída (VEITH *et al.*, 2010). Além disso, Vieux (2004) relata que a integração da hidrologia ao SIG é absolutamente natural, haja vista que os SIG são capazes de capturar, armazenar, manipular, analisar e visualizar variados conjuntos de dados georreferenciados e a hidrologia é uma ciência que apresenta um caráter espacial, desta forma, os modelos hidrológicos distribuídos demandam, em geral, grandes quantidades de dados.

No entanto, os modelos são representações inexatas do movimento da água em um sistema natural, razão pela qual devem ser calibrados com os dados observados. Enquanto a calibração minimiza os erros entre a saída do modelo e os dados observados, este processo se torna complicado em virtude do grande número de parâmetros não mensuráveis que precisam ser estimados (VEITH *et al.*, 2010).

Andrade *et al.* (2012) informam que o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido na década de 90, nos Estados Unidos, pelo Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura – *Agricultural Research Service/ United States Department of Agriculture* (ARS/USDA) dos Estados Unidos em conjunto com a Texas A&M University. O SWAT é um modelo matemático que permite que diferentes processos físicos sejam simulados em uma bacia hidrográfica (Arnold & Allen, 1996). O modelo tem sido adaptado, desde o seu surgimento, para algumas áreas específicas e foi integrado ao SIG possibilitando a entrada do banco de dados, a elaboração e edição de cenários ambientais e sua representação em forma de gráficos e mapas, controle e simulações, além de extrair e organizar as saídas do modelo (Marchioro, 2008).

Carvalho (2014) ressalta ainda que a interface ArcSWAT permite que o SWAT funcione acoplado ao ArcGIS, constituindo-se, assim, num Sistema de Informações Geográficas. A interface traduz os dados geoespaciais com as informações requisitadas pelo modelo para sua correta execução, como também promove a leitura e armazenamento de dados referentes ao clima, solos e uso do solo. A leitura do Modelo Digital de Elevação - MDE é realizada provendo a delimitação da bacia, das sub-bacias e das HRUs.

O SWAT é um modelo baseado em características físicas das bacias hidrográficas, computacionalmente eficiente para operar tanto em pequenas quanto em grandes bacias e é contínuo no tempo, sendo capaz de simular longos períodos (Santhi *et al.*, 2001).

Foi desenvolvido para prever o impacto das alterações no uso, no tipo e no manejo do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos, carga de poluentes e qualidade da água em bacias hidrológicas, em geral, de grande extensão (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). Opera em passo de tempo diário ou mensal e é capaz de simular longos períodos de dados.

Segundo Carvalho (2014), utilizando a classificação proposta por Tucci (1998), o SWAT é um modelo de simulação matemática contínuo, semidistribuído, determinístico e semiconceitual, que requer informações (dados de entrada) específicas.

3.4.1 Aplicações do modelo SWAT no Brasil

O modelo SWAT, desde sua criação, vem ganhando destaque dentre os modelos de simulação hidrológica. Gradualmente, ele vem ampliando suas fronteiras no ambiente acadêmico e científico. As razões para isso estão principalmente no perfil de modelagem, muito completo, que engloba vários parâmetros hidrológicos e agrônômicos, tornando-o um modelo versátil para auxiliar órgãos públicos e pesquisadores na tomada de decisão ante situações conflitivas do uso do solo que possam resultar em processos erosivos (CHU *et al.*, 2004).

Carvalho (2014) pondera que apesar dos grandes obstáculos à aplicação do SWAT em países onde há escassez de dados, sua utilização no Brasil vem aumentando progressivamente nos últimos anos. O número de trabalhos publicados já é substancial e o país, por conta de sua extensão e vocação agrícola, é considerado um grande “campo de testes” para o modelo e uma região estratégica para a potencialização do uso do SWAT no mundo.

Bressiani (2016) realizou uma vasta revisão da aplicação do modelo SWAT no Brasil, sendo contabilizadas 102 publicações que reportam o uso do SWAT em bacias hidrográficas brasileiras. Esta revisão detectou que o maior percentual de aplicações do SWAT se refere a investigações relacionadas às simulações de vazões dos cursos d'água (48%) e/ou perda e transporte de sedimentos (36%). Foram observados poucos estudos que reportam resultados de transportes de nutrientes (9%) e ainda menos estudos com

foco em aspectos teóricos ou relacionados apenas ao delineamento das bacias hidrográficas (6%) ou aos efeitos dos métodos de evapotranspiração (1%).

Uma interessante possibilidade que pode ser trabalhada com o modelo SWAT é apresentada por Carvalho (2014). Trata-se da simulação com cenários fictícios de uso do solo nas bacias hidrográficas. Pode-se, por exemplo, comparar a situação atual de uma bacia com a situação original (cobertura florestal nativa em toda a extensão da bacia) ou com o cenário proposto pelas leis ambientais. Foi o que propuseram Machado (2002) e Machado e Vettorazzi (2003). Esses autores aplicaram o modelo SWAT na bacia hidrográfica do Marins (SP), onde testaram resultados para dois cenários de uso distintos. No cenário 1, simulou-se um ambiente totalmente compatível com o código florestal brasileiro, ou seja, com matas ciliares e nascentes preservadas. No Cenário 2 simulou-se a bacia com cobertura alternada de pastagens e florestas. A produção de sedimentos no cenário atual, ou real, também foi simulada e os resultados foram comparados. O estudo concluiu que, em relação ao estado atual, o cenário 1 (conformação com o código florestal) reduziu a sedimentação em apenas 10,8%, enquanto o cenário 2 obteve redução de 84,4%.

Strauch *et al.* (2013) testaram a utilização do SWAT na predição dos impactos que práticas de conservação de solo teriam na alteração da vazão e produção de sedimentos na bacia do ribeirão Pipuripau. Segundo os autores, práticas conservacionistas de natureza estrutural, como terraços e barraginhas, podem gerar um abatimento de erosão de cerca de 40%. Os impactos dessas práticas na produção de água, no entanto, não foram significativos.

Almeida (2019) aplicou o modelo SWAT na simulação dos processos hidrológicos na bacia do rio das Velhas (da qual o rio Bicudo é afluente), sob diferentes cenários de uso da terra. Os cenários criados objetivaram quantificar os efeitos do aumento da intervenção antrópica na bacia em detrimento de áreas de floresta, sendo eles: uso atual na bacia (C1), agrícola (C2) e urbano (C3). Em C2 e C3, a área atual ocupada por florestas foi substituída por agricultura e infraestrutura urbana, respectivamente. O horizonte temporal da análise compreendeu os anos de 1995 a 2015. Nesses novos cenários, verificou-se o aumento do escoamento superficial e a diminuição do fluxo de base. O cenário C3 foi o de maior impacto, sendo o escoamento superficial gerado quase 3 vezes maior que no cenário C2, enquanto o fluxo de base foi 52% inferior.

Durães (2010) propôs e avaliou um método para estimar o estresse hidrológico em bacias hidrográficas, utilizando como paradigma as curvas de permanência de longo termo, geradas com base nos resultados de simulações do modelo SWAT. O estudo foi aplicado à bacia do rio Paraopeba, que representa um importante afluente do rio São Francisco, assim como o rio das Velhas, no qual o rio Bicudo deságua. Os resultados das estatísticas de precisão, nas fases de calibração e validação, demonstraram que o modelo pôde simular adequadamente os impactos hidrológicos causados devido a

alterações no uso do solo na bacia do rio Paraopeba, enquanto, os resultados referentes ao estresse hidrológico foram baixos ou médios em todos os cenários simulados.

Carvalho (2014) avaliou o desempenho do modelo SWAT na simulação da vazão e da descarga sólida em suspensão em uma bacia hidrográfica agrícola do Cerrado brasileiro, a bacia do Alto Rio Jardim-DF, com base no monitoramento em campo das vazões e dos sedimentos em suspensão, durante 4 anos. Os resultados demonstraram que, apesar do modelo ter simulado bem as vazões, o mesmo não aconteceu com a produção de sedimentos. Mesmo utilizando calibração automática com uma ampla gama de parâmetros, o ajuste obtido entre os valores calculados pelo modelo e aqueles observados em campo não foi satisfatório.

É importante salientar que o modelo SWAT foi desenvolvido com base num extenso banco de dados de solos, topografia, culturas, manejo e clima dos Estados Unidos da América. Nesse sentido, quando aplicado em regiões com escassez de dados, e cujas características de solos, plantas e clima divergem da realidade norte-americana, torna-se ainda mais imprescindível realizar a calibração dos parâmetros do modelo (BONUMÁ, 2009).

Carvalho (2014) salienta que quando, ao final do processo, não se consegue obter uma redução satisfatória do erro, é conveniente que se retorne ao início do processo de modelagem, uma vez que pode ter havido algum equívoco na preparação do modelo, isto é, inserção de informações inadequadas, etc.

3.4.2 Fases da modelagem no modelo SWAT

Para melhores efeitos de análise dos resultados, o SWAT possibilita dividir a bacia em subbacias e estas em áreas ainda menores, chamadas de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs – *Hydrological Response Units*). A divisão da bacia em HRUs, unidades que representam combinações de características comuns de solo, uso do solo e declividade dentro de cada subbacia, é dada automaticamente pelo modelo após o usuário designar um nível de sensibilidade para ser eliminado de áreas de uso do solo, solo e declividade menores do que o valor arbitrado (ARNOLD *et al.*, 1998).

Conforme apresentado por Carvalho (2014) a base conceitual do SWAT faz com que o modelo exija informações precisas quanto à bacia estudada, requerendo vários dados de entrada que estão relacionados com as características físicas da bacia, tais como informações sobre propriedades do solo, topografia, vegetação e uso e cobertura do solo – além de dados climáticos. Tais especificidades permitem a simulação em bacias sem dados de vazão, erosão e evaporação (NEITSCH *et al.*, 2005) – mesmo que isto impossibilite a validação dos resultados. A Figura 3 ilustra os dados necessários ao funcionamento do SWAT.

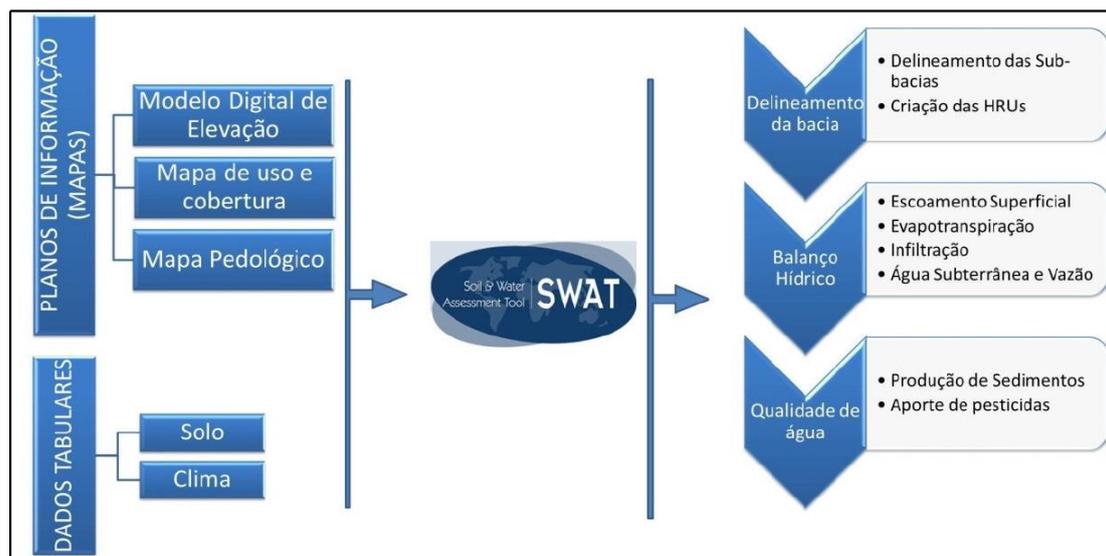


Figura 3 – Dados de entrada no SWAT e resumo de processos. Fonte: Adaptado de SWAT Input/Output Documentation, 2012.

Carvalho (2014) relata que o SWAT, como modelo distribuído, procura representar a variabilidade espacial da bacia hidrográfica. Diferentes níveis de discretização do espaço podem ser adotados por modelos matemáticos. No caso do modelo SWAT, este nível é representado por uma Unidade de Resposta Hidrológica (HRU, em inglês).

O modelo divide a bacia em sub-bacias e estas em áreas ainda menores, que são as Unidades de Resposta Hidrológica. As HRUs são unidades que representam combinações de características comuns de solo, uso do solo e declividade dentro de cada sub-bacia (NEITSCH *et al.*, 2005). É a partir dessas unidades que os resultados das simulações são gerados. Assim, é possível saber, para cada HRU da bacia, os resultados de escoamento superficial, produção de sedimentos, etc (CARVALHO, 2014).

Andrade *et al.* (2012) afirmam que subdividir a bacia em áreas que contêm combinações únicas, representadas pelas unidades de resposta hidrológica (*Hydrologic Response Units* - HRU's), possibilita ao modelo capturar diferenças na evapotranspiração e em outras condições hidrológicas para diferentes culturas e solos (Gassman *et al.*, 2007).

Durães (2010) relata que Spruill *et al.* (2000) aplicaram o modelo SWAT em uma micro-bacia rural com área de 5,5 km², localizada nos EUA. Ao analisarem os resultados diários, concluíram que, devido ao rápido tempo de resposta da bacia decorrente do seu reduzido tamanho, o SWAT não apresentou resultados satisfatórios, fornecendo coeficientes de Nash-Sutcliffe variando entre -0,04 e 0,19; porém, ao analisar os dados mensalmente, tais coeficientes atingiram valores de 0,58 a 0,89. Esses autores concluíram que o modelo SWAT pode ser aplicado em pequenas bacias hidrográficas para simulação de vazão, porém, as análises comparativas mensais se

mostraram mais adequadas do que as diárias, o que já é esperado como consequência da redução das variabilidades, quando se trabalha com intervalos mensais.

Moriase *et al* (2007) reforçam que quanto menor o passo de tempo (diário versus mensal e anual) mais pobre é o ajuste dos dados simulados aos observados.

3.4.3 Aquecimento, Calibração, Análise de Sensibilidade e Validação do Modelo SWAT

Andrade et al. (2012) informam que no início da simulação ocorrem incertezas devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente da umidade do solo, justificando a utilização de um período de aquecimento do modelo para que, ao se iniciar a simulação, as variáveis de estado estejam livres da influência das condições iniciais (MELLO et al., 2008).

Carvalho (2014) afirma que o período de aquecimento se trata, simplesmente, da escolha de uma determinada parcela inicial do tempo de simulação e sua exclusão do resultado final da modelagem. Ou seja, as simulações feitas nesse período serão realizadas, mas não influirão nos valores da função objetivo escolhida, servindo apenas para livrar as variáveis simuladas da influência das condições iniciais.

Conforme recomendado por Arnold et al. (2012), quanto menor o período de simulação, mais importante é o período de aquecimento. Para uma simulação de 30 anos, estes autores consideram opcional o aquecimento do modelo. Contudo, para simulações que envolvam 5 (cinco) anos ou menos, é recomendado um período de aquecimento. Neste caso, um período de aquecimento de 1 (um) ano é usualmente adequado para gerar um ciclo hidrológico satisfatório.

Baseado em Carvalho (2014) e em Arnold *et al.* (2012) após as etapas de preparação do modelo e execução, os resultados são, enfim, gerados. Essa primeira simulação utiliza, regra geral, valores de parâmetros fornecidos pelo próprio modelo (*default*). Nessa fase, normalmente, o programa gera resultados ainda não ajustados ao sistema específico que se quer modelar, isto é, os dados simulados não aderem aos dados medidos.

Nessas condições, o erro obtido (diferença entre os resultados simulados e os dados medidos) tende a ser bastante significativo. Dessa forma, é recomendada uma série de procedimentos pós-processamento dos modelos. Deverá ser feita a calibração, isto é, o ajuste dos valores dos parâmetros visando a redução do erro. Antes, porém, é recomendável que se faça uma análise de sensibilidade com o objetivo de identificar os parâmetros que são responsáveis mais fortemente por alterações nos resultados (BONUMÁ, 2009).

Tucci (1998) fornece algumas definições para melhor compreensão do sistema e do modelo que o representa. Tratam-se dos conceitos de “fenômeno”, “variável” e “parâmetro”. Segundo este autor, fenômeno é um processo físico que produz alteração

de estado no sistema como, por exemplo, a precipitação, a evaporação e a infiltração. Variável, por sua vez, é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno variando no espaço e no tempo como, por exemplo, a vazão que descreve o estado do escoamento. Já os parâmetros são valores que caracterizam o sistema, também podendo variar com o espaço e com o tempo como, por exemplo, a rugosidade de uma seção de um rio.

Na otimização dos parâmetros de um modelo hidrológico é necessário adotar uma função objetivo que agregue as diferenças entre os valores simulados e observados. É comum as funções objetivo relacionarem as diferenças numéricas entre os valores simulados pelo modelo e os dados observados. O propósito da calibração automática é então encontrar os valores dos parâmetros que otimizam (minimizam ou maximizam) o valor da função objetivo (SOROOSHIAN e GUPTA, 1995).

A função objetivo é um elemento muito importante na calibração automática de modelos hidrológicos, sendo a métrica utilizada pelo algoritmo de otimização para determinar a qualidade da simulação hidrológica (SALLES, 2012). A função objetivo pode ser definida como uma equação utilizada para medir a “distância” entre a resposta do modelo e os valores reais observados em campo.

As etapas de calibração, validação e análise de sensibilidade dos parâmetros empregadas na modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo com o SWAT serão detalhadas na descrição metodológica deste estudo.

Andrade *et al.* (2012) afirmam que a calibração de um modelo hidrológico é uma etapa fundamental e consiste na modificação dos parâmetros dentro de um intervalo aceitável, para obtenção de um modelo que replique condições previamente conhecidas do processo natural modelado (Viessman & Lewis, 2003).

A etapa seguinte à calibração é a validação ou verificação dos resultados. Nesta fase o que se busca é verificar como se comporta o modelo já calibrado quando se compara os resultados a dados medidos. É importante que os dados utilizados para calibração sejam independentes dos utilizados na validação. Se os mesmos dados forem utilizados para ambos os processos, não será surpresa se o modelo for considerado perfeito (WAINWRIGHT; MULLIGAN, 2005).

As investigações realizadas por Sarmiento (2010) confirmam o fato de que a representatividade dos dados é mais importante do que o tamanho da série usada para calibrar o modelo. Dados de calibração com insuficiência de informações sobre os períodos secos, chuvosos ou médios, não levam a um ajuste adequado e não proporcionam a obtenção de um modelo capaz de prever eventos distintos, em um cenário diferente.

Para a realização das análises de sensibilidade, calibração e validação do modelo foi utilizado um programa acessório denominado SWAT-CUP. Esse *software* promove a calibração dos dados a partir de algoritmos de otimização, tornando o ajuste entre os dados simulados pelo SWAT e os dados observados mais rápido e prático

(FUKUNAGA, 2012). O SWAT-CUP é um *software* gratuito que integra cinco diferentes algoritmos de otimização. Considerando o elevado requisito de processamento para cada iteração do software, optou-se nesta pesquisa pelo uso do algoritmo de otimização *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI-2), pois segundo Yang *et al.* (2008) dentre os algoritmos do SWAT-CUP, o SUFI-2 é o que necessita de menor quantidade de iterações para alcançar um desempenho satisfatório.

Conforme relatado por Bueno *et al.* (2017), os tipos de operadores adotados pelo SWAT-CUP durante o processo de calibração são: a (absolute), r (relative) e v (replace). Assim, se o operador for do tipo “a” (absolute), soma-se um valor (dentro da faixa de variação pré-estabelecida pelo usuário) ao valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior. Enquanto que, se o operador for do tipo “v” (replace), o programa substitui o valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior por um novo valor (dentro da faixa de variação indicada pelo usuário). Por fim, se o parâmetro calibrável tiver como operador “r” (relative), o SWAT-CUP multiplica o valor do parâmetro resultante da melhor simulação da iteração anterior por um novo valor (dentro da faixa de variação indicada pelo usuário). A partir dos novos valores dos parâmetros, procede-se uma nova iteração, buscando a maximização das estatísticas Nash-Sutcliffe (NS) e PBIAS.

O conjunto de parâmetros que melhor ajusta os dados simulados aos dados observados é alcançado por meio de uma função objetivo ou por um conjunto de funções objetivo. A cada passo, o algoritmo calcula novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então se verifica a convergência e encerra-se o processo iterativo. O processo termina ao ser encontrado um ponto ótimo da função (TUCCI *et al.*, 1998).

Andrade, *et al.* (2012) esclarecem que a análise de sensibilidade é um instrumento para previsão dos parâmetros do modelo sobre os resultados de sua saída, o que possibilita a racionalização da etapa de calibração, tal como, também, a fixação dos parâmetros para os quais o modelo é pouco sensível (Durães *et al.*, 2011).

A análise de sensibilidade é uma avaliação das magnitudes nas respostas do modelo em função de alterações nos parâmetros de entrada (ABBASPOUR, 2008). Na prática, trata-se de um procedimento para identificação dos parâmetros que contribuem mais fortemente para a geração dos resultados do modelo. Consequentemente, possibilita que a etapa da calibração do modelo, seja conduzida com maior consciência, pois se perceberá que muitos dos parâmetros não têm peso significativo na geração dos resultados e, portanto, não precisam ser calibrados (CARVALHO, 2014).

Nas técnicas manuais, as respostas do modelo são analisadas variando cada parâmetro e fixando todos os outros. Esta forma de análise possui a vantagem de não necessitar de apoio de programas computacionais com algoritmos de otimização. O problema neste tipo de procedimento é que, alterando-se apenas um parâmetro de cada vez, nunca se sabe se os valores dos outros parâmetros, que estão fixos, estariam ou não corretos (ARNOLD *et al.*, 2012).

O SWAT é sensível para mais de 100 parâmetros de entrada relacionados à vegetação, manejo, tipo dos solos, clima, aquífero, canal e reservatório (ARNOLD *et al.*, 1998). Devido a essa grande quantidade de parâmetros de entrada, é importante que se identifiquem quais os parâmetros que mais influenciam no modelo em questão e sua importância nos resultados gerados. Cada um dos parâmetros influencia cada modelo de forma diferente. Assim, é possível conseguir resultados similares com distintas combinações dos parâmetros (CARVALHO, 2014). Cabe ressaltar ainda que o SWAT possui 21 parâmetros que exercem influência na simulação da vazão, desta forma, a calibração de uma quantidade tão grande de parâmetros se torna inviável, necessitando da sua redução para tentar seguir o princípio da parcimônia (Muleta & Nicklow, 2005).

Conforme orientado por Carvalho (2014), encerrada a etapa de calibração, testa-se o desempenho do modelo frente a uma série independente de dados observados, ou seja, que não tenha sido utilizada na calibração. Trata-se da validação do modelo, que é efetuada visando a avaliação da capacidade do SWAT em simular adequadamente as vazões da bacia do rio Bicudo.

3.4.4 Indicadores de qualidade das simulações

Carvalho (2014) ressalta que existem diferentes funções objetivo encontradas na literatura, as quais são escolhidas de acordo com a finalidade do estudo hidrológico, direcionando a calibração do modelo para otimizar a simulação dos diferentes elementos do hidrograma, como a recessão, as vazões de pico ou o aporte de sedimentos.

Segundo Abbaspour (2015) no SUFI-2 do SWAT-CUP estão disponíveis 10 diferentes funções objetivo, tais como o coeficiente de determinação R^2 , o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), o Erro Quadrado Médio (MSE), entre outras. A função objetivo é a métrica utilizada pelos algoritmos do programa, para determinar o quão distante a nova simulação está dos dados observados.

Carvalho (2014) e a maioria dos estudos que utilizaram o SWAT empregaram o índice de Nash e Sutcliffe (NS) para avaliar a eficiência das simulações pelo modelo SWAT.

O índice de Nash e Sutcliffe (NS), apresentado na equação 1, é largamente utilizado na análise de modelos hidrológicos. Foi desenvolvido por Nash e Sutcliffe em 1970 e representa a aproximação dos valores simulados com os observados, por isso é caracterizado como uma função de desempenho. Quanto mais próximo de 1, mais satisfatório é o resultado da simulação.

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{med,obs})^2} \right] \quad (1)$$

Onde:

y_i^{obs} = vazão observada;

y_i^{sim} = vazão simulada;

$y^{med,obs}$ = média da vazão observada.

O coeficiente de determinação (R^2), apresentado na equação 2, é obtido a partir da regressão linear entre os valores medidos e observados. Seus valores variam entre -1 a 1, sendo que valores próximos de 0 indicam fraca correlação, e valores próximos a -1 ou 1 indicam forte correlação negativa ou positiva, respectivamente. Os valores acima de 0,6 são considerados aceitáveis para simulações mensais no SWAT (SANTHI *et al.*, 2001; BONUMÁ *et al.*, 2012).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs}) (y_i^{sim} - y_i^{med,sim})]^2}{[\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{med,obs})^2 \sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_i^{med,sim})^2]} \quad (2)$$

Onde:

y_i^{obs} = vazão observada;

y_i^{sim} = vazão simulada;

$y^{med,obs}$ = média da vazão observada;

$y^{med,sim}$ é a média da vazão simulada.

Outra função objetivo, relevante para o presente estudo, é o percentual de tendência PBIAS, apresentado na equação 3. O PBIAS mede o percentual de tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os dados observados. Os valores ótimos de PBIAS são aqueles próximos a zero, sendo que valores de baixa magnitude indicam acurácia da simulação pelo modelo. Os valores positivos indicam a tendência do modelo em subestimar os resultados simulados, enquanto os valores negativos indicam a tendência em superestimar os resultados simulados (GUPTA *et al.*, 1999).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_{obs} - y_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n y_{obs}} \right] \quad (3)$$

Onde:

y_{obs} = vazão observada;

y_{sim} = vazão simulada.

Os valores atribuídos aos parâmetros, na calibração com o SUFI-2 do SWAT-CUP, são acompanhados de uma incerteza, por isso a solução do modelo não é apenas uma linha com um valor para cada intervalo de tempo, mas sim uma faixa. Essa faixa de soluções é oriunda de uma distribuição de probabilidade acumulada da variável de saída do modelo, calculada com 95% de significância - 95PPU (95 *Percent Probability Uncertainty*). A cada iteração a incerteza vai diminuindo, e isso é feito através do controle das estatísticas: fator-p e fator-r. O fator-p é a porcentagem de dados

observados abrangidos pelo resultado da modelagem, e o fator-r é a espessura da faixa de incertezas. O SUFI-2 tenta obter valores razoáveis para esses dois fatores, pois assim como queremos que todas as observações estejam contidas dentro da faixa de soluções, também queremos uma faixa de incerteza pequena. Teoricamente, o valor para o fator-p varia entre 0 e 1, enquanto o fator-r varia entre 0 e infinito. Um fator-p de 1 e um fator-r de 0 é uma simulação que corresponde exatamente aos dados medidos. Os valores obtidos para esses fatores podem auxiliar na avaliação da força da calibração (ABBASPOUR, 2015).

3.5 Processos hidrológicos no Modelo SWAT

Carvalho (2014) relata que no SWAT a modelagem é realizada de acordo com as seguintes etapas: primeiramente, o programa faz o delineamento da área de interesse. Essa etapa utiliza ferramentas do próprio ArcGis para realizar processamentos com base no Modelo Digital de Elevação fornecido. Os produtos gerados nessa etapa são a demarcação da área da bacia, divisão em sub-bacias e delimitação dos cursos d'água. Após, tendo o usuário definido as classes de declividade e inserido os mapas de pedologia e uso do solo, o modelo delimitará as Unidades de Resposta Hidrológica (HRU).

Posteriormente, começa, então, a simulação hidrológica propriamente dita: utilizando informações de clima, de manejo e das características da área da bacia, o modelo permite o cálculo dos fluxos de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticida de cada HRU por unidade de área. Na sequência esses resultados são agregados para computar o que foi gerado pelas sub-bacias, de acordo com as frações de HRU existentes. Em seguida, as respostas geradas pelas sub-bacias são direcionadas para as calhas dos rios de acordo com a rede hídrica existente (ARNOLD *et al.*, 1998).

Nos próximos sub-tópicos serão relatados os processos hidrológicos para funcionamento do modelo SWAT, com base no que foi exposto nos trabalhos de Almeida (2019) e Durães (2010).

3.5.1 Balanço hídrico

Segundo Almeida (2019), o ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é composto de quatro volumes de controle que são: reservatório superficial, reservatório subsuperficial, reservatório subterrâneo aquífero raso e reservatório subterrâneo aquífero profundo. Nos processos hidrológicos no SWAT, a entrada de água na bacia ocorre através da precipitação, e as saídas são expressas pelo escoamento superficial, fluxo lateral, fluxo de base, recarga dos aquíferos, ascensão capilar e evapotranspiração.

Devido à continuidade do balanço hídrico, o modelo SWAT é capaz de estimar a infiltração, o escoamento superficial e a força de arraste pelo fluxo da água (ALMEIDA, 2019).

Machado (2002) ressalta que a contribuição dos reservatórios do modelo SWAT para o escoamento superficial provém do escoamento lateral a partir do perfil do solo e

do escoamento de retorno do aquífero raso. O volume que percola do reservatório subsuperficial, através do perfil do solo, representa a recarga do aquífero raso. A água que percola para o aquífero profundo não retorna para o sistema.

O modelo SWAT utiliza a equação 4, para a determinação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW + \sum_{t=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (4)$$

Sendo:

SW_t = conteúdo final de água no solo (mm);

SW = conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo no ponto de murcha permanente (mm);

T = tempo (dias);

R_i = precipitação (mm);

Q_i = escoamento superficial (mm);

ET_i = evapotranspiração (mm);

P_i = percolação (mm);

QR_i = fluxo de retorno ou ascensão capilar (mm).

A concepção utilizada pelo SWAT distingue os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica em duas partes. Na primeira, estão aqueles que pertencem à fase terrestre do ciclo hidrológico. Nessa fase são definidas as quantidades de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticidas que serão carregadas para a calha principal do rio em cada sub-bacia. Na segunda, a chamada fase aquática, estão aqueles processos que se referem ao movimento da água e sedimentos através da rede hídrica, do ponto de lançamento até o exutório da bacia (ARNOLD *et al.*, 1998).

3.5.2 Escoamento superficial

Durães (2010) e Almeida (2019) relatam que o SWAT utiliza o Método da Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) para estimar o escoamento superficial, em função do tipo, uso e manejo do solo, por meio da seguinte formulação:

$$Q = [(R - 0,2 S)^2] / [R + 0,8 S], \text{ se } R > 0,2 S \quad (5)$$

$$Q = 0, \text{ se } R \leq 0,2 S$$

Sendo:

Q = escoamento superficial diário (mm);

R = precipitação diária (mm);

S = absorção potencial do solo (mm).

O parâmetro S varia na bacia hidrográfica, em função do tipo de solo, do uso e ocupação do solo e da declividade, e varia de acordo com o tempo, em função das alterações no conteúdo de água no solo. Ele está relacionado com a Curva Número (CN) pela equação:

$$S = 254 (100/CN) - 1 \quad (6)$$

A escala de CN não é linear, variando entre 1 e 100. Os extremos correspondem respectivamente a uma cobertura com condutividade hidráulica infinita até uma cobertura completamente impermeável. Desse modo, para os valores de CN, são consideradas três condições de umidade:

- CN1: corresponde à curva número para a condição I de umidade, situação em que os solos estão secos (ponto de murcha);
- CN2: corresponde à curva número para a condição II de umidade, ou seja, a situação em que os solos apresentam a umidade próxima da capacidade de campo;
- CN3: corresponde à curva número para a condição III de umidade, situação em que os solos estão saturados.

O parâmetro CN que consta nas bases de dados do SWAT correspondem à condição de umidade II. As condições de umidade I e III, são obtidas pelo modelo por meio do uso de relações matemáticas a partir dos valores de CN2.

O Natural Resource Conservation Service (NRCS, 2007) classifica os solos em quatro grupos hidrológicos (A, B, C e D) baseados nas suas características de infiltração. Foi definido também o grupo hidrológico como um grupo de solos que tem similaridade em termos de potencial de geração de escoamento superficial sobre a similaridade de condições de tormenta e cobertura do solo (DURÃES, 2010).

Em grandes bacias com tempo de concentração maior que um dia, somente uma fração do escoamento superficial atingirá o canal principal no dia em que é gerado. O modelo incorpora um recurso de armazenamento do escoamento superficial de modo a atrasar a liberação deste escoamento no canal principal.

O volume de escoamento superficial liberado para o canal principal é dado por:

$$Q_{\text{surf}} = [Q'_{\text{surf}} + Q_{\text{stor}, i-1}] [1 - \exp(-\text{surlag} / t_{\text{conc}})] \quad (7)$$

Em que:

Q_{surf} = volume de escoamento superficial descarregado no canal principal em um dado dia (mm);

Q'_{surf} = volume de escoamento superficial gerado em uma sub-bacia em um dado dia (mm);

$Q_{\text{stor}, i-1}$ = volume do escoamento superficial armazenado no dia anterior (mm);

surlag = coeficiente de atraso do escoamento superficial (h);

t_{conc} = tempo de concentração para a sub-bacia (h).

Durães (2010) ressalta que o atraso na liberação do escoamento superficial suavizará as variações da vazão simulada no curso de água.

3.5.3 Escoamento lateral

O escoamento lateral é relevante em áreas com solos de alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais (0 a 2 metros) e uma base impermeável ou semi-permeável. Neste contexto, a precipitação percola verticalmente até atingir a camada semi-permeável ou impermeável. A água se acumula sobre a camada impermeável, formando uma zona saturada, que é a fonte de água para o escoamento lateral ou sub-superficial do subsolo.

O cálculo desse escoamento no SWAT é efetuado por meio de um modelo de onda cinemática desenvolvido por Sloan *et al.* (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Ele é baseado na equação do balanço de massa líquida em que um segmento em declive é utilizado como volume de controle, e dessa forma o escoamento lateral é calculado em cada camada de solo.

Se a zona saturada atinge a camada superior do solo, a água é permitida a fluir para a camada superior (de volta à superfície para a camada superior). Para simular o fluxo lateral em várias camadas de solo, o modelo é aplicado de forma independente, a partir da camada superior (ARNOLD *et al.*, 1998).

O escoamento sub-superficial ou lateral é calculado pelo SWAT conforme equação:

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot [(2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp) / (\Phi_d \cdot L_{hill})] \quad (8)$$

Em que:

Q_{lat} = quantidade de água que escoia sub-superficialmente (mm);

$SW_{ly,excess}$ = quantidade de água drenável na camada de solo (mm);

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada (mm/h);

slp = declividade média da sub-bacia (m/m);

Φ_d = porosidade da camada drenável do solo (mm/mm);

L_{hill} = comprimento do trecho (m).

3.5.4 Fluxo de base

No que se refere ao escoamento subterrâneo, o modelo SWAT simula dois tipos de aquíferos em cada sub-bacia: o raso (não confinado) e o profundo (confinado). O aquífero raso contribui para o escoamento no canal principal ou em trechos das sub-

bacias. Para o aquífero profundo admite-se que o mesmo contribui para o escoamento de água para fora da bacia hidrográfica simulada.

O fluxo da água subterrânea para o canal, considerando regime permanente, é calculado pela equação:

$$Q_{gw} = [8000 \cdot K_{sat} / (L_{gw})^2] \cdot [h_{wtbl}] \quad (9)$$

Onde:

Q_{gw} = escoamento subterrâneo (de base) do canal principal no dia i (mm);

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm/dia);

L_{gw} = distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m);

h_{wtbl} = profundidade do lençol freático (m).

3.5.5 Percolação

Segundo Almeida (2019), o cálculo de percolação do SWAT utiliza a propagação do armazenamento combinada com um modelo de fluxo em fendas no solo para simular o escoamento através de cada camada do solo. A água somente poderá percolar quando a umidade do solo numa determinada camada exceder sua capacidade e se a camada inferior não estiver saturada. Uma vez que a água percolou abaixo da zona radicular, este volume é armazenado como água subterrânea ou surge como escoamento de retorno à jusante do ponto considerado. A quantidade de água percolada para a próxima camada é calculada pela equação:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot [1 - \exp(\Delta t / TT_{perc})] \quad (10)$$

Em que:

$w_{perc,ly}$ = quantidade de água que percola para a próxima camada (mm);

$SW_{ly,excess}$ = volume drenável de água da camada de solo (mm);

Δt = duração do passo de tempo (h);

TT_{perc} = tempo de propagação através da camada (h).

3.5.6 Fluxo de retorno

É relatado por Durães (2010) e por Almeida (2019) que a água pode mover-se do aquífero raso para zona não saturada adjacente. Quando essa camada do aquífero está seca, a água da franja capilar que separa as zonas saturadas e não saturadas evapora e se difunde para as camadas superiores de forma difusa. Como a água é removida da franja capilar por evaporação, ela é repostada pela água do aquífero subjacente. A água também pode ser retirada do aquífero por plantas com raízes profundas, que são capazes de captar água diretamente do aquífero saturado.

O SWAT modela o movimento de água para as camadas adjacentes não saturadas como uma função da demanda hídrica para a evapotranspiração. Para evitar algum equívoco com a evaporação do solo e a transpiração, este processo dentro do SWAT é chamado de “revap”. Ele é relevante em bacias em que a zona saturada não está muito abaixo da superfície ou em locais onde plantas com raízes profundas se desenvolvem. Como o tipo da cobertura vegetal afeta a importância do “revap” no balanço de água, os parâmetros que governam essa variável geralmente variam com o uso do solo (DURÃES, 2010).

A quantidade máxima de água removida do aquífero via revap em um dado dia é expressa conforme a equação:

$$W_{\text{revap,mx}} = \beta_{\text{rev}} \times E_0 \quad (11)$$

Em que:

$W_{\text{revap,mx}}$ = quantidade máxima de água movendo para a zona do solo em resposta à deficiência de água (mm H₂O);

β_{rev} = coeficiente revap e,

E_0 = evapotranspiração potencial no dia (mm H₂O).

3.5.7 Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial pode ser determinada pela soma da evaporação do solo com a transpiração da planta. Para estimar a evapotranspiração potencial (PET), o SWAT dispõe de três métodos: Penman-Monteith, Priestley-Taylor e Hargreaves-Samani. A quantidade de dados de entrada requerida para cada método varia. O método de Penman-Monteith requer radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. O método de Priestley-Taylor requer radiação solar, temperatura do ar e umidade relativa. O método de Hargreaves requer somente a temperatura do ar.

Para este trabalho foi adotado o método de Penman-Monteith, que é o mais adotado pelos usuários do SWAT, segundo Durães (2010). A sua equação combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, a força necessária para remover o vapor de água e termos de resistência aerodinâmica e superficial.

Após a determinação da PET, o SWAT calcula a evapotranspiração real. Primeiro, o modelo calcula a evaporação resultante da interceptação da copa das plantas. Depois, usando uma metodologia proposta por Riehtie (1972), calcula-se a quantidade máxima de transpiração e quantidade máxima de sublimação/evaporação do solo. Então, a quantidade real de sublimação e evaporação resultante do solo é calculada.

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nas camadas superiores e

inferiores do perfil do solo. Um coeficiente de compensação denominado ESCO foi incorporado nas formulações matemáticas do SWAT para permitir que o usuário modifique a distribuição em profundidade usada para atender a demanda evaporativa do solo, conforme equação:

$$E_{\text{soil, ly}} = E_{\text{soil, zl}} - E_{\text{soil, zu}} \times \text{ESCO} \quad (12)$$

Em que:

$E_{\text{soil, ly}}$ = demanda evaporativa para a camada ly (mm H₂O);

$E_{\text{soil, zl}}$ = demanda evaporativa na camada inferior do solo (mm H₂O);

$E_{\text{soil, zu}}$ = demanda evaporativa na camada superior do solo (mm H₂O);

ESCO = fator de compensação de evaporação da água do solo (adm).

Após a interceptação da água pelo solo, a mesma pode vir a gerar o escoamento superficial ou infiltrar-se. De modo geral, a quantidade de água que passa pela seção de controle definida, no intervalo de tempo assumido, pode ser dada pela equação:

$$W_{\text{yld}} = \text{SURQ} + \text{LATQ} + \text{GWQ} - \text{TLOSS} - \text{abs} \quad (13)$$

Sendo:

W_{YLD} = quantidade de água que passa pela seção de controle no intervalo de tempo (mm);

SURQ = quantidade de água obtida pelo escoamento superficial (mm);

LATQ = contribuição do fluxo lateral (mm);

GWQ = contribuição do escoamento subterrâneo para a vazão (mm);

TLOSS = perda de água no sistema (mm) e,

abs = são as abstrações de água no sistema (mm).

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da bacia hidrográfica modelada

Localizada na região central do Estado de Minas Gerais, entre as latitudes 17°15' S e 20°25' S e longitudes 43°25' W e 44°50' W, a bacia hidrográfica do rio das Velhas compreende uma área total de 29.173 km², equivalente a quase 60% do território da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e a 4,05% da bacia do rio São Francisco (Agência Peixe Vivo, 2016). A bacia apresenta forma alongada e inclinada predominantemente na direção Norte-Sul (Figura 4) e corresponde à Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) SF5 (São Francisco 5).

Na bacia do rio das Velhas estão localizados, total ou parcialmente, 51 municípios dos quais 44 tem sua sede urbana na área da bacia, abrigando uma população estimada em cerca de 5 milhões de habitantes. Esses municípios têm importância econômica (62% do PIB mineiro) e social significativa.

Com 801 km, o rio das Velhas é o maior afluente em extensão da bacia do rio São Francisco. Esse rio nasce no município de Ouro Preto, dentro do Parque Municipal das Andorinhas, em uma altitude de aproximadamente 1.500 metros, e deságua no rio São Francisco no distrito de Barra do Guaicuy, município de Várzea da Palma (CBH VELHAS, 2019).

O rio das Velhas, ao longo de seu curso, é alimentado por diversos cursos d'água, com destaque para os seus principais afluentes: rio Bicudo, ribeirão Jequitibá, ribeirão da Mata, ribeirão Arrudas, ribeirão Onça e rio Itabirito, pela margem esquerda; e rio Curimataí, rio Pardo, rio Paraúna/Cipó, rio Taquaraçu e ribeirão Caeté/Sabará, pela margem direita (CBH VELHAS, 2019).

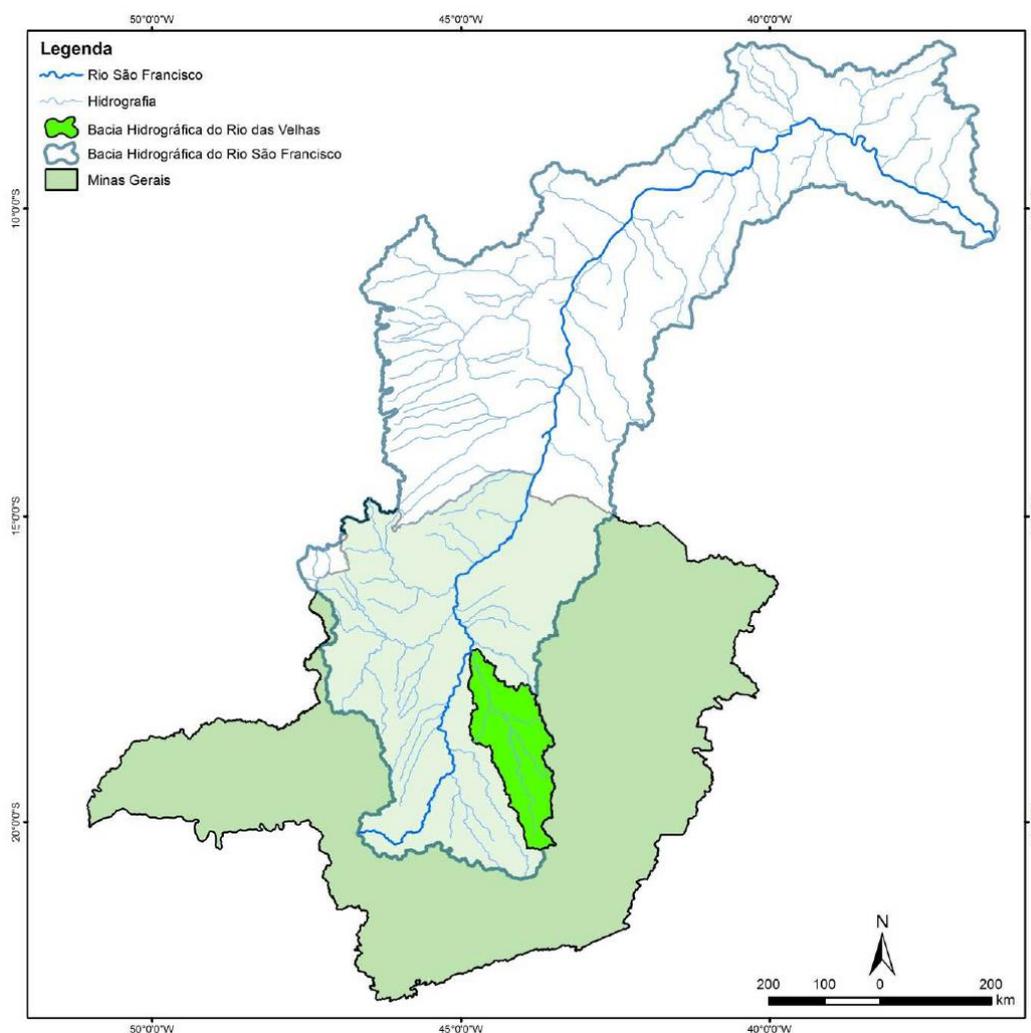


Figura 4 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas. Fonte: Agência Peixe Vivo, 2016.

O Plano Diretor de Recursos Hídricos (PDRH) do rio das Velhas adota a Unidade Territorial Estratégica (UTE) como unidade de estudo e planejamento das metas e ações para gestão dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio das Velhas, conforme apresentado na Figura 5. Cada UTE prevê a implantação de um Subcomitê, composto por membros do poder público, representantes dos usuários de água e da sociedade civil, que têm o importante papel de articuladores das entidades existentes na bacia e possuem funções públicas relacionadas às questões ambientais, sociais e educacionais. Nesse contexto, em 30 de março de 2011, através da Deliberação Normativa nº03/2011, foi instituído o Subcomitê da Bacia Hidrográfica do Rio Bicudo (SCBH Bicudo).

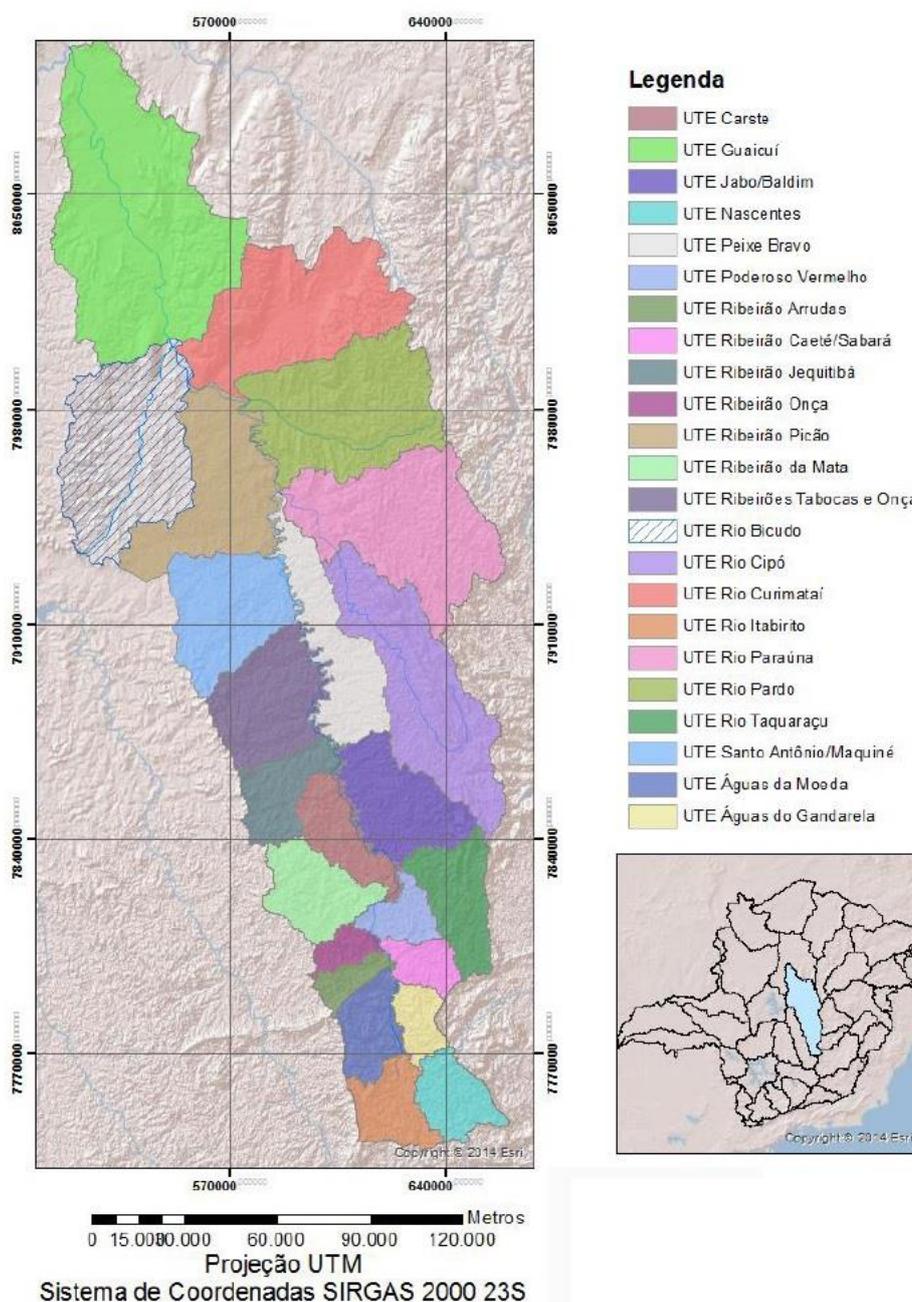


Figura 5 - Divisão da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas em Unidades Territoriais Estratégicas. Fonte: Agência Peixe Vivo, 2016.

A bacia hidrográfica do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas, em Minas Gerais, possui alguns cursos d'água intermitentes (que secam durante o período de estiagem), fazendo com que a disponibilidade hídrica nos períodos de seca seja um dos maiores desafios da população rural da bacia, que utiliza a água na produção agrícola e pecuária. O principal rio desta UTE é o Bicudo, com 148,76 km de extensão (Agência Peixe Vivo, 2016).

A bacia hidrográfica do rio Bicudo localiza-se no baixo rio das Velhas e é composta pelos municípios de Corinto e Morro da Garça (Figura 6). A Unidade ocupa uma área de 2.274,48 km² e detém uma população de 20.813 habitantes.

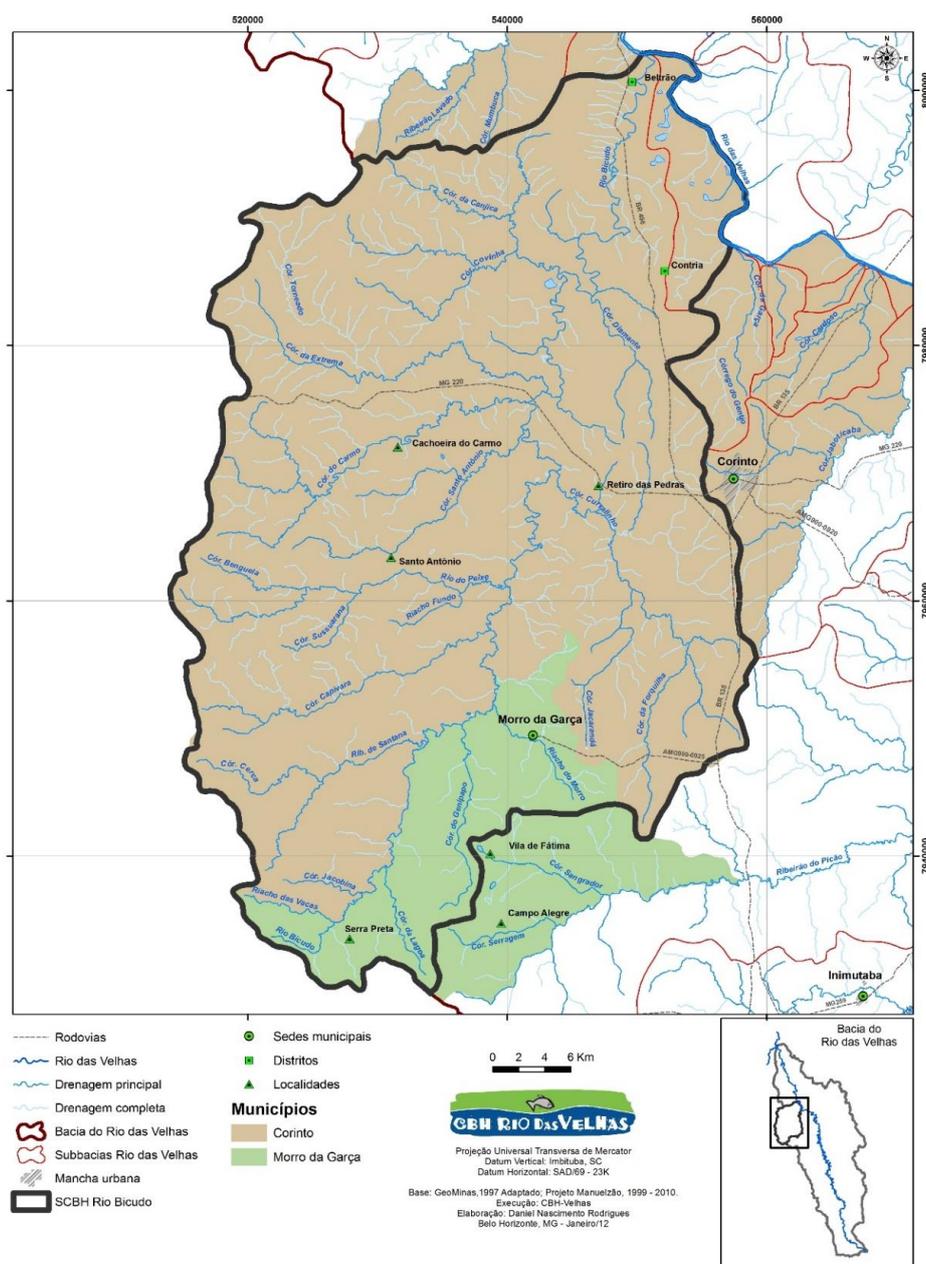


Figura 6 - Unidade Territorial Estratégica do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas, no estado de Minas Gerais. Fonte: Agência Peixe Vivo, 2016.

Conforme dados disponibilizados pela Agência Peixe Vivo (2016) na UTE Rio Bicudo há captação de água para abastecimento de 100% do município de Morro da Garça e 28% da população de Corinto. Morro da Garça possui tratamento de água com desinfecção e fluoretação. Ambos os municípios possuem Plano Municipal de Saneamento Básico - PMSB, contratado pelo Comitê do Rio das Velhas, por meio da Agência Peixe Vivo, com os recursos da cobrança pelo uso das águas no rio das Velhas. O consumo per capita da UTE Rio Bicudo (111,60 L/hab.dia) é inferior ao da bacia do rio das Velhas (136,23 L/hab.dia).

Quanto à susceptibilidade erosiva, a bacia do rio Bicudo apresenta 52,81% de seu território com forte fragilidade à erosão e 39,68% com média fragilidade. As características naturais do terreno, a compactação do solo e a ocupação desordenada aceleram os processos erosivos (Agência Peixe Vivo, 2016).

No que se refere aos efluentes, a UTE rio Bicudo não dispõe de qualquer tratamento parcial, sendo os dejetos lançados in natura nos corpos receptores. Quanto aos resíduos sólidos, em Morro da Garça a destinação final é o aterro controlado.

Os principais tributários do rio Bicudo são: córrego da Lagoa, córrego Jenipapo, riacho do Morro, riacho das Vacas, ribeirão Santana e córrego da Capivara.

De acordo com informações disponibilizadas pela Agência Peixe Vivo (2016), o rio Bicudo está localizado no baixo rio das Velhas, em sua margem esquerda. Apesar de o Índice de Qualidade da Água (IQA) ser considerado médio, o rio apresenta alguns focos de poluição e, sobretudo, tem observado problemas relacionados à falta de água em algumas comunidades da bacia. Esta questão foi ressaltada pelos integrantes do Subcomitê como o problema central a ser resolvido, uma vez que, em muitas das comunidades a falta de água vem sendo problema constante e tem acarretado em graves consequências. Buscando sanar o problema da escassez de água, tem sido sugerida, pelos membros do Subcomitê, a construção de barragens de contenção em comunidades rurais, visando o aumento da quantidade de água, principalmente nos períodos de seca.

Segundo Agência Peixe Vivo (2016), no último trimestre de 2012, foram construídas as primeiras 70 barraginhas na região do Alto Rio Bicudo, município de Morro da Garça. Conforme demanda do CBH Velhas, a Agência Peixe Vivo realizou a contratação de empresas responsáveis pela instalação de 308 barraginhas em 2015. Em 2020 foi concluído mais um trabalho, contratado pela Agência Peixe Vivo, cujo escopo envolveu a construção de 370 barraginhas adicionais durante os anos de 2019 e 2020, na bacia hidrográfica do rio Bicudo.

A Figura 7 apresenta a localização da bacia hidrográfica do rio Bicudo e a locação das 308 barraginhas construídas no ano de 2015. Nesta figura pode-se verificar a localização das estações de monitoramento fluviométrico e de monitoramento da qualidade da água, no leito do rio Bicudo.

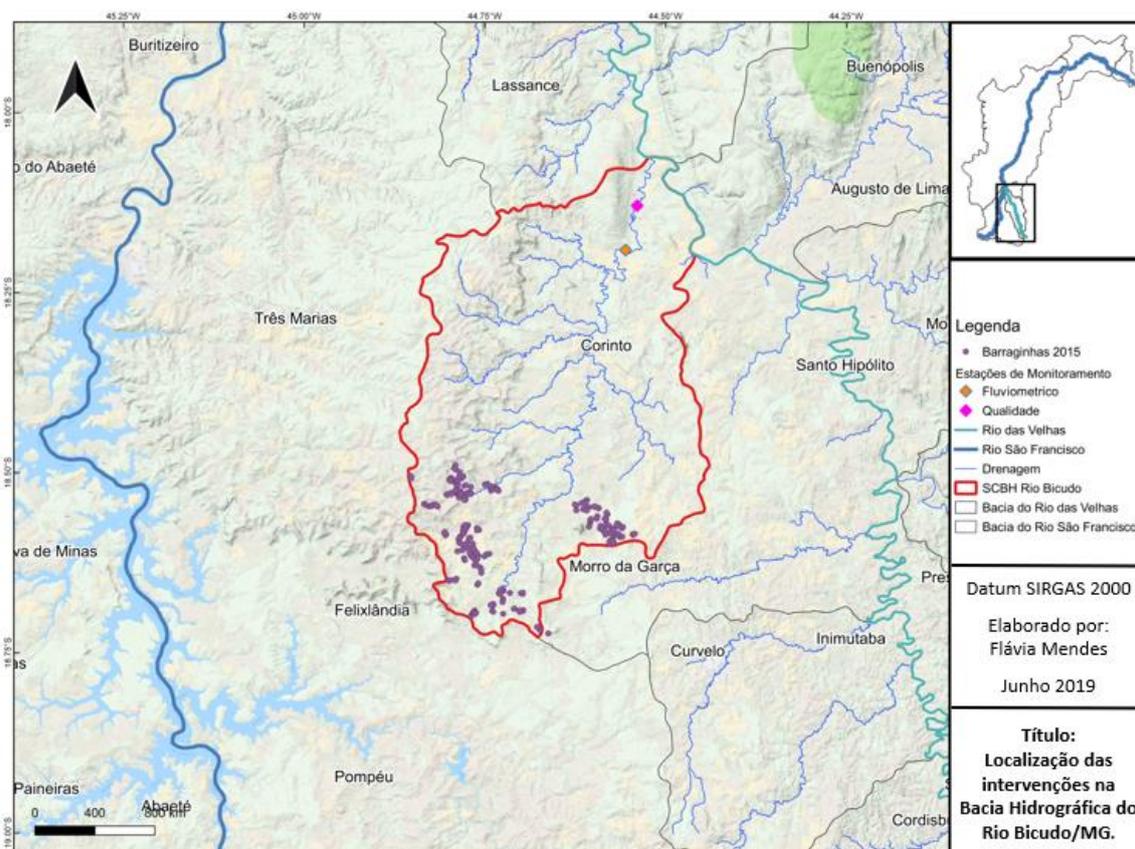


Figura 7 - Localização da bacia Hidrográfica do rio Bicudo, com a representação das bacias de contenção “barraginhas” instaladas e das estações de monitoramento (fluviométrico e da qualidade da água). Fonte dos dados: SIGA CBH Rio das Velhas.

4.1.1 Clima

Um dos sistemas de classificação hoje, amplamente empregado é o Sistema de Classificação Climática de Köppen-Geiger. Baseia-se no pressuposto de que a vegetação nativa é a melhor expressão do clima e combina temperaturas médias mensais e anuais bem como a precipitação. De acordo com a classificação de Köppen-Geiger a bacia hidrográfica do rio Bicudo está inserida em áreas abrangidas pelos climas Aw, Cwa e Cwb, conforme demonstrado na Figura 8.

De acordo com a Embrapa (2006) e Antunes (1986) esses climas são caracterizados da seguinte forma:

Aw: Clima tropical, com inverno seco. Apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). A temperatura média do mês mais frio é superior a 18°C. As precipitações são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1800 mm. Este tipo de clima predomina principalmente no oeste do Triângulo Mineiro, praticamente toda a metade do norte de Minas Gerais e no sudeste de Minas, na região de Muriaé – Cataguases – Leopoldina.

Cwa: Clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C). Este clima predomina nas regiões serranas do centro e sul de Minas Gerais e no norte nas serras do Espinhaço e Cabral.

Cwb: Clima subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno. A temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C. Em Minas Gerais, ocorre nas regiões de altitude mais elevadas das serras da Canastra, Espinhaço e Mantiqueira, numa pequena área à volta de Araguari e em outra ao sul de Carmo do Paranaíba.

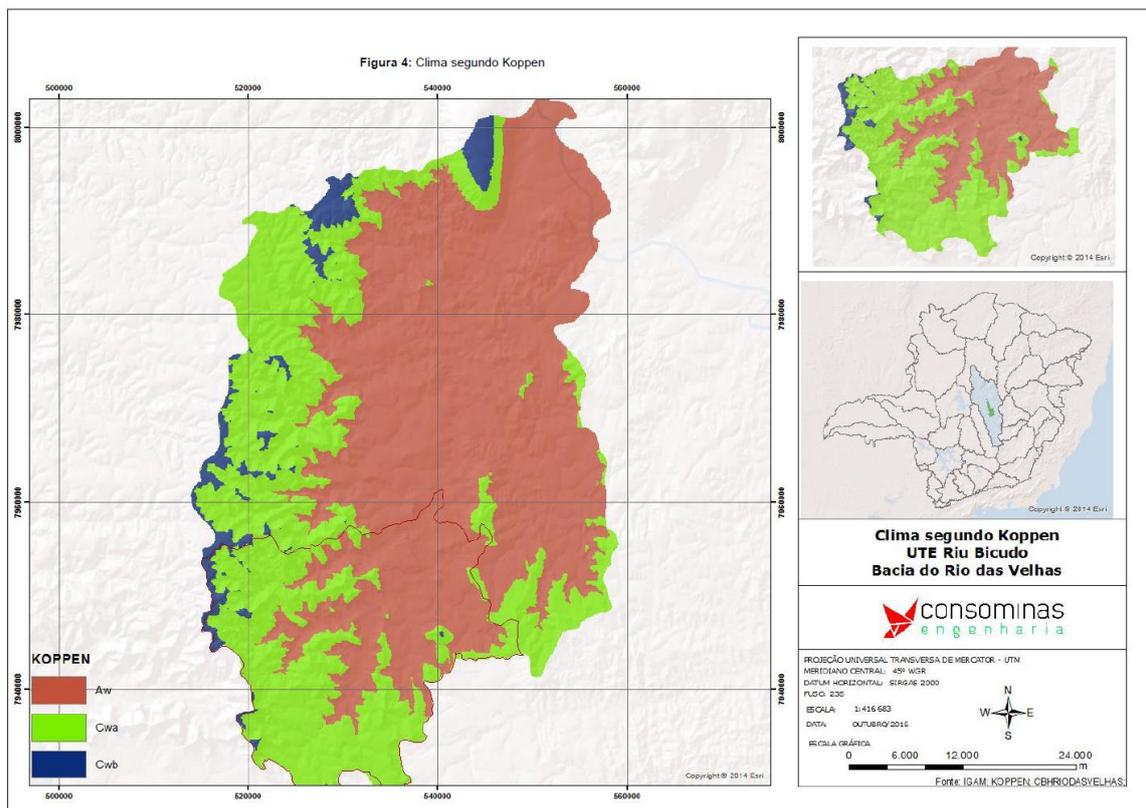


Figura 8 - Clima da bacia hidrográfica do rio Bicudo. Fonte: Agência Peixe Vivo (2016).

4.1.2 Cobertura Vegetal

De acordo com a Agência Peixe Vivo (2016), a vegetação da UTE Bicudo é marcada pela prevalência de dois biomas específicos: o Cerrado, que ocupa cerca de 65% da área da UTE, e a Mata Atlântica, que compõe 35% da área.

Caracterizada em sua maioria pelas áreas de pasto, a bacia do rio Bicudo possui a maior parcela da sua área ocupada pela classe agropecuária, que se divide em agricultura e pecuária.

Segundo caracterização da Embrapa (2006), e do MapBiomias (2016) na bacia do rio Bicudo, há predominância da vegetação savana parque com floresta de galeria. Essa formação é estritamente campestre, com um número pequeno de arbustos e subarbustos. Pereira (2009) esclarece que tal fisionomia pode ser encontrada em

diferentes posições topográficas, variados graus de umidade e fertilidade de solo, principalmente sobre encostas, chapadas, olhos d'água ou circundando veredas e bordas de matas de galeria. As gramíneas prevalecem no revestimento vegetal do pasto, mas pequenas árvores, arbustos e ervas, geralmente não alcançando mais que um metro de altura, a invadem, favorecidos pelas queimadas anuais.

Se tratando da região do alto rio Bicudo, é importante salientar uma grande participação da formação vegetal Savana Gramíneo-Lenhosa. Esse tipo de fitofisionomia caracteriza-se por apresentar domínio de gramíneas, mas apresenta algumas lenhosas anãs. A classificação da cobertura vegetal é apresentada na Figura 9.

A UTE Bicudo não possui Unidades de Conservação inseridas em seu território. Quanto à prioridade, 13% da área da UTE é considerada prioritária para conservação, segundo dados disponibilizados pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SISEMA.

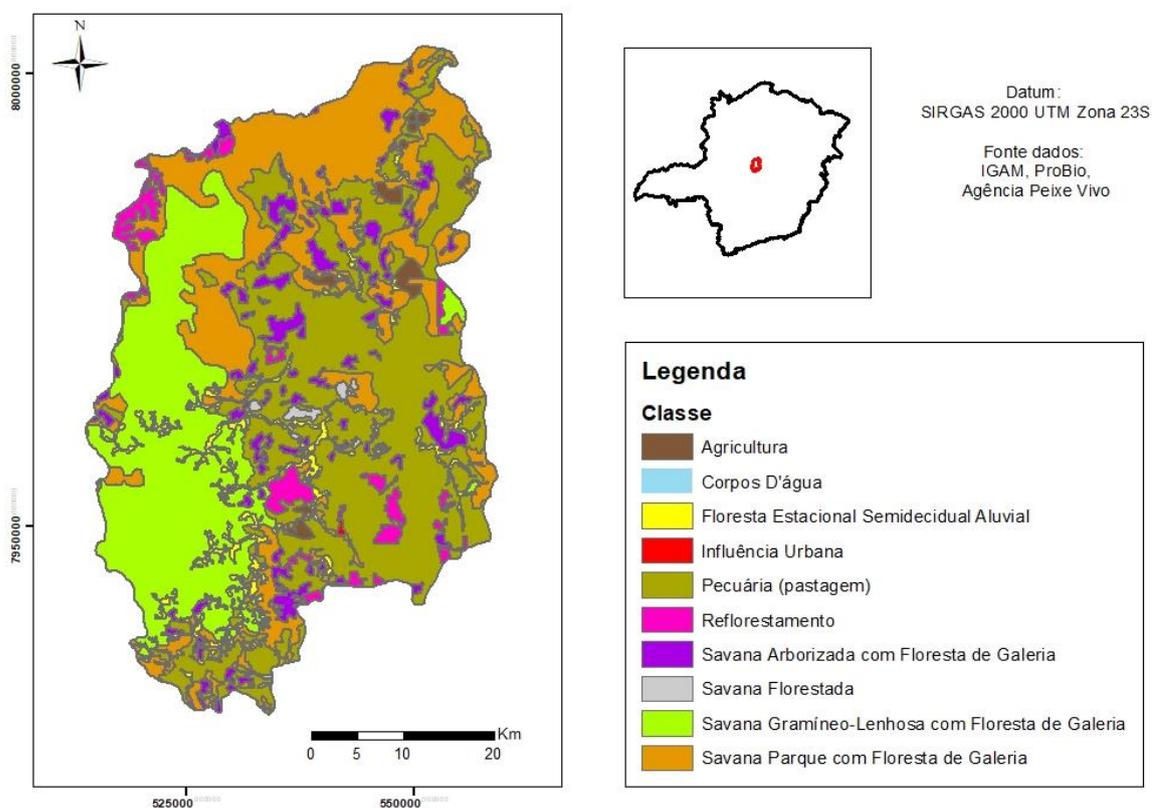


Figura 9 – Cobertura vegetal da bacia do rio Bicudo. Fonte: Autora.

4.1.3 Uso e Ocupação do Solo

Conforme dados disponibilizados pela Agência Peixe Vivo (2016), o mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Bicudo, elaborados a partir de mapas de cerrado e mata atlântica da Coleção 2, do MapBiomias, no ano de 2016, confirma a predominância da ocupação deste solo pela atividade agropecuária, que se

trata de uma atividade de grande impacto, com consideráveis áreas destinadas à pastagem, conforme demonstrado na Figura 10.

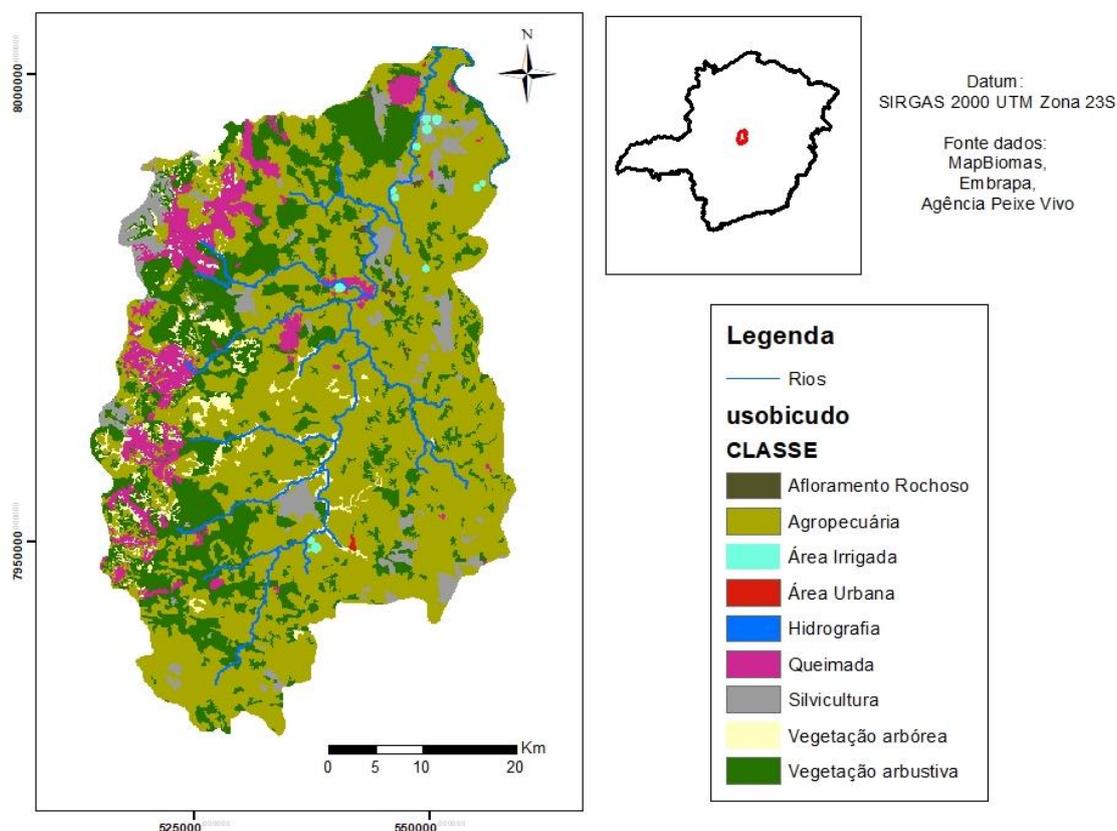


Figura 10 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio Bicudo, do ano de 2016. Fonte: Autora.

O uso intensivo de áreas com pastagem e a fragmentação ocasionada por esta atividade, gera impactos de forma negativa sobre a biodiversidade, podendo em muitos casos, levar à extinção de determinadas espécies naquele local (FERREIRA, 2005).

As principais ações responsáveis pelos processos erosivos nas áreas de depressão, que representam o entorno do leito do rio Bicudo, são os manejos agrícolas inadequados, pisoteio do gado, desmatamento e queimadas. A cobertura vegetal natural é especialmente importante para regular e proteger a camada superficial do solo nestas áreas. Fatores que eliminam a cobertura vegetal natural das áreas de encostas aumentam a exposição do terreno aos agentes erosivos, podendo surgir ravinas e voçorocas.

A classe com maior representatividade na bacia do rio Bicudo é a agropecuária, com 59,4% do total, seguida da classe “Vegetação arbustiva”, com 23,7%, o que confirma as características vegetativas da região, composta em sua maior parte pelo Cerrado (Savana). A classe de uso agropecuário é composta por lavoura e pecuária.

4.1.4 Relevo

De acordo com dados da Agência Peixe Vivo (2016), a bacia do rio Bicudo é caracterizada por apresentar um relevo altamente diversificado, sendo que na região de seu alto curso a região apresenta relevo montanhoso e fortemente ondulado, e é caracterizado como plano na região de seu baixo curso.

O relevo possui extensas áreas aplainadas ao longo dos principais rios da região. Apresenta desníveis topográficos variáveis com superfícies onduladas que mostram sinais de reelaboração recente, revelando as irregularidades do terreno. Os planaltos são constituídos por rochas com camadas sub-horizontais e dobradas do Grupo Bambuí.

Conforme verificado no modelo digital de elevação da bacia do rio Bicudo, os valores de altitude variam de 474 a 992 metros e as declividades são consideravelmente íngremes em alguns trechos da bacia (até 46,9%); seu valor médio é de 8,6%.

4.1.5 Solos

Os solos da bacia hidrográfica do rio Bicudo encontram-se vinculados a diversidade geomorfológica local, estando relacionados, também, à litologia (CBH Velhas, 2019).

De acordo com a Agência Peixe Vivo (2016), na UTE Bicudo há predominância de Cambissolo, com ocorrência de Latossolo Vermelho ao longo de grande extensão da bacia, de Neossolos Litólicos no extremo norte e Latossolo Vermelho-Amarelo nos extremos norte e oeste. As Áreas Cársticas representam 0,93% (2.110,30 ha) da área total da UTE Bicudo. Nessas áreas, os processos erosivos potenciais estão associados às dolinas e sumidouros, à dissolução química e ao escoamento subsuperficial que são os principais agentes responsáveis pelo transporte de sedimentos.

Na bacia hidrográfica do rio Bicudo, o Latossolo Vermelho ocorre em faixas nas porções central, sudeste e nordeste, associadas ao relevo suavemente ondulado a ondulado. São assim classificadas por apresentarem cores vermelhas acentuadas devido a presença dos óxidos de ferro em grande quantidade no material originário, em ambientes bem drenados. Por serem profundos e porosos, apresentam condições adequadas para a construção de barraginhas.

Não obstante, a maior porção da área é formada por solos pouco desenvolvidos, que ainda apresentam características do material originário (rocha) evidenciado pela presença de minerais primários, como é o caso do Cambissolo, presente nesta bacia. Para os Cambissolos há necessidade das práticas conservacionistas devido à maior suscetibilidade aos processos erosivos. Se tratando da região do alto rio Bicudo, onde se concentram as barraginhas instaladas na bacia, os solos predominantes na região são o Latossolo Vermelho e o Cambissolo, como pode ser verificado no mapa da Figura 11.

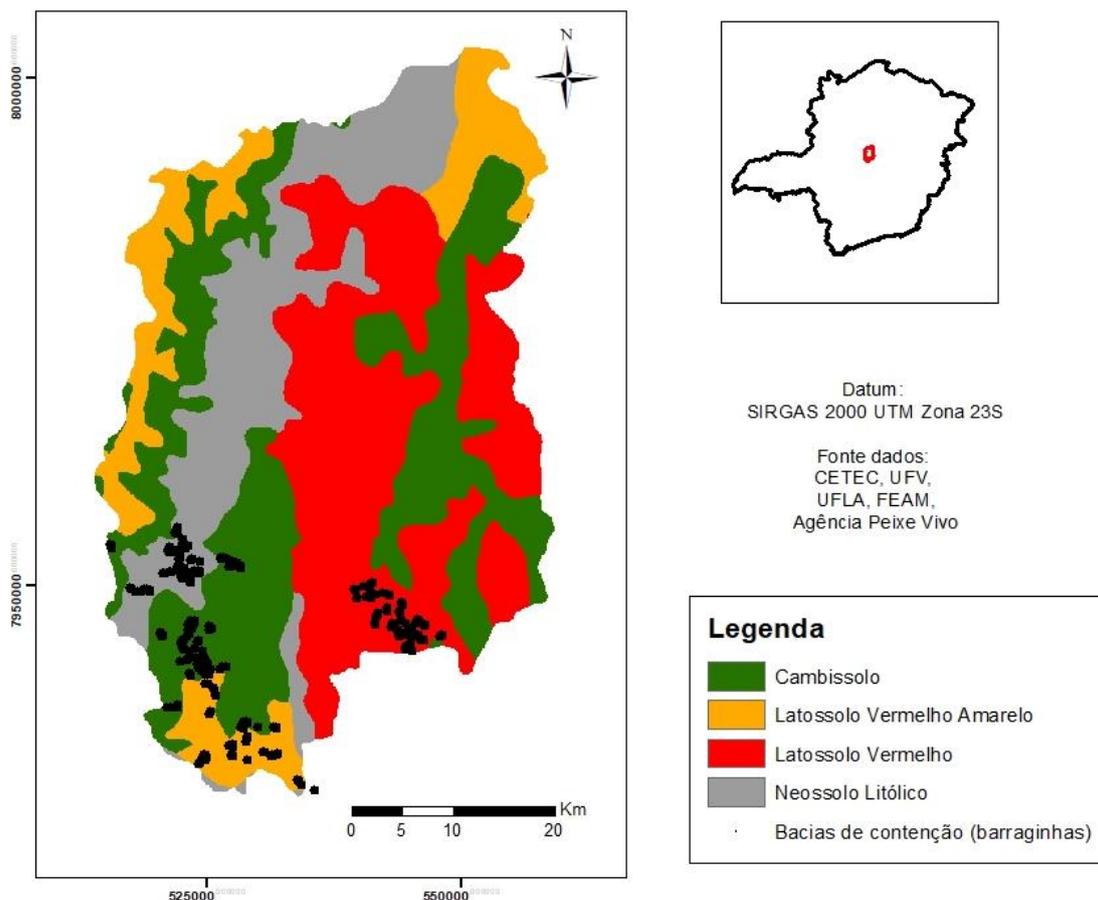


Figura 11 – Caracterização dos solos da bacia hidrográfica do rio Bicudo. Fonte: Autora.

4.2 Metodologia de pesquisa e desenvolvimento empregada

O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) será utilizado neste estudo, como uma extensão dos softwares de geoprocessamento ArcGIS ou QGIS, para simular o impacto da implantação de bacias de contenção, denominadas barraginhas, no incremento da disponibilidade hídrica do rio Bicudo.

A modelagem com o SWAT segue, necessariamente, etapas sequenciais. O processo se inicia com a entrada de dados no modelo que, antes da simulação propriamente dita, processa os dados de entrada e gera resultados parciais, como o delineamento da bacia. Após a simulação inicial, são iniciadas as etapas de pós-processamento, baseadas no ajuste dos dados simulados com os dados observados disponíveis, para variável de interesse, que neste caso tratam-se das vazões superficiais no rio Bicudo. O último procedimento é a validação do modelo, etapa na qual o modelo calibrado será testado com uma série independente de dados observados.

Após a calibração e validação do modelo, o mesmo estará apto a ser submetido às simulações para avaliação dos cenários desejados.

A Figura 12 apresenta um esquema de todo o processo mencionado:



Figura 12 – Etapas sequenciais da modelagem hidrológica com o SWAT.

O modelo foi calibrado e validado utilizando-se dados de monitoramento hidrológico e climático, dentre outros dados de entrada conforme será detalhado no item 3.6, deste trabalho.

Foi construído o modelo da bacia do rio Bicudo, considerando o período de 2002 a 2018; sendo o período de 2002 e 2003 o período de aquecimento do modelo; o período de 2009 a 2014 foi o período utilizado para a calibração do modelo; e o período de 2004 a 2008 foi adotado para a etapa de validação do modelo, empregando-se os resultados da simulação da vazão e os dados monitorados na estação fluviométrica “Ponte do Bicudo”.

Convém ressaltar que foram testados diversos períodos distintos, para as fases de calibração e validação do modelo, sendo adotados os períodos mencionados no parágrafo anterior, em função da maior representatividade dos dados hidrológicos (chuva e vazão), observada no período entre os anos de 2009 a 2014, por envolver eventos de cheias intensas e secas intensas. Assim, neste trabalho foi adotado o período que demonstrou maior representatividade dos dados hidrológicos para a etapa de calibração do modelo, no intuito de garantir a construção de um modelo mais próximo da realidade.

Com o modelo calibrado e validado foram trabalhados dois cenários no período de 2015 a 2018, um considerando a presença das barraginhas, materializadas por meio do aprofundamento do MDE em suas localizações geográficas e outro sem estas.

No presente estudo foi utilizada a versão mais recente à época do *software* SWAT, o ArcSWAT 2012.10_5.21, em associação com a versão do ArcGIS 10.5.

Na etapa de calibração, foi empregado o *software* SWATCUP 2012, versão 5.1.5, especializado em calibração automática de parâmetros do SWAT, validação de séries e análise de sensibilidade e de incertezas relacionadas a simulações hidrológicas.

Para edição e tratamento dos dados de entrada e de saída do modelo SWAT foi utilizado o Microsoft Office 365®.

Para cálculo das variáveis climáticas no modelo SWAT foi empregado o aplicativo *weather generator* - WGN Excel Macro.

4.3 Dados de entrada no Modelo SWAT

No SWAT, a entrada de dados acontece via interface SIG, podendo ser empregado o ArcMap ou o QGIS. Neste trabalho foi utilizado o ArcSWAT como interface entre o SWAT e o ArcMap. Esta interface possibilita a exibição das saídas do modelo por meio de mapas e tabelas.

Previamente à simulação, o SWAT exige que o usuário forneça uma série de informações sobre a bacia estudada. Tratam-se, basicamente, de dados relativos ao clima da área e de informações fisiográficas da bacia.

Conforme foi demonstrado na Figura 12, foram providenciados, para a construção do modelo da bacia do rio Bicudo, no SWAT, três diferentes arquivos na forma de mapas: modelo digital de elevação - MDE, mapa pedológico e mapa de uso e ocupação do solo para o período que se quer fazer a simulação. Todos os mapas foram convertidos para o formato raster.

O material cartográfico utilizado consistiu em mapa de solos fornecidos pelo convênio UFV – UFLA – CETEC – FEAM, em escala de 1:500.000; mapa do modelo digital de elevação com resolução espacial de 12,50 metros, o que corresponde a uma escala de 1:62.500, elaborado pela NASA, obtidos por meio do satélite ALOS DEM; e o mapa de uso e ocupação do solo, disponibilizado pela Agência Peixe Vivo, sendo empregados na sua elaboração mapas de Cerrado e Mata Atlântica da Coleção 2, do ano 2016 – MapBiomias, com resolução de 30 metros.

Além desses mapas, foram também preparados os dados tabulares referentes às condições climáticas: dados diários de precipitação, temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa.

Os dados de caracterização dos perfis de solos foram compilados em tabela Access fornecida ao modelo, com o detalhamento de cada classe de solo contida no mapa pedológico. A preparação desta tabela é um dos grandes entraves à aplicação do SWAT em larga escala no Brasil, pois é exigido um grande nível de detalhamento.

Os parâmetros necessários à simulação são: tipo de solo, profundidade da camada de solo, grupo hidrológico de solo, densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível, teor de carbono, areia, argila, silte e rocha, profundidade de raiz, potencial de fraturamento do solo, albedo e erodibilidade (NEITSCH *et al.*, 2005).

Esses parâmetros devem ser informados para cada uma das camadas (horizontes) de cada classe de solo. Para este estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica de estudos realizados no Brasil que tenham caracterizado os tipos de solos próximos à região de análise, para aplicações no SWAT.

Inicialmente foi utilizada a base de solos desenvolvida para o Cerrado brasileiro, apresentada por Lima *et al.* (2013). Entretanto os resultados obtidos não foram satisfatórios. Posteriormente foi adotada a caracterização dos solos apresentada para a

bacia do rio das Velhas, no trabalho de Almeida (2019), que foram fornecidos pelos pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG: Carlos Rogério de Mello, Matheus Fonseca Durães, Daniel Brasil Ferreira Pinto, Vinícius Augusto de Oliveira e José de Oliveira Melo Neto (dados não publicados). Este levantamento foi considerado de grande relevância para o presente estudo.

Os dados exigidos pelo modelo e as respectivas fontes adotadas neste trabalho estão detalhados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Fonte dos dados de entrada para simulação na bacia do rio Bicudo.

Dado de entrada	Tipo de dado	Descrição	Fonte
Precipitação Diária	Tabular	Dados diários de precipitação (mm)	Estação pluviométrica “Morro da Garça”, código 01844019, operada pela CPRM, sob responsabilidade da ANA.
Vazão diária	Tabular	Dados diários de vazão (m ³ /s)	Estação fluviométrica “Ponte do Bicudo”, código 41940000, operada pela CPRM, sob responsabilidade da ANA.
Dados climatológicos diários	Tabular	Dados diários de precipitação, temperatura, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento.	Estações Meteorológicas de Observação de Superfície Automática do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET.
Modelo Digital de Elevação	Mapa	O MDE foi obtido por meio dos dados do satélite ALOS DEM, que possui escala 1:62.500, com resolução espacial de 12,50 metros.	<i>NASA's Earth Science Data Systems (ESDS) Program.</i>
Mapa pedológico	Mapa	O mapa utilizado tem escala 1:500.000	Convênio UFV – UFLA – CETEC - FEAM
Mapa de uso e ocupação do solo	Mapa	Mapas de Cerrado e Mata Atlântica da Coleção 2, ano 2016 – MapBiomias, com resolução de 30 metros.	MAPBIOMAS / Agência Peixe Vivo
Dados dos perfis de solo	Tabular	Características do solo como granulometria, profundidade, densidade, condutividade hidráulica, etc. Deve ser informado para todos os perfis de cada classe de solo da bacia.	Bibliografia de trabalhos que realizaram a caracterização dos tipos de solos presentes na região.

4.4 Avaliação das séries históricas de monitoramento hidrológico

O interesse em estudos da tendência dos componentes do ciclo hidrológico tem aumentado devido às controvérsias sobre as mudanças climáticas. Para Uliana *et al.* (2015) a identificação de tendências sazonais de precipitação e vazão contribui para a

compreensão da variabilidade climática global e é essencial para o desenvolvimento de modelos hidrológicos, previsão hidrológica e gestão dos recursos hídricos.

Para análise do impacto na disponibilidade hídrica do rio Bicudo, proporcionado por intervenções para recuperação de áreas degradadas, do tipo bacias de contenção (barraginhas) executadas na bacia do rio Bicudo no ano de 2015, foi investigado o comportamento das variáveis hidrológicas de precipitação total anual e de vazão anual média nesta bacia hidrográfica.

Foi então comparado o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica, nos períodos anterior e posterior à implantação das bacias de contenção.

Para efetuar a análise do comportamento das variáveis hidrológicas nos períodos anteriores e posteriores às intervenções foi analisado um período de 8 (oito) anos, entre 2011 e 2018. Este período foi selecionado para avaliação, por envolver aproximadamente a mesma quantidade de tempo de análise antes e após o ano de 2015, no qual foram implantadas as bacias de contenção na região do alto rio Bicudo.

Para esta análise, os dados de monitoramento fluviométrico e pluviométrico foram extraídos do Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb, disponibilizado pela ANA, e foram compilados e analisados para obtenção dos valores de vazões médias anuais e de precipitação total anual.

Foi realizada também uma análise ampla de todo o período de dados empregados nas avaliações do modelo SWAT, neste trabalho. Cabe ressaltar que apesar da disponibilidade de dados de monitoramento pluviométrico para o período de 1988 a 2019 e da disponibilidade de dados de monitoramento fluviométrico de 1965 a 2019, foi realizada uma avaliação prévia de todos os dados disponíveis. A partir desta análise prévia, com o auxílio do software Excel, foi verificado que o período que envolve a menor quantidade de falhas de monitoramento fluviométrico é o período entre os anos de 2002 a 2018, sendo portanto adotado para as modelagens do presente estudo.

4.5 Caracterização climática da bacia do rio Bicudo - *Weather Generator* (WGN)

As informações analisadas para embasar este estudo consistiram primordialmente em dados hidrometeorológicos secundários extraídos do Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb, que disponibiliza um sistema de informações hidrológicas, divulgadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, em parceria com o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, Serviço Geológico do Brasil - CPRM e outros órgãos. Também foram consultadas outras fontes oficiais de entidades que disponibilizam dados de caracterização ambiental da região, tais como: Embrapa, INMET, Prefeituras, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, Agência Peixe Vivo, dentre outros.

A existência de dados de monitoramento hidrológico de boa qualidade, como medições de descargas líquidas, é fator condicionante para a calibração de modelos como o SWAT, segundo Carvalho (2014). Trata-se de um grande problema para a

realidade brasileira, cuja densidade de estações é muito pequena quando comparada à de países desenvolvidos. Na área de drenagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo existe apenas uma estação de monitoramento fluviométrico e uma estação de monitoramento pluviométrico.

Próximo à foz do rio Bicudo, na sua interseção com o rio das Velhas (Latitude S 18° 11' 26,88"/Longitude W 44° 33' 20,16") está localizada a estação fluviométrica de código 41940000, operada pela CPRM, sob responsabilidade da ANA. Esta estação, denominada "Ponte do Bicudo" apresenta dados de monitoramento fluviométrico que contemplam o período de 1965 a 2019.

Próximo à cabeceira do rio Bicudo (Latitude S 18° 32' 30,12"/Longitude W 44° 35' 56,04") está localizada a estação pluviométrica de código 01844019, operada pela CPRM, sob responsabilidade da ANA. Esta estação, denominada "Morro da Garça" apresenta dados de monitoramento pluviométrico que contemplam o período de 1988 a 2019.

O modelo SWAT requer como dados de entrada as seguintes variáveis meteorológicas para a bacia hidrográfica simulada: precipitação diária; temperaturas máxima e mínima do ar; radiação solar; velocidade do vento; temperatura do ponto de orvalho; e altura de chuva máxima de 30 minutos. Conforme relatado por Neitsch (2005), o SWAT inclui um gerador de condições atmosféricas utilizado para simular todas essas variáveis, para a bacia de estudo, com base em estatísticas mensais climáticas calculadas a partir de dados medidos e assim, é possível preencher as falhas nos registros monitorados ou gerar séries de variáveis regionais. Para inserção no *Write Weather Generator Data* (WGN) do SWAT, os dados meteorológicos foram organizados conforme requerido no Manual do Usuário do SWAT, na escala diária, em formato de texto (.txt).

Como não há séries completas de dados climáticos na bacia para subsidiar a simulação de cenários no modelo computacional SWAT, foi realizado, neste estudo, o cálculo das variáveis climáticas utilizando o aplicativo *weather generator* - WGN Excel Macro, desenvolvido por Boisrame (2010). Este aplicativo possibilita a criação de estatísticas e coeficientes para inserção no gerador climático, a partir de dados de monitoramento climático diário, em estações localizadas próximas à bacia hidrográfica do rio Bicudo.

Na Figura 13 é representada a bacia hidrográfica do rio Bicudo, afluente do rio das Velhas, no estado de Minas Gerais. Nesta Figura é indicada a localização das estações de monitoramento climático empregadas neste estudo.

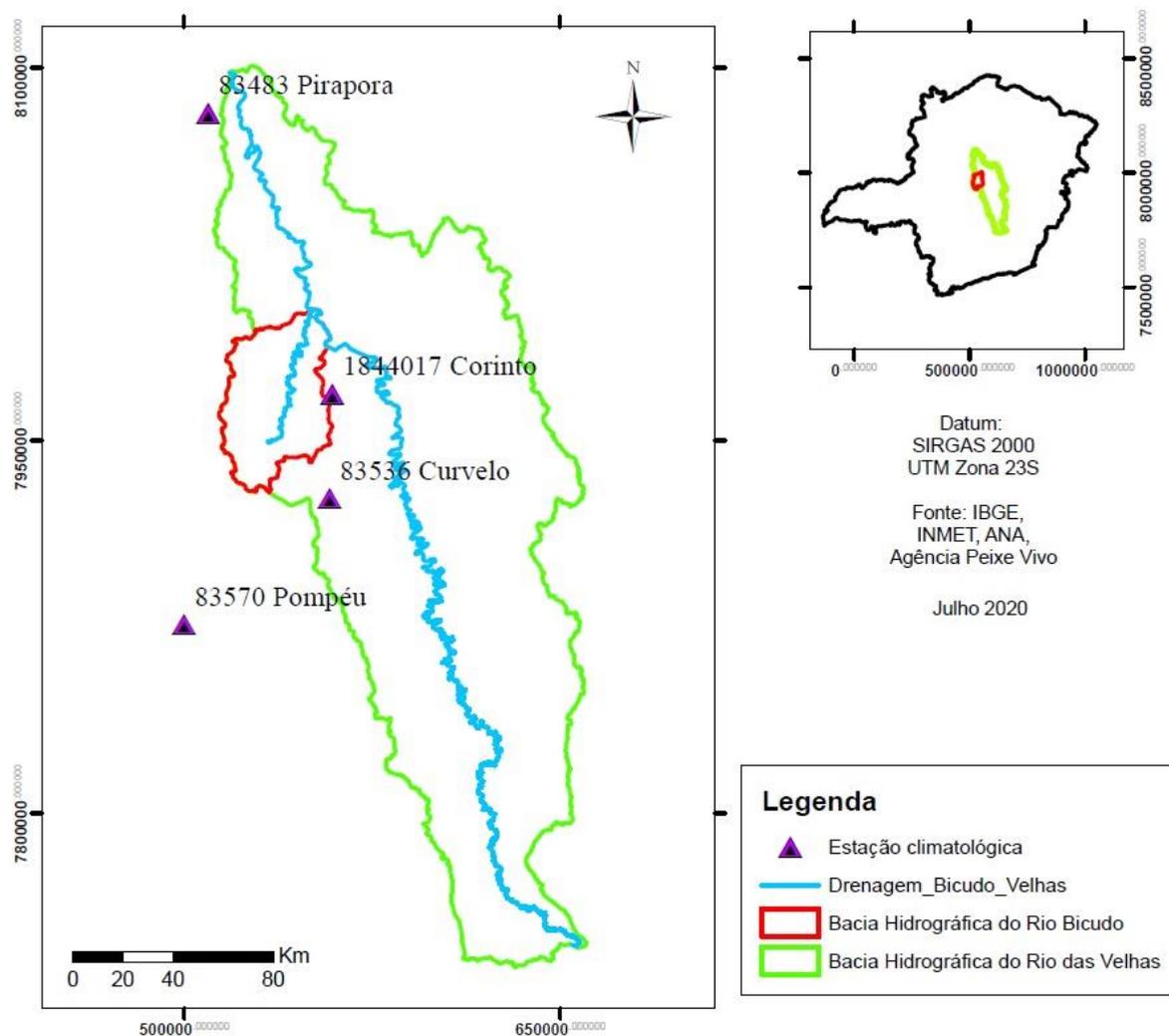


Figura 13 – Localização da bacia hidrográfica do rio Bicudo e das estações climáticas analisadas. Fonte: Autora.

Para a presente análise, optou-se pela utilização dos dados diários disponibilizados em estações de monitoramento meteorológico do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) ou da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Os dados selecionados, foram obtidos de quatro estações de monitoramento localizadas no entorno da bacia hidrográfica do rio Bicudo. Foi selecionado o intervalo de dados diários de monitoramento entre janeiro de 2002 e dezembro de 2018. A maior parte dos dados necessários foi obtida das estações de monitoramento localizadas em Curvelo/MG e em Pompéu/MG. Optou-se por utilizar os dados da estação pluviométrica operada pela ANA, localizada nos limites da bacia do rio Bicudo, no município de Corinto/MG, tendo em vista a relevância desses dados, devido à proximidade de tal estação com o rio Bicudo. Por fim, foi selecionada a estação de monitoramento localizada em Pirapora/MG, uma vez que as demais estações climáticas localizadas próximas à bacia do rio Bicudo não realizam monitoramento diário de

insolação, ou realizam este monitoramento, porém apresentam muitas falhas no período de estudo, como é o caso da estação do INMET localizada em Pompéu/MG.

As informações das estações analisadas, suas distâncias em relação à bacia hidrográfica do rio Bicudo, bem como os parâmetros monitorados que foram utilizados para cada estação climática estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados das estações climáticas analisadas.

Estação de monitoramento	83536 INMET	83570 INMET	1844017 ANA	83483 INMET
Localização	Curvelo/MG	Pompéu/MG	Corinto/MG	Pirapora/MG
Latitude (graus decimais)	-18,75	-19,21	-18,37	-17,35
Longitude (graus decimais)	-44,45	-45,00	-44,44	-44,91
Altitude (m)	672,00	690,91	640,00	505,24
Distância até a bacia do rio Bicudo (km)	20,00	61,00	0	89,00
Dados selecionados	- Precipitação - Temperatura - Umidade Relativa do Ar - Velocidade do vento	- Insolação - Temperatura - Umidade Relativa do Ar - Velocidade do vento	- Precipitação	- Insolação

Para cada estação climática analisada, os dados diários de monitoramento, selecionados conforme disposto na Tabela 2, foram adaptados ao formato requerido pelo *Weather Generator - WGN*, para as variáveis: precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, velocidade do vento, e umidade relativa do ar.

Já as variáveis temperatura do ponto de orvalho, altura da chuva máxima de 30 minutos e radiação solar foram estimadas, conforme descrito a seguir.

O cálculo da temperatura do ponto de orvalho foi realizado utilizando-se a fórmula apresentada por Lawrence (2005):

$$t_d \approx t - \left(\frac{100 - RH}{5} \right) \quad (14)$$

Onde:

RH = umidade relativa do ar (%);

t_d = temperatura do ponto de orvalho (°C); e

t = temperatura média ambiente (°C).

Foram obtidos os resultados diários de temperatura do ponto de orvalho para as estações que possuem dados de monitoramento diário simultâneo para os parâmetros umidade relativa do ar e temperatura média do ambiente.

A altura de chuva máxima de 30 minutos foi calculada utilizando os dados diários disponibilizados pelas estações de monitoramento pluviométrico localizadas nos municípios Corinto/MG e Curvelo/MG. Para o cálculo do evento extremo de chuva máxima de 30 minutos, foi necessário transformar a série de chuvas diárias em chuvas de 24 horas, em seguida as chuvas de 24 horas em chuvas de 1 hora, e por fim, as chuvas de 1 hora em chuvas de 30 minutos, a partir da multiplicação de três coeficientes 1,14; 0,42; e 0,74, conforme desagregação de chuvas, referida pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica da Companhia Ambiental Paulista - DAEE/CETESB (1980).

Quanto à radiação solar, os postos climatológicos do INMET possuem dados de insolação diária, em horas, sendo que o aplicativo WGN requer dados de radiação solar diária, em MJ/m². De acordo com Neitsch *et al.* (2005) e Noronha *et al.* (2015), para adaptar as unidades dessas duas variáveis é preciso aplicar equações representativas de dois principais grupos de conceitos que influenciam a radiação solar na superfície, a relação Terra-Sol e os efeitos atmosféricos sobre a radiação solar. Para obtenção dos dados de radiação solar diária, foi utilizada a equação de Angström-Prescott, pois segundo Borges, *et al.* (2018), esta equação é a mais utilizada para tal finalidade.

$$H = H_0 \cdot \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (15)$$

Onde:

H = radiação solar diária em superfície horizontal (MJ/m²/dia);

H₀ = radiação extraterrestre diária (MJ/m²/dia);

n = número de horas de brilho solar diária;

N = quantidade máxima de horas de brilho solar diária; e

a e b = coeficientes de regressão, que são característicos da região analisada.

4.6 Elaboração dos dados cartográficos para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo

No ano de 2007, o Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC elaborou o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais na escala de 1:600.000. Contudo, devido à necessidade de um levantamento mais detalhado, foi estabelecido um convênio entre a Universidade Federal de Viçosa (UFV), a Universidade Federal de Lavras (UFLA), o CETEC e a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), para a realização de novos trabalhos de amostragem e atualização da classificação dos solos mineiros para a versão mais recente do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa (2006), obtendo como produto final, em 2010, o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, na escala de 1:500.000. Este foi o material cartográfico adotado como dados de entrada nas simulações do presente estudo.

As características de relevo foram expressas pelo Modelo Numérico de Terreno (MNT), gerado a partir do modelo digital do satélite ALOS PALSAR – *Advanced Land*

Observing Satellite-1. Os dados obtidos por este satélite são provenientes de múltiplos modos de observação com variadas polarizações, resoluções, largura de faixas e ângulos de observação.

Este satélite foi adotado para o presente estudo, por possuir melhor resolução espacial, de 12,5 metros, quando comparado aos outros satélites que disponibilizam imagens de forma gratuita, como o SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*, que possui resolução de 30 metros.

As imagens do ALOS PALSAR são disponibilizadas livremente na plataforma do programa de Sistemas de Dados Científicos Terrestres do site oficial da NASA – *Nacional Aeronautics and Space Administration* dos EUA.

A área da bacia hidrográfica do rio Bicudo contempla quatro imagens do satélite ALOS PALSAR. Dessa forma, tornou-se necessária a construção de um mosaico a partir dessas imagens parciais. Para isso, foi utilizada a ferramenta “Mosaic to new raster”.

A partir do mosaico obtido, foi gerado um arquivo raster do Modelo Digital de Elevação (MDE) contemplando a área da bacia do rio Bicudo.

Para a correção de imperfeições nos dados de elevação, o MDE foi convertido para pontos, utilizando-se a ferramenta “Raster to point”. Na sequência foi efetuada a interpolação dos pontos por meio da ferramenta “IDW”.

O raster obtido foi empregado como input no modelo SWAT para o período de aquecimento, calibração e para a simulação do Cenário 02 (sem barraginhas).

Para o Cenário 01 (com barraginhas), a localização das bacias de contenção foi representada no MDE utilizando-se a ferramenta “Raster calculator”. Para isso, a partir do MDE empregado no Cenário 02, foi subtraído o volume de cada barraginha instalada na bacia do rio Bicudo. Cada barraginha foi representada com a profundidade de 2 metros e com o diâmetro de 14 metros, sendo o total de 308 barraginhas construídas na bacia no ano de 2015.

Os dados cartográficos de uso e ocupação do solo empregados nesta pesquisa foram disponibilizado pela Agência Peixe Vivo. Estes dados foram produzidos a partir de mapas de Cerrado e Mata Atlântica da Coleção 2, do ano 2016 – MapBiomias. Posteriormente, foi realizado o recorte para a bacia do rio Bicudo.

Os mapas do MapBiomias são elaborados por meio da classificação automática pixel a pixel de imagens de satélites Landsat com resolução de 30 metros.

O modelo SWAT contém um banco de dados com a caracterização de cada categoria de uso e ocupação do solo. Entretanto, este banco de dados foi elaborado com base nas características de uso e ocupação do solo observadas nos Estados Unidos. Assim, torna-se necessário aos usuários do SWAT, nos demais países, efetuar a

compatibilização das características da área em estudo com a correspondente caracterização apresentada pelo banco de dados do modelo.

A Tabela 3 apresenta a correspondência dos usos do solo da bacia hidrográfica do rio Bicudo com o banco de dados do SWAT, adotada para este trabalho, incluindo o percentual de cada uso observado na bacia.

Tabela 3 – Compatibilização das classes de uso e ocupação do solo da bacia do rio Bicudo com o banco de dados do SWAT.

Uso do solo	Correspondente no banco de dados SWAT	Código SWAT	%
Afloramento Rochoso	Barren	BARR	0,32%
Agropecuária	Agricultural Land-Generic	AGRL	59,41%
Área Irrigada	Agricultural Land-Row Crops	AGRR	0,38%
Área Urbana	Residential	URBN	0,05%
Hidrografia	Water	WATR	0,13%
Queimada	Range-grasses	RNGE	6,87%
Silvicultura	Eucalyptus	EUCA	5,74%
Vegetação arbórea	Forest – Evergreen	FRSE	3,36%
Vegetação arbustiva	Range-brush	RNGB	23,74%

4.7 Construção do modelo hidrológico da bacia do rio Bicudo

Os primeiros processamentos realizados pelo SWAT são relativos ao delineamento da bacia estudada. Isso é feito a partir do modelo digital de elevação fornecido. O SWAT executa esta etapa utilizando ferramentas de hidrologia do ArcGIS. Assim, basta o usuário informar o ponto do exutório da bacia para que o SWAT processe a área e formato da bacia, a delimitação dos cursos d'água, a divisão em sub-bacias, as declividades, a direção do fluxo e os pontos de acumulação de água (CARVALHO, 2014).

Em relação ao delineamento da rede hídrica, seu nível de detalhamento pode ser configurado pelo usuário. No nível máximo de detalhamento a ferramenta inclui trechos efêmeros dos rios modelados, gerando grande quantidade de sub-bacias. Há uma série de estudos com SWAT que aproveitam essa ferramenta para comparar os resultados da simulação com maior ou menor quantidade de sub-bacias dentro da área estudada. Jha *et al.* (2004) elaboraram estudo exclusivamente para avaliar o efeito da discretização da bacia nos resultados do SWAT. Segundo esses autores, a divisão ótima indica que as sub-bacias devem ter entre 2 e 6% do tamanho da área estudada (CARVALHO, 2014).

Portanto, para as simulações efetuadas nesta pesquisa foi adotada a discretização da bacia que corresponde a 2% da área total.

Os mapas de solo, uso do solo e modelo digital de elevação – MDE são fornecidos previamente, como dados de entrada no modelo SWAT. Já as declividades são geradas através de processamentos sobre o MDE fornecido, após o usuário definir a quantidade de classes de declividade a ser considerada. Neste estudo foi realizada a

análise da amplitude de declividades da bacia do rio Bicudo, e posteriormente foi definida a quantidade de classes de declividade para modelagem no SWAT. Considerando que a declividade média na bacia é de 8,57%, foram definidas 3 classes de declividade: I = até 5%; II = de 5% a 12%; e III = acima de 12%. Esta definição foi adotada por conferir boa representatividade para cada classe, sendo que cada uma delas abrangeu uma quantidade aproximada de áreas.

Carvalho (2014) ressalta que o SWAT dá a opção ao usuário para designar um nível de sensibilidade para ser eliminado de áreas de uso do solo, tipo de solo e declividade menores do que o valor arbitrado. Assim, HRUs que sejam muito pequenas podem ser eliminadas. Isso visa, unicamente, ganho em eficiência no momento da simulação e da calibração. Neste estudo foram estabelecidos os níveis de sensibilidade para a definição das HRUs de 15% para o uso do solo, 20% para os tipos de solos e 20% para as declividades.

4.8 Calibração, validação e simulações

No SWAT, o período de simulação máximo permitido ao usuário é determinado pela abrangência dos dados climáticos. Os dados de monitoramento disponíveis para a bacia hidrográfica do rio Bicudo, conforme fontes discriminadas na Tabela 2, envolvem um grande período de anos de monitoramento, sendo selecionado o período de dados que contempla desde o dia 01/01/2002 até o dia 31/12/2018, período com menor quantidade de falhas verificadas nos dados fluviométricos disponíveis. Este período contempla todas as etapas de análises e modelagens efetuadas por meio do SWAT para este estudo, conforme discriminado na Tabela 4.

Tabela 4 – Períodos adotados para simulação no modelo SWAT.

Etapas	Período
Calibração do modelo	01/01/2009 a 31/12/2014 (6 anos) Aquecimento: 01/01/2007 a 31/12/2008 (2 anos)
Validação do modelo	01/01/2004 a 31/12/2008 (5 anos) Aquecimento: 01/01/2002 a 31/12/2003 (2 anos)
Simulações de cenários	01/01/2015 a 31/05/2018 (4 anos) Aquecimento: 01/01/2013 a 31/12/2014 (2 anos)

Neste trabalho foi adotado um período de aquecimento de 2 (dois) anos, para cada etapa: calibração, validação e simulação de cenários, conforme recomendado por Arnold *et al.* (2012).

A calibração é o ajuste dos parâmetros de um modelo para que obtenha uma aceitável concordância entre os dados observados e simulados (ARNOLD *et al.*, 2000).

Conforme recomendado por Arnold *et al.* (2000), é necessário separar dois períodos da série temporal de dados disponíveis, um para a calibração e outro para a validação. Neste trabalho, os dados de calibração foram selecionados visando contemplar um período com grande variabilidade de comportamento hidrológico, no que se refere aos dados de monitoramento fluviométrico e pluviométrico. Foram

calibrados os dados monitorados durante um período de 6 anos e foram validados os dados monitorados em um período distinto de 5 anos, sendo adotado um período prévio de 2 anos, para aquecimento (*warm up*), conforme disposto na Tabela 4. Ambos os intervalos selecionados, para calibração e validação envolveram períodos secos e chuvosos.

Na etapa de calibração, com o apoio do SWAT-CUP, foram realizadas diversas tentativas alterando-se tanto os parâmetros a serem calibrados, quando os intervalos de calibração de cada parâmetro, com base em trabalhos similares publicados, que serão citados na sequência neste tópico.

Considerando que as simulações com maior quantidade de iterações demandam alta capacidade e maior tempo de processamento do SWAT-CUP, foram definidas estratégias neste estudo, visando otimizar o processo de calibração. Neste intuito, inicialmente foram testados os conjuntos de parâmetros e os intervalos pré-definidos, com base nos trabalhos que foram adotados como referência, a serem citados na sequência. Para estes testes iniciais, foram rodadas 30 iterações, o que demandou menor tempo e capacidade de processamento do SWAT-CUP. No momento em que os resultados das estatísticas obtidas se aproximaram dos valores desejados, rodou-se 500 iterações do SWAT-CUP com os conjuntos de parâmetros e intervalos obtidos nas iterações iniciais. Portanto, esta estratégia possibilitou a dedicação de maior quantidade de tempo e capacidade de processamento do *software* para os parâmetros mais adequados às condições do modelo da bacia do rio Bicudo.

Por consistir em um procedimento que compara respostas geradas pelo modelo (vazão, sedimentação, etc) de acordo com as variações nos valores de seus parâmetros, a análise de sensibilidade necessita de um valor inicial para comparação. Esse valor pode ser obtido a partir das próprias simulações do modelo (feitas com valores *default* dos parâmetros), a partir de dados observados da variável que se pretende simular ou a partir de referências bibliográficas para cenários similares.

Para a análise da sensibilidade de cada parâmetro no resultado de cada iteração, por meio do emprego dos métodos combinados *Latin Hypercube* (LH) e *one-factor-at-time* (OAT), do *software* SWAT-CUP, foram definidos os parâmetros mais sensíveis à calibração, fazendo uso desta informação para a próxima iteração, durante o processamento da calibração.

Neste trabalho, para a definição de quais parâmetros deveriam ser calibrados, foi realizada uma busca na literatura disponível, para a identificação dos parâmetros relacionados à vazão, que são comumente mais sensíveis. Nesta etapa, diversos parâmetros foram testados e avaliados no *software* SWAT-CUP, sendo consideradas mais relevantes para o contexto hidrológico da bacia do rio Bicudo, as faixas de parâmetros adotadas no trabalho de Almeida, A.L.S.P. (2019) que realizou a calibração de parâmetros para a bacia hidrográfica do rio das Velhas, incluindo a bacia do rio Bicudo; o trabalho de Carvalho, F.H. (2014), que efetuou o ajuste dos parâmetros para uma bacia agrícola do Cerrado brasileiro; o trabalho de Durães, M.F. (2010), que

realizou a calibração dos parâmetros para a bacia do rio Paraopeba; e o trabalho de Almeida, R.A. (2016), que calibrou os parâmetros para a bacia do rio Mucuri.

A partir das referências mencionadas acima, e das análises de sensibilidade dos parâmetros testados no *software* SWAT-CUP foi definido um grupo de 11 (onze) parâmetros a serem calibrados no âmbito deste trabalho.

Os onze parâmetros empregados nas etapas de calibração e validação do modelo foram os seguintes: número da curva inicial para a condição de umidade II (CN2), constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF), tempo de recarga do aquífero (GW_DELAY), limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN), coeficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular/zona não saturada (GW_REVAP), limite de água no aquífero raso para ocorrer retorno para a zona radicular/zona não saturada ou percolação para o aquífero profundo (REVAPMN), capacidade de armazenamento de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada no solo (SOL_K), coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal (CH_N2), fator de demanda de água pelas plantas (EPCO), fator de demanda de evaporação da água do solo (ESCO).

Para a avaliação e definição de estratégias durante a etapa de calibração dos dados, foi essencial o trabalho desenvolvido por Abbaspour *et al.* (2015), que apresenta a orientação de quais parâmetros devem ser alterados, tendo seus valores aumentados ou reduzidos, visando obter melhores resultados nas simulações de vazões máximas ou mínimas.

Conforme recomendado por Abbaspour (2015), a validação do modelo foi realizada rodando-se uma nova simulação com 500 iterações, no SWAT-CUP, com os dados gerados na simulação realizada no ArcSWAT para o período de 2004 a 2008, na qual foram adotados os parâmetros calibrados.

No âmbito deste trabalho a função objetivo adotada foi o NS, sendo assim a cada iteração o *software* SWAT-CUP buscava maximizar este índice. Adicionalmente foram também avaliados os índices PBIAS, R², fator-p e fator-r, no intuito de avaliar a qualidade das simulações e dos ajustes.

Na Tabela 5 são apresentados os intervalos de performance dos índices NS e PBIAS, recomendados para as simulações com o passo de tempo mensal, e a avaliação de desempenho, conforme estudos desenvolvidos por Moriasi *et al.* (2007).

Tabela 5 – Classificação do desempenho das simulações mensais do modelo SWAT conforme funções objetivo NS e PBIAS.

Avaliação de desempenho para simulações de vazão	NS	PBIAS
Muito bom	$0,75 < NS < 1,00$	$PBIAS < \pm 10\%$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$\pm 10\% < PBIAS < \pm 15\%$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	$\pm 15\% < PBIAS < \pm 25\%$
Inadequado	$NS \leq 0,50$	$PBIAS > \pm 25\%$

Por sua vez, a avaliação dos índices R^2 , fator-p e fator-r foi efetuada em conformidade com os critérios apresentados no tópico 3.4.4 deste trabalho.

Após as etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação dos parâmetros procedeu-se à etapa das simulações propostas para este estudo, no intuito de investigar alterações nas vazões do rio Bicudo para as seguintes situações:

- 1) Cenário 01 (situação real): Presença das bacias de contenção “barraginhas” na bacia do rio Bicudo, construídas no ano de 2015.
- 2) Cenário 02 (situação hipotética): Ausência das bacias de contenção “barraginhas” na bacia do rio Bicudo;

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Correção e preparo de dados

Os dados de entrada tabulares, requeridos para a modelagem da bacia do rio Bicudo no SWAT, foram corrigidos e adaptados ao formato requerido pelo modelo, em conformidade com as orientações do manual do usuário do SWAT. Tais dados foram ajustados e inseridos no modelo por meio do arquivo Access do SWAT Database ou por meio de arquivos de texto .txt.

Os dados cartográficos foram adquiridos e preparados conforme relatado no Capítulo 3 – Metodologia. A caracterização e os mapas produzidos para inserção na modelagem do ArcSWAT visando refletir o contexto físico da bacia hidrográfica do rio Bicudo, são apresentados na sequência, nas Figuras 16, 17 e 18.

Para todos os mapas foi adotado o sistema referencial de coordenadas SIRGAS 2000 UTM Zona 23S, e os dados foram convertidos para o formato raster antes de sua inserção no modelo.

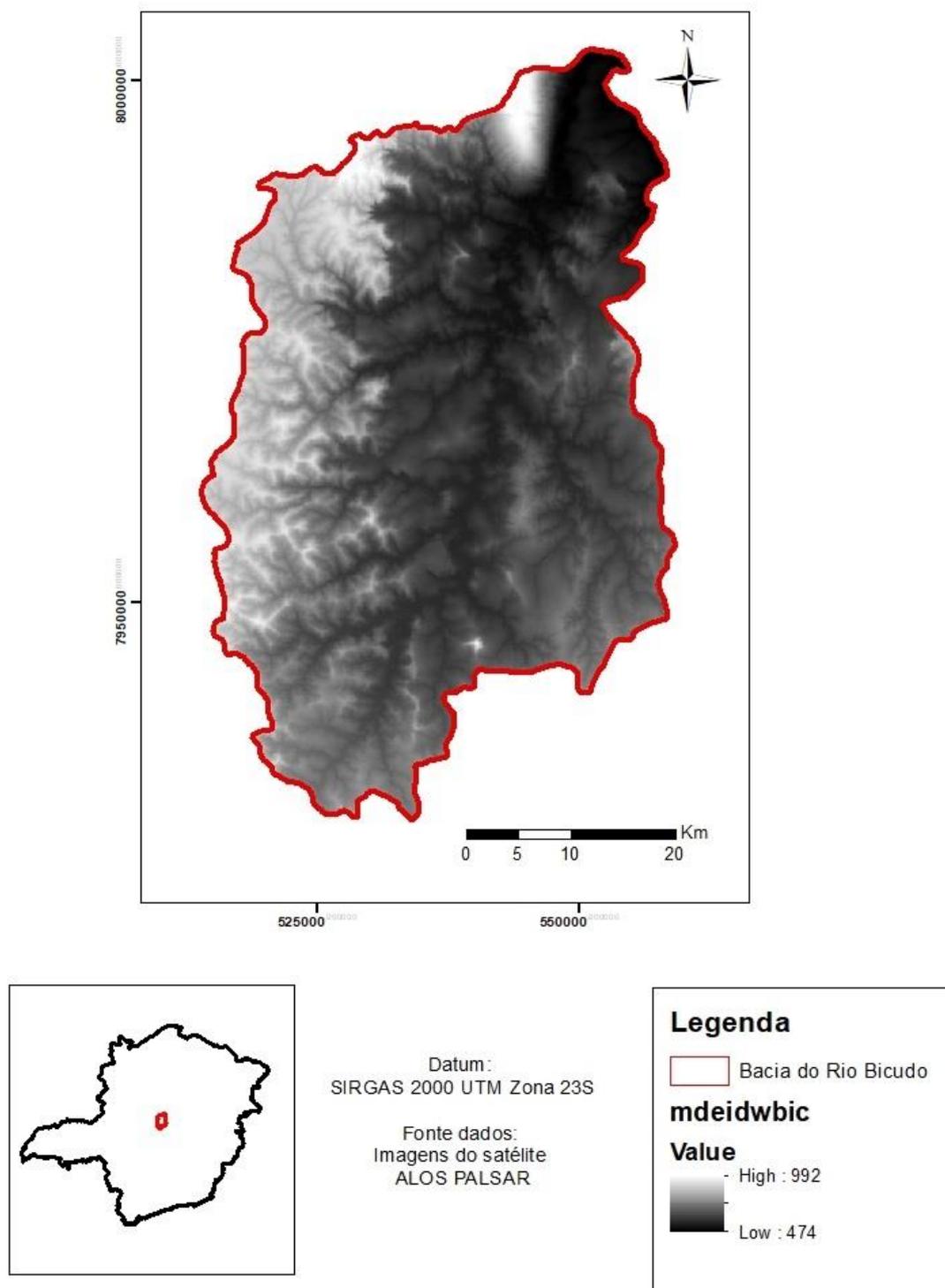


Figura 14 – Mapa do Modelo Digital de Elevação – MDE, preparado como dado de entrada para a modelagem da bacia do rio Bicudo no SWAT.

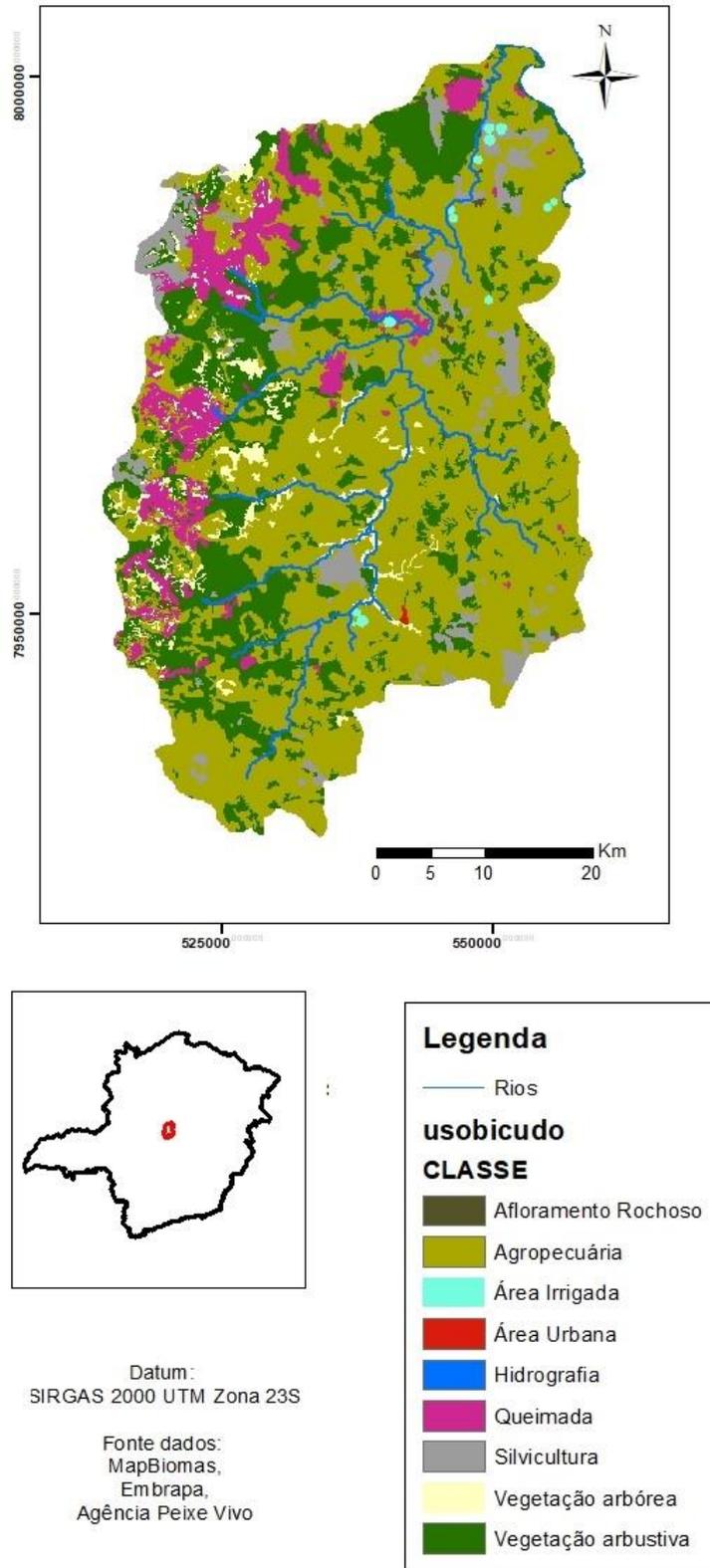


Figura 15 – Mapa de uso e ocupação do solo preparado como dado de entrada para a modelagem da bacia do rio Bicudo no SWAT.

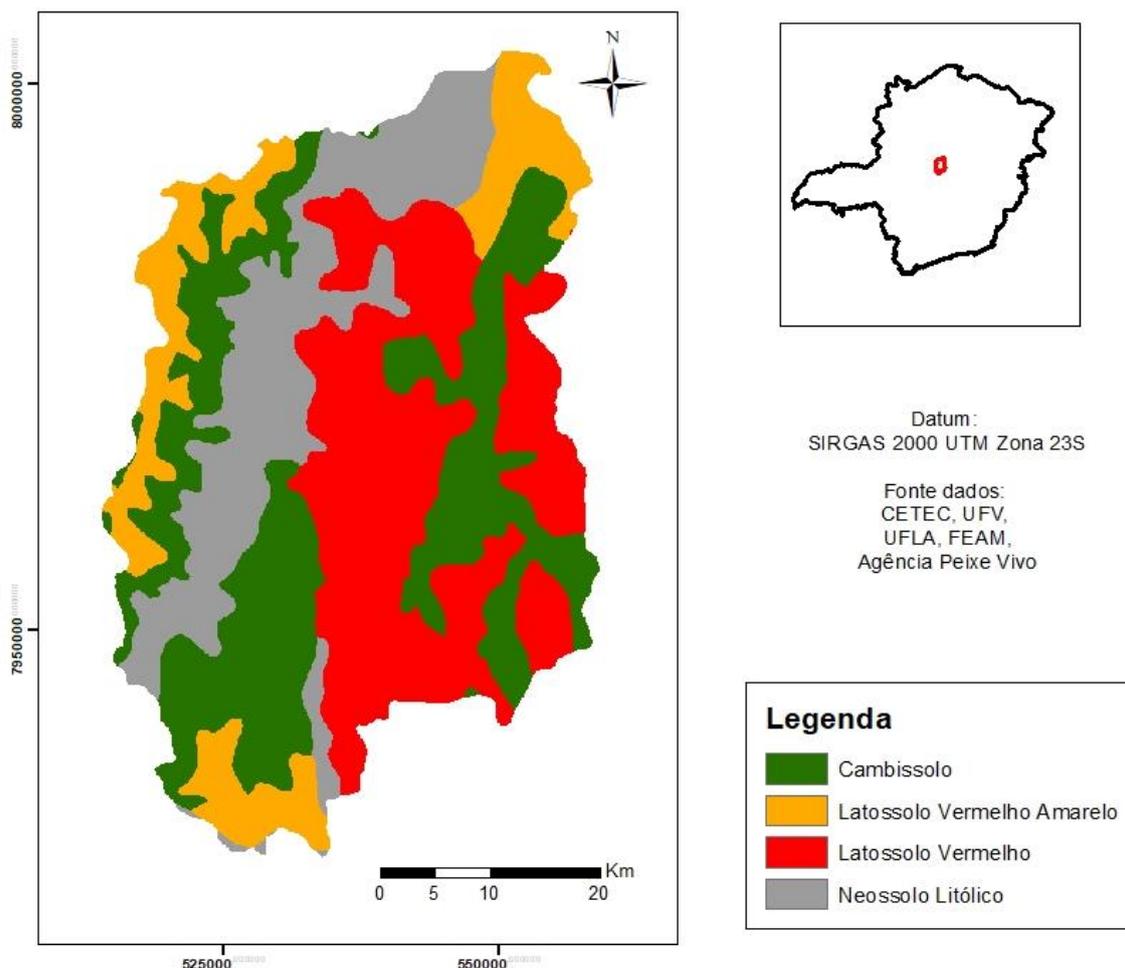


Figura 16 – Mapa de solos preparado como dado de entrada para a modelagem da bacia do rio Bicudo no SWAT.

Primeiramente foi realizada a avaliação e os testes do modelo com os dados cartográficos de solos disponibilizados pela EMBRAPA (2006), o que não gerou resultados satisfatórios no SWAT. Adotou-se então as bases cartográficas disponibilizadas pelo consórcio CETEC, UFV, UFLA, FEAM, que produziram resultados satisfatórios para a bacia. Esses dados são os que constam na Figura 16.

Por sua vez, após a avaliação e testes dos dados tabulares disponibilizados pela literatura, os dados que reproduziram mais adequadamente as características da bacia do rio Bicudo foram os dados empregados no trabalho de Almeida (2019), que são expostos nas Tabelas de 6 a 10, para cada camada do perfil de solo, conforme adotado no modelo para o presente trabalho.

Tabela 6 – Caracterização geral e da camada 1 dos solos da bacia do rio Bicudo.

Tipo de solo	NLd	CX	LVA	LV
%	22,37%	32,18%	11,78%	33,68%
NLAYERS	1	3	5	5
HYDGRP	C	C	A	A
SOL_ZMX	300,00	1000,00	3500,00	3500,00
ANION_EXCL	0,50	0,48	0,55	0,55
SOL_CRK	0,51	0,50	0,50	0,50
TEXTURE	SIL- UWB	SIL- UWB	SIL- UWB	SIL- UWB
SOL_Z1	300,00	100,00	300,00	300,00
SOL_BD1	1,13	1,14	1,55	1,55
SOL_AWC1	0,16	0,05	0,14	0,14
SOL_K1	5,80	20,00	150,00	150,00
SOL_CBN1	0,87	1,50	1,00	1,00
CLAY1	33,00	33,00	42,00	42,00
SILT1	41,00	16,00	26,00	26,00
SAND1	26,00	51,00	32,00	32,00
ROCK1	0,00	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB1	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K1	0,06	0,05	0,13	0,13
SOL_EC1	26,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 7 – Caracterização da camada 2 dos solos da bacia do rio Bicudo.

Tipo de solo	CX	LVA	LV
SOL_Z2	550,00	600,00	600,00
SOL_BD2	1,70	1,60	1,60
SOL_AWC2	0,40	0,20	0,20
SOL_K2	20,00	120,00	120,00
SOL_CBN2	0,60	0,45	0,45
CLAY2	40,00	40,00	40,00
SILT2	17,00	28,70	28,70
SAND2	43,00	31,30	31,30
ROCK2	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB2	0,15	0,15	0,15
USLE_K2	0,15	0,12	0,12
SOL_EC2	0,00	0,00	0,00

Tabela 8 – Caracterização da camada 3 dos solos da bacia do rio Bicudo.

Tipo de solo	CX	LVA	LV
SOL_Z3	1000,00	940,00	940,00
SOL_BD3	1,70	1,70	1,70
SOL_AWC3	0,70	0,60	0,60
SOL_K3	12,50	100,00	100,00
SOL_CBN3	0,30	0,40	0,40
CLAY3	20,80	28,40	28,40
SILT3	18,30	37,70	37,70
SAND3	60,90	33,90	33,90
ROCK3	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB3	0,15	0,15	0,15
USLE_K3	0,00	0,14	0,14
SOL_EC3	0,00	0,00	0,00

Tabela 9 – Caracterização da camada 4 dos solos da bacia do rio Bicudo.

Tipo de solo	LVA	LV
SOL_Z4	1220,00	1220,00
SOL_BD4	1,50	1,50
SOL_AWC4	0,20	0,20
SOL_K4	70,00	70,00
SOL_CBN4	0,35	0,35
CLAY4	29,80	29,80
SILT4	13,50	13,50
SAND4	56,70	56,70
ROCK4	0,00	0,00
SOL_ALB4	0,15	0,15
USLE_K4	0,14	0,14
SOL_EC4	0,00	0,00

Tabela 10 – Caracterização da camada 5 dos solos da bacia do rio Bicudo.

Tipo de solo	LVA	LV
SOL_Z5	3500,00	3500,00
SOL_BD5	1,50	1,50
SOL_AWC5	0,10	0,10
SOL_K5	40,00	40,00
SOL_CBN5	0,20	0,20
CLAY5	27,00	27,00
SILT5	39,30	39,30
SAND5	33,70	33,70
ROCK5	0,00	0,00
SOL_ALB5	0,00	0,00
USLE_K5	0,00	0,00
SOL_EC5	0,00	0,00

5.2 Caracterização climática da bacia – Weather Generator Data (WGN)

No intuito de se obter registros em quantidade e qualidade suficientes, foram conciliados os dados de monitoramento de quatro estações climáticas localizadas no entorno da bacia hidrográfica do rio Bicudo. Uma das estações empregadas está localizada no interior da bacia hidrográfica em estudo, no município de Corinto/MG, operada pela ANA, da qual foram adquiridos os dados de monitoramento pluviométrico.

Devido à ausência ou às falhas de monitoramento climatológico na bacia do rio Bicudo, foi utilizado o aplicativo Weather Generator (WGN) Excel Macro para a construção da estação climática nesta bacia hidrográfica, considerando o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2018, perfazendo um total de 17 anos de dados.

A conversão da variável umidade relativa do ar, monitorada pelo INMET, em temperatura do ponto de orvalho, para inserção no WGN, foi realizada utilizando-se a fórmula apresentada por Lawrence, sendo obtidos dados diários de temperatura do ponto de orvalho para a bacia do rio Bicudo. Por sua vez, para geração dos dados diários de radiação solar, os dados de insolação solar diária, monitorados pelo INMET foram convertidos empregando-se a equação de Angström-Prescott. Em virtude da inexistência de série de chuvas sub-diárias na bacia hidrográfica do rio Bicudo, foi necessário realizar a desagregação das chuvas de 1 dia em chuvas de 24 horas; em seguida as chuvas de 24 horas em chuvas de 1 hora e por sua vez as de 1 hora em chuvas de 30 minutos.

A partir da simulação de todas as variáveis pelo WGN, com base nas estatísticas mensais calculadas a partir dos dados monitorados, foi possível o preenchimento de falhas nos registros monitorados para a bacia do rio Bicudo, por meio do modelo SWAT.

Após o processamento de dados pelo *WGN Excel Macro*, para a geração das estatísticas mensais calculadas para cada estação climatológica, foram calculados os valores médios de cada variável obtida, visando estimar as características meteorológicas da bacia do rio Bicudo, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Estimativa das estatísticas climatológicas mensais calculadas para a bacia hidrográfica do rio Bicudo.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX (°C)	31,0	31,8	31,0	30,5	28,9	28,2	28,4	30,1	31,8	32,7	30,9	30,8
TMPMN (°C)	20,1	19,7	19,5	17,9	14,8	13,3	12,5	13,9	16,6	19,1	19,7	20,1
TMPSTDMX (°C)	2,8	2,7	2,4	2,1	2,0	1,7	2,3	2,2	2,9	3,3	3,3	3,2
TMPSTDMN (°C)	1,2	1,4	1,3	2,1	2,4	2,1	2,2	2,4	2,6	2,2	1,7	1,2
PCPMM (mm)	166,3	133,8	150,3	43,1	15,9	4,4	3,5	5,2	26,2	70,6	182,0	239,5
PCPSTD (mm)	11,4	12,2	12,1	5,2	3,0	1,4	1,5	1,4	4,6	7,6	12,6	15,9
PCPSKW(adim.)	3,1	3,9	4,0	5,4	9,3	12,2	17,7	11,9	7,3	4,7	3,1	3,2
PR-W1 (adim.)	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,3
PR-W2 (adim.)	0,6	0,5	0,5	0,4	0,2	0,0	0,3	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6
PCPD (dias)	11,4	8,7	9,9	4,7	2,1	0,7	0,4	0,9	2,6	5,7	12,2	13,5
RAINHHMX (mm)	30,4	37,2	41,3	19,3	13,3	7,7	10,8	8,0	17,4	24,7	34,7	43,9
SOLARAV (MJ/m ² .dia)	21,5	22,3	20,4	19,6	16,6	15,7	16,4	19,5	21,7	22,6	21,5	21,5
DEWPT (°C)	19,0	18,6	18,8	17,4	14,2	12,7	11,2	11,5	13,7	16,1	18,2	19,2
WNDVAV (m/s)	1,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	1,5	1,6	1,5	1,3	1,2

Onde: TMPMX é a média mensal das temperaturas máximas, TMPMN é a média mensal das temperaturas mínimas, TMPSTDMX é o desvio padrão das temperaturas máximas, TMPSTDMN é o desvio padrão das temperaturas mínimas, PCPMM é a média da precipitação mensal, PCPSTD é o desvio padrão das precipitações diárias, PCPSKW é o coeficiente de assimetria das precipitações diárias, PR-W1 é a probabilidade de um dia úmido acontecer após um dia seco no mês, PR-W2 é a probabilidade de um dia úmido acontecer após um dia úmido no mês, PCPD é a média de dias com precipitação no mês, RAINHHMX é o evento extremo de chuva de 30 minutos no mês, SOLARAV é a média da radiação solar diária no mês, DEWPT é a média mensal da temperatura do ponto de orvalho, e WNDVAV é a média mensal da velocidade do vento.

A Figura 17, a Figura 18, e a Figura 19 ilustram a variação das temperaturas, precipitações e radiação solar apresentadas na Tabela 11. Os dados da estação climática construída para a bacia hidrográfica do rio Bicudo foram gerados com sucesso pelo aplicativo WGN. Os resultados refletem o clima da região com estação seca, entre maio e setembro, e chuvosa, entre outubro e abril. Verificou-se que a estação seca é caracterizada por temperaturas mensais médias mais elevadas, e radiação solar mais intensa, quando comparada à estação chuvosa.

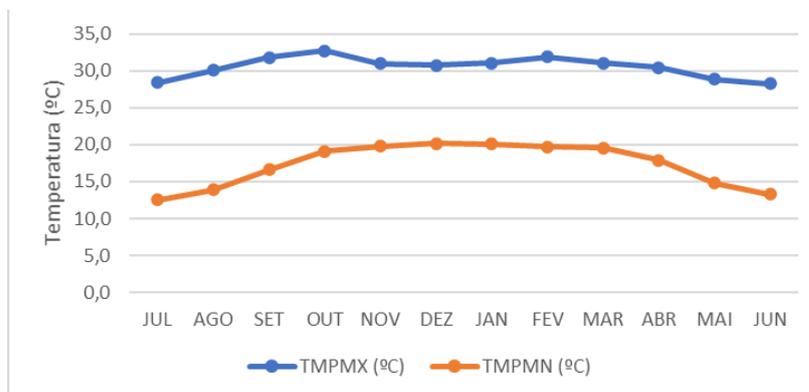


Figura 17 – Variáveis calculadas para a bacia do rio Bicudo (temperaturas).

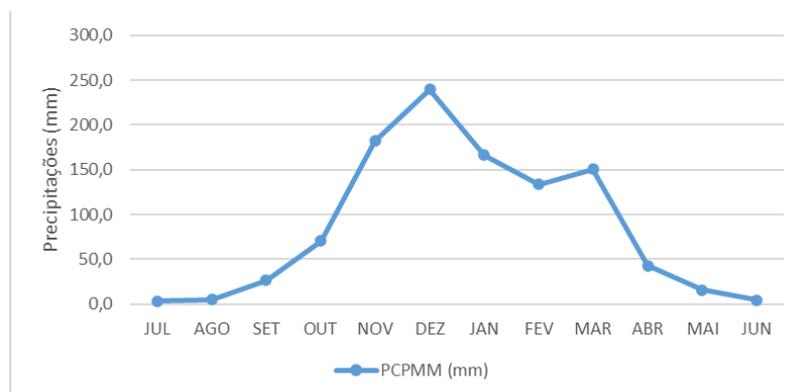


Figura 18 – Variáveis calculadas para a bacia do rio Bicudo (precipitações).

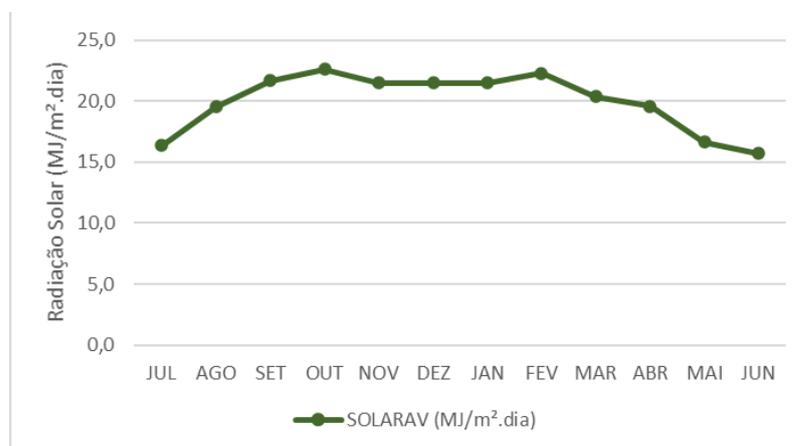


Figura 19 – Radiação solar média mensal calculada para a bacia do rio Bicudo.

Foi realizada análise da disponibilidade de dados em cada estação climática, no intuito de avaliar a quantidade de falhas de monitoramento de cada variável em cada estação. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Avaliação da disponibilidade de dados das estações climáticas empregadas.

	Estação climática	Município	% de falhas
Precipitação	83536 - INMET	Curvelo/MG	2,29%
	1844017 - ANA	Corinto/MG	0,05%
Temperatura	83536 - INMET	Curvelo/MG	34,90%
	83570 - INMET	Pompéu/MG	22,32%
Velocidade do vento	83536 - INMET	Curvelo/MG	5,02%
	83570 - INMET	Pompéu/MG	17,65%
Umidade relativa do ar	83536 - INMET	Curvelo/MG	40,57%
	83570 - INMET	Pompéu/MG	22,32%
Insolação	83483 - INMET	Pirapora/MG	9,37%
	83570 - INMET	Pompéu/MG	81,01%

A partir dessa avaliação constatou-se que as estações pluviométricas utilizadas apresentam o monitoramento mais completo, com a menor quantidade de falhas. As variáveis temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar apresentam dados de monitoramento com a ocorrência de falhas em um nível considerado aceitável para a proposta deste estudo, variando entre 5,02% e 40,57% de falhas.

Por sua vez, a variável climática insolação apresentou considerável percentual de falhas de monitoramento na estação climática localizada em Pompéu/MG (81,01%). Por isso, foram consultados os dados da estação localizada em Diamantina/MG, apesar desta estar relativamente distante da bacia do rio Bicudo (89 km). Considerando que as estações localizadas em Curvelo/MG e Corinto/MG não realizam o monitoramento da insolação, que a estação de Pompéu/MG apresenta um grande percentual de falhas de monitoramento e que a estação de Diamantina/MG está relativamente distante da bacia simulada, optou-se pela simulação dos dados de insolação pelo próprio SWAT, com base nas estatísticas obtidas pelo aplicativo *weather generator* - WGN Excel Macro. Tais estatísticas, por sua vez, foram geradas com base nos dados de monitoramento disponibilizados pelas estações climáticas localizadas nos municípios de Pirapora/MG e Pompéu/MG.

Para todas as demais variáveis foram inseridos os dados de monitoramento diário nas simulações com o SWAT, sendo as falhas preenchidas pelo modelo, com base nas estatísticas obtidas pelo aplicativo *weather generator* - WGN Excel Macro.

A opção pela utilização dos dados de monitoramento de duas estações climáticas para cada variável foi uma estratégia realizada neste trabalho, visando compensar a presença das falhas de monitoramento observadas em cada estação.

5.3 Avaliação das séries históricas de monitoramento hidrológico

Após aquisição e organização dos dados diários de monitoramento pluviométrico e fluviométrico, procedeu-se à avaliação do comportamento das séries históricas de monitoramento para o período simulado nas análises do SWAT, do ano de

2004 até 2018. Para tanto, foram calculadas as vazões médias anuais e as precipitações totais anuais para este período. Os quantitativos observados constam na Tabela 13 e na Figura 20.

Tabela 13 – Valores de precipitação e vazão para o período de 2004 a 2018.

	Precipitação total anual (mm)	Vazão média anual (m³/s)
2004	1381,90	17,70
2005	1274,75	22,53
2006	1240,70	19,55
2007	806,65	20,29
2008	1288,00	16,23
2009	1174,15	20,90
2010	1227,15	8,37
2011	1097,20	9,34
2012	879,95	11,80
2013	1388,45	10,81
2014	449,90	4,80
2015	666,05	3,42
2016	1039,65	4,92
2017	743,25	4,68
2018	1260,95	7,71

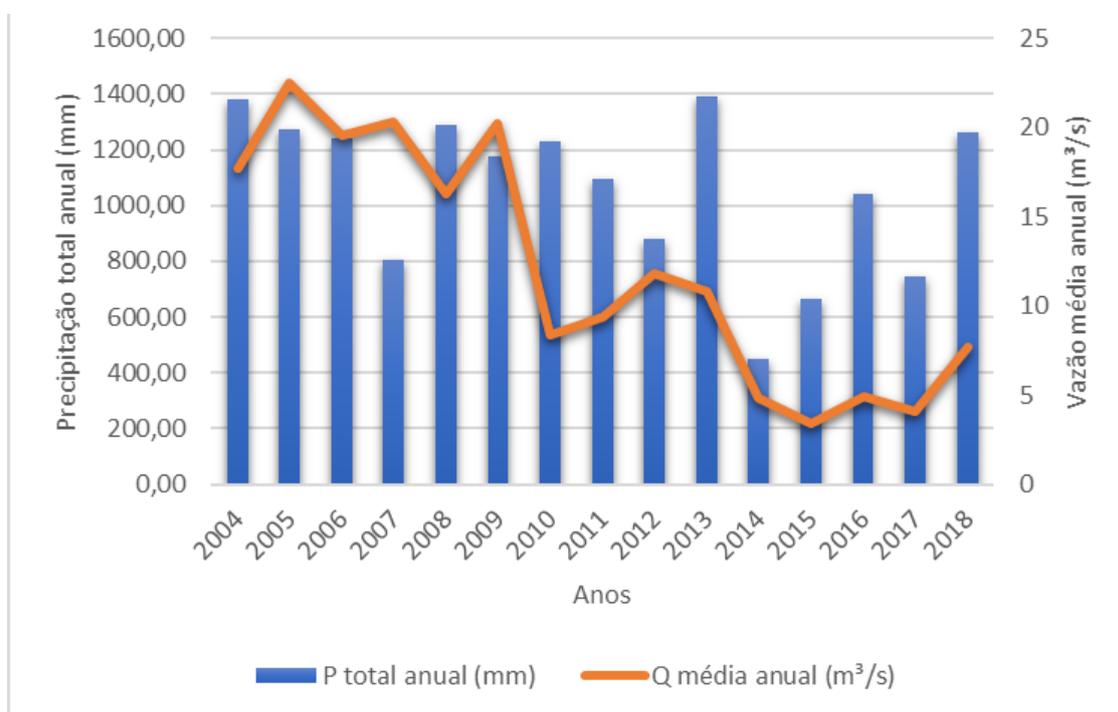


Figura 20 – Precipitação total anual versus vazão média anual para o período de 2004 a 2018.

A análise do comportamento dos dados hidrológicos revela que o ano de 2007 foi atípico, por ter sido um ano mais seco, contudo, as vazões no rio Bicudo se mantiveram relativamente estáveis. A partir do ano de 2010 é verificada uma considerável redução das vazões médias anuais, sendo que a redução de vazões na calha do rio Bicudo se mostra mais expressiva a partir do ano de 2014 até o ano de 2018, que envolve o período de simulações de cenários no âmbito desta pesquisa. É constatada a redução drástica do total de precipitação anual no ano de 2014, o que possivelmente está atrelado à crise hídrica que afetou a região Sudeste brasileira neste período.

Foi realizada a análise dos dados hidrológicos observados na bacia hidrográfica do rio Bicudo, no período de 2011 a 2018, intervalo que envolve as situações anterior e posterior à instalação das bacias de contenção (barraginhas) realizada em 2015.

Conforme relatado na metodologia deste trabalho, antes de se proceder às análises com o modelo SWAT, foram manipulados e avaliados os dados hidrológicos disponíveis, com o uso do Windows Excel. Tal avaliação teve o intuito de verificar o comportamento das variáveis precipitação anual total e vazão anual média para os anos em questão. Os resultados são apresentados na Figura 21.

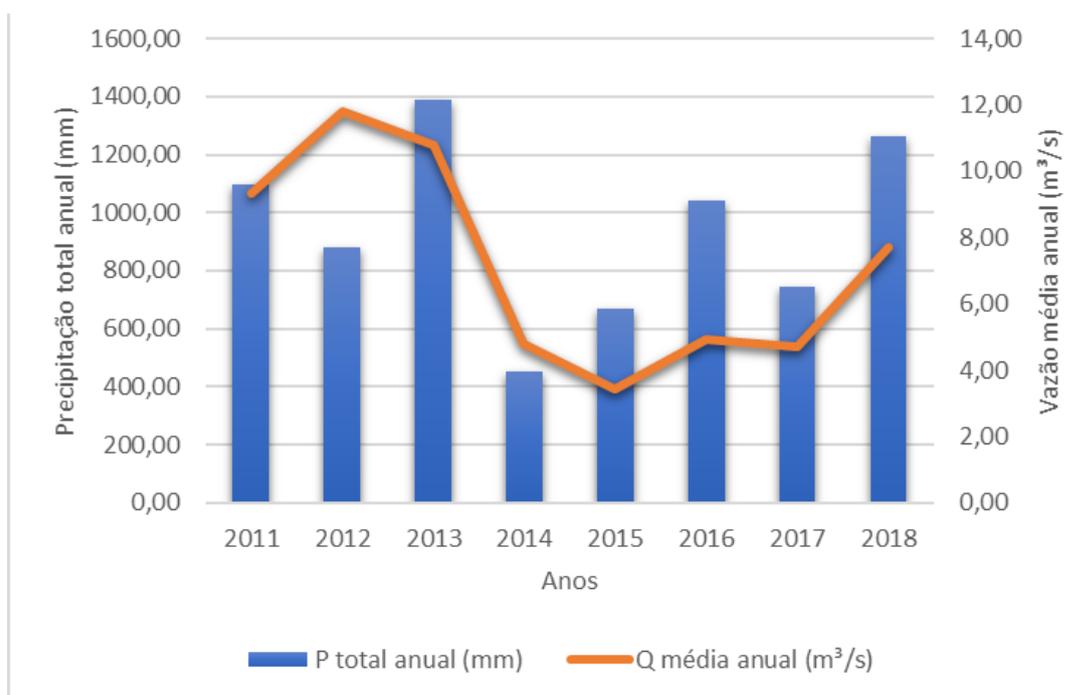


Figura 21 – Análise do comportamento anual das variáveis hidrológicas na bacia do rio Bicudo, para períodos anteriores e posteriores às intervenções. Fonte dos dados: CPRM/ANA – Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb.

Verificou-se que antes da construção das barraginhas nos anos de 2011 a 2013 foram observados valores relativamente elevados de chuvas próximo à cabeceira da bacia, coerentes com os também elevados valores de vazões médias próximo à foz do rio Bicudo.

O período de 2014 a 2017 trouxe à tona os problemas da gestão compartilhada dos recursos hídricos no Brasil diante das incertezas de um período de escassez e eminência de colapso hídrico, ocasionado em partes pelos eventos extremos de secas agravados em diversas regiões do Brasil, incluindo Minas Gerais. Neste Estado, segundo Correia (2018), verificou-se o aumento do número de municípios que decretaram situação de emergência no período seco, devido à sequência de períodos chuvosos abaixo da climatologia local, resultando no agravamento da situação hídrica no período entre 2014 e 2017.

Neste cenário, a crise hídrica de 2014 a 2017 acometeu a região na qual o rio Bicudo está inserido, como refletem os dados apresentados na Figura 21, que constata a escassez de chuvas no ano de 2014 e 2015. Como consequência verificou-se a diminuição da disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do rio Bicudo, refletida na diminuição dos valores de vazão medidos na estação fluviométrica “Ponte do Bicudo” nos anos de 2014 e 2015.

No ano de 2016 foi observado o aumento da quantidade de chuvas na região próxima ao local de construção das barraginhas, que foram finalizadas naquele ano. Como consequência, observou-se o aumento das vazões no exutório da bacia, com relação ao ano anterior.

No ano de 2017, quando as 308 barraginhas construídas nos municípios de Corinto/MG e Morro da Garça/MG já estavam em funcionamento, verificou-se que embora a quantidade de precipitação anual total tenha diminuído drasticamente, houve aumento da disponibilidade hídrica no rio Bicudo, tendo em vista o aumento de sua vazão média anual neste ano, com relação ao ano anterior. O que leva a crer que ocorreu aumento do escoamento superficial acumulado na bacia, possivelmente proporcionado pelas intervenções executadas.

No ano de 2018 as vazões médias monitoradas também apresentaram acréscimo com relação ao ano anterior, além do aumento na quantidade de chuvas que acometeram a região neste ano.

A identificação de tendências sazonais de precipitação e vazão contribui para a compreensão da variabilidade climática global e é essencial para o desenvolvimento de modelos hidrológicos, previsão hidrológica e gestão dos recursos hídricos (ULIANA *et al.*, 2015).

Após a avaliação das séries históricas relatada, procedeu-se à construção do modelo da bacia hidrográfica do rio Bicudo, com o uso do software SWAT, no intuito de averiguar o comportamento das variáveis hidrológicas e comprovar as tendências observadas na análise preliminar dos dados.

5.4 Modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo

5.4.1 Delineamento das sub-bacias e HRUs

Após a conclusão da etapa de correção e preparo dos dados de entrada no modelo, os dados gerados foram processados pelo SWAT, com o apoio de ferramentas de hidrologia do ArcGIS. Após identificação do ponto do exutório da bacia, efetuou-se o processamento da área e do formato da bacia hidrográfica do rio Bicudo, e realizou-se a delimitação dos cursos d'água, e a divisão em sub-bacias, com a informação de declividades e direção dos fluxos. O mapa gerado nesta etapa é apresentado na Figura 22.

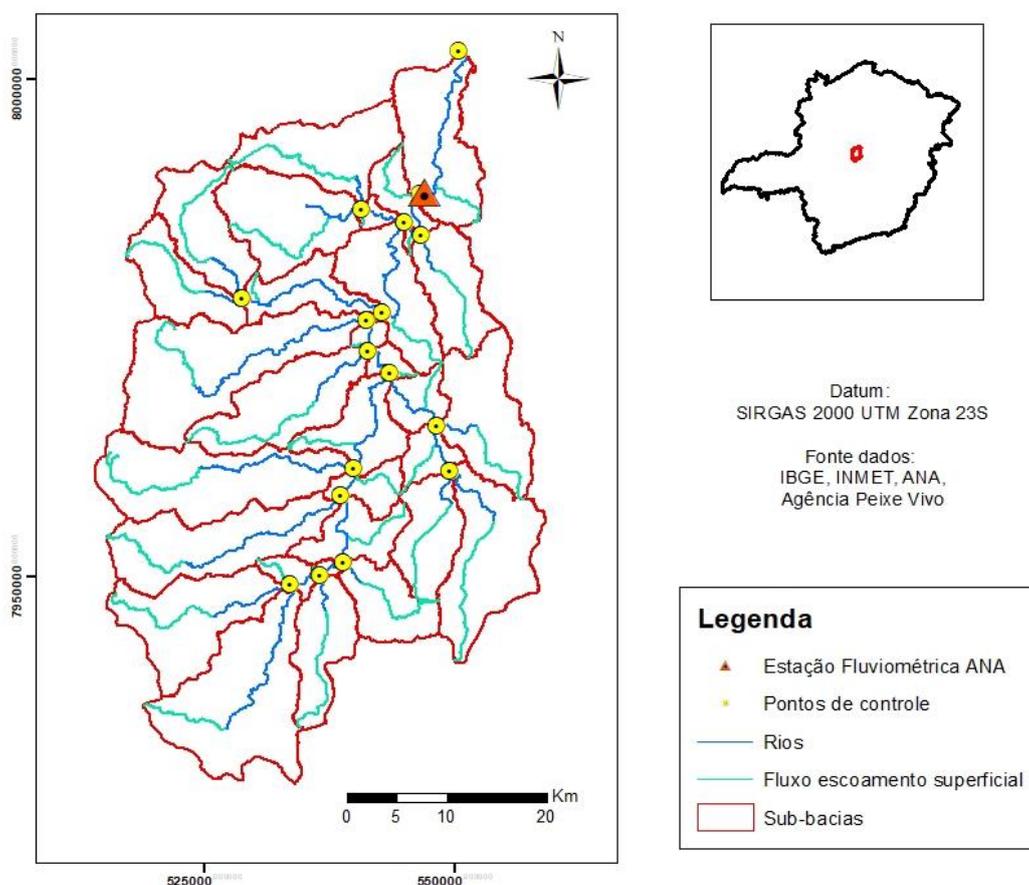


Figura 22 – Informações hidrográficas simuladas pelo Modelo SWAT.

Foi inserido um ponto de controle no ponto de coordenadas onde está localizada a estação fluviométrica da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Este ponto está relativamente próximo à foz do rio Bicudo e portanto reflete os impactos que possam ocorrer em uma área representativa desta bacia hidrográfica. Como é possível observar na Figura 22, o ponto de controle adotado está a jusante dos locais de intervenção onde foram construídas as bacias de contenção no ano de 2015. Assim, a locação deste ponto no modelo permite a verificação do impacto destas intervenções na seção fluvial analisada, além de permitir a comparação dos valores simulados com os valores observados, que são aqueles monitorados pela ANA.

Nesta etapa, a partir dos dados inseridos e das definições adotadas, o modelo SWAT repartiu a bacia hidrográfica do rio Bicudo em 32 sub-bacias e 213 unidades de resposta hidrológica – HRUs.

Foi constatado que o delineamento da bacia efetuado pelo modelo SWAT é um pouco distinto dos limites adotados pelo órgão estadual de gestão de recursos hídricos, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, como pode-se verificar na Figura 23. Isso porque o IGAM considera alguns afluentes diretos do rio das Velhas, como pertencentes à bacia do rio Bicudo, possivelmente no intuito de facilitar a gestão das águas nesta região.

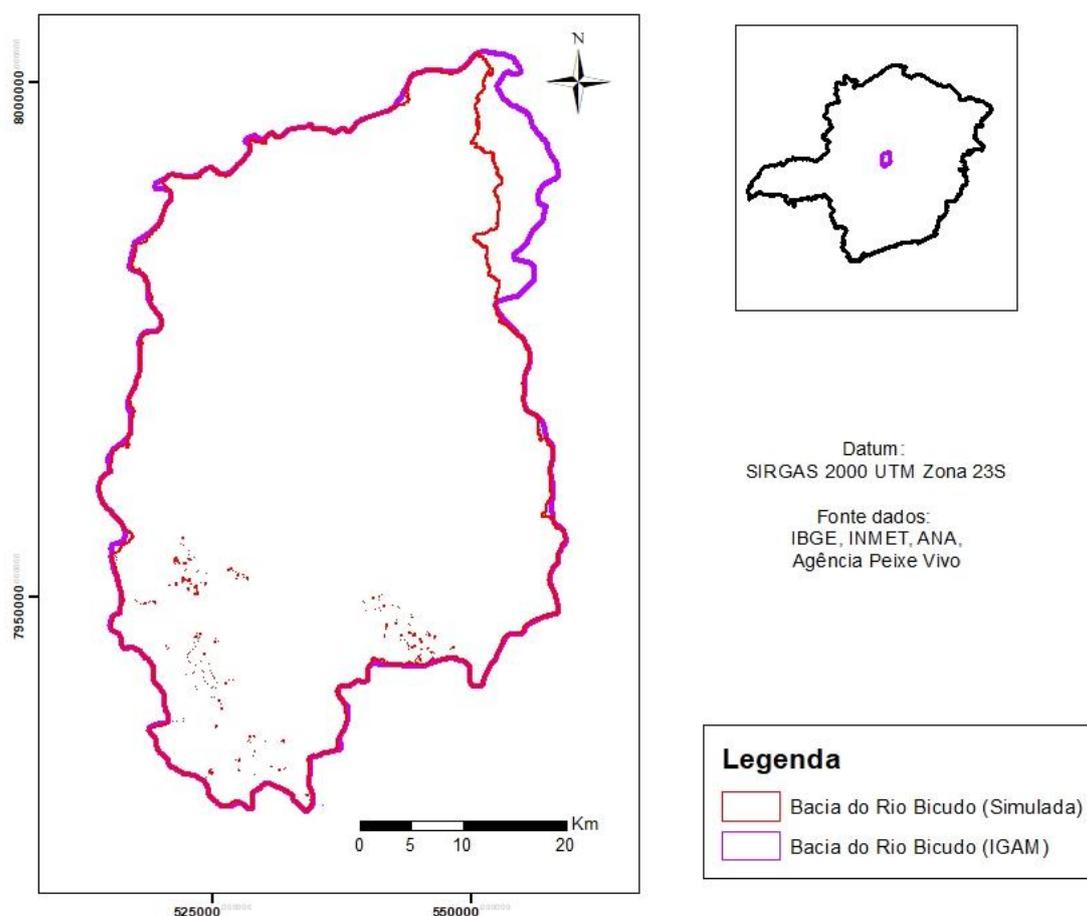


Figura 23 – Limites da bacia hidrográfica do rio Bicudo: Simulado pelo SWAT x Adotado pelo órgão gestor IGAM.

5.4.2 Calibração, validação e análise de incertezas

A bacia hidrográfica do rio Bicudo possui área de 2.274,48 km², sendo consideravelmente maior que a bacia rural objeto de estudos de Spruill *et al.* (2000), abordados no tópico 3.4.2 deste trabalho. Contudo, foi verificado que os resultados obtidos para a calibração dos dados diários de vazões obteve resultados insatisfatórios, refletidos em coeficientes de Nash-Sutcliffe menores que 0,5. Assim, foram adotadas as calibrações e validações considerando a discretização mensal dos dados fluviométricos.

Após a realização das simulações iniciais, as primeiras calibrações obtidas não se ajustaram satisfatoriamente aos dados observados na bacia do rio Bicudo. Além disso, nesta etapa, assim como nas anteriores à primeira simulação do modelo, foram verificados diversos erros de processamento do software, os quais foram solucionados a partir de pesquisas na literatura disponível e pela troca de informações e experiências obtidas com os usuários brasileiros do modelo SWAT.

Ao se comparar os resultados das primeiras simulações com os dados fluviométricos monitorados na seção de controle do rio Bicudo, foi verificado que o SWAT superestimou tanto as vazões de pico quanto as vazões mínimas. Procedeu-se então à calibração do modelo, ajustando-se os intervalos dos parâmetros conforme recomendado por Abbaspour *et al.* (2015).

Como estratégia para a obtenção de melhores ajustes para a etapa de calibração dos dados, foram reavaliadas as etapas iniciais de preparação do modelo. Para tanto, foi executada a avaliação dos dados de entrada do modelo adotados previamente, sendo efetuados ajustes na compatibilização do uso e ocupação do solo, com as bases americanas do modelo; ajustes nas referências de caracterização dos perfis de solos, dentre outros ajustes realizados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, até a obtenção do modelo adequado e satisfatório para a bacia hidrográfica em estudo.

As etapas de calibração, validação e análise de sensibilidade e de incertezas foram realizadas com o apoio do *software* SWAT-CUP, conforme relatado nos itens 3.4.3 e 4.8, deste trabalho.

Conforme relatado na metodologia deste trabalho, foram definidos onze parâmetros para a calibração do modelo hidrográfico da bacia do rio Bicudo, sendo eles: número da curva inicial para a condição de umidade II (CN2), constante de recessão do escoamento de base (ALPHA_BF), tempo de recarga do aquífero (GW_DELAY), limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN), coeficiente de retorno de água do aquífero para a zona radicular/zona não saturada (GW_REVAP), limite de água no aquífero raso para ocorrer retorno para a zona radicular/zona não saturada ou percolação para o aquífero profundo (REVAPMN), capacidade de armazenamento de água no solo (SOL_AWC), condutividade hidráulica saturada no solo (SOL_K), coeficiente de rugosidade de Manning para o canal principal (CH_N2), fator de demanda de água pelas plantas (EPCO), fator de demanda de evaporação da água do solo (ESCO).

Como solução da calibração do modelo são apresentados os valores mínimos e máximos para cada fator calibrado. Além disso, são fornecidos os valores ótimos, que são aqueles obtidos na iteração que apresentou o melhor resultado para a função objetivo definida, que no caso deste trabalho foi o índice de Nash e Sutcliffe (NS). Os valores dos intervalos de fatores calibrados para os grupos de parâmetros selecionados, visando reproduzir as características físicas da bacia do rio Bicudo, bem como os valores ótimos obtidos para os fatores e os respectivos parâmetros adotados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores dos parâmetros calibrados para a bacia do rio Bicudo.

Parâmetro	Método		Fator mínimo	Fator máximo	Fator Ótimo	Parâmetro Adotado
r_CN2.mgt	r	relative	-0,881	-0,305	-0,643	diversos CNs
v_ALPHA_BF.gw	v	replace	0,106	0,922	0,868	0,868
a_GW_DELAY.gw	a	absolute	22,030	72,694	60,890	90,890
a_GWQMN.gw	a	absolute	1081,931	1282,715	1182,323	2364,640
v_GW_REVAP.gw	v	replace	0,038	0,226	0,067	0,067
a_REVAPMN.gw	a	absolute	202,896	572,866	571,756	1321,756
v_CH_N2.rte	v	replace	-0,010	0,200	0,065	0,065
v_ESCO.hru	v	replace	0,174	0,850	0,216	0,216
v_EPCO.hru	v	replace	0,373	1,103	1,000	1,000
r_SOL_AWC.sol	r	relative	0,228	0,496	1,496	diversas camadas
r_SOL_K.sol	r	relative	-0,100	0,100	0,950	diversas camadas

Conforme se observa na tabela acima, a comunicação dos resultados da modelagem é realizada por meio de um intervalo de valores de parâmetros, em função dos fatores mínimos e máximos obtidos na calibração. Esse intervalo representa as incertezas inerentes ao processo de modelagem hidrológica, o que torna impeditiva a identificação de uma única solução representativa do fenômeno modelado ou dos conjuntos de parâmetros ótimos.

Uma importante constatação para o atingimento da calibração adequada do modelo foi a relevância da influência dos métodos de calibração empregados para cada parâmetro. Foi observado que as alterações nos métodos adotados para o ajuste de cada parâmetro refletiram diretamente na qualidade da calibração, mensurada pelos valores de funções objetivo obtidas.

Com base em trabalhos similares, mencionados no tópico 4.8 deste documento, foram adotados os métodos de calibração para cada parâmetro, nesta pesquisa, conforme disposto na Tabela 14.

Para a avaliação do desempenho da calibração e da validação do modelo, para a bacia do rio Bicudo, foram gerados os gráficos de vazão observada, da vazão calibrada e da faixa de 95PPU (*Percent Probability Uncertainty*). Foram também calculadas as estatísticas para os indicadores NS, PBIAS, R², fator-p e fator-k. Os valores obtidos para estes índices são apresentados na Tabela 15 e os gráficos gerados para as vazões observadas e simuladas são apresentados na Figura 24 para a etapa de calibração e na Figura 25 para a etapa de validação.

Tabela 15 - Verificação da qualidade das simulações após calibração e validação.

ÍNDICE	CALIBRAÇÃO	VALIDAÇÃO
NS	0,67	0,75
PBIAS	-5,10%	9,50%
R ²	0,70	0,79
Fator-p	0,42	0,53
Fator-r	0,53	0,48

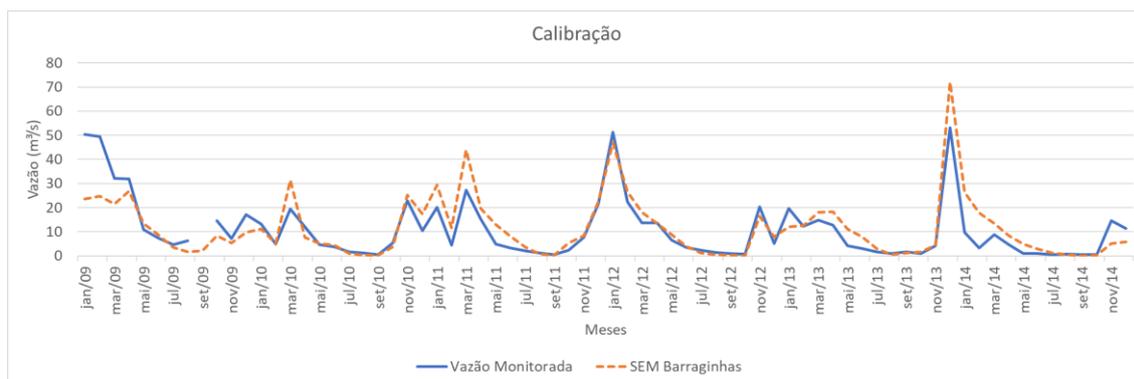


Figura 24 – Gráfico da vazão observada e da vazão simulada para a etapa de calibração dos dados, que envolve um período de 6 anos, entre 01/01/2009 a 31/12/2014.

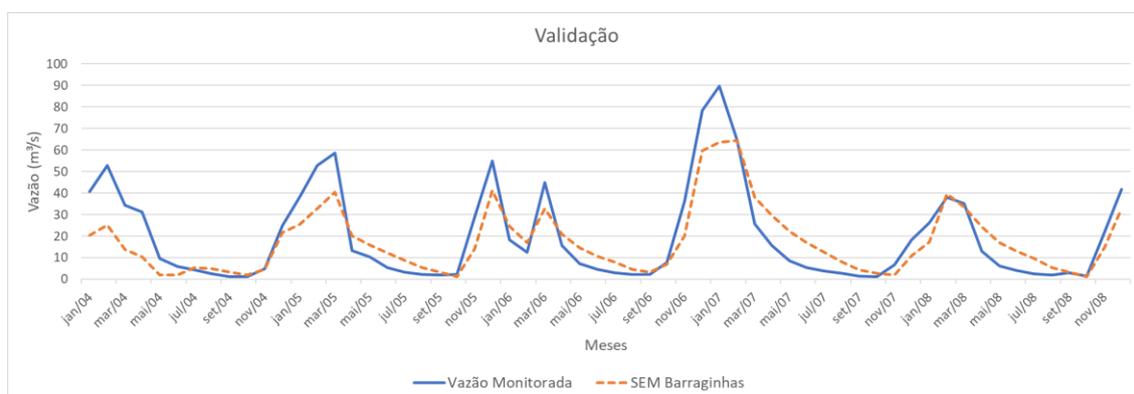


Figura 25 – Gráfico da vazão observada e da vazão simulada para a etapa de validação dos dados, que envolve um período de 5 anos, entre 01/01/2004 a 31/12/2008.

Os resultados observados para os índices NS e PBIAS na Tabela 15 indicam que a calibração e a validação do modelo SWAT, aplicadas à bacia hidrográfica do rio Bicudo, apresentaram um desempenho considerado bom baseado índices NS e muito bom quando avaliados os percentuais de tendência PBIAS, de acordo com a classificação proposta por Moriasi *et al.* (2007).

Foi verificado ainda, por meio da análise dos valores de PBIAS e gráficos de vazões obtidos, que na etapa de calibração o modelo apresentou uma leve tendência em superestimar os resultados simulados, enquanto na etapa de validação o modelo apresentou uma leve tendência em subestimar os resultados de vazões simuladas.

Contudo, os desvios verificados estão dentro dos limites aceitáveis, sendo considerados muito bons, conforme mencionado.

Santhi *et al.* (2001) e Bonumá *et al.* (2012) consideram aceitáveis para simulações no SWAT os valores de R^2 acima de 0,6, portanto verificou-se que os resultados obtidos para este índice tanto na calibração quanto na validação foram considerados satisfatórios, sendo obtidos os valores de 0,70 e 0,79, respectivamente.

Por fim, foram verificada a incerteza dos ajustes do modelo, a partir dos valores das estatísticas do fator-p e do fator-r. Foi verificado que os valores obtidos tanto para o fator-p quanto para o fator-r em ambas as etapas (calibração e validação), apresentaram valores próximos a 0,5 conforme se verifica na Tabela 15. Quanto mais próximo de 0 estiver o fator-r, menores são as incertezas na simulação. E quanto mais próximo de 1 for o valor-p, maior a porcentagem de dados observados que se encaixam dentro da faixa de incerteza da simulação. Foi verificado portanto que o SUFI-2 obteve resultados razoáveis para estes indicadores.

5.4.3 Análise de sensibilidade dos parâmetros

A Tabela 16 e a Figura 26 apresentam o ranqueamento dos parâmetros, em função dos índices “t-stat” e “p-value”, após a simulação para calibração do modelo, com 500 iterações.

Tabela 16 – Valores dos índices de sensibilidade dos parâmetros calibrados para a variável vazão na modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo, pelo SWAT.

Parâmetro	Índice t-Stat	Índice p-value
v__ALPHA_BF.gw	0,200	0,841
a__REVAPMN.gw	-0,211	0,833
v__CH_N2.rte	1,464	0,144
a__GW_DELAY.gw	4,048	0,000
a__GWQMN.gw	-4,562	0,000
r__SOL_K().sol	-5,759	0,000
v__EPCO.hru	6,960	0,000
v__ESCO.hru	-10,149	0,000
v__GW_REVAP.gw	13,167	0,000
r__SOL_AWC().sol	19,460	0,000
r__CN2.mgt	-26,899	0,000

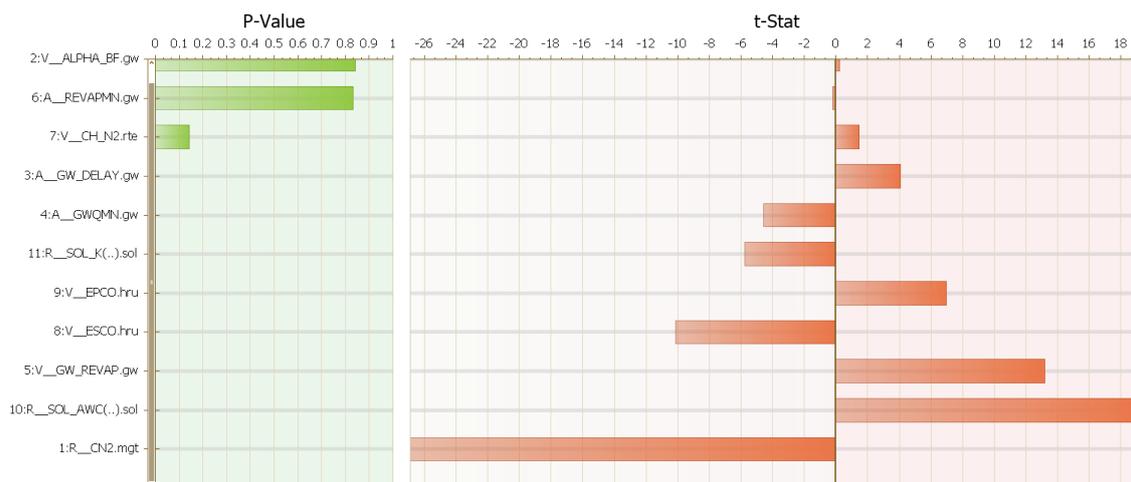


Figura 26 – Gráficos do ranking de sensibilidade dos parâmetros calibrados para a variável vazão na modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo, pelo SWAT.

Observa-se que os parâmetros mais sensíveis na etapa de calibração são representados pelos maiores valores do módulo do índice “t-stat”, que representa a relação do coeficiente do parâmetro pelo erro padrão; e pelos menores valores do índice “p-value”, que está relacionado com a rejeição da hipótese de que uma adição no valor do parâmetro proporcione um acréscimo significativo na variável resposta.

Foi verificado que a maior parte dos parâmetros selecionados para a calibração se mostraram sensíveis ao modelo, quando testados ao nível de significância de 95%. São considerados sensíveis, segundo Abbaspour (2015) os parâmetros que apresentam fator-p menor que 0,05. Portanto, foram considerados sensíveis oito dos onze parâmetros testados, sendo eles em ordem decrescente de sensibilidade: CN2, SOL_AWC, GW_REVAP, ESCO, EPCO, SOL_K, GWQMN e GW_DELAY.

Os parâmetros mais sensíveis na calibração do modelo para a bacia do rio Bicudo estão relacionados ao escoamento superficial no canal (CN2), à quantidade de água no solo (GWQMN, SOL_K e SOL_AWC), ao fluxo de base (GW_REVAP, GW_DELAY), ao fator de consumo de água da vegetação (EPCO) e ao fator de demanda de evaporação da água do solo (ESCO).

5.5 Simulações dos cenários com e sem barraginhas

Após calibrado e validado o modelo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Bicudo, foram avaliados os cenários para os anos de 2015 a 2018, considerando:

- Cenário 01 (situação real): Presença das bacias de contenção “barraginhas” na bacia do rio Bicudo, construídas no ano de 2015.
- Cenário 02 (situação hipotética): Ausência das bacias de contenção “barraginhas” na bacia do rio Bicudo;

A Figura 27 representa em gráfico o comportamento hidrológico das vazões no ponto de controle na calha do rio Bicudo, para todo o período avaliado nesta pesquisa, que envolve 15 anos de observação dos dados, desde 2004 até 2018.

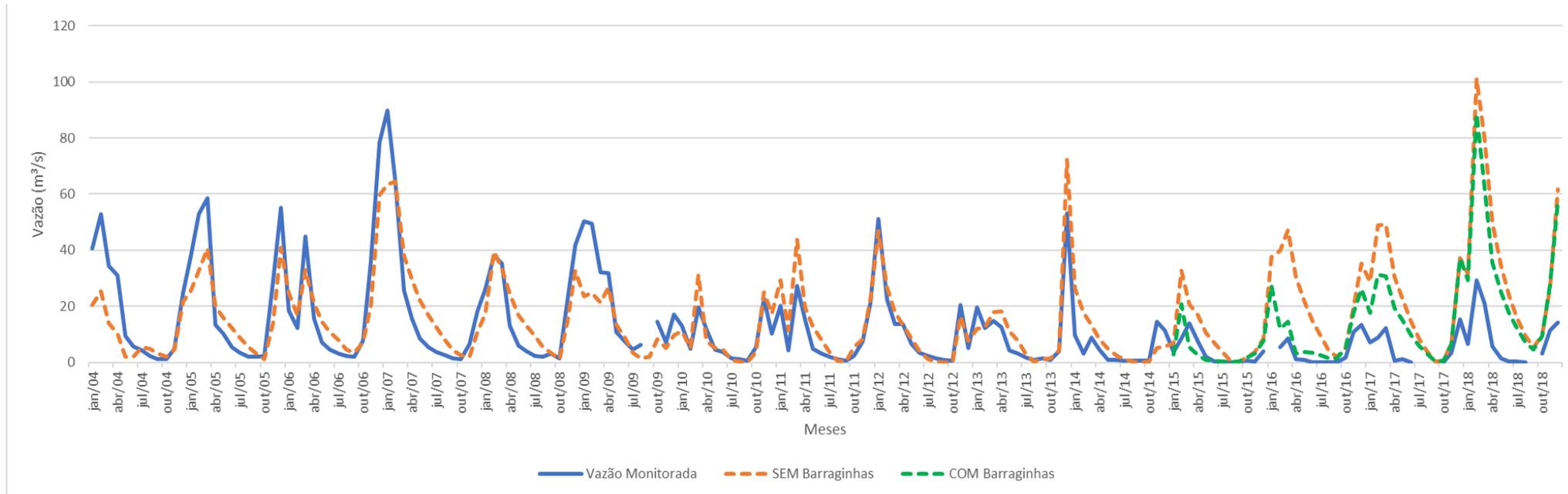


Figura 27 – Gráfico das vazões observadas e simuladas para todo o período de estudo, que contempla 15 anos, entre 01/01/2004 a 31/12/2018.

Conforme foi verificado na avaliação prévia dos dados, relatada no item 5.3 deste trabalho, foi verificado que as vazões observadas no rio Bicudo, monitoradas pela estação fluviométrica da ANA, apresentam uma redução expressiva a partir do ano de 2014, sendo que tal fato pode estar relacionado ao aumento de possíveis captações difusas de água na área de drenagem da bacia.

A análise dos gráficos gerados permite constatar o satisfatório ajuste dos dados observados e simulados, para o período anterior a 2014, que corresponde aos períodos de calibração e validação dos dados hidrológicos.

Considerando a construção de 308 barraginhas na área de drenagem da bacia do rio Bicudo no ano de 2015, foi investigado o impacto dessas intervenções nas vazões do rio, por meio da simulação de como seria o comportamento das vazões na bacia caso não estivesse ocorrido a construção das bacias de contenção (cenário 02); comparado à situação que considera a presença dessas intervenções (cenário 01), o qual deveria refletir melhor a situação real. Ou seja, era de se esperar que as vazões obtidas para o cenário 01 estivessem mais próximas das vazões monitoradas na estação fluviométrica da ANA, por considerar a situação real observada na bacia.

A Figura 28 apresenta em gráfico o comportamento hidrológico das vazões no ponto de controle na calha do rio Bicudo, para o período dos cenários considerados, que envolvem 04 (quatro) anos de dados, desde 2015 até 2018.

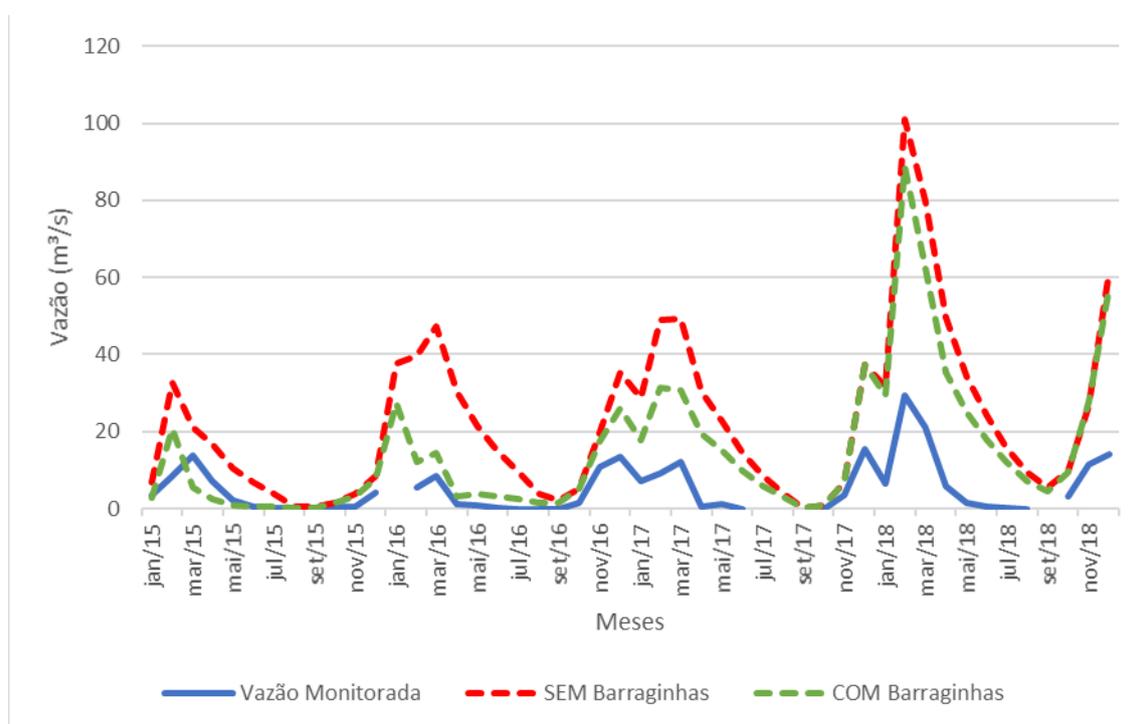


Figura 28 – Gráfico das vazões observadas e simuladas para o período dos cenários considerados, entre 01/01/2015 a 31/12/2018.

É possível constatar, a partir da análise dos hidrogramas gerados, que as vazões verificadas para o cenário com a presença de barraginhas (cenário 01) estiveram mais

próximas das vazões reais, monitoradas na estação fluviométrica da bacia, quando comparado ao cenário 02. Este resultado está em conformidade com o esperado, considerando que o cenário 01 representa a situação real da bacia modelada.

Outra relevante constatação foi a sensibilidade que o modelo demonstrou às alterações do modelo digital de elevação – MDE, efetuadas no intuito de refletir a presença das bacias de contenção, o que tornou possível a avaliação proposta no âmbito deste trabalho.

O cenário 01 (com barraginhas) simulou vazões de pico menores que as simuladas no cenário 02 (sem barraginhas), o que indica que a presença dessas intervenções em conjunto é capaz de promover a redução das vazões de pico em eventos chuvosos críticos, favorecendo a permanência da água no interior dos limites da bacia hidrográfica por um tempo maior, quando comparado ao cenário sem a presença de tais intervenções.

Os resultados apresentados na Figura 28 demonstram que para os anos de 2015 e 2016 as curvas de recessão simuladas se ajustaram bem ao hidrograma observado na bacia do rio Bicudo, de acordo com o monitoramento fluviométrico realizado pela ANA. Contudo, para os anos de 2017 e 2018 não se observa uma boa aderência dos dados simulados e observados.

5.6 Avaliação do impacto da construção de bacias de contenção no regime hídrico

Diante da análise dos resultados das simulações efetuadas para o cenário 02, que representa a ausência das bacias de contenção, quando comparado à situação com a presença de barraginhas, cenário 01, é possível constatar a influência da construção das bacias de contenção no regime hídrico do rio Bicudo.

Conforme foi demonstrado na Figura 28, a presença das bacias de contenção na área de drenagem da bacia hidrográfica em estudo, proporcionou uma considerável redução nas vazões de pico do rio, nos períodos de chuvas intensas. Essa redução na vazão da calha do rio Bicudo foi possível devido à contenção das águas pluviais no interior das barraginhas, permitindo a permanência da água na bacia hidrográfica por um período maior, promovendo sua infiltração lenta no solo.

Ao favorecer o processo de infiltração de água no solo, a retenção de águas pluviais nas bacias de contenção possibilitam o aumento da recarga dos mananciais de águas subterrâneas nas áreas de drenagem da bacia hidrográfica.

Além disso, a contenção das águas provenientes de enxurradas, pelas barraginhas, possibilita a diminuição do carreamento de sedimentos e nutrientes do solo, para o interior do leito dos rios, uma vez que nos eventos de chuvas intensas os sedimentos e nutrientes são conduzidos e retidos no interior das bacias de contenção construídas, promovendo sua permanência na fase terrestre das áreas de drenagem.

O aumento da recarga dos mananciais de águas subterrâneas, aliado com a diminuição da perda de solos e nutrientes, proporcionados pelas intervenções do tipo bacias de contenção, são fatores capazes de influenciar no incremento da oferta hídrica da bacia hidrográfica e na melhoria da fertilidade dos solos cultiváveis. Estes impactos representam melhorias na qualidade de vida da população local da bacia hidrográfica do rio Bicudo, que está submetida a condições intensas de escassez hídrica, em função das condições climáticas locais.

Neste sentido, é válido ressaltar que a população rural da bacia hidrográfica do rio Bicudo poderia estar sendo acometida por uma situação ainda mais crítica de escassez de água para abastecimento humano e animal, e para as atividades agropecuárias, após os anos de 2014, quando se intensificou a crise hídrica na região.

Portanto, cabe destacar que a implantação de bacias de contenção ou barraginhas em uma bacia hidrográfica é capaz de promover diversos benefícios em consequência das alterações no regime hídrico da bacia hidrográfica, verificados nos cenários avaliados no presente estudo.

Em síntese, a redução das vazões de pico na calha do rio Bicudo, para a situação que contempla a atuação das bacias de contenção, indica uma maior permanência de tempo das águas pluviais nos solos, favorecendo a infiltração mais lenta das águas nos solos. Como consequência, há um aumento na recarga dos mananciais subterrâneos, implicando no aumento do nível dos lençóis freáticos. Com isso, há um aumento na disponibilidade de água nas áreas próximas às bacias de contenção, com a umidificação dos solos, a irrigação das raízes das culturas por um período maior, e a revitalização de nascentes. Outro aspecto influenciado pela implantação do sistema de barraginhas na bacia hidrográfica é a contenção das enxurradas provenientes de chuvas intensas, amenizando os danos dessas chuvas nas plantações e no meio ambiente, ao promover a redução de erosões no solo e de assoreamento dos cursos d'água à jusante.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos tanto na avaliação das séries históricas de dados fluviométricos e pluviométricos monitorados, quanto na análise dos cenários produzidos pelo modelo SWAT, permitem constatar que há indícios da ocorrência de incremento da oferta hídrica na bacia, proporcionada pelo funcionamento adequado das bacias de contenção construídas na área de drenagem do rio Bicudo.

A avaliação do comportamento dos dados hidrológicos abordada neste trabalho, com o auxílio do *software* de modelagem hidrológica SWAT, teve o intuito de oferecer uma avaliação da efetividade das intervenções do tipo bacias de contenção (barraginhas) em bacias hidrográficas. Ressalvadas as limitações inerentes a um modelo hidrológico, a ferramenta adotada foi capaz de refletir com fidelidade a realidade física da bacia hidrográfica, por levar em consideração variados aspectos que possuem influência no regime hidrológico dos cursos d'água, tais como as variações de uso e ocupação do solo, tipos e perfis de solos, fatores climáticos diversos, dentre outras variáveis.

Foi verificado que os períodos de dados selecionados para as etapas de calibração e validação do modelo, conforme informado na descrição metodológica deste trabalho, foram representativos. O período empregado para calibração envolveu períodos secos, chuvosos e médios, contemplando alta variedade de comportamento fluviométrico. Com isso, a etapa de validação apresentou um ajuste satisfatório dos dados, refletido nos valores dos índices obtidos para as funções objetivo. Os resultados dos índices NS, R² e PBIAS verificados nas etapas de calibração e validação por sua vez, conduziram a uma maior confiabilidade dos resultados obtidos na etapa de simulações de cenários.

Neste sentido, conclui-se que as etapas de calibração e validação do modelo SWAT produzido para a bacia hidrográfica do rio Bicudo demonstraram resultados adequados, refletidos pelos índices e funções objetivo observados. Com isso, pode-se inferir que os dados adotados e a modelagem produzida se ajustaram satisfatoriamente às características físicas reais da bacia estudada.

Cabe mencionar que foi constatada uma considerável mudança no hidrograma da bacia, para o período de 2016 a 2018, em que se observa uma redução das vazões de pico monitoradas, ao se comparar com os anos anteriores. Este fato leva a crer que possivelmente ocorreu alguma alteração estrutural na área de drenagem da bacia do rio Bicudo, além da implantação das bacias de contenção. Seria necessária, portanto, a realização de um diagnóstico em campo, no intuito de constatar a existência de algum fator que possa estar promovendo a redução das vazões de pico neste período. Para uma representação mais fiel da bacia hidrográfica, estas possíveis alterações precisariam ser ajustadas no modelo construído, a partir do ano de 2016.

A caracterização climática da bacia hidrográfica do rio Bicudo, obtida pelo gerador climático do modelo, reflete adequadamente o clima da região com estação seca, entre maio e setembro, e chuvosa, entre outubro e abril. Verificou-se que a estação chuvosa é caracterizada por temperaturas mensais médias mais elevadas, e radiação solar mais intensa, quando comparada à estação seca.

Os cenários distintos analisados com o modelo SWAT possibilitaram retratar as situações com a presença ou com a ausência das bacias de contenção, graças à sensibilidade do modelo produzido às alterações do modelo digital de elevação – MDE efetuadas para esta análise. A avaliação dos cenários gerados, permitiu constatar que a execução de práticas do tipo bacias de contenção em áreas rurais são capazes de promover a redução das vazões de pico, nos cursos d'água a jusante destas intervenções. Com isso as águas pluviais permanecem no interior dos limites da bacia hidrográfica por um tempo maior, quando comparado ao cenário sem a presença das bacias de contenção.

Neste sentido, a captação de chuvas por meio da construção de sistemas de barraginhas se mostrou uma estratégia eficiente para aproveitamento das águas das chuvas intensas e irregulares que acometem regiões de clima predominantemente seco. Considerando a deficiência hídrica da bacia hidrográfica do rio Bicudo, os resultados

deste estudo indicam que as bacias de contenção podem promover a conservação dos solos devido à contenção de enxurradas e consequente redução da erosão. Além disso, a retenção de águas pluviais durante um maior período de tempo no interior dos limites da bacia hidrográfica, proporcionado pela retenção de água nas barraginhas, favorece a revitalização dos mananciais de água próximos, permitindo uma elevação dos níveis do lençol freático.

Convém destacar que, apesar dos benefícios proporcionados pela implantação das barraginhas em uma bacia hidrográfica, pode haver a dificuldade de sua implantação em determinada área, devido à falta de anuência dos proprietários dos terrenos onde se pretende implantar tais intervenções. Em alguns casos, os proprietários rurais consideram que estas intervenções representam perda de parcela da área de seu terreno. Contudo, um dos objetivos desse tipo de estrutura é favorecer a permanência de condições de umidade do solo favoráveis ao cultivo de plantações nos terrenos dos produtores rurais.

Devido ao acúmulo de sedimentos no interior das bacias de contenção, após o período chuvoso, recomenda-se que seja realizada a retirada destes sedimentos periodicamente, a cada dois anos, ou após o esgotamento de sua capacidade, para que a mesma continue exercendo sua função adequadamente.

Os resultados deste estudo demonstram que a execução de projetos de recuperação de áreas degradadas em localidades rurais pode acarretar em benefícios para toda a população da bacia hidrográfica, que no caso em estudo, apresenta situação crítica de disponibilidade hídrica.

No que concerne ao exercício da tomada de decisão que é requerido no planejamento e na gestão dos recursos hídricos, são incontestáveis a importância e utilidade das ferramentas de modelagem hidrológica. Contudo, a existência de incertezas nesse processo não pode ser desconsiderada na análise dos resultados.

Neste sentido, cada etapa executada no esforço da modelagem da bacia hidrográfica do rio Bicudo foi acompanhada de análises de incerteza dos dados, com base na avaliação dos índices obtidos para as funções objetivo empregadas. Cada etapa foi então considerada satisfatória uma vez que foram obtidos índices adequados, que estão contemplados nas faixas de valores recomendadas pela bibliografia.

Desta forma, apesar das incertezas existentes no uso de ferramentas de simulação hidrológica, os resultados gerados neste trabalho poderão ser úteis para os gestores de recursos hídricos, para os membros dos comitês de bacias hidrográficas e para os representantes das agências de bacias hidrográficas brasileiras, no desenvolvimento de estratégias para a preservação dos recursos hídricos e dos solos em bacias hidrográficas com características similares às do rio Bicudo.

Visando melhor proveito das ferramentas de modelagem hidrológica no auxílio da gestão dos recursos hídricos brasileiros, recomenda-se investimentos em estudos que

promovam a caracterização de tipos e perfis de solos; o diagnóstico do uso e ocupação dos solos; além do aumento da rede de monitoramento fluviométrico das bacias hidrográficas do país. Tais ações poderão favorecer o uso dos modelos disponíveis para simulações hidrológicas de bacias hidrográficas, proporcionando maior disponibilidade de dados de entrada e maior confiabilidade nos resultados simulados por essas ferramentas.

Espera-se que as informações geradas nesta pesquisa contribuam para o embasamento de diretrizes para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos da bacia do rio Bicudo, bem como de bacias hidrográficas com características semelhantes.

7 PRODUTO

O produto desta pesquisa trata-se do modelo hidrológico testado e validado para a bacia hidrográfica do rio Bicudo, empregando-se os dados de entrada adquiridos e ajustados ao longo desta pesquisa. Esta ferramenta possibilita a simulação de diversos cenários, visando a avaliação de estratégias para o melhor gerenciamento e preservação dos recursos hídricos da bacia, por parte dos órgãos gestores de recursos hídricos brasileiros. O modelo obtido neste projeto estará disponível para utilização da Agência Peixe Vivo e do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas.

8 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PEIXE VIVO. **Termo de Referência para Contratação de consultoria especializada para desenvolvimento e elaboração de Termos de Referência para contratações de projetos hidroambientais do rio das Velhas.** Ato Convocatório nº 003/2016. Novembro, 2016.

AGÊNCIA PEIXE VIVO. **Relatório de Execução de Serviços “As built” – Projeto de Construção de barraginhas na bacia hidrográfica do Rio Bicudo, nos municípios de Corinto e Morro da Garça/Minas Gerais.** Belo Horizonte, 2016.

AGÊNCIA PEIXE VIVO. **Termo de Referência para Contratação de pessoa jurídica especializada para execução de projeto hidroambiental na unidade territorial estratégica rio Bicudo, em Minas Gerais.** Ato Convocatório nº 001/2019. Janeiro, 2019.

ABBASPOUR, K.C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual.** Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, 2008, 95p.

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 524 (2015) p. 733-752. Duebendorf, Switzerland, 2015.

ALMEIDA, A. L. S. P. **Gestão dos recursos hídricos na bacia do rio das Velhas: como podem os modelos hidrológicos distribuídos subsidiar o planejamento?** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

ALMEIDA, R. A. **Modelagem hidrológica na bacia do rio Mucuri com a utilização do Modelo SWAT.** Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2016.

ANDRADE, M. A.; *et al.* **Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG.** 2012, 8p. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, 2012.

ANTUNES, F. Z. Caracterização climática do estado de Minas Gerais: climatologia agrícola. Informe Agropecuário. v. 12. P. 9-13, 1986.

ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P. M. **Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin.** Journal of Hydrology, v. 227, p. 21-40, 2000.

ARNOLD, J.G; MORIASI, D.N; GASSMAN, P.W; ABBASPOUR, K.C; WHITE, M.J; SRINIVASAN, R; SANTHI, C; HARMEL, R.D; VAN GRIENSVEN, A; VAN LIEW,

M.W; KANNAN, N; JHA, M.K. **Swat: Model use, calibration and validation.** Transactions of the ASABE, v.54, p.1491-1508, 2012.

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. **Large area hydrologic modeling and assessment Part I: model development.** Journal of the American water resources association. v. 34, n. 1, p. 73 - 89. 1998.

ARNOLD, J.G.; ALLEN, P. M. **Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds.** Journal of Hydrology, v.176, p.57-77, 1996.

BARBOSA, F. A. R.; **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape/PB.** Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006.

BOISRAME, G. **wgn Maker Excel Macro which prepares data for the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model,** 2010. Disponível em: <<https://swat.tamu.edu/media/41583/wgen-excel.zip>>. Acesso em: Julho, 2020.

BONUMÁ, N.B; REICHERT, J.M; MINELLA, J.P; JACOMET, L; OLIVEIRA, A; RODRIGUES, M.F. **Simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural no sul do Brasil.** In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Fortaleza, 2009.

BONUMÁ, N.B., ROSSI, C.G., ARNOLD, J.G., REICHERT, J.M., MINELLA, J.P., ALLEN, P.M., VOLK, M. **Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified Swat Model.** Journal of Environmental Quality, Special Section, p. 55-66, 2012.

BORGES, W. F. A; ARAÚJO, A. M.; SILVA, A. A. C.; FERNANDES, E. C. R.; MENEZES, E. J. N.; ROCHA, G. J. A. M.; ANDRADE, L. I.; FILHO, O. D. Q. O. **Estudo da Radiação Solar através da equação de Angström-Prescott para geração de energia.** X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Salvador/BA, 2018.

BRASIL DE FATO. Artigo: **Barraginhas podem gerar água e vida para a população.** Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://www.brasildefatomg.com.br/2020/08/21/artigo-barraginhas-podem-gerar-agua-e-vida-para-a-populacao>. Acesso em: Janeiro, 2021.

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. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 8, p.9-35, 2016.

BUENO, E. O.; OLIVEIRA, V. A.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. **Desempenho do Modelo SWAT para diferentes critérios de geração de unidades de resposta hidrológica.** Revista Scientia Agraria. Vol. 18. nº 2. P. 114-125. Curitiba, 2017.

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

CARVALHO, H. E. S. **Capacidade de infiltração de “barraginhas” em dois solos do Distrito Federal.** Dissertação apresentada à Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology.** New York: McGraw-hill Book, 572p. 1988.

CORREIA, C. M. C. C; *et al.* **Relatório Anual Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais – 2014/2017.** Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM. Belo Horizonte, 2018.

CHU, T. W.; SHIRMOHAMMADI, H.; SADEGHI, A. **Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient components in the Piedmont physiographic region of Maryland.** Transactions of the American Society Agricultural Engineers v.47(5), p. 1523-1538. 2004.

DAEE/CETESB (1980). Departamento de Águas e Drenagem Urbana/Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem urbana: Manual de projeto.** São Paulo: 466p. 1980.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído.** 134p. Dissertação de Mestrado apresentada para a Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

DURÃES, M.F.; MELLO, C.R.; NAGHETTINI, M. **Applicability of the SWAT model for hydrologic simulation in Paraopeba River Basin, MG.** Cerne, v.17, p.481-488, Lavras, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Barraginhas para captação de enxurradas.** Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Sete Lagoas, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Aspectos Ecológicos.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/aspec.htm>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk.** Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earthscan, London. 285p. 2011

FERREIRA, A. B. et al. **Análise comparativa do uso e ocupação do solo na área de influência da Usina Hidrelétrica Capim Branco I a partir de técnicas de geoprocessamento.** SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. Anais. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2997-3004.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo.** 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) apresentada para a Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. **The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions.** Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n. 4, p. 1211-1250. 2007.

GUPTA, H. V., SOROOSHIAN, S., YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. Journal of Hydrologic Eng, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.

JHA, M. K.; GASSMAN, P. W.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. G. **Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions.** J. American Water Resour. Assoc., v.40, n.3, p.811-25, 2004.

KLING, H.; GUPTA, H. **On the development of regionalization relationships for lumped watershed models: The impact of ignoring sub-basin scale variability.** Journal of Hydrology. N. 373, p. 337-351, 2009

LAWRENCE, M. G. **The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air.** American Meteorological Society. 2005.

LIMA, J.E.F.W; SILVA, E.M; STRAUCH, M; LORZ, C. **Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado.** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves. 2013.

MACHADO, R.E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 fl. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo/SP. 2002.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A. **Simulação da produção de sedimento para a microbacia hidrográfica do ribeirão Marins (SP).** Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 27, p.735-741. 2003.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. 189p.

MARONI, J. R. Artigo: **Ele “plantou” chuva no sertão e melhorou a vida de milhares de pessoas.** Especial para a Gazeta do Povo. Agronegócio – Sustentabilidade.

Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/agronegocio/ele-plantou-chuva-no-sertao-e-melhorou-a-vida-milhares-de-pessoas/>. Acesso em: Janeiro, 2021.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; NORTON, L. D.; SILVA, A. M.; ACERBI JÚNIOR, F. W. **Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian head water basin.** *Catena*, v.75, p.235-247, 2008.

MONTE-MOR, R. C. A. **Análise de processos hidrológicos em bacias de rios intermitentes no semiárido mineiro.** Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

MORIASI, D. N. *et al.* **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.** *Transaction of the ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. **Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model.** *Journal of Hydrology*, v.306, p.127-145, 2005.

NASA – *Nacional Aeronautics and Space Administration/EUA.* **Programa de Sistemas de Dados Científicos Terrestres.** Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov>. Acesso em: Março de 2020.

NAGUETTINI, M.; PINTO, E. J.A. **Hidrologia Estatística.** Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Belo Horizonte, 2007.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation**, Version 2005. Agricultural Research Service. Texas. 476p. 2005.

NORONHA, G. C.; SILVA, L. P.; HORA, M. A. G. M. **O uso do Gerador Climático do SWAT para a microbacia de Santa Maria/Cambiocó.** XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Brasília/DF, 2015.

PEDREIRA, P. R. P.; *et al.* **Implantação do Sistema Barraginhas na região Sudeste do Estado do Tocantins.** XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal, RN, 2014.

PEREIRA, Zefa Valdivina. Caracterização de Biodiversidade de Mato Grosso do Sul. In: YONAMINE, Sérgio Seiko (Coord. Geral). **Zoneamento Ecológico-Econômico do Mato Grosso do Sul: Contribuições Técnicas, Teóricas, Jurídicas e Metodológicas.** Campo Grande, 2009, Vol. 1.

Portal da Agência de Bacia Hidrográfica Peixe Vivo – **Agência Peixe Vivo.** Disponível em: < <https://agenciapeixe vivo.org.br/>>. Acesso em: Agosto, 2019.

Portal do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas - **CBH Velhas.** Disponível em: < <http://cbh velhas.org.br/>>. Acesso em: Agosto, 2019.

Portal **EMBRAPA**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/>>. Acesso em: Outubro, 2019.

Portal **SIGA Velhas**. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas - CBH Velhas. Disponível em: <<http://siga.cbhvelhas.org.br/>>. Acesso em: Agosto, 2019.

RITCHIE, J.T. **Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover**. Water Resources Research. Res., v.8, p.1204-1213, Washington, 1972.

RODRIGUES, L. S.; *et al.* **Disseminação das Tecnologias Sociais Barraginhas e Lago de Múltiplo Uso para segurança hídrica de lavouras e alimentar de comunidades**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29. 2012, Campinas. Associação Brasileira de Milho e Sorgo. 2012, p.3677-3688.

SALLES, L.A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília/DF. 2012.

SARAIVA, I. S.; **Regionalização de parâmetros de simulação hidrológica para emprego em bacias hidrográficas sem monitoramento fluviométrico**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SARMENTO, L. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. 2010. 241 f. Tese de Doutorado. Programa de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Universidade de Brasília. Brasília/DF. 2010.

SANTHI, C; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M. **Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources**. Journal of the American Water Resources Association, v. 37, p.1169-1188. 2001.

SILVA, G. M. F. **Impactos das barraginhas para a comunidade Inácio Félix, no município de Minas Novas/MG**. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras, 2017.

Sistema de Informações Hidrológicas – **Hidroweb/ANA**. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acesso em: Agosto, 2019.

SLOAN, P.G.; MOORE, I.D.; COLTHARP, G.B.; EIGEL, J.D. **Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds**. Water Resources Inst., v.20, n.12, p.2266-2278, 1983.

SLOAN, P.G.; MOORE, I.D. **Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds**. Water Resources Research, v.20, n.12, p.1815-1822, 1984.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model Calibrations. Cap.2. In: SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Colorado, Highlands Ranch: Ed. Water Resources Publications, 1995.

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. **Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model**. Transactions of the ASAE, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, 2000.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J.G. **Integration of the basin-scale water quality model with GIS**. Water Resources Bulletin, v.30, n.03, p. 453-462. 1994.

STRAUCH, M.; *et al.* **The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment**. 2013, 13p. In: ELSEVIER – Journal of Environmental Management, Germany, 2013.

TUCCI, C.E.M. Modelos e Simulações. In: TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Segunda edição. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, p. 79-164. 2001.

ULIANA, E. M; *et al.* **Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico**. Revista Ambiente e Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 10, núm. 1, enero-marzo, 2015, pp. 82-88.

VEITH, T. L.; LIEW, M. W. van; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. **Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds**. Transactions of the ASABE, v.53, p.1477-1486, 2010.

VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS**. 2.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289p.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 5.ed. New Jersey: Upper Saddle River. 2003. 612p.

WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. **Rainfall-runoff modeling in gauged and ungauged catchments**. 1.ed. Londres: Imperial College, 2004. 306p.

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. **Environmental Modelling: finding simplicity in complexity**. John Wiley & Sons Ltd. Wichester, England. 408 p. 2005.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C.; XIA, J.; YANG, H. **Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China**. Journal of Hydrology, v. 358, n. 1-2, p. 1-23, 2008.