



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

A INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A
BACIA DO RIO DAS ALMAS - GOIÁS

VANINE ELANE MENEZES DE FARIAS

JOÃO PESSOA – PB

Outubro de 2018

VANINE ELANE MENEZES DE FARIAS

A INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A
BACIA DO RIO DAS ALMAS - GOIÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do curso de Engenharia Ambiental
da Universidade Federal da Paraíba, como pré-
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof.º Dr. Richarde Marques da Silva

JOÃO PESSOA – PB

Outubro de 2018

F224i Farias, Vanine Elane Menezes de.

A INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO
SWAT PARA A BACIA DO RIO DAS ALMAS - GOIÁS / Vanine
Elane Menezes de Farias. - João Pessoa - PB, 2018.
79 f. : il.

Orientação: Richarde Marques da Silva.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Bioma cerrado. 2. Modelagem hidrológica. 3. SWAT. 4.
Produção de sedimentos. I. Silva, Richarde Marques da.
II. Título.

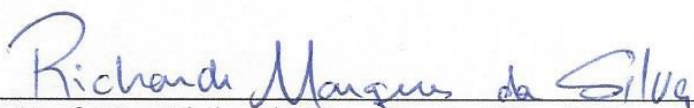
UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

VANINE ELANE MENEZES DE FARIAS

A INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NA CALIBRAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A BACIA DO RIO DAS ALMAS - GOIÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 26/10/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Richarde Marques da Silva (orientador)
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

APROVADO



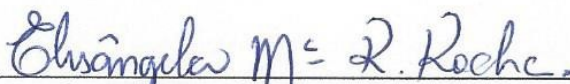
Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – CT/UFPB

Aprovado



Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – CT/UFPB

APROVADA



Profª. Elisângela Maria Rodrigues Rocha
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Profª Elisângela M. R. Rocha
Coord. CCGEAM/CT/UFPB
Mat. SIAPE 1821373

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força, coragem e sabedoria ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Eloise Elane e Wellington Farias e minha avó Elza Menezes (*In Memoriam*) pelo amor incondicional, por todo carinho, cuidado e por acreditarem em mim em cada passo dado. Vocês são essenciais para eu sempre ir adiante, são responsáveis por essas minhas conquistas, por proporcionarem sempre as melhores condições para que eu alcance meus objetivos, não medindo esforços em me fornecerem a melhor educação possível. Aos meus irmãos Alexandre e Pablo e a toda minha família pelo apoio de sempre. Mil vezes eu pudesse escolher uma família, mil vezes eu escolheria vocês.

Ao meu orientador, professor Richarde Marques, pela oportunidade de ingressar na pesquisa, pelos ensinamentos, paciência, por acreditar que eu seria capaz de realizar esse trabalho e pela eterna calma no meio do meu desespero. Aos professores Celso Augusto e Gustavo Barbosa por aceitarem fazer parte da banca avaliadora. Os convidei por considera-los exemplo e os admirarem como os grandes profissionais que são.

Aos meus colegas de turma(s) pelos cinco anos de convivência e por me acolherem tão bem quando caí de paraquedas, desbloqueada e perdida, nessa universidade. Em especial Samanta, Mabeth, Felipe e Jaque pela trajetória nesses períodos finais. Eu não teria passado tão bem por esse curso se não fossem por vocês nos meus dias. E por eles, estendo meu agradecimento a todos os outros que fizeram parte disso tudo. Foi massa. Gratidão a todos. Espero cruzar sempre com vocês aí pelos rodeios da vida.

Aos colegas do LEPPAN, por me acolherem junto a vocês por esse tempo e por toda ajuda ao longo do caminho. Vocês foram demais. Obrigada pelas orientações, pela ajuda, pelas discussões e pelos momentos divertidos que tivemos. Vocês sempre foram atenciosos, sempre abriram mão de suas atividades pra virem me ajudar quando eu precisei e sempre me deram apoio em todo esse trabalho. Se o SWAT não enlouqueceu a gente nesse meio tempo, não enlouquecemos nunca mais. A vocês meu muitíssimo obrigada.

Ao professor Cláudio Ruy Portela, por ter me recebido de braços abertos a participar de seus projetos, acreditando em mim quando eu ainda estava no comecinho dessa caminhada. Obrigada por toda confiança e por mesmo depois de anos, apesar de um oceano de distância, estar sempre a disposição para o que for preciso, me ajudando sem medir esforços. E aos

colegas do LabESC pelo tempo vivido. Vocês são massa e vão ser sempre minha saudade. Ninguém aguentou tanto meu choro e meus estresses pelo curso quanto vocês.

Aos amigos fora da vida universitária que também sempre acreditaram em mim, aguentaram minhas ausências e entenderam todas as vezes que deixei de ir vê-los por ter intermináveis provas e projetos para entregar no dia seguinte. Vocês são massa também.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha caminhada e fizeram dos meus dias todos bons, toda minha gratidão a vocês.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a influência das mudanças do uso e ocupação do solo na calibração de um modelo hidrossedimentológico para a bacia hidrográfica do rio das Almas, localizada no bioma cerrado, Estado de Goiás, Brasil. Neste estudo, foi utilizado o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) integrado ao Sistema de Informações Geográficas ArcGIS, utilizando em seu processamento dados climatológicos, mapas de uso e ocupação do solo, tipos de solo e o modelo digital de elevação. O SWAT foi aplicado para três cenários de uso do solo (cenário 1 = 1991, cenário 2 = 2017, e cenário 3 = 2006) e utilizando as mesmas condições climáticas, sendo os dois primeiros para calibração e o cenário 3 para simulação com a melhor parametrização obtida com o melhor ajuste entre as vazões observadas e simuladas. As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas dos postos Colônia dos Americanos e Jaraguá, para o período de 1974 a 1980 (calibração) e 1981 a 1988 (validação). A análise de desempenho do modelo foi medida a partir do índice de Nash-Sutcliffe (NS) e do coeficiente de determinação de Pearson (R^2). Para um melhor ajuste do modelo, o processo de calibração foi realizado através do programa SWAT-CUP para o posto Colônia dos Americanos, onde foram calibrados 11 parâmetros na bacia, os quais foram considerados mais influentes no processo hidrológico. Os resultados da calibração foram: (a) cenário 1: $R^2 = 0,88$ e $NS = 0,74$ e (b) cenário 2: $R^2 = 0,84$ e $NS = 0,70$. Os resultados das calibrações podem ser considerados satisfatórios. Para o processo de validação foram obtidos: (a) cenário 1: $R^2 = 0,80$ e $NS = 0,56$ e (b) cenário 2 $R^2 = 0,87$ e $NS = -0,18$. No que tange à validação, pode-se observar que no cenário 2 a calibração realizada não foi representativa para o período de validação. O cenário 1 apresentou a melhor parametrização para representar a bacia e para verificar sua representatividade sob diferentes usos do solo aplicou-se a parametrização ao cenário 3, obtendo $R^2 = 0,88$ e $NS = 0,76$. A estimativa de produção de sedimentos variou de 11,7 a 129 ton/ha/ano para o cenário 1 e para o cenário 2 variando de 64,94 a 348,61 ton/ha/ano. A relação entre os dados de vazão observada para Colônia dos Americanos e de produção de sedimentos calculada apresentou $R^2 = 0,79$ e $R^2 = 0,90$ para os cenários 1 e 2, respectivamente. A perda de solo foi maior para as sub-bacias com predominância de agricultura, cambissolo e declividade variando de 1 a 10%. Os resultados mostram que o modelo tem uma boa representatividade para a área de estudo e seus diferentes usos do solo.

Palavras-chave: Bioma cerrado; Modelagem hidrológica; SWAT; Produção de sedimentos.

ABSTRACT

The objective of this monography was to analyze the influence of changes of the soil use and its accupation on the calibration of a hydrosedimentological model for the Almas river basin, located in the cerrado biome, State of Goiás, Brazil. In this study, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used integrated to the Geographic Information System ArcGIS, using in its processing climatological data, use maps and soil occupation, soil types and the digital elevation model. SWAT was applied to three land use scenarios (scenario 1 = 1991, scenario 2 = 2017 and scenario 3 = 2006) and using the same climatic conditions, the first two for calibration and scenario 3 for simulation with the best parameterization obtained with the best fit between observed and simulated flow rates. Simulated flow rates were compared with the observed flow rates from the Colônia dos Americanoos and Jaraguá stations, from 1974 to 1980 (calibration) and from 1981 to 1988 (validation). The performance analysis of the model was measured from the Nash-Sutcliffe index (NS) and the Pearson determination coefficient (R^2). To a better model adjustment, the calibration process was performed through the SWAT-CUP program for the colônia dos Americanos, where 11 parameters were calibrated in the basin, which were considered more influential in the hydrological process. The results of the calibration were: (a) scenario 1: $R^2 = 0.88$ and $NS = 0.74$ and (b) scenario 2: $R^2 = 0.84$ and $NS = 0.70$. The results of the calibrations can be considered satisfactory. For the validation process the results obtained were: (a) scenario 1: $R^2 = 0.80$ and $NS = 0.56$ and (b) scenario 2 $R^2 = 0.87$ and $NS = -0.18$. Regarding the validation, it can be observed that in scenario 2 the calibration performed was not representative for the validation period. Scenario 1 presented the best parameterization to represent the basin and to verify its representativeness under different soil uses, the parameterization was applied to scenario 3, obtaining $R^2 = 0.88$ and $NS = 0.76$. The estimated sediments production ranged from 11.7 to 129 ton / ha / year for scenario 1 and for scenario 2 ranging from 64.94 to 348.61 tons / ha / year. The relation between the data of flow rate, observed for the Colônia dos Americanos, and the calculated sediments production presented $R^2 = 0,79$ and $R^2 = 0,90$ for the sceneries 1 and 2, respectively. The soil loss was higher for the sub-basins with predominance of agriculture, cambisols and declivity varying from 1 to 10%. The results show that the model has a good representativeness for the study area and its different uses of the soil.

Keywords: Cerrado biome; Hydrological modeling; SWAT; Production of sediments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio das Almas, em Goiás e no Brasil.....	28
Figura 2 - Média pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas mensal na bacia do rio das Almas entre 1968 e 1994.....	29
Figura 3 - MDE utilizado na delimitação da bacia e rede de drenagem da bacia do rio das Almas.....	34
Figura 4 - Tipos de solo da bacia do rio das Almas, Goiás. Fonte: Adaptado de LAPIG.....	36
Figura 5 - Representação da saída de dados baseado nos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica pelo SWAT.	42
Figura 6 - Discretização da bacia hidrográfica.....	47
Figura 7 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 1991...49	
Figura 8 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 2017...49	
Figura 9 - Hidrogramas das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada no posto Jaraguá para o período de 1968 a 1994 no cenário 1.....	51
Figura 10 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada em Colônia dos Americanos para o período de 1974 a 1988 no cenário 1. .51	
Figura 11 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada para o posto Jaraguá no cenário 2.....	52
Figura 12 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada para o posto Colônia dos Americanos no cenário 2.	52
Figura 13 - Resultado da sensibilidade global dos parâmetros no posto Colônia dos Americanos para Cenário 1.	54
Figura 14 - Resultado da sensibilidade global dos parâmetros no posto Colônia dos Americanos para o Cenário 2.	55
Figura 15 - Comparação entre as vazões observadas e calibradas e o hietograma da precipitação média observada para o Cenário 1.	59
Figura 16 – Comparação entre as vazões observadas e calibradas e o hietograma da precipitação média observada para o Cenário 2.	59
Figura 17 - Hidrograma das vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 1 no posto Jaraguá.....	61
Figura 18 - Hidrograma das vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 2 no posto Jaraguá.....	61
Figura 19 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 2006. 64	

Figura 20 – Comparação entre as vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 3.....	64
Figura 21 - Distribuição espacial do escoamento superficial para o cenário 3.	66
Figura 22 - Precipitação média anual e produção estimada de sedimentos na bacia do rio das Almas para o cenário 1.	67
Figura 23 - Precipitação média anual e produção estimada de sedimentos na bacia do rio das Almas para o cenário 2.	67
Figura 24 - Relação entre vazão observada e a produção de sedimentos no Cenário 1.	68
Figura 25 - Relação entre vazão observada e a produção de sedimentos para o Cenário 2.	69
Figura 26 - Distribuição espacial da perda de solo nas sub-bacias para o cenário 3.....	70
Figura 27 - Representação dos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio das Almas pelo SWAT.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Associação entre o uso e ocupação de solo na bacia hidrográfica e as classes existentes no banco de dados do SWAT.	37
Tabela 2 - Descrição das estações climatológicas utilizadas.....	38
Tabela 3 - Parâmetros climatológicos inseridos no gerador climático referente ao posto Goiás.	39
Tabela 4 - Parâmetros climatológicos inseridos no gerador climático referente ao posto Pirenópolis.....	39
Tabela 5 - Postos pluviométricos e fluviométricos utilizados na pesquisa.	40
Tabela 6 - Classificação da eficiência da modelagem.....	43
Tabela 7 - Parâmetros e limites utilizados na calibração do modelo.....	44
Tabela 8 - Coeficientes estatísticos para diferentes combinações no modelo.....	48
Tabela 9 - Mudanças nas áreas dos usos do solo para os anos de 1991, 2006 e 2017.	50
Tabela 10 - Vazões observadas e simuladas pelo modelo para o cenário 1.	53
Tabela 11 - Vazões observadas e simuladas pelo modelo para o cenário 2.	53
Tabela 12 - Parâmetros sensíveis para calibração do SWAT no cerrado do Brasil.	56
Tabela 13 - Parâmetros calibrados para o Cenário 1.....	56
Tabela 14 - Parâmetros calibrados para o Cenário 2.....	57
Tabela 15 - Vazões observadas e calibradas pelo modelo para o posto Colônia dos Americanos.....	60
Tabela 16 - Vazões observadas e calibradas pelo modelo para Jaraguá.	62
Tabela 17 - Valores de NS e R ² para o período de calibração e validação com o SWAT em bacias do bioma cerrado.	63
Tabela 18 - Índices estatísticos do modelo para os três cenários.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
ARS	Agricultural Research Service
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CH_N2	Coeficiente de Manning do canal principal ($s.m^{-1/3}$)
CN	Curva-número
CN2	Curva número na condição II
CREAMS	Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management
DEWPT	Temperatura média do ponto de orvalho no mês
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
FAO	Food and Agriculture Organization
GLEAMS	Groundwater Loading Effects on Agricultural Management
GW_DELAY	Tempo de retardo da água subterrânea (dias)
GW_REVAP	Coeficiente de água subterrânea
GWQMN	Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAPIG	Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
MDE	Modelo Digital de Elevação
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
NRCS	Natural Resource Conservation Service
NS	Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe
PCPD	Número médio de precipitações no mês

PCPMM	Precipitação média mensal
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação diária a cada mês
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PW_W1	Probabilidade de dia úmido após dia seco
PR_W2	Probabilidade de dia úmido seguido de dia úmido
R ²	Coeficiente de Determinação
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo
IG	Sistemas de Informações Geográficas
SCS	Soil Conservation Service
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo(mm H ₂ O/mm solo)
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)
SWRRB	Simulator for Water Resources in Rural Basins
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Procedures
TOPMODEL	Topography based hydrological Model
TMPMN	Precipitação média mínima mensal
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima
TMPMX	Precipitação média máxima mensal
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima
USGS	Earth Explorer da United States Geological Survey

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Justificativa.....	17
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 Processos hidrológicos e sedimentares.....	19
2.2 Modelos Hidrossedimentológicos	20
2.3 Integração do SIG com modelos hidrossedimentológicos	24
2.4 Aplicações do modelo SWAT	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Caracterização da área de estudo.....	28
3.2 O modelo SWAT	30
3.2.1 Equacionamento do modelo SWAT.....	31
3.3 Elaboração do banco de dados	33
3.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)	34
3.3.2 Tipos de solo e uso e ocupação do solo	35
3.3.3 Dados climáticos e fluviométricos	37
3.4 Etapas de execução do modelo e criação de cenários de uso e ocupação do solo, para estimativa de vazão e produção de sedimentos	41
3.5 Análises de desempenho do modelo.....	42
3.6 Escolha dos parâmetros e análise de sensibilidade.....	43
3.7 Calibração e ajuste do modelo.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Processamento de dados de entrada	47
4.2 Mudanças de uso do solo da bacia do rio das Almas	48

4.3 Simulação das vazões	50
4.4 Análise de sensibilidade dos parâmetros	54
4.5 Calibração do modelo SWAT.....	56
4.6 Produção de sedimentos estimada	66
4.7 Balanço hídrico da bacia do rio das Almas	70
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem de consumo natural finito que devido ao mau uso e gerenciamento, além de interferências climáticas, vem se tornando um bem escasso, gerando conflito entre diferentes usuários. O problema da disponibilidade e qualidade da água passa pelas condições de uso e ocupação do solo. Nesse sentido, é necessário estabelecer políticas adequadas de uso da terra e dos recursos naturais devido ao aumento gradativo da escassez de água e degradação ambiental das bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 2014). Para isso, é importante a realização de estudos hidrológicos nas bacias hidrográficas, de forma a entender o funcionamento dos processos em seu balanço hídrico e os impactos ambientais que o crescimento populacional, a degradação do meio ambiente e o uso inadequado do solo podem causar na produção de água e sedimentos.

Neste estudo, a bacia do rio das Almas, localizada no Estado de Goiás, mais precisamente no bioma cerrado foi escolhida para ser analisada. O bioma cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, com aproximadamente 24% do território nacional. Suas águas vertem para oito das doze regiões hidrográficas brasileiras (LIMA, 2011). Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Goiás (2015), apesar da abundância, os recursos hídricos estão distribuídos desuniformemente. Atualmente, o Estado de Goiás tem a agricultura como uma de suas maiores práticas de uso do solo e, dessa forma, torna-se de fundamental importância o conhecimento dos usos de suas reservas de água e sua distribuição, pois ajudam a orientar a natureza e a escala de aplicação de instrumentos de gestão de recursos hídricos. A segunda maior demanda de água é para o setor industrial, com cerca de 11% da demanda total do estado, com grande parte direcionada à agroindústria e seu setor sucroalcooleiro que trabalha em uma complexa relação entre o uso do solo e das demandas de água.

Castro (2013) afirma que para uma gestão adequada dos recursos hídricos é imprescindível à utilização de bases de dados confiáveis. Contudo, para muitas regiões do Brasil, dados climatológicos, de precipitação e de vazão ainda são insuficientes ou não existem. Dessa forma, uma alternativa para estimar o comportamento de uma bacia hidrográfica é utilizando modelos matemáticos para auxiliar no estudo hidrológico, como é o caso do modelo SWAT, que vem sendo amplamente utilizado em várias partes do planeta (UZEIKA, 2009).

De acordo com Tucci (1998), “os modelos distribuídos, agregados a modelos digitais de terreno e ao geoprocessamento, têm buscado melhorar a representatividade espacial e temporal do comportamento das diferentes partes da bacia, sujeitas a diferentes ações antrópicas”. Assim, utilizou-se o modelo SWAT por ser uma ferramenta com uma interface acoplada a um software de Sistema de Informações Geográficas, o ArcGIS, desenvolvido para simular o impacto que o manejo do solo, a pedologia e as alterações de uso e ocupação podem ter no escoamento, produção de sedimentos, perda do solo e na qualidade da água de uma bacia hidrográfica. Pode ser aplicado a bacias de pequeno, médio ou grande extensão, simulando todos os seus processos hidrológicos. Além disso, ajuda a simular diferentes cenários e as consequências que pode gerar a alteração dessas informações (SANTOS, 2006).

A modelagem hidrológica com o auxílio dos Sistemas de Informações Geográficas é uma ferramenta de apoio às decisões para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Permite a representação espaço-temporal dos processos hidrológicos obtidos na modelagem e a produção de mapas temáticos a partir do cruzamento de dados tabulares e informações espaciais (SILVA e SANTOS, 2008), combinando informações topográficas, de uso e ocupação e tipo de solo e de condições meteorológicas das bacias, de forma rápida, eficiente e de baixo custo.

1.1 Justificativa

A bacia hidrográfica do rio das Almas sofreu ao longo dos anos uma vasta alteração em seu uso e ocupação do solo. Visto que são raros os meios de obtenção de dados oficiais atualizados acerca da precipitação, vazão e produção de sedimentos, uma forma de estudar os impactos dessas modificações nos recursos hídricos e na perda de solo da região é incentivar pesquisas que estabeleçam a relação do uso do solo e a dinâmica hidrossedimentológica da bacia. A utilização de ferramentas como o modelo hidrológico é uma alternativa de auxiliar em um planejamento ambiental, principalmente para a gestão dos recursos hídricos da região. A modelagem hidrológica permite estabelecer cenários capazes de avaliar esses processos e fenômenos a partir de diferentes condições climatológicas e de uso do solo, fazendo projeções futuras de acordo com a realidade de estudo e as modificações aos quais está submetido. Por ser integrado a um SIG, a modelagem pelo SWAT leva a uma maior compreensão da realidade de estudo, visto que é capaz de analisar a realidade da área em diferentes condições de tempo e espaço.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a influência das mudanças do uso e ocupação do solo na calibração do modelo SWAT para uma bacia hidrográfica tropical úmida do bioma cerrado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar as mudanças do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio das Almas entre 1991 e 2017 mediante a assimilação de imagens de Sensoriamento Remoto.
- b) Determinar a melhor parametrização do modelo SWAT para a área de estudo utilizando diferentes cenários de uso do solo.
- c) Analisar a vazão na bacia do rio das Almas usando o modelo SWAT.
- d) Estimar a produção de sedimentos na bacia do rio das Almas utilizando o modelo SWAT.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processos hidrológicos e hidrossedimentológicos

Os modelos hidrossedimentológicos tem relação direta com os processos que ocorrem nos ciclos hidrológicos e sedimentares de uma bacia hidrográfica. Dessa forma, para a compreensão do sistema a ser modelado é importante conhecer cada etapa desses ciclos. O conhecimento das relações entre os fatores que causam a perda de solo e de água nas bacias hidrográficas são importantes para o planejamento eficaz da gestão dos recursos hídricos da região de estudo.

O ciclo hidrológico é um processo dinâmico de circulação da água entre a superfície da terra e a atmosfera, constituído por diferentes fases. A precipitação, que é como toda a água do meio atmosférico atinge a terra, como chuva, neblina, granizo, geada e neve. Quando a precipitação não é interceptada pela vegetação local, a parcela de água que atinge a terra passa pelo processo de infiltração, sendo esse o momento em que a água penetra nas camadas do solo próximas a superfície. O escoamento ocorre quando a intensidade da precipitação supera a capacidade de infiltração do solo e há o movimento de deslocamento da água na superfície terrestre, seja de forma superficial ou subsuperficial. A percolação é a fase do ciclo hidrológico que consiste no movimento da água dentro do perfil do solo e é responsável pela manutenção do fluxo de base, além de manter a perenização dos rios em épocas de estiagem. A evaporação é o processo que transforma a água líquida ou sólida em vapor, transferindo-a da superfície para a atmosfera. E a transpiração, que é a perda de água pelas plantas (TUCCI, 1998; UZEIKA, 2009).

Em paralelo ao ciclo hidrológico acontece no sistema a produção de sedimentos que está relacionado aos processos da água que ocorrem na superfície. O processo de desprendimento de partículas do solo, seu transporte e deposição na superfície da bacia pelas forças erosivas das gotas de chuva e escoamento superficial é o que fazem parte do ciclo hidrossedimentológico (NEITSCH et al., 2011; UZEIKA, 2009). Por outro lado, diferente do que acontece do ciclo da água, as partículas do solo não voltam ao meio de onde vieram. Dessa forma, o planejamento de conservação do solo e da água requer um conhecimento mais profundo das relações entre os fatores causadores da perda no solo e na água.

Bordas e Semmelmann (1993) descrevem os principais fenômenos do ciclo hidrossedimentológico. Inicialmente, ocorre a desprendimento das partículas do solo que ficam suscetíveis a ação do escoamento superficial. A partir disso, ocorre o processo de

erosão onde há o deslocamento dessas partículas solidas de seu lugar de origem. O material erodido é transportado pela água e no processo de sedimentação as partículas mais finas em suspensão tendem a descer ao fundo do leito sob ação da gravidade. As partículas são depositadas ao fundo do leito e lá se acumulam no processo chamado de consolidação.

Dessa forma, observa-se que a rede de drenagem vai transportar tanto água como sedimentos na bacia. Isso pode gerar impactos negativos para a região, pois tem influência direta na degradação e na fertilidade do solo, além de poder afetar a qualidade do leito dos rios e dos ecossistemas fluviais e estuarinos. Para evitar os possíveis impactos podem-se utilizar modelos hidrológicos para representar os processos envolvidos e criar cenários e hipóteses de como o uso do solo e as condições topográficas podem ser trabalhadas para evitar problemas consequentes da erosão e transporte de sedimentos.

2.2 Modelos hidrossedimentológicos

O modelo é uma representação simplificada de uma realidade, seja de um fenômeno, um processo, uma entidade física ou uma estrutura. A modelagem ajuda a explicar como acontece um determinado fenômeno e prever seu comportamento ou estado futuro. Permite simular cenários alternativos e que sejam realizadas comparações entre si, além de auxiliar na verificação de hipóteses e em previsões para apoiar uma tomada de decisão (CARNEIRO, 2009).

Os sistemas ambientais são uma realidade complexa, que muitas vezes podem incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre diferentes escalas de tempo e espaço. Por vezes isso se torna um obstáculo na representação e análise quantitativa e qualitativa de todos os seus processos envolvidos. Em um processo particular como o sistema hidrológico pode-se haver um entendimento qualitativo, mas seu entendimento quantitativo pode ser limitado. O modelo é uma ferramenta capaz de auxiliar na representação dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica e possibilita o estudo dos mesmos por meio de uma linguagem de mais fácil acesso, uso e aplicação (FERRIGO, 2014; STEYAERT, 1993).

Existem inúmeros modelos hidrológicos disponíveis ao uso. Muitos são desenvolvidos para uma mesma finalidade, diferenciando-se por questões conceituais ou em função dos dados utilizados, das escalas temporais e espaciais nas quais operam os processos que representam e pela discretização. A escolha do modelo apropriado para aplicação de cada um

depende de uma série de fatores. Lima (2010) aponta que para escolher o modelo apropriado deve-se levar em consideração o objetivo do estudo e o que se deseja extrair do modelo; quais os dados necessários para a modelagem e quais os dados disponíveis para sua execução; qual a precisão requerida e o grau de capacitação do corpo técnico para se utilizar e interpretar as informações de saída do modelo; o tempo e se tem equipamentos com capacidade suficiente de processamento.

Diante dos diversos modelos existentes, as maiores dificuldades para a modelagem estão as limitações existentes em seu processamento, desde as condições quantitativas e qualitativas dos dados requeridos à complexidade de representar alguns fenômenos a partir de equações matemáticas. Além disso, é imprescindível a compreensão do conjunto de processos físicos envolvidos para poder se interpretar os resultados obtidos, quais suas limitações e possíveis aplicabilidades em outras regiões. A heterogeneidade dos processos hidrológicos envolvidos propicia o desenvolvimento de inúmeros modelos que se diferenciam pelos objetivos propostos, pelos dados de entrada utilizados e pela discretização da bacia (TUCCI, 1998; McCULLOCH e ROBINSON, 1993).

Rennó e Soares (2000) discutem que os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos, como se físicos ou matemáticos, se os tipos de variáveis utilizadas são determinísticos ou estocásticos, se as relações dessas variáveis são empíricas ou conceituais, se os dados são representados de forma discreta ou contínua, se a relação espacial é pontual ou distribuída e quanto a existência de dependência temporal sendo estáticos ou dinâmicos.

Autores como Tucci (1998), Viessman Jr. e Lewis (2002) e Christofletti (1999) descrevem as diferentes classificações do modelo quanto à descrição do processo, a discretização espacial e extensão temporal, sendo eles:

- Físicos: são modelos que incluem tecnologias análogas e princípios de semelhança aplicados a modelos em escalas reduzidas.
- Matemáticos: procuram representar o comportamento do sistema por meio de equações matemáticas.
- Conceituais: baseiam-se nas concepções teóricas do ciclo hidrológico para caracterizar e interpretar os fenômenos, em vez de descrever a ocorrência empírica do processo físico.
- Empíricos: ajustam os valores calculados aos dados observados através de funções sem considerar processos físicos envolvidos.

- Concentrados: quando não levam em consideração a variabilidade espacial dos parâmetros no interior do sistema, considerando os dados de entrada e os parâmetros representativos como valores médios e geralmente utilizam só o tempo como variável independente.
- Distribuídos: quando suas variáveis e parâmetros variam espacialmente no interior do sistema.
- Contínuos: capazes de modelar os fenômenos e processos ao longo de um período de tempo de forma contínua.
- Eventos: modelos que simulam um evento individual, de curta duração, dadas as condições iniciais.

Um mesmo processo a ser modelado pode ser representado de diferentes maneiras, o qual algumas são mais apropriadas para determinados casos. Dessa forma, não existe um modelo único que seja o melhor e sim pode existir aquele que melhor descreve um fenômeno. (RENNÓ e SOARES, 2000).

Tucci (1998) apresenta o modelo hidrológico como uma ferramenta extremamente útil, capaz de representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica a partir da equacionalização de seus processos. Dessa forma, a vantagem de utilizar a modelagem é a possibilidade de se prever situações diferentes das observadas, prever situações futuras e é uma forma de sustentar a definição de políticas públicas em bases científicas (CARNEIRO, 2009). Além disso, poder realizar um estudo eficiente de diferentes cenários de uma forma rápida e com baixo custo de operação.

Os modelos hidrossedimentológico são um grupo dos modelos hidrológicos que acrescentam em sua aplicação o estudo dos processos sedimentológicos de uma bacia hidrográfica. Uzeika (2009) define o modelo hidrossedimentológico como uma ferramenta computacional que a partir de equações matemáticas permite analisar quais os efeitos que o clima, tipo de solo e o uso e ocupação do solo de uma região tem sobre seus processos hidrológicos envolvidos e seus processos erosivos, desde a desagregação ao transporte dos sedimentos.

Singh e Woolhiser (2002) fazem um levantamento da perspectiva histórica da modelagem hidrológica de bacias hidrográficas. Os autores constatarem que o início dessa modelagem deu-se a partir do desenvolvimento da engenharia civil no século XIX o qual foram idealizados modelos voltados à concepção de estradas, canais, esgotos da cidade, sistemas de drenagem, represas, galerias, pontes e sistemas de abastecimento. Na primeira metade do

século XX a modelagem hidrológica envolvia conceitos, teorias e modelos de componentes individuais do ciclo hidrológico. A partir da década de 1960 a tecnologia possibilitou que começassem a ser integrados modelos de diferentes componentes do ciclo hidrológico e pudessem ser aplicados em toda uma bacia hidrográfica em diferentes escalas temporais e espaciais.

Atualmente diversos modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos estão disponíveis ao uso e vem sendo utilizados para simulação em bacias de pequenas, médias e de grande porte. Os modelos se diferenciam por seus diferentes processamentos e finalidades. Dentre os mais utilizados para hidrologia estão o *Système Hydrologique Europeen* – SHE (ABBOTT *et al.*, 1986), *Topographic Kinematic Approximation and Integration* – TOPKAPI (LIU e TODINI, 2002), *Arno River Model* – ARNO (TODINI, 1996), Modelo Hidrológico de Grandes Bacias - MGB-IPH (COLLISSCHONN *et al.*, 2010), *Topographic Based Hydrological Model* – TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979). Muitos desses modelos são desenvolvidos por grupos de pesquisas com a finalidade de obter modelos distribuídos que agregassem as melhores formulações para representar cada fase do ciclo hidrológico (KAISER, 2006). Para a modelagem da erosão hídrica existe o *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System* – CREAMS (KNISEL, 1980), *Water Erosion Prediction Project* – WEPP (FLANAGAN e NEARING, 1995), *Kinematic Erosion Model* - Kinneros (WOOLHISER *et al.*, 1990) e *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998). Estes últimos são integrados a um SIG, o que permite que as análises sejam feitas com uma análise espaço-temporal e considerar a variabilidade espacial para cada parâmetro e dado de entrada permite que o estudo seja feito com maior precisão.

Tucci (1998) enuncia que os modelos semi-distribuídos não necessariamente simulam um fenômeno e obtém resultados melhores que os modelos concentrados, mas enquanto no modelo concentrado se trabalha em uma grande escala assumindo que os dados de entrada e parâmetros variam apenas no tempo e não no espaço, os modelos distribuídos permitem que o escoamento superficial, balanços de água e produção de sedimentos tenham melhor distribuição e possam ser estudados ao longo de vários pontos da bacia. O autor ainda afirma que a utilização de modelos distribuídos em conjunto com o geoprocessamento tem melhorado a representação espacial e temporal dos processos hidrológicos nas diferentes partes da bacia sujeitas a diferentes ações antrópicas. Santos (2015) afirma que a partir da evolução computacional nas últimas décadas e pelo surgimento de novas formas de tratamento de dados espaciais, os modelos hidrossedimentológicos vêm sendo acoplados ao

ambiente SIG permitindo a análise espacial dos seus processos em escala de bacia hidrográfica.

Dessa forma, utilizou-se o modelo SWAT para o desenvolvimento do objetivo proposto pela pesquisa, visto que é um modelo hidrossedimentológico de base física, semi-distribuído, contínuo no tempo e com uma interface acoplada a um SIG que tem sido muito estudado e difundido mundialmente apresentando resultados satisfatórios de aplicação (ARNOLD et al., 2012; GASSMAN et al., 2007). Podendo analisar o efeito do uso e ocupação do solo sobre escoamento superficial, qualidade da água e produção de sedimentos, é um modelo que permite maior agilidade e facilidade na organização e o seu uso (FERRIGO, 2014).

2.3 Integração do SIG com modelos hidrossedimentológicos

Santos (2000) define o Geoprocessamento como um termo amplo, que engloba tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos por meio de programas computacionais, como o sensoriamento remoto, utilização de Sistemas de Posicionamento Global e Sistemas de Informações Geográficas. Os SIG são sistemas capazes de reproduzir, armazenar, processar e representar informações do espaço geográfico, gerando mapas, imagens de satélites cartas topográficas e gráficos como produto final.

Câmara et al. (2015) afirma que em um país como o Brasil que tem dimensão continental e carência de informações adequadas para tomada de decisão de problemas urbanos, rurais e ambientais, o geoprocessamento se apresenta como uma ferramenta eficaz e de baixo custo operacional para realizar análises complexas, criar bancos de dados georreferenciados e automatizar a produção de documentos topográficos.

Ferrigo (2014) disserta que a junção da modelagem hidrológica com o Sistema de Informações Geográficas é uma maneira de juntar diferentes séries de dados e informações disponíveis em multiescalas e permitir a distribuição espacial dessas informações, subdividindo a bacia hidrográfica em áreas menores e hidrológicamente mais homogêneas. Essa é uma forma de minimizar uma grande limitação da aplicação de modelos hidrológicos mais complexos, que é o trabalho em uma grande área com grande heterogeneidade dos dados que descrevem esses sistemas naturais.

Utilizar um modelo hidrológico integrado com o SIG é uma grande ferramenta capaz de realizar análises complexas de uma bacia hidrográfica levando em consideração a

variabilidade no tempo e no espaço e determinar parâmetros hidrológicos a partir da utilização conjunta de imagens das características da cobertura do solo, do Modelo Digital de Elevação, informações climatológicas medidas em diferentes pontos da bacia e gerar, assim, resultados mais satisfatórios do que se aplicando técnicas de maneira separada (FERRAZ et al., 1999; MENDES e CIRILO, 2013). Para Christofolletti (1999), a espacialidade é uma característica inerente aos sistemas ambientais, o que ressalta a significância dos sistemas de informação geográfica para os procedimentos da modelagem. A análise da vazão e produção de sedimentos pelo SWAT permite a entrada de dados específicos para características da região em diferentes pontos da bacia, permite estudar o comportamento desses fatores e elaborar mapas a partir dos resultados gerados na modelagem, especializando a vazão e produção de sedimentos e analisando a influência de todos os fatores climatológicos e de mudança no solo sobre o processo hidrológico.

2.4 Aplicações do modelo SWAT

O SWAT é um modelo desenvolvido para pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas com a finalidade de prever e avaliar quais os efeitos do manejo e mudança de uso do solo sobre os recursos hídricos, principalmente em bacias hidrográficas rurais não monitoradas (Arnold *et al.*, 1998).

Arnold et al. (2012) certifica que a primeira aplicação do modelo SWAT foi relatada por Engel et al. (1993) nos Estados Unidos. A publicação da primeira revisão descrita de uma interface do Sistema de Informações Geográficas para o SWAT foi elaborada por Arnold et al. (1998), que apresentou uma visão geral descrevendo os principais componentes do modelo. A partir daí, entre 1996 e 2000 foram lançados quatro versões atualizadas do modelo. Gasmann et al. (2007) forneceu mais uma descrição sobre o SWAT e também apresentou uma visão geral aprofundada de mais de 250 aplicativos relacionados ao modelo em todo o mundo. Em 2013 foi lançada a última versão do modelo SWAT 2012.

O SWAT tem se apresentado eficiente como uma ferramenta para compreender os fenômenos hidrológicos, analisar a influência das mudanças do clima e do uso solo sobre os impactos nos recursos hídricos e a prever a vazão e produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica. Inúmeras pesquisas com resultados satisfatórios já foram publicadas utilizando o SWAT como ferramenta em diversas localidades do mundo. No Brasil, o modelo foi aplicado no desenvolvimento de pesquisas como Durães (2010), Carvalho Neto *et al.* (2011), Santos et

al. (2014), Bonumá *et al.* (2010), Bressiani *et al.* (2015), Baldissera (2005), Santos (2015) que utilizaram o SWAT para analisar a eficiência do modelo simular os processos hidrológicos ou sedimentares em diferentes bacias hidrográficas. No cerrado brasileiro o modelo foi aplicado a trabalhos como Carvalho (2014), Castro (2013), Ferrigo (2014), Salles (2012) e Fukunaga (2012).

Para outras regiões do Brasil, BONUMÁ *et al.* (2010) aplicou o SWAT para avaliar o balanço hídrico e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Arroio Lino, região sul do país. O estudo apresentou bons resultados e os valores simulados quando comparados aos observados e obtiveram índices estatísticos satisfatórios para a simulação da vazão e produção de sedimentos. Na região Centro-Oeste, Baldissera (2005) desenvolveu sua pesquisa para avaliar a aplicabilidade do SWAT para simular vazões na bacia do rio Cuiabá, com uma área com cerca de 900.000 km², o primeiro estudo no Brasil aplicado a uma bacia de grande extensão, obtendo resultados satisfatórios de $NS = 0,71$ e $R^2 = 0,75$. Para a região nordeste, Santos (2015) realizou uma análise espaço temporal dos processos hidrossedimentológicos de escoamento superficial, propagação e produção de sedimentos da bacia do rio Taparucá, em Pernambuco. A modelagem apresentou valores satisfatórios de calibração e validação tanto para a vazão quanto para a produção de sedimentos.

Para bacias hidrográficas do cerrado brasileiro, Castro (2013) avaliou a aplicabilidade do SWAT para a bacia do Alto Rio Jardim de aproximadamente 105 km², localizada no sudeste do Distrito Federal. Em seu estudo, o modelo sem calibração não retrata satisfatoriamente os processos hidrológicos. Após o processo de calibração, o modelo apresentou boa representatividade da vazão diária da bacia e em seus testes de eficiência atingiu coeficientes de $NS = 0,60$ e $R^2 = 0,66$ considerados satisfatórios pela literatura. Entretanto, em seu período de validação apresentaram NS e R^2 de -0,8 e 0,66, considerados insatisfatórios. Apesar disso, a autora concluiu que mesmo com limitações nos resultados obtidos na validação da modelagem, o SWAT demonstrou ser uma ferramenta passível de utilização para a simulação de vazões nessa área de estudo.

Aplicando o SWAT também para a bacia do Alto Rio Jardim no Distrito Federal, Carvalho (2014) seguiu outra função disponível pelo SWAT e utilizou o modelo para simular a descarga sólida em suspensão nessa bacia agrícola. Os resultados deste estudo mostram que apesar de apresentar uma boa simulação das vazões obtendo um $NS = 0,71$ e $R^2 = 0,85$ no período de calibração e $NS = 0,54$ e $R^2 = 0,95$ na validação, a simulação da produção de

sedimentos não foi satisfatória, não apresentando bom desempenho para ajustar os valores calculados no modelo com os dados observados.

Ferrigo (2014) teve como objetivo de estudo avaliar a representatividade de 14 parâmetros obtidos na calibração do SWAT para a sub-bacia do rio Descoberto, Distrito Federal, para utilização em outras cinco bacias que contribuem para a mesma. A calibração automática da modelagem foi considerada satisfatória pela literatura adotada pela autora, apresentando $NS = 0,4$ e $R^2 = 0,44$. Na verificação os índices estatísticos foram de $NS = 0,48$ e $R^2 = 0,46$. Ao verificar a representatividade desses parâmetros para as quatro outras sub-bacias propostas, três apresentaram índices estatísticos satisfatórios e uma apresentou índices abaixo do esperado.

Salles (2012) utilizou o SWAT para simular a vazão da bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau. O modelo foi calibrado manualmente e simulou de forma satisfatória as vazões médias mensais indicando a possível aplicabilidade do modelo na predição de vazões na bacia. Todavia, tanto no período de calibração quanto de validação o modelo estimou adequadamente as vazões de pico, mas tendeu a superestimar as vazões de base.

Fukunaga (2012) avaliou a aplicabilidade do SWAT para estimar vazões em duas bacias do Espírito Santo, a microbacia do Córrego Jaqueira (MBJ) com área de aproximadamente 22,6 hectares e a sub-bacia do Itapemirim de aproximadamente 2.237 km². Na simulação inicial as vazões de base eram subestimadas e as vazões de pico superestimadas. A calibração foi realizada de forma automática para o modelo resultou em melhores relações e coeficientes estatísticos satisfatórios para a sub-bacia do rio Itapemirim ($NS = 0,57$ e $R^2 = 0,75$), embora a vazão de pico tenha sido subestimada. O pouco monitoramento e as inúmeras quantidades de falhas impossibilitaram de verificar se o modelo se aplica de forma satisfatória para a microbacia do córrego Jaqueira.

Esses estudos apresentam bons resultados e comprovam a aplicabilidade do SWAT como uma ferramenta para auxiliar gestores ambientais em tomadas de decisão a partir de uma fundamentação científica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio das Almas está situada no Estado de Goiás, Brasil, entre as coordenadas de latitude 15°49'00'' e 16°16'00'' sul e 49°21'00'' e 48°78'00'' de longitude oeste (Figura 1). Distribuído em 44 municípios e com uma área de aproximadamente 18.681,33 km², possui uma rede hidrográfica pertencente à bacia do rio Tocantins, com principais efluentes o Rio Verde, Rio Uru e Rio do Peixe. Sua nascente se encontra no Parque Estadual da Serra dos Pirineus, município de Pirenópolis, e sua foz no Lago Serra da Mesa.

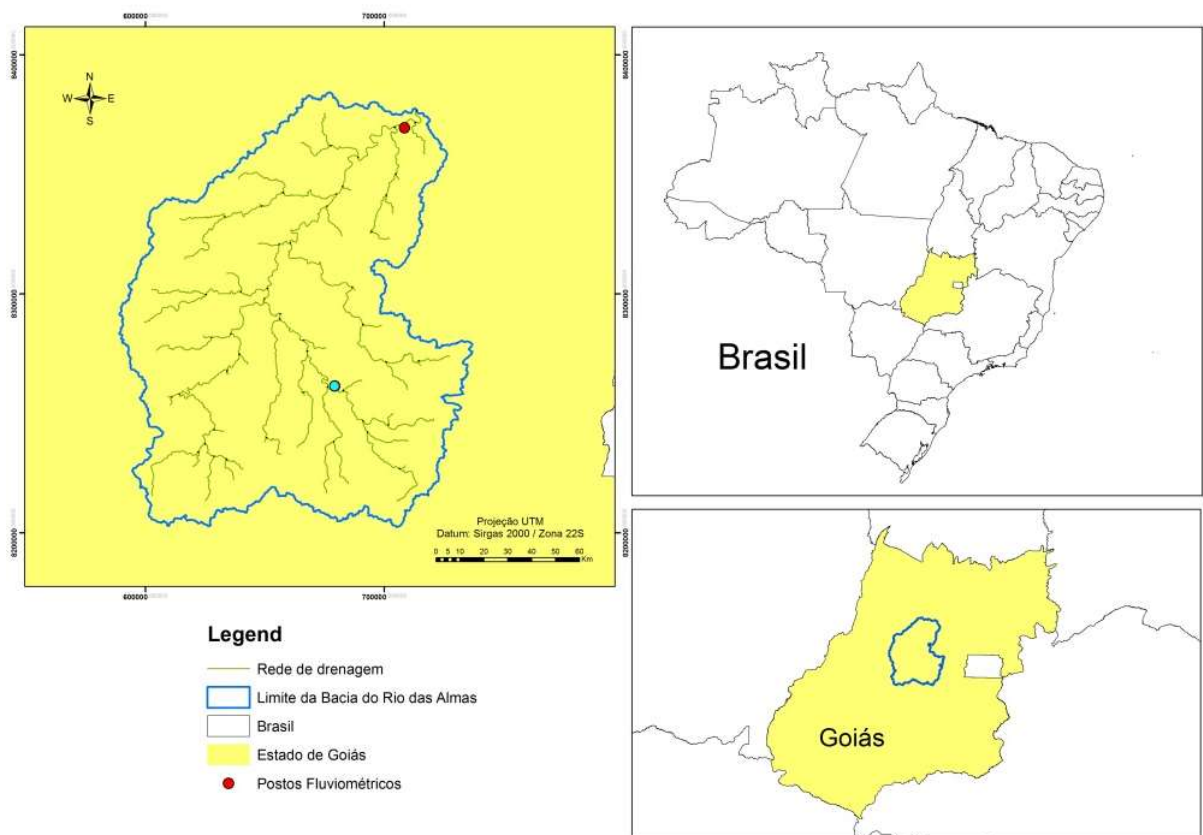


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio das Almas, em Goiás e no Brasil.

Conforme a classificação climática de Köppen, a bacia hidrográfica do rio das Almas está inserida na zona climática Aw, denominada clima Tropical de Savana, com estação seca de inverno e verão chuvoso (CARDOSO et al., 2014). A precipitação média anual da bacia é de aproximadamente 1.500 mm, com período chuvoso ocorrendo entre os meses de outubro a março, no qual concentra 86% do total anual de pluviosidade, enquanto a estação seca ocorre entre os meses de abril a setembro (com precipitação em torno de 198,4 mm), como mostra a

Figura 2. A temperatura média anual na bacia é de 25°C, podendo apresentar temperaturas mínimas de 17°C nos meses de junho e julho a alcançar temperaturas máximas de 34°C em agosto e setembro.

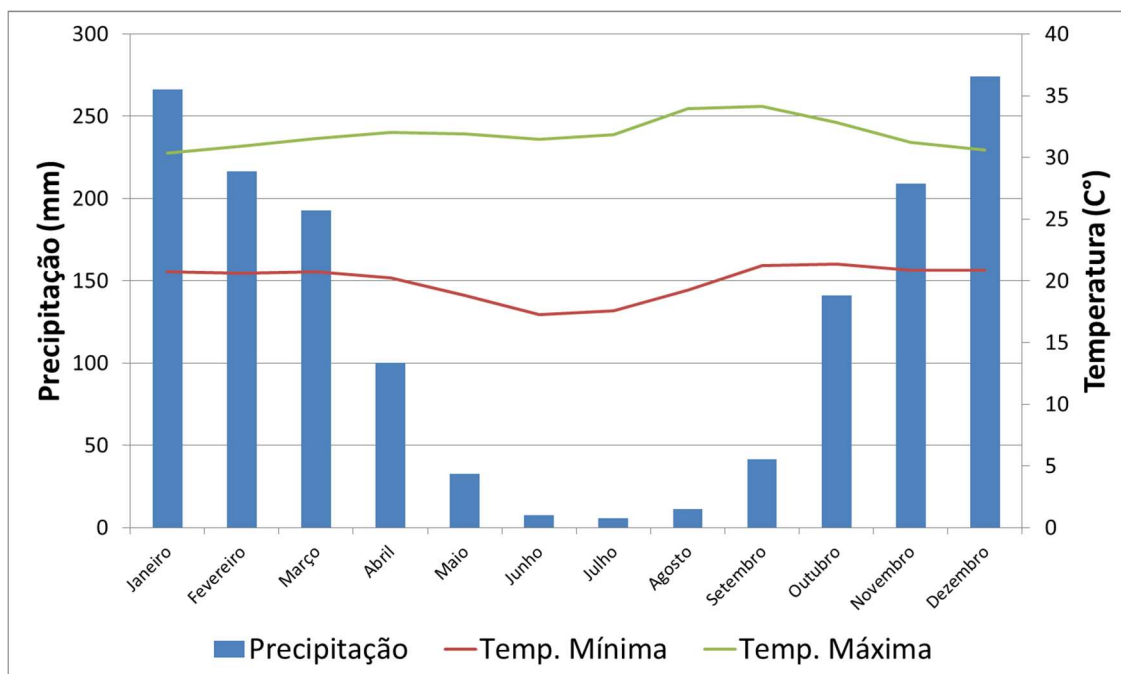


Figura 2 - Média pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas mensal na bacia do rio das Almas entre 1968 e 1994.

A vegetação predominante é característica do cerrado, segundo maior bioma brasileiro, o qual suas fisionomias englobam as formações florestais, representadas por mata ciliar, mata de galeria, mata de seca e cerradão; formações savânicas, representada pelo cerrado, vereda, parque de cerrado e palmeiral; e formação campestre (PERH-Goiás, 2015). Os tipos de solo predominantes nessa bacia hidrográfica são os argissolos vermelhos (15%), cambissolos (18,1%), chernossolos (8,53%), latossolos vermelhos (53,62%) e neossolos (4,75%). Apresenta relevo montanhoso, de morfologia acidentado, com vertentes íngremes, e por vezes escarpado (SILVEIRA et al., 2009) e altitudes que variam de 435 a 1484 metros.

A agricultura e a pecuária são as principais atividades econômicas do Estado de Goiás. A bacia apresenta maior parte de sua extensão voltada a essas duas atividades, que foi substituindo ao longo do tempo seu cenário natural, diminuindo as áreas de cerrado floresta, cerrado típico e mata ciliar e aumentando a área de produção agropecuária (TEIXEIRA NETO, 2006).

3.2 O modelo SWAT

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo hidrossedimentológico desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS), principal agência científica de pesquisa vinculada ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Foi desenvolvido com o propósito de prever o impacto das práticas de manejo do solo na produção de água, sedimentos e produtos químicos agrícolas em grandes bacias hidrográficas (NEITSCH *et al.*, 2011).

O SWAT é um modelo de base semi-física, onde se incorporam informações específicas sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação, práticas de manejo do solo na bacia e os processos físicos são diretamente modelados com base nos dados de entrada. É semidistribuído e contínuo no tempo, em que os fenômenos são representados em longo prazo, capaz de simular em período diário, mensal ou anual (ARNOLD *et al.*, 2012).

Esse modelo foi criado em meados da década de 90, passou por uma série de revisões e atualizações a fim de aperfeiçoar suas capacidades. De acordo com Neitsch *et al.* (2011) é o produto de anos de estudo e aprimoramento do modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins* - SWRRB (WILLIAMS *et al.*, 1985; ARNOLD *et al.* 1990) e outros modelos que contribuíram significativamente para seu desenvolvimento, como *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* – CREAMS (KNISEL, 1980), *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* - GLEAMS (LEONARD *et al.*, 1987) e *Erosion-Productivity Impact Calculator* – EPIC (WILLIAMS *et al.*, 1984).

O modelo SWAT foi desenvolvido para simular os processos de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral superficial e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de redes de drenagem, ciclo hidrossedimentológico, nutrientes, pesticidas e bactérias (NEITSCH *et al.*, 2005). Para isso, diversas equações são utilizadas no seu processamento e podem ser analisadas no *Soil & Water Assessment Tool – Theoretical Documentation* (NEITSCH *et al.*, 2011), manual que descreve detalhadamente todos os processos e equações envolvidas na modelagem do SWAT. A seguir serão descritos os processos e equações voltadas apenas à simulação da vazão e estimativa da produção de sedimentos, que fazem parte do objetivo do trabalho.

3.2.1 Equacionamento do modelo SWAT

Independente do tipo de problema estudado com o SWAT, a equação do balanço hídrico é a força motriz por trás de todos os processos hidrológicos simulados na bacia hidrográfica (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011) (Eq. 1).

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

sendo, SW_t a quantidade final de água no solo (mm); SW_0 a quantidade inicial de água contida no solo no dia i (mm); t o tempo (dias); R_{day} representa a precipitação no dia i (mm); Q_{surf} o escoamento superficial no dia i (mm); E_a é evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} significa a quantidade de água que entra na zona vadosa no dia i (mm); Q_{gw} a quantidade de fluxo de retorno no dia i (mm).

O escoamento superficial é a parcela de precipitação que ao atingir o solo escoar pela superfície logo que a intensidade da precipitação supere a capacidade de infiltração (PINTO et al., 1976) e pode ser calculado no modelo a partir do método de infiltração de Green & Ampt (1911) e do método da Curva Número desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* – SCS (1972). Para estimar o escoamento a partir do método de Green e Ampt o modelo requer que sejam fornecidos dados sub-diários de precipitação na bacia. Dessa forma, o método adotado para o estudo foi o da Curva Número, desenvolvido para estimar o escoamento para diferentes usos da terra e tipos de solo (RALLISON e MILLER, 1981). O escoamento superficial é obtido a partir da Eq. 2.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} - 0.8S)} \quad (2)$$

onde, Q_{surf} é o escoamento superficial (mm); R_{day} é a precipitação para o dia (mm); e S representa o parâmetro de retenção (mm). Segundo Neitsch *et al.* (2011), este parâmetro varia espacialmente e temporalmente na bacia, de acordo com sua alteração do solo, uso e ocupação da terra, declividade e as mudanças de umidade, definido pela Equação 3.

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

em que CN indica o número da curva para o dia, sendo um parâmetro com valores tabelados de 1 a 100, estando relacionado a permeabilidade e a capacidade de retenção máximas do solo.

A evapotranspiração é a principal forma pelo qual a água é removida da bacia, incluindo todos os processos em que a água na superfície é convertida em vapor d'água, como a evaporação a partir do dossel das plantas, transpiração, sublimação da neve e evaporação do solo (FERRIGO, 2014). Foram incorporados ao SWAT três métodos para sua possível determinação: o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), método de Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) e o método de Hargreaves (HARGREAVES et al., 1985). O método utilizado no modelo foi o de Penman-Moneith para obter a evapotranspiração a partir dos parâmetros climatológicos de radiação solar, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento, requeridos e avaliados no processo (Eq. 4) (ALLEN et al., 1998).

$$\lambda E_t = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \gamma \cdot K_1 \cdot \left(0,622 \cdot \lambda \cdot \frac{\rho_{air}}{P}\right) \cdot (e_z^n - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{e_a}\right)} \quad (4)$$

em que λE é a densidade de fluxo de calor latente (MJ/m²/d); E representa a taxa de evaporação de profundidade (mm/d); Δ é a declividade da curva da pressão-temperatura do valor de saturação; H_{net} é a rede de radiação (MJ/m²/d); G é a densidade do fluxo de calor para o solo (MJ/m²/d); ρ_{air} é a densidade do ar (kg/m³); C_p é o calor específico em pressão constante (MJ/Kg °C); e_z^0 é a pressão do valor de saturação de ar na altura z (kPa); e_z é a pressão do vapor de água de ar na altura z (kPa); γ é a constante psicrométrica (kPa/°C); r_c é a resistência do dossel de planta (s/m); e r_a é a resistência de difusão da camada de ar (s/m).

Para estimar a produção de sedimentos na bacia o modelo SWAT utiliza-se a Equação Universal Perdas de Solo Modificada (WILLIAMS, 1995), dada por:

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot L_{USLE} \cdot CFRG \quad (5)$$

em que sed é a produção de sedimento em um determinado dia (toneladas métricas); Q_{surf} é o volume do escoamento superficial (mm/ha); q_{peak} é o índice máximo de escoamento (m³/s); $area_{hru}$ é a área de HRU (ha); K_{usle} é o fator de erodibilidade do solo USLE (0,013 toneladas métricas em m²h/(m³ - toneladas métricas cm)); C_{USLE} é o fator de cobertura e gestão USLE;

P_{USLE} é o fator de prática de apoio USLE; LS_{USLE} é o fator topográfico USLE; $CFRG$ é o fator de fragmento bruto.

O SWAT permite que a bacia hidrográfica seja dividida em sub-bacias e estas em unidades ainda menores, denominadas Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs – *Hydrological Responde Units*), a partir da combinação de características similares do tipo e manejo do solo, uso dominante da terra e da topografia (ARNOLD, 2012). Ao subdividir as bacias mais complexas, os processos de escoamento, produção de sedimentos e transporte de nutrientes são calculados separadamente para cada uma das pequenas áreas e posteriormente somados para obterem-se as cargas totais da bacia. Esse processo resulta em um aumento da precisão da simulação e fornece uma melhor descrição física do balanço hídrico (ARNOLD, 1998).

3.3 Elaboração do banco de dados

O SWAT é um modelo amplo que para ser executado requer uma diversidade de informações referentes às características da bacia hidrográfica estudada. Fukunaga (2012) afirma que por referir-se a um modelo computacional, utilizar dados incoerentes ou de má qualidade gera resultados igualmente ruins. Dessa forma, para adquirir bons resultados é importante a inserção de dados coerentes, de maneira organizada e com formatações pré-definidas.

Neste estudo foram utilizados dados de entrada tabulares referentes aos tipos de solo e ao clima da bacia hidrográfica, o primeiro voltado às características físico-hídricas para cada camada de solo na bacia e o último relativo às informações da precipitação, radiação solar, velocidade dos ventos, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa a serem inseridas do gerador climático. É exigido, também, planos de informações geoespaciais como o modelo digital de elevação, mapa de cobertura do solo e o mapa pedológico. Segundo Neitsch et al. (2011), os processos físicos associados à movimentação hídrica e sedimentar são modelados pelo SWAT diretamente através desses dados de entrada. Os dados de entrada foram inseridos no modelo a partir do ArcSWAT, a interface utilizada para configurar o SWAT dentro do ArcGis.

3.3.1 Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) representa as altitudes da superfície topográfica da bacia e os componentes geográficos presentes sobre elas, como a cobertura vegetal e as edificações. A partir dele, podem-se obter informações acerca da declividade e da rede de drenagem. A inserção do MDE (Figura 3) permite inicialmente que o modelo delimite a bacia hidrográfica de estudo, construa a rede de drenagem e identifique a direção do fluxo do escoamento superficial. Para determinar a rede de drenagem, definiu-se a densidade da rede hidrográfica atribuindo uma área mínima de acumulação do fluxo de 2.000 hectares, tal que abaixo desse valor estabelecido nenhum curso de rio é criado. Para melhor análise, o modelo divide a bacia hidrográfica em sub-bacias menores de acordo com sua topografia e rede de drenagem e para cada uma delas calcula seus parâmetros topográficos referentes a área, declividade e elevação.

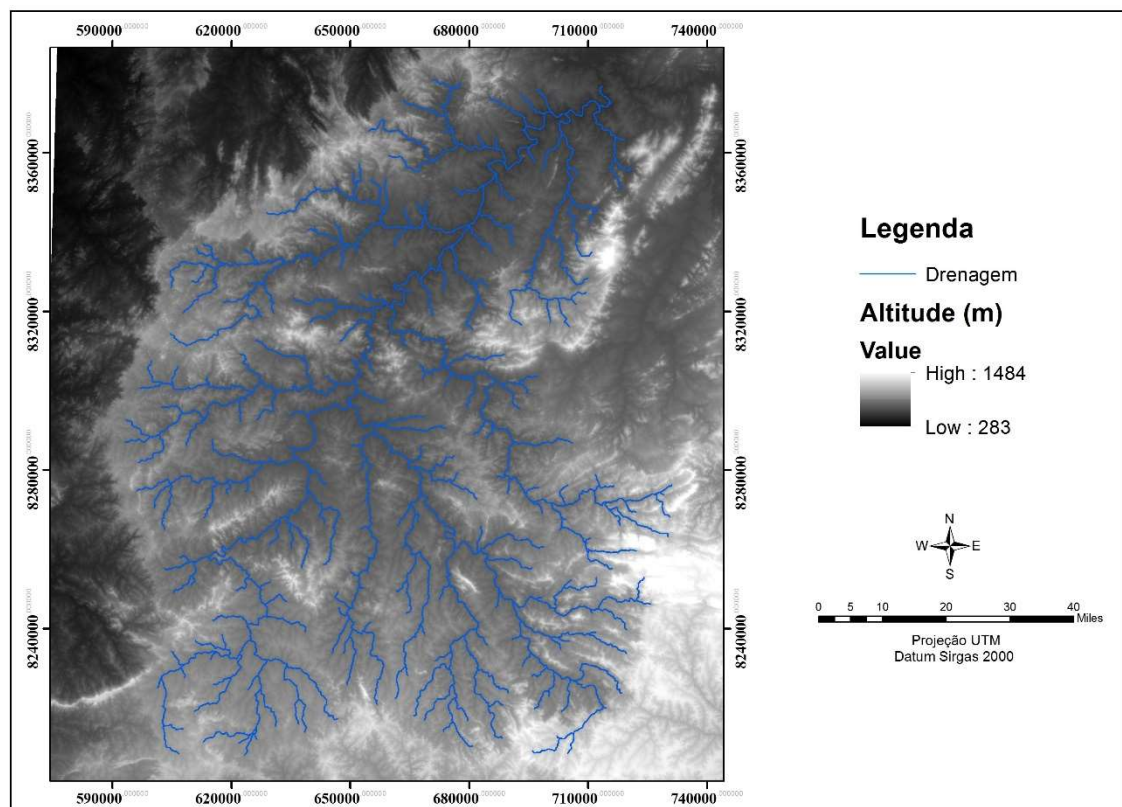


Figura 3 - MDE utilizado na delimitação da bacia e rede de drenagem da bacia do rio das Almas.

O MDE é um arquivo do tipo matricial, com resolução espacial de 30 metros, obtido junto ao projeto TOPODATA, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esse

produto é originado da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e para compor a bacia foram utilizados seis arquivos (14S51, 14S495, 15S51, 15S495, 16S51, 16S495), com a projeção no SIRGAS 2000, na zona UTM 22S.

3.3.2 Tipos de solo e uso e ocupação do solo

Para a realização da simulação hidrológica, o modelo SWAT requer que sejam inseridos em seu banco de dados uma série de informações referentes aos tipos de solo que compreendam suas características físico-hídricas. Esses parâmetros são referentes ao número de horizontes, profundidade da raiz, porcentagem de silte, areia, argila, cascalho e carbono orgânico, e foram obtidos a partir da classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA pelo endereço eletrônico do Sistema de Informação de Solos Brasileiros (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>). Seus valores foram convertidos para unidade de medida exigida pelo SWAT e posteriormente inserida em sua base de dados.

Os parâmetros descritos a seguir compõem o modelo hidrológico e não existem dados obtidos diretamente da bacia, dessa forma, foram adotados valores recomendados pela literatura e adaptados a área de estudo para a realização da pesquisa. Para as características do grupo hidrológico dos solos foi utilizada a classificação proposta pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais dos Estados Unidos (NRCS, 2009), que considera quatro diferentes grupos hidrológicos A, B, C e D. Ainda de acordo com o NRCS (2009), esses grupos hidrológicos juntamente com informações de uso da terra, suas práticas de manejo e as condições hidrológicas da área influenciam na determinação da curva número e do escoamento superficial no solo e interferem no valor da taxa de infiltração do solo.

Para a porosidade e a condutividade hidráulica saturada do solo foram utilizados valores adaptados de Steyaert (1982), que afirma serem parâmetros necessários para quantificar a água disponível para a vegetação e para modelar o movimento da água através dos solos. A capacidade de água disponível no solo foi determinada a partir do proposto por Salter e Williams (1997; 1969), sendo estimada com base na proporção de areia, silte, argila e matéria orgânica no solo. Os valores utilizados de albedo foram propostos por Tsvetsinskaya (2002) e os fatores de erodibilidade calculadas a partir da equação de erodibilidade proposta por Williams (1975), que calcula esse fator com base nas características de areia, silte, argila e matéria orgânica presente no solo da bacia.

O mapa dos tipos de solo na bacia (Figura 4) foi obtido na página eletrônica do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG, disponível em: <http://maps.lapig.iesa.ufg.br/lapig.html>. A bacia estudada apresenta cinco tipos de solo em sua extensão: argissolo vermelho, cambissolo, chernossolo, latossolo vermelho e neossolo litólico distrófico.

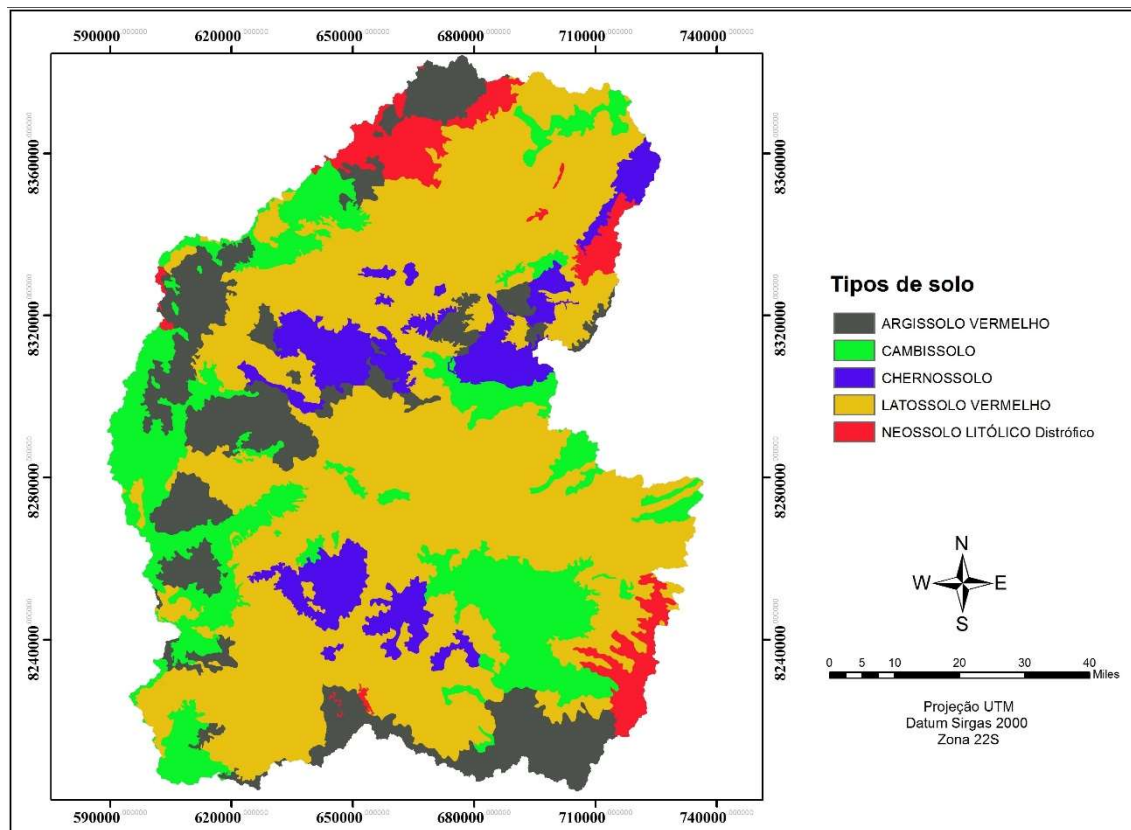


Figura 4 - Tipos de solo da bacia do rio das Almas, Goiás. Fonte: Adaptado de LAPIG.

Os mapas de classificação de uso e ocupação do solo para o ano de 1991 foram elaborados a partir de imagens de satélite Landsat 5 (RGB 3-4-5), sensor TM, órbita 222, ponto 70 e Landsat 5 (4, 5 e 6), órbita 222 e ponto 71 obtidas no sítio eletrônico do *Earth Explorer da United States Geological Survey – USGS* do dia de 06 de junho de 1991. Para 2017, utilizou-se imagens de satélite Landsat 8, sensor OLI, órbita 222, ponto 70 e Landsat 8, órbita 222 e ponto 71 do dia de 04 de junho de 2017 na mesma plataforma. As classificações para os anos de 1991, 2006 e 2017 foram realizadas no software ArcGis 10.1 utilizando o método supervisionado. As classificações do uso do solo foram divididas em oito diferentes classes, tal que as formações florestais foram representadas por mata ciliar e Cerrado/Floresta,

as formações savânicas pelo cerrado típico e, junto a isso, foram classificadas as áreas de pastagem, agricultura, corpos hídricos, área urbana e solo exposto.

Para a simulação, cada uma dessas classificações na bacia do cerrado foi associada a uma classe de uso do solo americana existente no banco de dados do modelo SWAT de acordo com as características de maior similaridade entre ambas. As associações das classes são apresentadas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Associação entre o uso e ocupação de solo na bacia hidrográfica e as classes existentes no banco de dados do SWAT.

Uso do solo na bacia rio das Almas	Uso do solo no SWAT
Agricultura	AGRL (<i>Agricultural Land</i>)
Pastagem	PAST (<i>Pasture</i>)
Urbana	URLD (<i>Residential-Low Density</i>)
Cerrado/Floresta	FRSD (<i>Forest-Deciduous</i>)
Cerrado Típico	FRST (<i>Forest-Mixed</i>)
Corpo Hídrico	WATR (<i>Water</i>)
Mata Ciliar	FRSE (<i>Forest-Evergreen</i>)
Solo exposto	BARR (<i>Barren</i>)

Para determinar as cargas totais da bacia, o modelo tem seus processos hidrológicos calculados separadamente por cada Unidade de Resposta Hidrológica – HRU para depois serem somados e dados seus valores finais. As unidades de respostas são áreas menores com características similares do tipo de solo, uso do solo e da topografia (ARNOLD, 2012) e são formadas a partir da inserção desses dados de entrada. Para criar as HRUs a partir das combinações de características do solo, pode-se adotar uma área limite com a porcentagem mínima de área para o tipo do solo, uso do solo e declividade a ser considerada para as combinações, tal que as áreas menores que essa porcentagem não são utilizadas, ou determinando que seja feita a partir combinação das características dominantes. Pelo objetivo do estudo realizado, adotou-se a combinação das características dominantes das sub-bacias, onde cada uma delas gera uma HRU combinando seu uso do solo dominante, a unidade de solo dominante e a declividade dominante.

3.3.3 Dados climáticos e fluviométricos

Os dados climáticos requeridos pelo SWAT são dados diários de radiação solar, velocidade dos ventos, temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa, que podem ser obtidos de registros das estações climatológicas situadas dentro da bacia ou em sua

circunvizinhança ou podem ser gerados de forma automática pelo modelo. Segundo Neitsch et al. (2011), esses dados fornecem informações de umidade e energia que controlam o equilíbrio hídrico e guiam todos os outros processos simulados na bacia hidrográfica.

O modelo SWAT tem um gerador climático WXGEN originalmente desenvolvido para o modelo EPIC (SHARPLEY e WILLIAMS, 1990), que pode gerar dados climáticos da bacia ou preencher falhas com base em dados já registrados. É nele que são inseridos os parâmetros do clima requeridos pelo modelo (NEITSCH, 2011).

Para compor a base de dados climáticos foram utilizadas séries históricas obtidas em duas estações climatológicas para o período de 1965 a 1994 (Tabela 2). Esses postos são monitorados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e foram extraídos a partir da plataforma do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>, que apresentam os dados diários em forma digital de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial.

Tabela 2 - Descrição das estações climatológicas utilizadas.

Nome do Posto	Tipo	Código	Latitude	Longitude	Altitude
Goiás	Climatológico	83374	-15,91	-50,13	512 m
Pirenópolis	Climatológico	83376	-15,85	-48,96	740 m

Além dos dados climáticos de radiação solar, velocidade dos ventos, temperatura e umidade relativa, o modelo requer uma série de parâmetros estatísticos sobre o clima, como a precipitação média máxima mensal (TMPMX), precipitação média mínima mensal (TMPMN), desvio padrão da temperatura máxima (TMPSTDMX), desvio padrão da temperatura mínima (TMPSTDMN), precipitação média mensal (PCPMM), desvio padrão da precipitação (PCPSTD), coeficiente de assimetria para a precipitação diária a cada mês (PCPSKW), probabilidade de dia úmido após dia seco (PW_W1), probabilidade de dia úmido seguido de dia úmido (PR_W2), número médio de precipitações no mês (PCPD), temperatura média do ponto de orvalho no mês (DEWPT). Esses parâmetros foram calculados a partir de dois programas computacionais desenvolvidos por Liersch (2003), o pcSTAT, que foi usado para calcular os valores dos fatores de precipitação e o dew02, utilizado para calcular a temperatura média do ponto de orvalho usando dados diários de temperatura e umidade do ar. Os resultados desses parâmetros climáticos são descritos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Parâmetros climatológicos inseridos no gerador climático referente ao posto Goiás.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	30,7	31,0	31,5	32,1	31,9	31,5	31,8	33,9	34,1	32,8	31,3	30,6
TMPMN	20,8	20,6	20,7	20,3	18,8	17,5	17,5	19,3	21,2	21,3	20,9	20,9
TMPSTDMX	0,5	0,5	0,5	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5
TMPSTDMN	0,3	0,4	0,4	0,4	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,3
PCPMM	325,2	264,2	246,5	118,9	43,4	7,5	23,0	14,3	43,3	160,7	246	299
PCPSTD	16,4	14,7	14,2	10,7	6,2	2,1	2,2	3,3	5,1	11,6	14,3	15,2
PCPSKW	2,7	2,8	3,5	6,6	8,1	12,5	6,9	11,6	6,5	3,4	3,1	2,5
PR_W1	0,5	0,5	0,4	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,5
PR_W2	0,8	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,8	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7
PCPD	21,5	18,9	18,5	10,6	4,7	1,1	4,6	1,8	5,8	12,5	17,9	21,0
RAINHHMX	19,2	16,6	17,6	13,0	7,0	1,5	1,0	2,9	6,4	15,4	17,9	18,0
SOLARAV	16,4	18,0	17,5	17,2	16,5	16,3	16,8	19,3	19,8	19,7	18,2	17,1
DEWPT	22,2	22,2	22,6	21,9	19,9	17,8	15,7	16,1	17,9	20,8	21,9	22,2
WNAV	1,2	1,3	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,8	1,8	1,6	1,4	1,4

Tabela 4 - Parâmetros climatológicos inseridos no gerador climático referente ao posto Pirenópolis.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMPMX	28,9	29,2	29,3	29,6	29,2	28,9	29,5	31,3	31,2	30,7	29,4	28,4
TMPMN	18,7	18,8	18,6	18,2	16,5	14,5	14,1	15,8	17,9	18,8	18,7	19,1
TMPSTDMX	0,5	0,5	0,5	0,3	0,6	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5
TMPSTDMN	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5	0,6	0,3	0,5	0,4	0,5	0,3	0,5
PCPMM	278,3	250,8	197,8	157,8	47,7	24,3	10,1	8,3	54,7	131,7	215	306
PCPSTD	13,0	14,3	10,5	10,4	5,0	3,6	1,8	2,7	6,0	9,4	13,0	16,3
PCPSKW	2,6	3,5	3,2	3,5	6,2	8,7	7,6	15,0	5,5	3,4	3,6	3,6
PR_W1	0,5	0,6	0,5	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6
PR_W2	0,8	0,8	0,7	0,7	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8
PCPD	25,0	21,6	20,8	17,1	6,9	3,6	1,8	1,5	8,1	14,9	19,7	23,9
RAINHHMX	15,8	14,2	13,1	13,6	5,2	3,0	2,5	2,7	9,4	13,4	15,7	18,5
SOLARAV	17,0	17,6	17,1	16,6	16,0	16,0	17,4	19,4	20,1	19,9	18,5	15,8
DEWPT	20,4	20,8	20,7	20,2	18,4	16,3	14,1	14,0	15,8	18,9	19,8	20,7
WNAV	1,2	1,3	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,8	1,8	1,6	1,4	1,4

Os postos climatológicos apresentam os dados diários de todas as variáveis climáticas requeridas para a modelagem. A partir deles, todos os parâmetros climatológicos citados acima foram calculados e inseridos no modelo em formato texto a partir do gerador climático (Weather Stations) do SWAT.

As estações iniciaram suas operações em 1946, dessa forma, a bacia tem uma extensa série de dados, fator importante para uma melhor caracterização climática da região. Para a modelagem a série histórica utilizada foi de 1965 a 1994 por ser o período de tempo com

dados completos, sem apresentar falhas, e estar dentro da faixa de tempo das séries históricas de vazão e precipitação.

Para a precipitação foram utilizados dados diários de cinco postos pluviométricos monitorados pela Agência Nacional de Águas – ANA, obtidos na plataforma digital do Hidroweb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>), entre os anos de 1965 a 1994, descritos na Tabela 5 a seguir. Para os dados de vazão foram utilizadas duas estações fluviométricas da ANA.

Tabela 5 - Postos pluviométricos e fluviométricos utilizados na pesquisa.

Nome do Posto	Tipo	Código	Longitude	Latitude
Goianésia	Pluviométrico	1549001	-49.12	-15.33
Jaraguá	Pluviométrico	1549003	-49.33	-15.75
UHE Serra da Mesa Ceres	Pluviométrico	1549000	-49.55	-15.27
UHE Serra da Mesa Fazenda Cajupira	Pluviométrico	1449005	-49.17	-14.79
Uruana	Pluviométrico	1549009	-49.69	-15.49
Colônia dos Americanos	Fluviométrico	20490000	-49.06	-14.73
Jaraguá	Fluviométrico	20100000	-49.3	-15.71

Fonte: ANA (2017)

Alguns postos pluviométricos apresentaram falhas em sua série de dados, decorrentes de problemas operacionais pelo observador ou pelo aparelho utilizado para os registros. Para possibilitar na organização dos dados que o modelo tenha uma série pluviométrica contínua, as falhas das estações foram preenchidas por meio do método de ponderação regional. É um método simplificado que permite preencher as falhas de um posto a partir de uma ponderação com base nos dados de três postos vizinhos, considerando que a precipitação nessa estação é proporcional as estações vizinhas. É dado pela Equação 6 descrita a seguir.

$$P_X = \frac{1}{3} \left(\frac{M_x}{M_A} P_A + \frac{M_x}{M_B} P_B + \frac{M_x}{M_C} P_C \right) \quad (6)$$

sendo P_x a precipitação na estação a ser preenchida, representando as falhas; M_x a média aritmética das precipitações do posto com falha; M_A , M_B e M_C a média aritmética das precipitações dos postos vizinhos; P_A , P_B e P_C as precipitações nos postos vizinhos na a data a ser preenchida

3.4 Etapas de execução do modelo e criação de cenários de uso e ocupação do solo, para a estimativa de vazão e produção de sedimentos

Na modelagem utilizou-se o ArcSWAT, uma interface do modelo SWAT acoplado ao *software* ArcGis, um Sistema de Informações Geográficas muito utilizado mundialmente. É através da interface que os dados são preparados para o formato padrão do modelo.

Para a parametrização do modelo na área estudada e para analisar qual a influência da mudança do uso do solo na dinâmica hidrossedimentológica da bacia e de sua calibração, foram gerados três cenários de uso do solo sob os mesmos dados e condições climáticas de entrada. Os cenários foram: (a) **cenário 1:** tem o uso e ocupação do solo mais distante do atual, sendo escolhido o ano de 1991, (b) **cenário 2:** utiliza o uso do solo mais atual em uma imagem de 2017, e (c) **cenário 3:** escolhido o ano intermediário de 2006 para retratar a bacia. Os dois primeiros cenários são meramente para a calibração do modelo a partir das classificações mais distintas de uso do solo para a bacia hidrográfica. A partir da calibração do modelo para os dois cenários foram feitas comparações gráficas e estatísticas entre ambas para verificar qual tem a melhor resposta ao modelo e para a utilização de quais parâmetros se tem a melhor representação da bacia hidrográfica. Assim, após a definição do cenário que obteve a melhor parametrização para a área de estudo, testou-se os parâmetros calibrados para um ano intermediário (cenário 3) com a finalidade de avaliar a representação dessa calibração às alterações no uso do solo da bacia.

Após os testes de calibração, a utilização da melhor parametrização do modelo para simular o cenário 3 e analisar as mudanças dos impactos do uso do solo na calibração do modelo, os resultados foram inseridos no SWAT Check. Esse programa foi desenvolvido pela equipe técnica do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos que executa três funções para a modelagem: ler a saída gerada pelo SWAT, alertando os usuários de valores que se encontrem fora do intervalo típico; gera figuras baseadas nos processos para uma melhor visualização e adequação desses valores de saída; e detecta possíveis erros de aplicação (WHITE et al., 2012). O SWAT Check ajuda a examinar os erros que podem ser comuns relacionados a hidrologia. A Figura 5 a seguir apresenta a ilustração gerada por ele. Após todo esse processo, a simulação é realizada e salva pelo ArcSWAT.

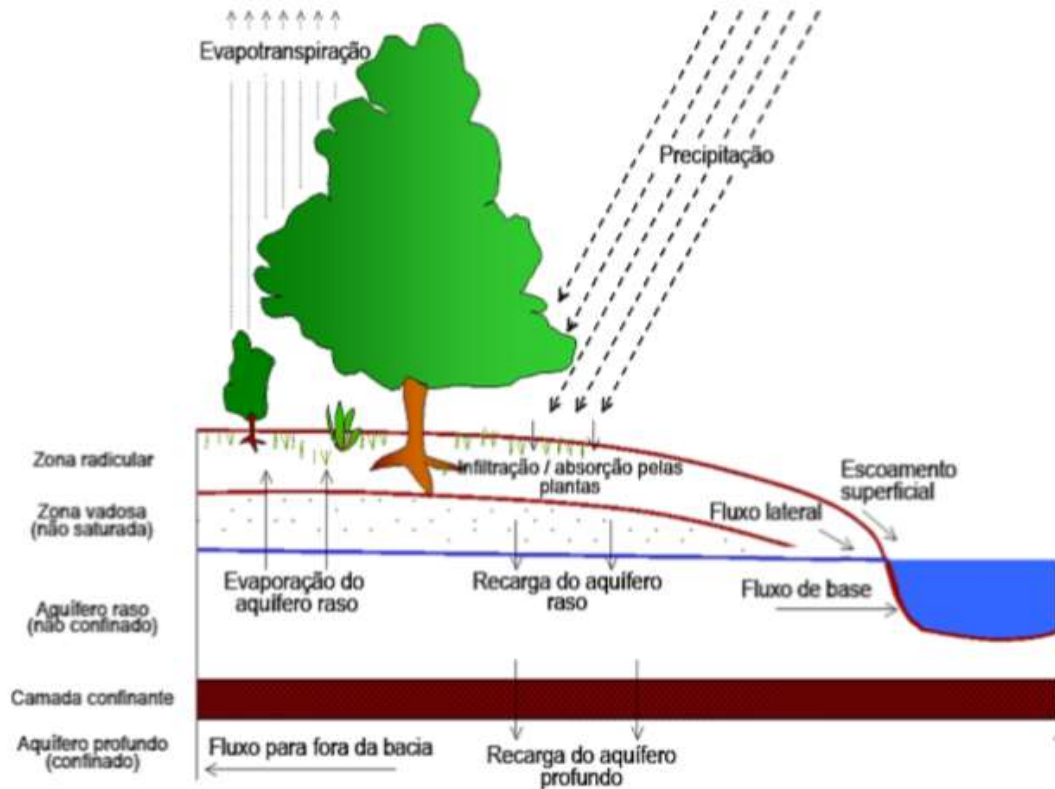


Figura 5 - Representação da saída de dados baseado nos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica pelo SWAT.

3.5 Análises de desempenho do modelo

Para avaliar a eficiência dos dados simulados pelo SWAT para os cenários 1 e 2 são utilizadas comparações gráficas e análises estatísticas. As avaliações gráficas se dão pela análise da comparação dos hidrogramas com os dados observados de vazão e dados simulados. Nas análises estatísticas, foi utilizado o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), considerados por Sevat (1991) em seu estudo como a melhor função objetivo para o melhor ajuste do hidrograma calculado a ser obtido. Foi também utilizado o coeficiente de determinação de Pearson (R^2), calculando a relação linear entra a vazão observada e a simulada (Eqs. 7 e 8).

$$NS = 1 - \left| \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right| \quad (7)$$

$$R^2 = \left| \frac{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 \cdot \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2} \right| \quad (8)$$

no qual, Q_{obs} é a vazão observada, Q_{sim} é a vazão simulada, $\overline{Q_{sim}}$ é a média da vazão simulada e $\overline{Q_{obs}}$ a média da vazão observada. Os valor do NS pode variar de $-\infty$ a 1 e do R^2 de 0 a 1, sendo $NS = 1$ e $R^2 = 1$ o ajuste perfeito dos resultados.

A Tabela 6 a seguir apresenta a classificação da eficiência da modelagem no modelo SWAT pela análise do R^2 e NS. No caso em que a simulação se classifica em insatisfatória é preciso a realização da calibração do modelo.

Tabela 6 - Classificação da eficiência da modelagem.

Classificação	R^2	NS
Muito boa	$0,80 < R^2 < 1,0$	$0,75 < NS < 1,0$
Boa	$0,70 < R^2 < 0,80$	$0,65 < NS < 0,75$
Satisfatória	$0,60 < R^2 < 0,70$	$0,60 < NS < 0,70$
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	$NS \leq 0,50$

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

3.6 Escolha dos parâmetros e análise de sensibilidade dos parâmetros hidrológicos

O passo inicial para o processo de calibração é a escolha dos parâmetros considerados mais sensíveis à bacia hidrográfica com base em opinião especializada e análise de sensibilidade (FERRIGO, 2014). Para definir quais parâmetros a serem utilizados foi realizada uma análise de sensibilidade para 19 parâmetros recomendados por Santos (2015), o que apresentou resultado gráfico e estatístico insatisfatório para o objetivo proposto, visto que a simulação não representou de forma satisfatória o comportamento dos processos hidrológicos da bacia. Dessa forma, com base no estudo apresentado por Arnold *et al.* (2012a), em trabalhos científicos realizados no Brasil como Bressiani *et al.* (2015) e Bonumá (2011) e estudos diretamente no cerrado, como Castro (2013), Carvalho (2014) e Ferrigo (2014) chegou-se a 11 parâmetros de influência no processo hidrológico da bacia do rio das Almas.

Para cada parâmetro selecionado é determinado um limite inferior e um superior. No processo de calibração seu valor irá variar dentro desse intervalo até se obter o melhor resultado. Como ao longo da bacia mudam algumas características de solo, uso da terra e declividade, alguns parâmetros podem ser uniformizados para a bacia como um todo e outros tem uma variabilidade espacial. Isso vai ser determinado dentro do modelo a partir de métodos de alteração que podem ser por **substituição direta**, o qual o modelo substitui seu melhor valor encontrado para todos os pontos da bacia; método de **adição**, onde ao valor

inicial do parâmetro em cada HRU é adicionado o valor encontrado na calibração, podendo variar para cada unidade de resposta hidrológica na extensão da bacia; e pelo método de **multiplicação**, onde o valor encontrado na calibração é multiplicado pelo valor inicial encontrado no *default* do modelo e também varia ao longo da bacia. O SWAT permite escolher para quais sub-bacias esses parâmetros vão ser alterados. Para o estudo, determinou-se que os parâmetros fossem substituídos em todas as HRUs de suas áreas de contribuição. Na Tabela 7 observam-se os parâmetros utilizados na modelagem, seus limites determinados e quais seus métodos de aplicação.

Tabela 7 - Parâmetros e limites utilizados na calibração do modelo.

Parâmetro	Descrição	Método	Limite Inferior	Limite Superior
ALPHA_BF	Constante de recessão do fluxo de base (adim). É um indicador direto da resposta do fluxo subterrâneo para as mudanças na recarga. Maiores valores desse parâmetro indicam maior recarga do aquífero e menor fluxo de base.	Substituição	0	1
CH_N2	Coefficiente de Manning do canal principal (s.m ^{-1/3})	Substituição	0	0.3
CN2	Curva número na condição II (adim). Utilizado para o cálculo do escoamento superficial pelo método <i>SCS Curve Number</i> . É obtido em função da permeabilidade, do tipo de solo, do uso e da condição antecedente de umidade no solo.	Multiplicação	-0.1	10
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adim). É um parâmetro importante no processo de evapotranspiração. Os valores desse parâmetro representam um percentual aplicado à evaporação da camada superior do solo, de modo que percentuais elevados significam maior evaporação na camada superior do solo.	Substituição	0.5	1
GW_DELAY	Retardo do escoamento subterrâneo (dias). Retarda o tempo em que a água se move pelas camadas do solo até encontrar o aquífero raso.	Adição	-30	450
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona não saturada (adim). É designado como uma constante de proporcionalidade para o cálculo da quantidade máxima de água que se move no solo em resposta às deficiências de água.	Substituição	0	0.2
GWQMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno (mm). Quanto	Substituição	0	1000

Parâmetro	Descrição	Método	Limite Inferior	Limite Superior
	maior o valor desse parâmetro uma porção maior do fluxo de base é retardada.			
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (adim).	Multiplicação	0.1	1
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mmH ₂ O)/mm solo). Utilizado para calcular o conteúdo de água no solo disponível para a vegetação.	Multiplicação	-0.25	1
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo (mm/h). Necessário para calcular o tempo de percolação da água numa dada camada do solo.	Multiplicação	-0.8	100
SURLAG	Coefficiente de atraso do escoamento superficial (adim). Menores valores representam maior atraso no escoamento superficial.	Substituição	0	24

Fonte: Adaptado de Medeiros (2017)

A análise de sensibilidade foi realizada pelo *Global Sensitivity* do SWAT-CUP, que foi executada em uma iteração com 1000 simulações. A sensibilidade dos parâmetros é determinada a partir do cálculo do sistema linear de regressão múltipla. Para identificar a significância relativa de cada parâmetro, o SWAT-CUP apresenta duas funções para determinar essa sensibilidade: o *t-stat*, que fornece a medida da sensibilidade, onde quão maior seu valor mais sensível o parâmetro é; e o *p-value*, que determina a significância da sensibilidade e quão mais próximo de zero maior a significância do parâmetro (ABBASPOUR, 2015).

3.7 Calibração e ajuste do modelo

A calibração é um ajuste dos parâmetros para encontrar harmonia entre a vazão observada e a vazão simulada. Foi realizado para a vazão mensal de forma automática entre o período de 1974 a 1980, utilizando como uma ferramenta de auxílio o *SWAT Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP) (ABBASPOUR, 2011), um *software* de domínio público desenvolvido para o SWAT de forma a auxiliar nesse processo.

A calibração foi realizada para o posto Colônia dos Americanos situado próximo ao exutório da bacia, uma vez que ele tem toda a bacia hidrográfica como sua área de contribuição. Inicialmente, os dados observados foram divididos em duas séries distintas, utilizando uma série para a calibração (1974 a 1980) e outra para a validação (1981 a 1988) da

modelagem. A calibração foi realizada pelo algoritmo de otimização SUFI-2 do SWAT-CUP, capaz de analisar simultaneamente grande número de parâmetros que influenciam no modelo e busca um melhor resultado final por meio de inúmeras combinações.

Na calibração do modelo para cada cenário foram realizadas 5 iterações com 500 simulações em cada uma delas. Após quatro iterações os coeficientes tendem a ficar constantes não mostrando nenhuma alteração significativa aos índices estatísticos. Os parâmetros ainda passaram por um processo de ajuste manual para a obtenção de uma melhor representação do modelo.

A eficiência da calibração é verificada observando os coeficientes estatísticos descritos no item 3.5. Em seguida, os parâmetros calibrados são levados a interface do ArcSWAT, no qual é gerada uma nova simulação com os valores ajustados. Para validar o modelo, realiza-se uma simulação para o período de 1981 a 1988 e analisam-se seus índices estatísticos e modelo gráfico.

Como outra forma de validar o modelo e verificar se resultou em uma boa representação para toda a extensão da área de estudo, após calibrar toda a bacia hidrográfica com o posto Colônia dos Americanos, comparou-se a vazão simulada na sub-bacia 342, onde está localizado o posto de Jaraguá, com as vazões observadas do seu posto fluviométrico e analisou-se seu comportamento hidrológico.

Após o processo de calibração e definido qual cenário modelou a bacia hidrográfica com mais eficiência de acordo com seus parâmetros encontrados, aplicou-se ao modelo calibrado um novo uso do solo intermediário do ano de 2006 para analisar seu comportamento hidrológico e se a parametrização definida para a bacia a partir do melhor cenário se aplica a diferentes usos do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Processamento de dados de entrada

A bacia do rio das Almas foi dividida em 503 sub-bacias (Figura 6) e 503 unidades de respostas hidrológicas. Os postos fluviométricos no interior da bacia ficaram situados na sub-bacia 342 (posto Jaraguá) e na sub-bacia 14 (posto Colônia dos Americanos), com áreas de 40,21 km² e 25,24 km², respectivamente.

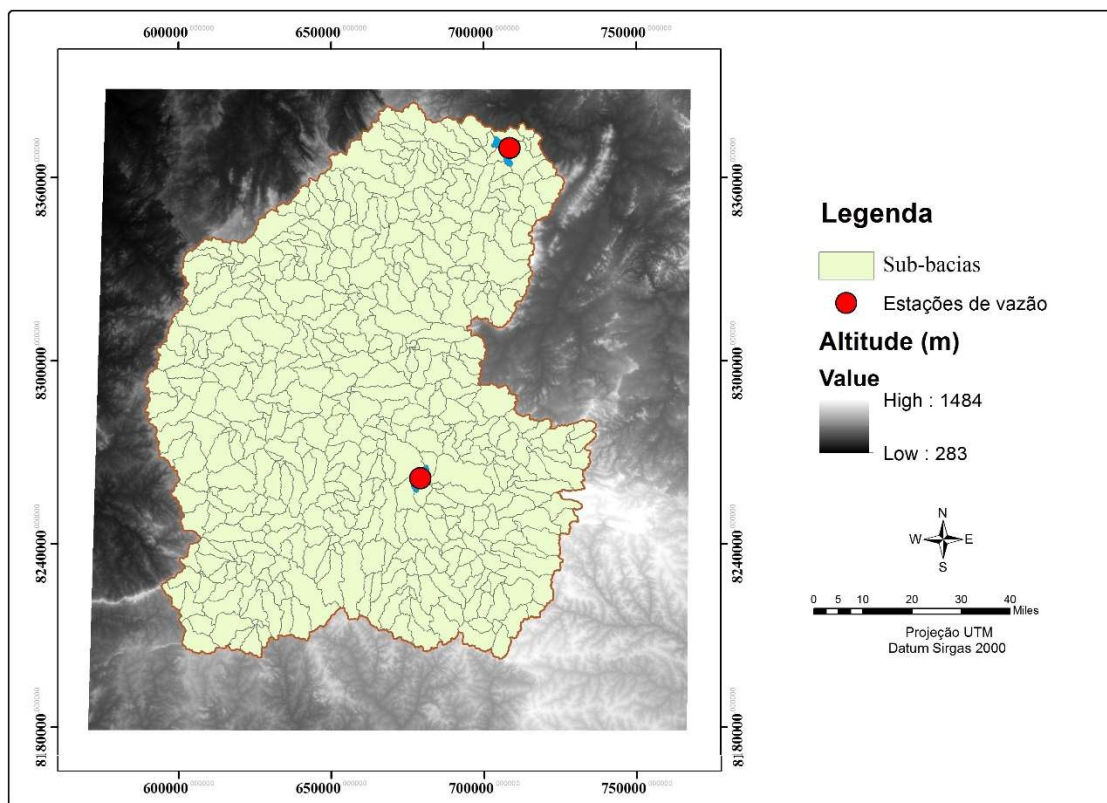


Figura 6 - Discretização da bacia hidrográfica.

A quantidade de sub-bacias e HRUs geradas foram idênticas, pois se optou por diminuir a área mínima de acumulação do fluxo, de modo a gerar um maior número sub-bacias, e criar as unidades de respostas hidrológicas baseadas na combinação das características predominantes do solo de cada uma delas, o que resulta em uma HRU para cada sub-bacia. Para tanto, foram realizados testes a partir da elaboração de projetos que considerassem diferentes áreas mínimas de acumulação de fluxo, com variação de 2000 a 10000 ha, e diferentes combinações das características do solo, variando as porcentagens de suas áreas limites e sua combinação predominante.

A Tabela 8 apresenta os coeficientes estatísticos para avaliar a eficiência dos dados simulados em cada projeto criado, mostrando que as diferentes combinações desses fatores não alteram de forma significativa os resultados gerados nas simulações do modelo e, consequentemente, seus coeficientes. Dessa forma, optou-se pelo último caso por considerar que ele representa bem a bacia e por uma questão operacional, visto que a divisão em muitas sub-bacias deixa áreas menores a serem analisadas e tem melhor facilidade em ser executado no modelo. Os projetos com grande quantidade de HRUs apresentaram coeficientes um pouco melhores, porém dificuldade para simular no SWAT-CUP no processo de calibração.

Tabela 8 - Coeficientes estatísticos para diferentes combinações no modelo.

Área mínima de acumulação do fluxo	Limites das áreas (%)	Jaraguá		Colônia dos Americanos		sub-bacias	HRUs geradas
		R ²	Nash	R ²	Nash		
10000 ha	30/ 30 / 25	0,75	-2,27	0,86	-0,12	97	1641
10000 ha	10 / 10 / 5	0,75	-2,34	0,85	-0,18	97	2943
5000 ha	30 / 30/ 25	0,77	-1,93	0,87	-0,03	197	455
3500 ha	30 / 30 / 25	0,75	-2,27	0,86	-0,13	305	1062
2000 ha	30 / 30 / 25	0,75	-2,24	0,85	-0,16	503	736
2000 ha	Características predominantes	0,70	-3,22	0,78	-0,66	503	503

4.2 Mudanças de uso do solo da bacia do rio das Almas

Para verificar a influência das mudanças do uso e ocupação do solo sobre os processos hidrossedimentológicos da bacia, foram analisadas as modificações entre os anos de 1991 e 2017. Essa comparação permitiu analisar as alterações dos tipos de uso do solo no comportamento da vazão e da erosão para a bacia hidrográfica. As Figuras 7 e 8 apresentam a classificação do uso solo para os anos estudados e a Tabela 9 detalha as mudanças do uso ao longo dos anos analisados.

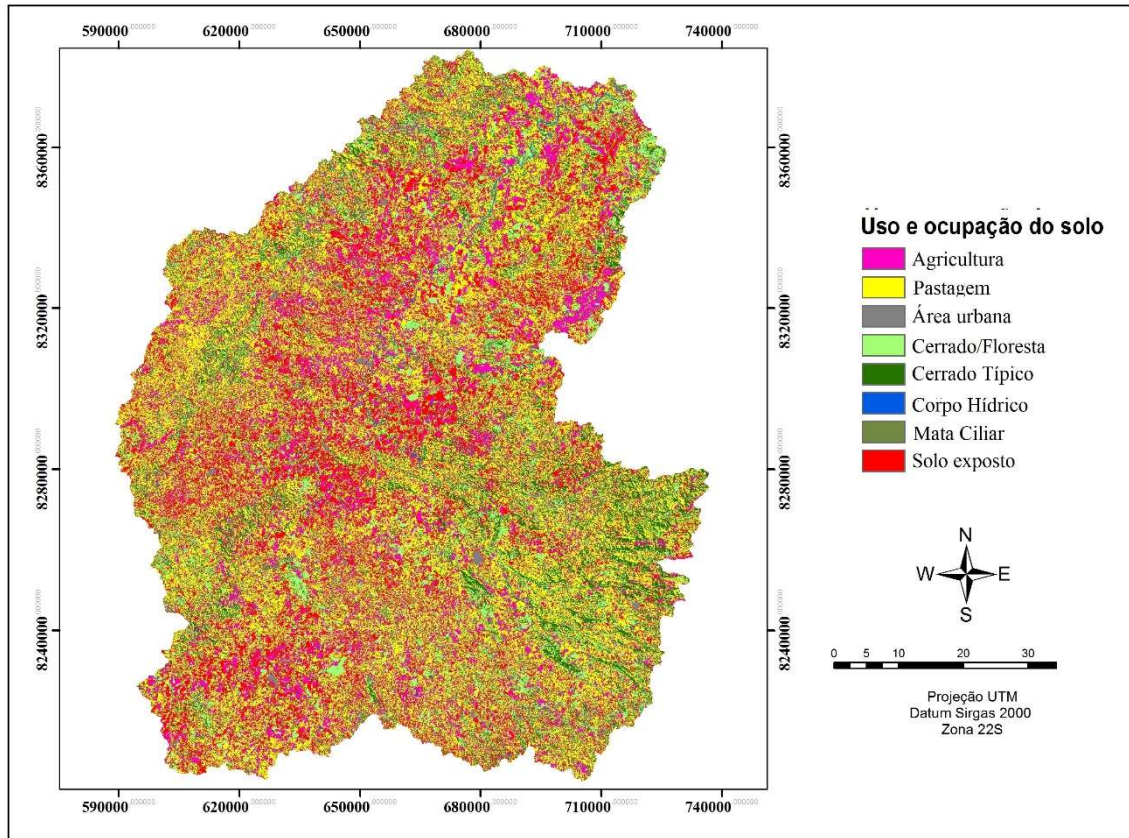


Figura 7 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 1991.

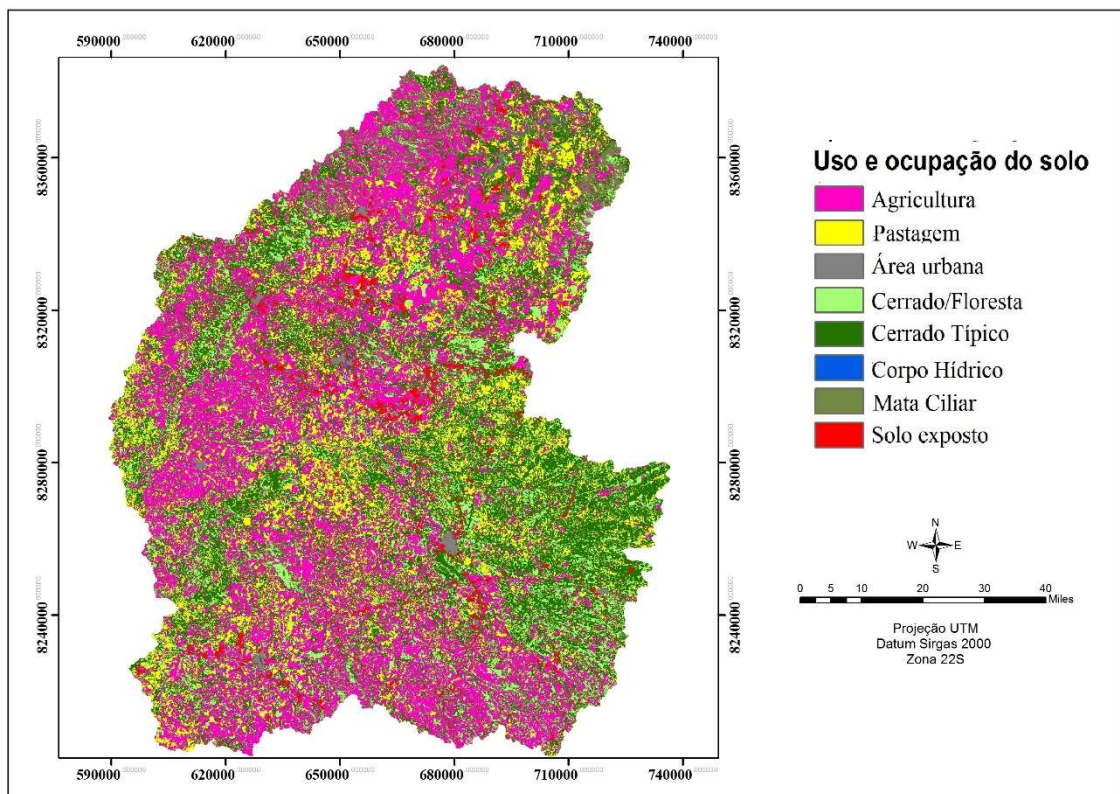


Figura 8 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 2017.

Tabela 9 - Mudanças nas áreas dos usos do solo para os anos de 1991, 2006 e 2017.

Uso do solo	Cenário 1 (1991)		Cenário 3 (2006)		Cenário 2 (2017)		Variação km
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	
Agricultura	3659,86	19,64	5306,57	28,47	6248,02	33,53	+ 2588,16
Pastagem	6771,06	36,33	3485,57	18,7	2796,88	15,01	- 3974,18
Urbana	40,42	0,22	55,80	0,3	87,34	0,47	+ 46,42
Cerrado/Floresta	1524,37	8,18	1892,46	10,15	2323,06	12,46	+ 798,69
Cerrado Típico	1392,62	7,47	5436,24	29,17	5716,71	30,67	+ 4324,09
Corpo Hídrico	98,56	0,53	123,49	0,66	99,88	0,54	+ 1,32
Mata Ciliar	2453,94	13,17	1629,62	8,74	978,79	5,25	- 1475,15
Solo exposto	2695,99	14,47	707,08	3,79	386,15	2,07	- 2309,84

Ao longo do período analisado observou-se um aumento de 70,72% na área de agricultura local, enquanto a de pastagem diminuiu 58,69%, ambas consideradas importantes atividades econômicas, sendo as mais exploradas no estado de Goiás. Pode-se observar também que a área urbana duplicou seu tamanho e a classe corpo hídrico aumentou 1,3%, permanecendo inalterada no período estudado. A classe cerrado típico expandiu três vezes sua área na região, principalmente na porção oeste da bacia, onde já ocupava grande destaque. A classe cerrado/floresta aumentou 52,3%, enquanto a mata ciliar reduziu sua área em 60,1% e o solo exposto 62,5%, apresentando um avanço das áreas agrícolas na bacia.

4.3 Simulação das vazões

A simulação hidrológica foi realizada na escala mensal para o período de 1968 a 1994 para o posto de Jaraguá, e de 1974 a 1988 para Colônia dos Americanos, que são os períodos de tempo com séries contínuas de dados sem falhas nestes postos fluviométricos. Para analisar o comportamento das vazões para os diferentes usos do solo nos anos de 1991 (cenário 1) e 2017 (cenário 2), a aplicação do modelo utilizou os mesmos dados de precipitação, clima e vazão, avaliando dessa forma apenas a alteração do uso do solo como dados de entrada. As Figuras 9 e 10 mostram as comparações entre as vazões observadas e as simuladas (sem calibração) para o cenário 1 nos exutórios das sub-bacias 14 e 342. Nas Figuras 11 e 12, são apresentadas as distribuições temporais das vazões simuladas com os dados observados de vazão para o cenário 2.

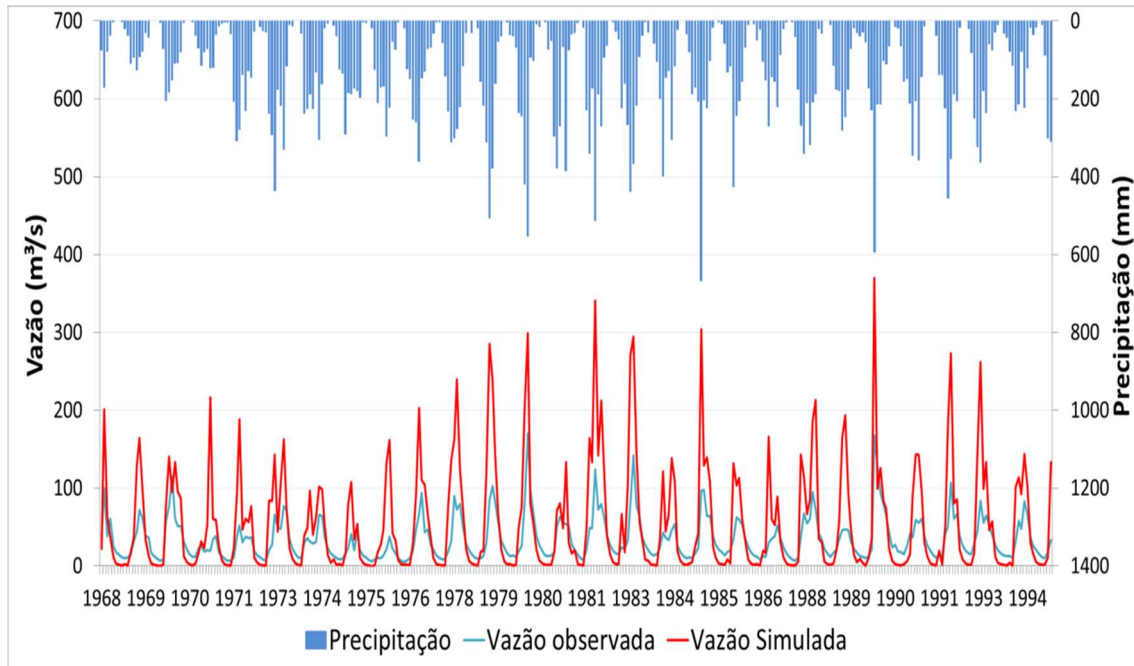


Figura 9 - Hidrogramas das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada no posto Jaraguá para o período de 1968 a 1994 no cenário 1.

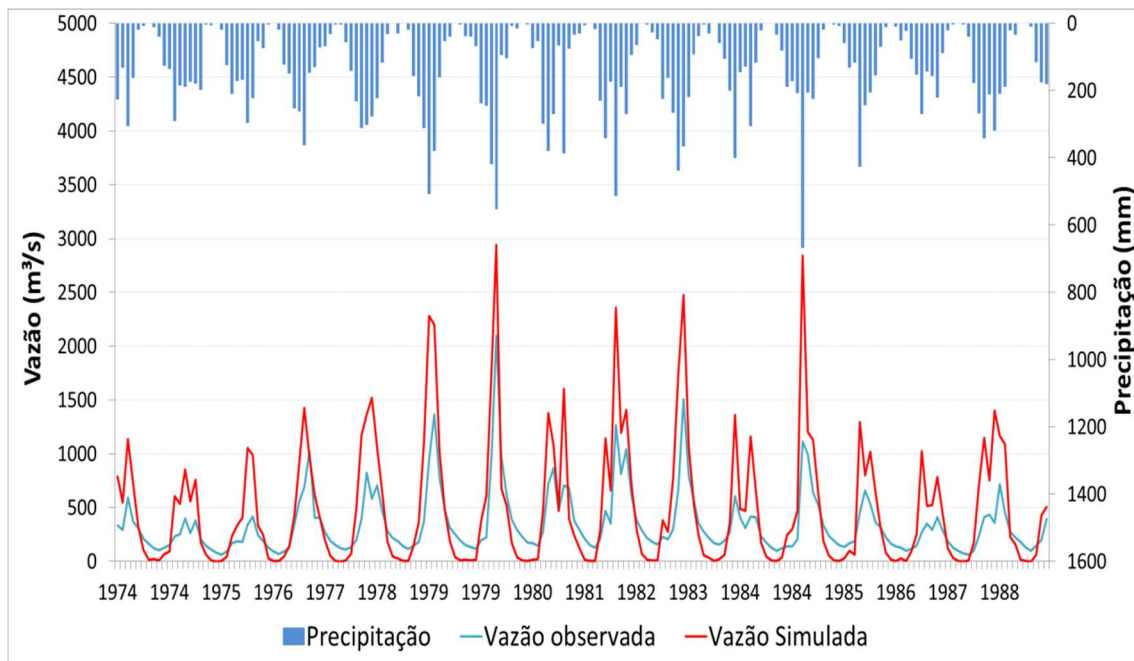


Figura 10 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada em Colônia dos Americanos para o período de 1974 a 1988 no cenário 1.

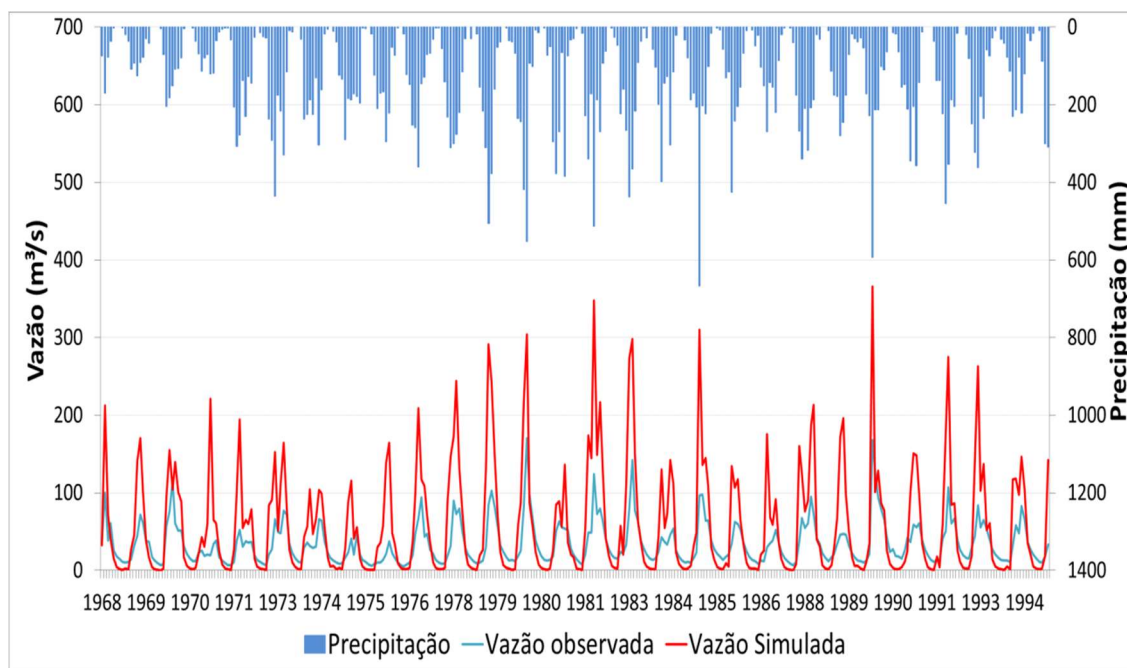


Figura 11 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada para o posto Jaraguá para no cenário 2.

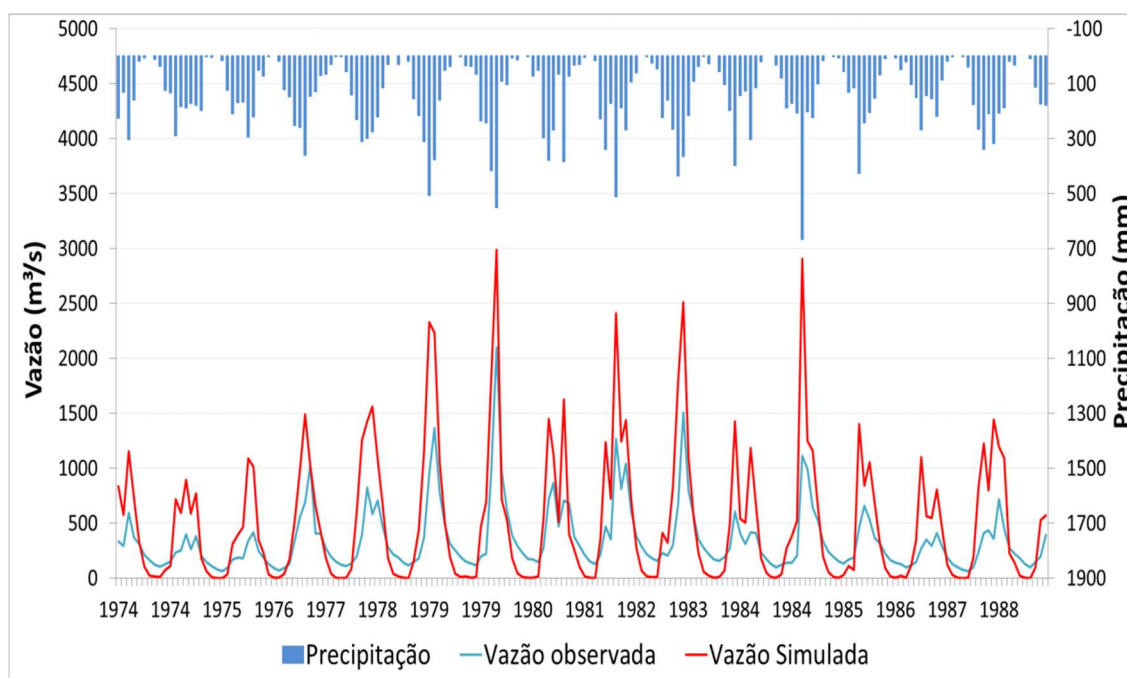


Figura 12 - Hidrograma das vazões observadas e simuladas e hietograma da precipitação média observada para o posto Colônia dos Americanos no cenário 2.

De acordo com os gráficos obtidos, observa-se que as modelagens iniciais em todos os casos apresentaram resultados gráficos insatisfatórios, embora o modelo tenha representado bem o comportamento da bacia de acordo com os dados inseridos, seguindo os picos de vazão

e sendo correspondente ao comportamento da precipitação. Deve-se ressaltar também que o modelo superestimou as vazões máximas de pico e mostrou tendência a subestimar as vazões de base, onde em vários períodos de pouca chuva o modelo simulou como zero, mostrando dificuldade na simulação dos processos de água subterrânea da bacia. Para bacias do cerrado, esse tipo de resultado também foi relatado em outros estudos, como Castro (2013), Salles (2012), Ferrigo (2011) e Fukunaga (2012).

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as vazões observadas e simuladas para os dois postos fluviométricos nos diferentes cenários e os índices estatísticos para avaliar a eficiência das simulações.

Tabela 10 - Vazões observadas e simuladas pelo modelo para o cenário 1.

Estatísticas	Jaraguá		Colônia dos Americanos	
	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão simulada (m ³ /s)	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão simulada (m ³ /s)
Mínima	4,97	0,1097	64,48	0,1108
Média	34,57	55,47	346,80	485,28
Máxima	170,29	370,1	2095,41	2944,0
R ²	0,70		0,78	
Nash	-3,22		-0,66	

Tabela 11 - Vazões observadas e simuladas pelo modelo para o cenário 2.

Estatísticas	Jaraguá		Colônia dos Americanos	
	Vazão Observada (m ³ /s)	Vazão Simulada (m ³ /s)	Vazão Observada (m ³ /s)	Vazão Simulada (m ³ /s)
Mínima	4,97	0,2123	64,48	0,2686
Média	34,57	58,89	346,80	485,28
Máxima	170,29	365,4	2095,41	2990,0
R ²	0,70		0,76	
Nash	-3,22		-0,91	

A comparação gráfica e estatística das simulações iniciais do modelo foi realizada como uma forma de compreender o sistema hidrológico da bacia. Pode-se observar que os picos de vazão simulados no modelo superestimaram em até duas vezes os valores observados, como Jaraguá no cenário 1, que simulou picos máximos de vazão de 370,1 m³/s, enquanto os valores observados atingiram 170,29 m³/s. O escoamento de base foi subestimado como zero nos meses secos, como em Colônia dos Americanos que tem a vazão mínima observada de 64,48 m³/s e o modelo subestimou como 0,27 m³/s. Para os dois cenários, a média da vazão simulada foi superior a média da vazão real observada.

As análises estatísticas apresentaram bons coeficientes de determinação, porém coeficientes de Nash insatisfatórios, de acordo com o aceitável por Moriasi et al. (2007). O bom resultado de R^2 avalia a precisão em que o modelo acompanha o comportamento das curvas e a variação dos valores observados, representando bem os picos de vazão. O baixo valor do Nash deve-se ao fato dos valores superestimados do volume do escoamento terem ficado distantes dos valores observados. Dessa forma, houve a necessidade de realizar a calibração do modelo para a obtenção de um melhor ajuste entre a vazão simulada pelo SWAT e os dados observados para que a modelagem representasse a realidade da bacia de forma satisfatória.

4.4 Análise de sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade é uma forma de identificar quais parâmetros exercem maior influência nos resultados gerados no modelo e são mais sensíveis às condições da bacia hidrográfica de estudo. Os resultados da sensibilidade dos parâmetros na modelagem para os dois cenários estudados são apresentados nas Figuras 13 e 14.

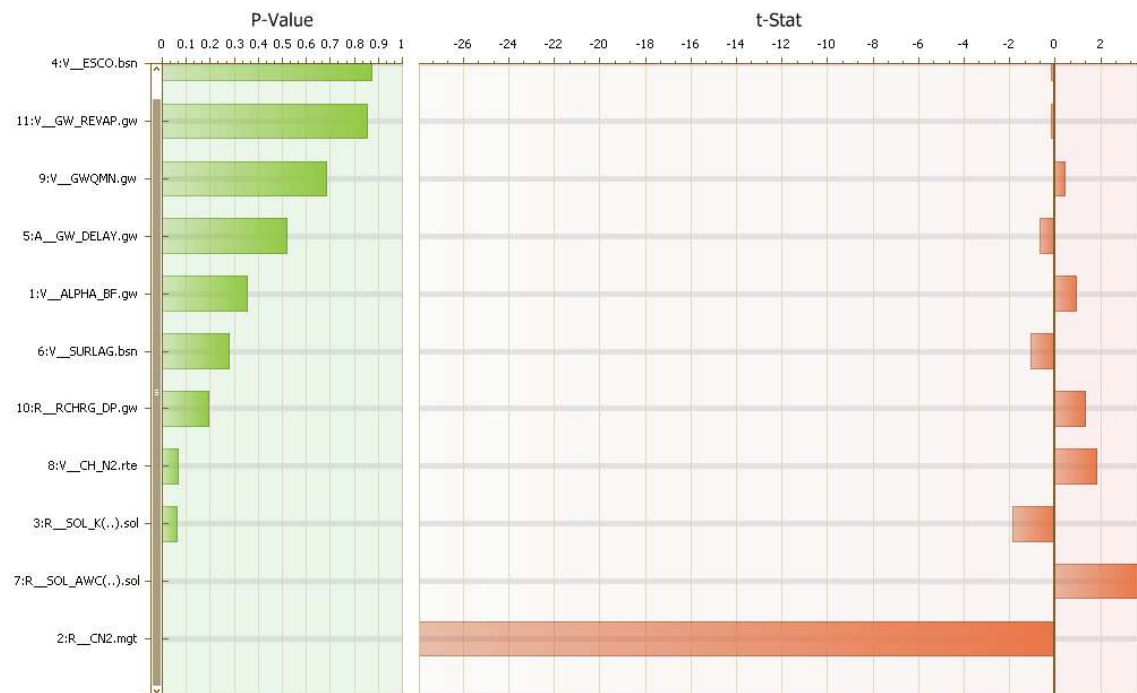


Figura 13 - Resultado da sensibilidade global dos parâmetros no posto Colônia dos Americanos para Cenário 1.

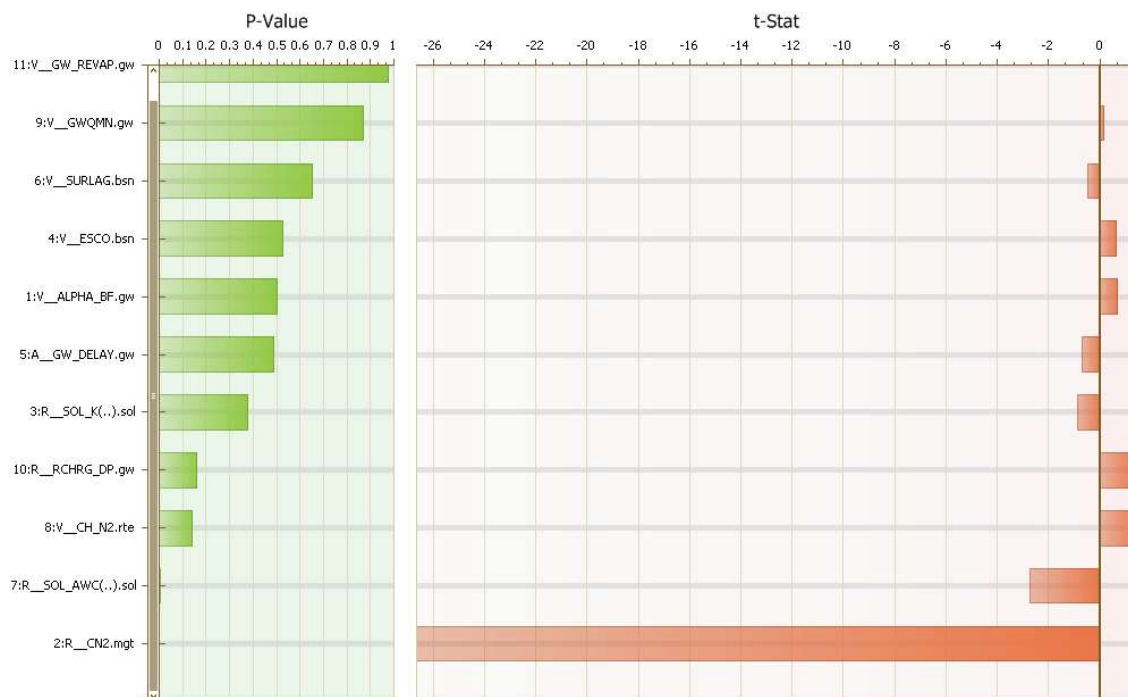


Figura 14 - Resultado da sensibilidade global dos parâmetros no posto Colônia dos Americanos para o Cenário 2.

No que tange os resultados obtidos, o índice *t-stat* determina a medida da sensibilidade dos parâmetros, sendo quão maior seu valor absoluto mais sensível o parâmetro é. Para os dois cenários estudados, os cinco principais parâmetros mais sensíveis nas calibrações foram: CN2, SOL_AWC, CH_N2, RCHRG_DP, SOL_K. O *p-value* determina a significância da sensibilidade dos parâmetros, no qual os parâmetros mais próximos de zero apresentam maior significância no modelo. Dessa forma, pode-se observar que os parâmetros considerados mais sensíveis ao modelo também são os de maior significância. Neste estudo, o parâmetro CN2 foi o mais influente e está relacionado a umidade do solo. Os parâmetros SOL_AWC e SOL_K estão relacionados às características físicas do solo e o RCHRG_DP a água subterrânea.

A Tabela 12 apresenta o *ranking* dos parâmetros de maior sensibilidade identificados em outros estudos para bacias do cerrado. Pode-se observar que não há grande variação entre os parâmetros mais sensíveis entre as diferentes bacias, modificando-se pouco seus resultados. A diferença entre as sensibilidades está relacionada diretamente às condições físicas e climáticas de cada bacia hidrográfica.

Tabela 12 - Parâmetros sensíveis para calibração do SWAT no cerrado do Brasil.

	Este Trabalho	Castro (2013)	Carvalho (2014)	Ferrigo (2014)	Salles (2012)
1	CN2	SURLAG	CN2	SOL_K	CN2
2	SOL_AWC	ALPHA_BF	SOL_K	CN2	CH_K2
3	CH_N2	SOL_K	ESCO	SOL_AWC	SURLAG
4	RCHRG_DP	GWQMN	GW_DELAY	SHALLST	ALPHA_BF
5	SOL_K	CN2	SURLAG	ANION_EXCL	ESCO
6	GW_DELAY	CH_K2	SOL_AWC	REVAPMN	RCHRG_DP
7	ALPHA_BF	RCHRG_DP	SHALLST	ESCO	CH_N2
8	ESCO	ESCO	CH_N2	ALPHA_BF	SOL_AWC
9	SURLAG	SOL_AWC	ALPHA_BF	SOL_BD	GWQMN
10	GWQMN	SOL_Z	GWQMN	DEEPST	GW_DELAY

4.5 Calibração do modelo SWAT

Após a análise dos parâmetros mais sensíveis e de suas influências no processo hidrológico da bacia, foram realizadas duas calibrações automáticas para os anos de 1974 a 1980 utilizando o *software* SWAT-CUP, para o posto fluviométrico de Colônia dos Americanos, uma para cada cenário. Assim, a partir das duas calibrações usando os dois mapas de uso do solo (cenários 1 e 2), pôde-se observar para qual dos dois casos houve melhor calibração entre as vazões observadas e simuladas. Nesse sentido, utilizou-se a melhor parametrização do cenário com melhor ajuste, para representar os impactos que as mudanças de uso do solo podem influenciar nos processos hidrossedimentológicos.

Os dados observados foram divididos em duas séries distintas, utilizando o período de 1974 a 1980 para a calibração, e 1981 a 1988 para a validação do modelo. As Tabelas 13 e 14 mostram os valores do melhor ajuste dos parâmetros para as duas calibrações.

Tabela 13 - Parâmetros calibrados para o Cenário 1.

Parâmetro	Método	Grupo	Valor Inicial	Ajuste SWAT-CUP	Valor Final Calibrado
ALPHA_BF	Substituição	Água subterrânea (.gw)	0,338	0,196172	0,1962
CN2	Multiplicação	Escoamento superficial (.mgt)	35,0	1,12	39,2
ESCO	Substituição	Evapotranspiração (.hru)	0,95	0,943561	0,944
GW_DELAY	Adição	Água subterrânea (.gw)	374,64	83,4828	458,1228
GW_REVAP	Substituição	Água subterrânea (.gw)	0,1792	0,17935	0,1794

GWQMN	Substituição	Água subterrânea (.gw)	940,27	807,191711	807,1917
CH_N2	Substituição	Sub-bacia (.rte)	0,2821	0,241084	0,241
RCHRG_DP	Multiplicação	Água subterrânea (.gw)	0,068	1,140903	0,0775
SOL_AWC	Multiplicação	Solos (.sol)	0,183	1,963028	0,359
SOL_K	Multiplicação	Solos (.sol)	2,3	2,630853	6,05
SURLAG	Substituição	Escoamento Superficial	2,0	20,161922	20,16

Tabela 14 - Parâmetros calibrados para o Cenário 2.

Parâmetro	Método	Grupo	Valor inicial	Valor ajustado no SWAT-CUP	Valor calibrado
ALPHA_BF	Substituição	Água subterrânea (.gw)	0,0480	0,091989	0,092
CN2	Multiplicação	Escoamento superficial (.mgt)	73,0	0,96	70,1
ESCO	Substituição	Evapotranspiração (.hru)	0,95	0,607487	0,607
GW_DELAY	Adição	Água subterrânea (.gw)	31,0	41,837143	72,8371
GW_REVAP	Substituição	Água subterrânea (.gw)	0,020	0,125646	0,1256
GWQMN	Substituição	Água subterrânea (.gw)	1000,0	743,091064	743,0911
CH_N2	Substituição	Sub-bacia (.rte)	0,014	0,094123	0,094
RCHRG_DP	Multiplicação	Água subterrânea (.gw)	0,0500	1,200011	0,0600
SOL_AWC	Multiplicação	Solos (.sol)	0,183	0,882206	0,1614
SOL_K	Multiplicação	Solos (.sol)	2,3	13,369624	30,75
SURLAG	Substituição	Escoamento Superficial	2,0	10,112601	10,11

Para melhor ajustar o modelo buscaram-se pesquisas direcionadas ao bioma cerrado de forma a se obter valores de parâmetros do modelo SWAT e compreender melhor os processos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio das Almas.

De acordo com o levantamento bibliográfico realizado sobre valores dos parâmetros físicos do SWAT para bacias do cerrado, pode-se citar o estudo de Carvalho (2014), no qual concluiu que o fator de maior contribuição para o modelo apresentar uma tendência de superestimar as vazões máximas e subestimar as vazões de base é o valor da Curva-Número, que difere muito dos solos brasileiros e dos solos americanos, para o qual o SWAT é inicialmente configurado. Na análise de sensibilidade isso ficou claro ao se constatar que a curva número para a condição de umidade (CN2) foi o parâmetro mais sensível e de maior significância para o modelo. Dessa forma, o CN2 foi o primeiro parâmetro utilizado na calibração, no qual, segundo Castro (2013), a sua alteração pode aumentar a infiltração na bacia e diminuir o escoamento superficial. Como a simulação apresentou um rápido retorno ao escoamento superficial, modificou-se, também, o coeficiente de retardo do escoamento (SURLAG). Salles (2012) demonstrou em seu estudo que uma alteração no valor desse parâmetro pode aumentar a quantidade de água armazenada e tornar o hidrograma mais suave.

Para aumentar o fluxo de base, alterou-se a condutividade hidráulica do solo saturado (SOL_K), que influenciou no movimento da água no solo, fazendo com que o modelo não subestimasse a vazão de base como zero nos meses secos. Para aumentar essa vazão mínima nesses períodos também foram utilizados alguns parâmetros relacionados à água subterrânea, como o GWQMN, que é o limite entre a profundidade do aquífero raso e a superfície; RCHRG_DP que é a fração de água percolada para o aquífero profundo; ALPLHA_BF, como a constante de recessão do escoamento de base; o tempo de retardo da água subterrânea (GW_DELAY) e GW_REVAP, que é o coeficiente REVAP de água subterrânea.

Segundo Salles (2012), o parâmetro Ch_N2, que é o coeficiente de rugosidade de Manning, pode ser calibrado pois do valor padrão desse parâmetro no SWAT é igual a 0,014, que é indicado para canais de concreto. Para a bacia hidrográfica esses valores devem ser calibrados, pois são canais naturais com a presença de árvores, arbustos e pedras. Neste estudo também se alterou o fator de compensação de evaporação do solo (ESCO), no intuito de aumentar a evaporação das camadas de solo, além de alterar os valores do teor de água disponível no solo (SOL_AWC).

A simulação com a modificação desses parâmetros resultou em uma resposta mais adequada do modelo ao comportamento da bacia, ajustando melhor a vazão calculada com a observada. As Figuras 15 e 16 apresentam os hidrogramas das vazões para os períodos de calibração e validação do posto fluviométrico. Na Tabela 15 são apresentadas as vazões

observadas e calibradas nos diferentes anos e os índices estatísticos para avaliar a eficiência das simulações.

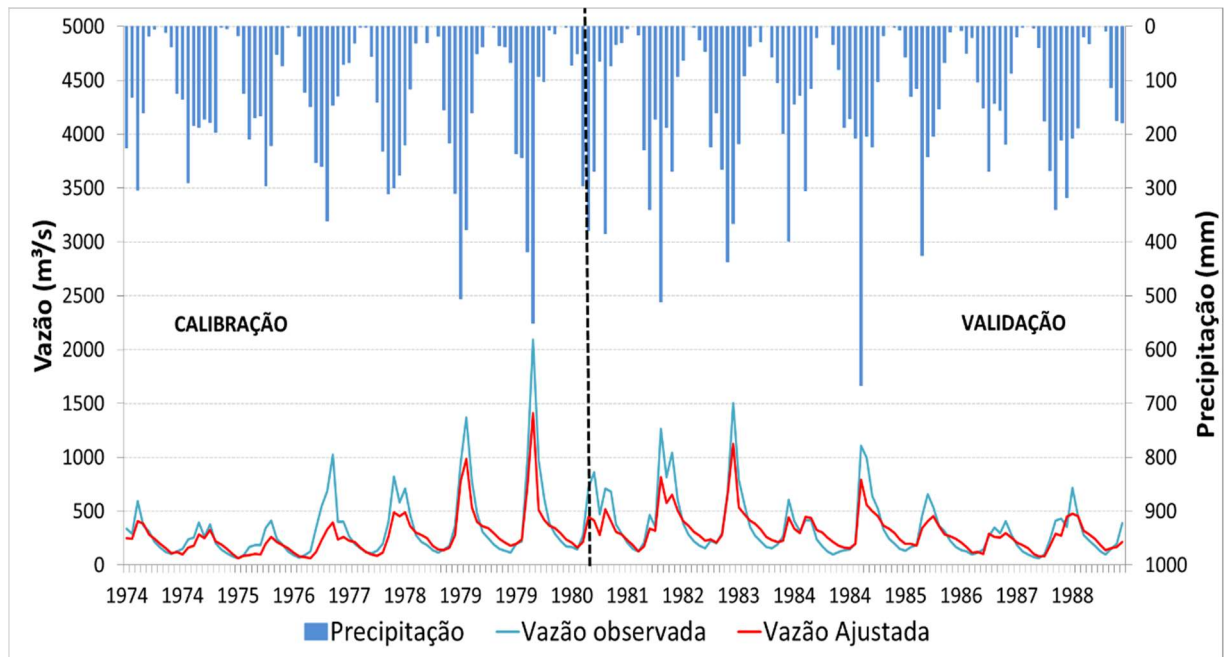


Figura 15 - Comparação entre as vazões observadas e calibradas e o hietograma da precipitação média observada para o Cenário 1.

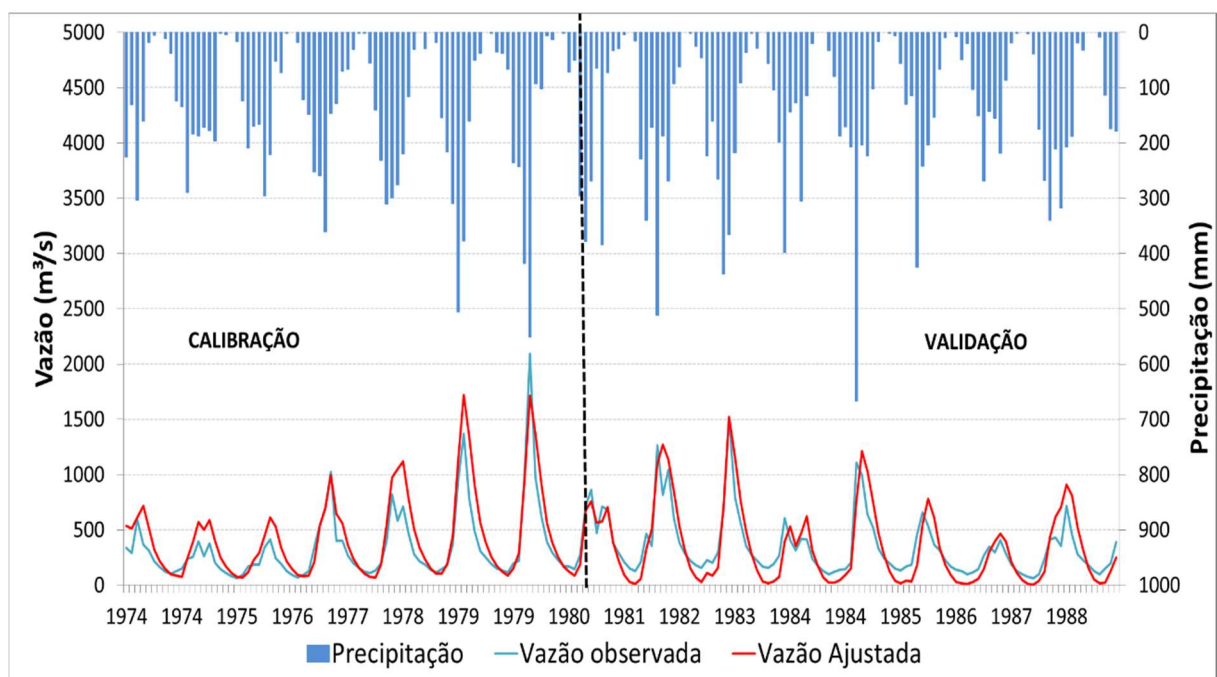


Figura 16 – Comparação entre as vazões observadas e calibradas e o hietograma da precipitação média observada para o Cenário 2.

Tabela 15 - Vazões observadas e calibradas pelo modelo para o posto Colônia dos Americanos.

Estatísticas	Cenário 1		Cenário 2	
	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)
Mínima	64,48	62,5	64,48	3,98
Média	341,54	294,64	346,80	431,67
Máxima	2095,41	1414,0	2095,41	1718,0
R ²	0,88		0,84	
Nash	0,74		0,70	

As novas simulações do modelo calibrado apresentaram bons resultados gráficos, de forma que a vazão de base não foi mais subestimada a zero e as vazões de pico não foram altas comparadas as observadas.

No primeiro cenário, o modelo subestimou levemente o volume escoado na bacia e não alcançou os picos máximos, mas representou bem a vazão de base e o seu comportamento comparado com a observada, apresentando bons coeficientes estatísticos de $R^2 = 0,88$ e $NS = 0,74$ na calibração. Para a validação a modelagem apresentou o mesmo comportamento e obteve coeficientes considerados satisfatórios de $R^2 = 0,86$ e $NS = 0,74$. Comparando as médias de vazão nota-se que no processo de calibração ao forçar a busca por melhores resultados nos índices estatísticos o modelo acabou subestimando um pouco a vazão.

O cenário 2 representou bem o comportamento das vazões no período de calibração, sem superestimar o escoamento superficial e subestimar a vazão de base. Por outro lado, apesar de apresentar bons coeficientes estatísticos para o período de validação, com $R^2 = 0,82$ e $NS = 0,68$, observou-se que em alguns pontos a vazão de base voltou a ser subestimada, tal que a vazão observada mínima foi de 64,48 m³/s, enquanto o modelo simulou uma vazão mínima de 3,98 m³/s.

Visto que a calibração foi feita para toda a bacia hidrográfica, como uma forma de verificar se o modelo representa bem os processos hidrológicos em toda sua extensão e como forma de testar a qualidade da calibração, comparou-se a simulação calibrada na bacia 342, onde está localizado o posto de Jaraguá, com os dados observados de seu posto fluviométrico. As Figuras 17 e 18 apresentam os hidrogramas das vazões para o período de calibração para o posto Jaraguá. A Tabela 16 apresenta as vazões observadas e calibradas nos diferentes anos e os índices estatísticos para avaliar a eficiência das simulações.

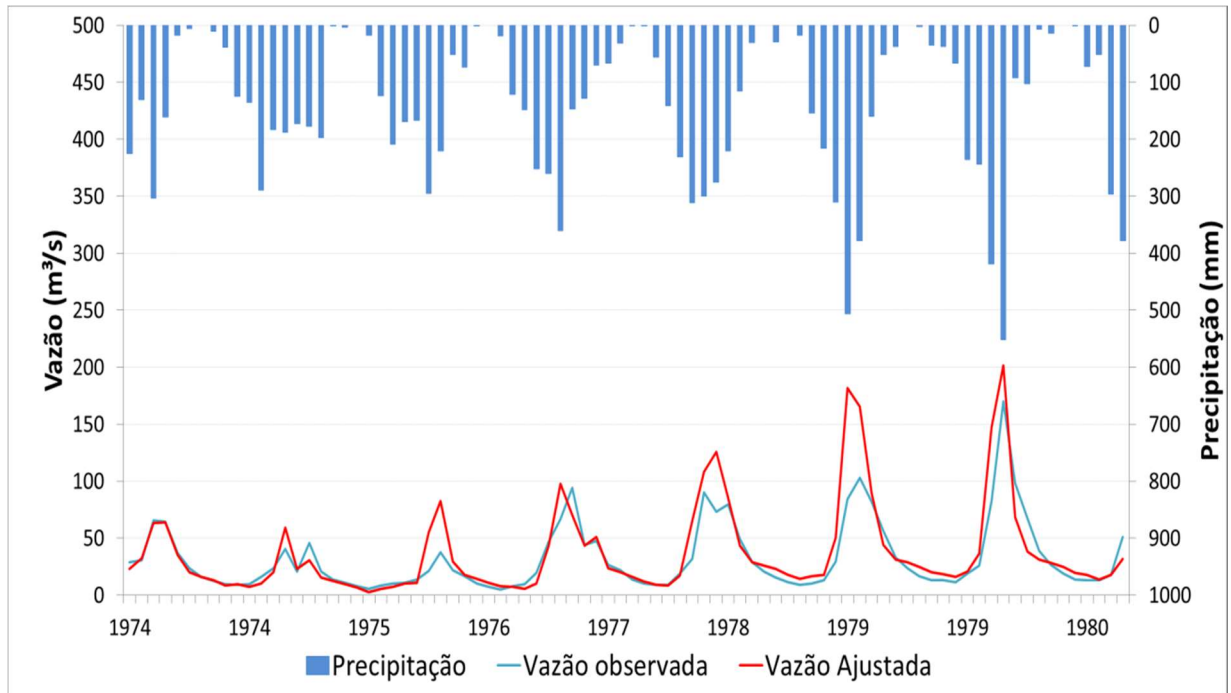


Figura 17 - Hidrograma das vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 1 no posto Jaraguá.

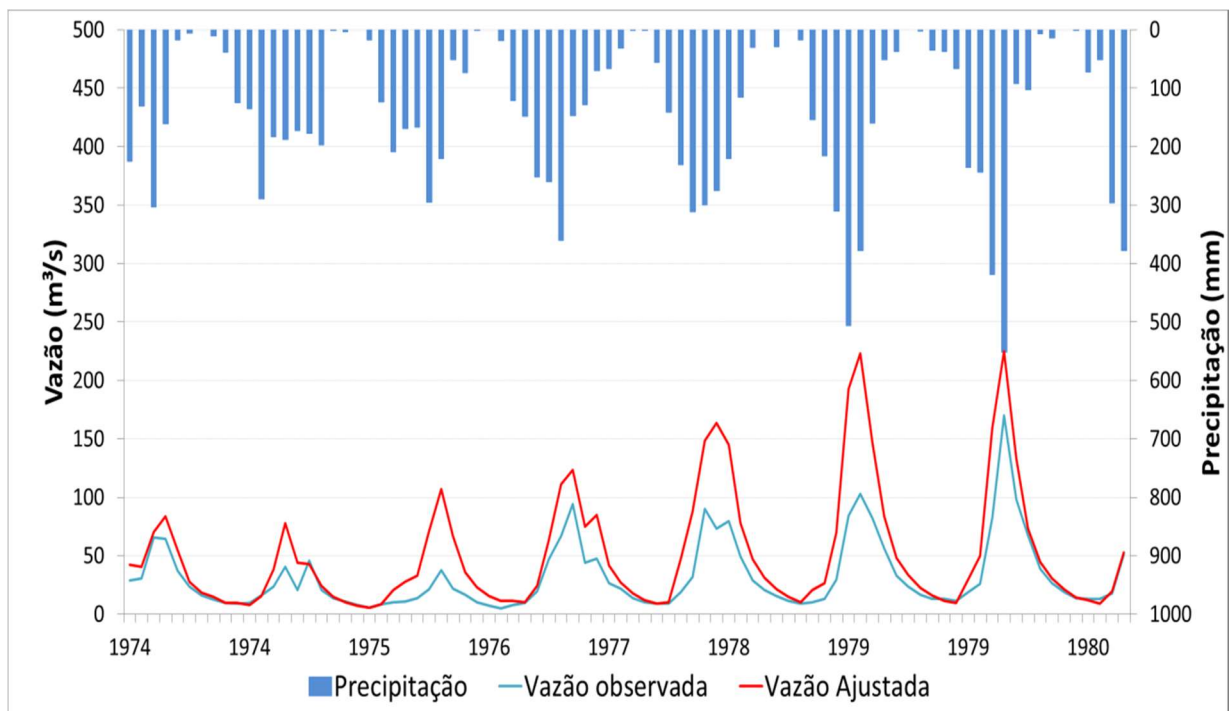


Figura 18 - Hidrograma das vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 2 no posto Jaraguá.

Tabela 16 - Vazões observadas e calibradas pelo modelo para Jaraguá.

Estatísticas	Cenário 1		Cenário 2	
	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)	Vazão observada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)
Média	31,81	36,99	31,81	50,85
R ²		0,80		0,87
Nash		0,56		-0,18

A calibração para o cenário 1 no posto Jaraguá representou graficamente e estatisticamente de forma satisfatória a modelagem da bacia, principalmente para os períodos com baixa precipitação. Os coeficientes podem ser considerados satisfatórios, pois estão acima do recomendado pela literatura (MORIASI et al., 2007), além disso, a vazão observada média foi igual a 31,81 m³/s, enquanto a simulada foi de 36,99 m³/s, um valor próximo com uma diferença que pode ser considerada baixa. Os picos máximos de vazão reduziram quando comparado ao simulado apresentado (Figura 9). Ainda assim, a calibração não representou com eficácia todos os picos, pois nos eventos de chuva do ano de 1979, apesar de reduzido, ainda foi bem maior que a vazão observada.

Por outro lado, para o cenário 2 algumas vazões simuladas foram superestimadas para o posto Jaraguá, que apresentou um volume simulado muito acima do observado na bacia, tendo um valor de Nash negativo e, conseqüentemente, insatisfatório, o que significa que para esse uso do solo, o modelo não representou bem espacialmente as vazões.

Dessa forma, observa-se que as mudanças de uso do solo na bacia tem impacto direto na calibração do modelo. Sob as mesmas condições climáticas e dados fluviométricos no período de tempo estabelecido como objeto de estudo, a calibração foi satisfatória para o cenário 1 e sua parametrização é a melhor obtida para a bacia hidrográfica.

Na Tabela 17 estão os valores dos coeficientes para o período de calibração e validação para alguns trabalhos realizados no bioma cerrado. Pode-se observar que o cenário 1 apresentou bons coeficientes e boa representação e está dentro do esperado para as bacias do cerrado. O cenário 2 foi considerado o menos eficiente para o objetivo de estudo, pois ao analisar seu comportamento da vazão espacialmente, a simulação para o posto Jaraguá teve um comportamento parecido com o apresentado em Castro (2013), que apesar de empregar os mesmos valores dos parâmetros obtidos na calibração, os dados simulados e observados não apresentaram boa aproximação em seu estudo, tal que, o fluxo de base foi bem representado

de junho de 2007 a janeiro de 2008, e a partir desse período o modelo não conseguiu retornar o fluxo de base para valores próximos aos observados depois da recessão dos picos de vazão.

Tabela 17 - Valores de NS e R² para o período de calibração e validação com o SWAT em bacias do bioma cerrado.

Trabalho	Bacia	Área	Calibração		Validação	
		Km ²	R ²	NS	R ²	NS
Este Trabalho	Rio das Almas (Cenário 1)	18.681,33	0,88	0,74	0,86	0,74
Castro (2013)	Alto Jardim	105	0,66	0,60	0,66.	-0,84
Salles (2012)	Pipiripau	235	-	0,67	-	0,79
Ferrigo <i>et al.</i> (2014)	Lago Descoberto	452	0,73	0,63	0,82	0,48
Carvalho (2014)	Alto Rio Jardim	104,86	0.85	0.71	0.95	0.54
Fukunaga (2012)	Sub-bacia do rio Itapemirim	2.237	0,76	0,75	0,63	0,57

Visto a influência que as mudanças do uso do solo no rio das Almas apresentaram sobre a calibração do modelo, testou-se a aplicação da parametrização do cenário 1, obtida como a melhor para a representação da bacia, para o cenário 3, que é um período intermediário escolhido para retratar a área de estudo. A Figura 19 a seguir apresenta a classificação do solo para o ano de 2006. Os detalhes das mudanças do uso entre os dois cenários analisados e o cenário intermediário estão apresentados na Tabela 9. A Figura 20 apresenta a simulação da vazão para o Cenário 3 com a parametrização definida para a bacia, sob as mesmas condições físicas e climáticas, alterando apenas o uso do solo para o de 2006.

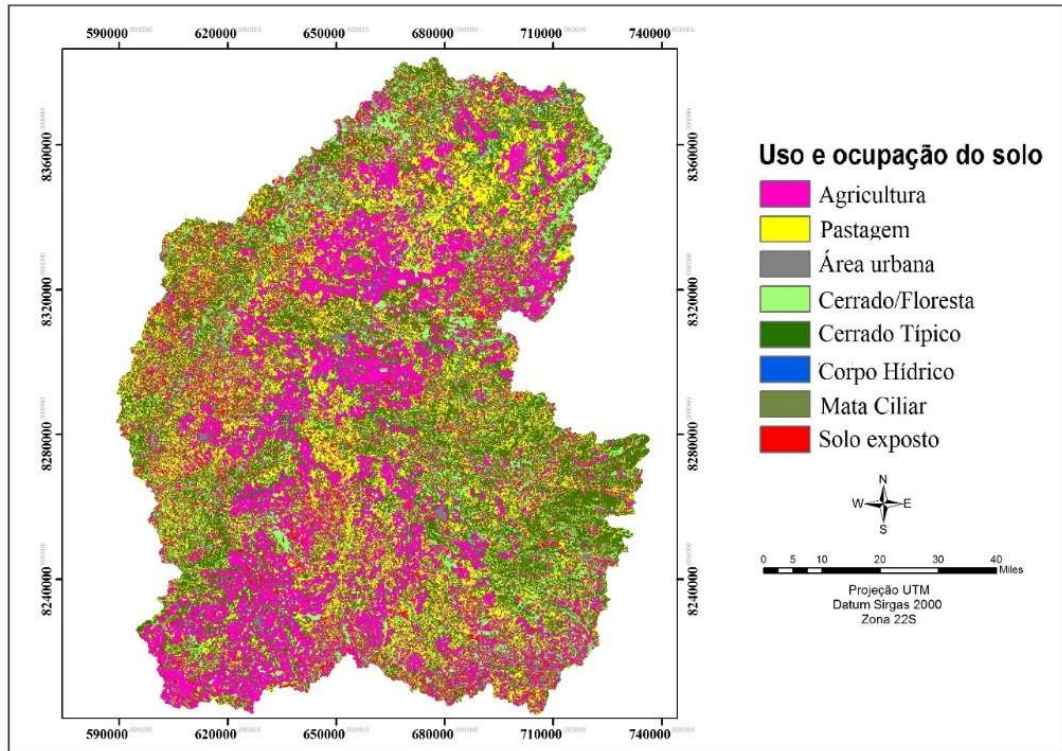


Figura 19 - Uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do rio das Almas no ano de 2006.

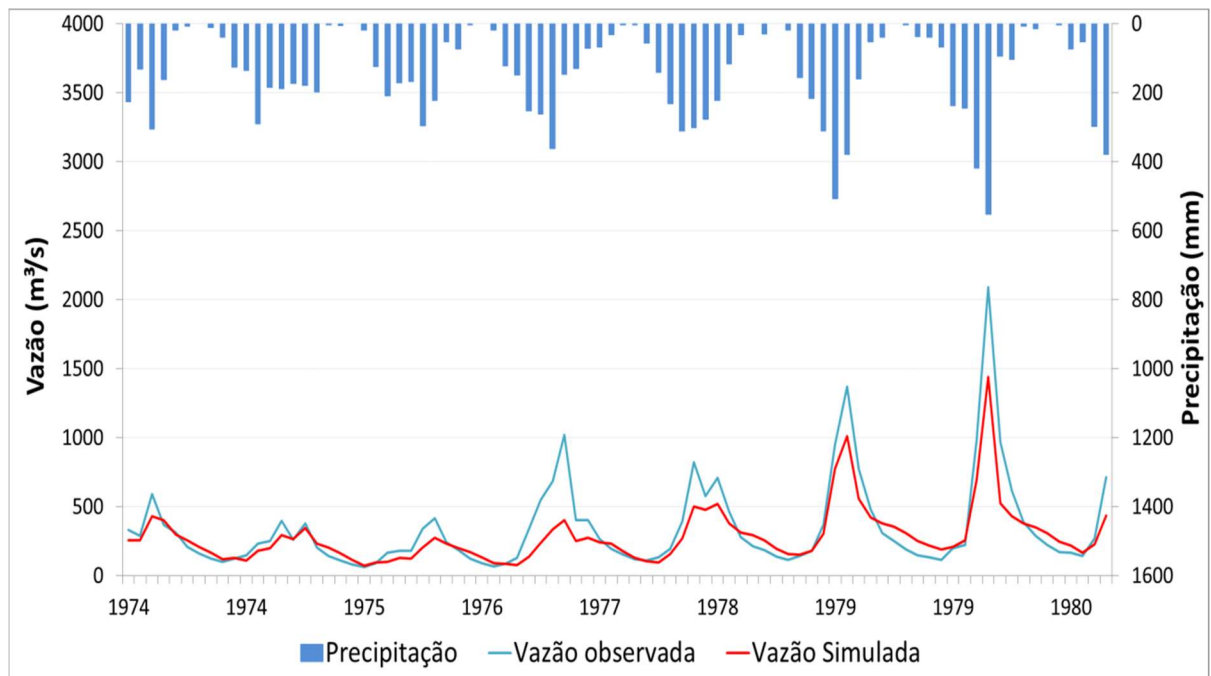


Figura 20 – Comparação entre as vazões observadas e calibradas e hietograma da precipitação média observada para o cenário 3.

Para o cenário 3, a simulação apresentou o mesmo comportamento hidrológico que apresentou no cenário 1, que representou bem o escoamento de base e não superestimou as vazões de pico, porém ajustou o volume do escoamento a um pouco abaixo do valor observado. Assim, pode-se verificar a representatividade desses parâmetros para a modelagem da bacia sob diferentes usos do solo, considerando-a satisfatória dentro dos limites estabelecidos bons para os coeficientes estatísticos de análise. A Tabela 18 apresenta a comparação das vazões observadas e simuladas para cada cenário e dos índices estatísticos de desempenho.

Tabela 18 - Índices estatísticos do modelo para os três cenários.

Estatísticas	Vazão observada (m ³ /s)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
		Vazão calibrada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)	Vazão calibrada (m ³ /s)
Mínima	64,48	62,5	3,98	73,36
Média	341,54	294,64	431,67	312,40
Máxima	2095,41	1414,0	1718,0	1442,0
R ²		0,88	0,84	0,88
Nash		0,74	0,70	0,76

O SWAT por ser um modelo semi-distribuído possui uma ferramenta de espacialização do escoamento superficial na bacia hidrográfica. Na Figura 21 a seguir pode-se observar o mapa especializado da vazão por cada sub-bacia. As maiores taxas de vazão estão localizadas ao centro da bacia por onde corre o rio das Almas, atingindo seus maiores valores de vazão próximo ao exutório.

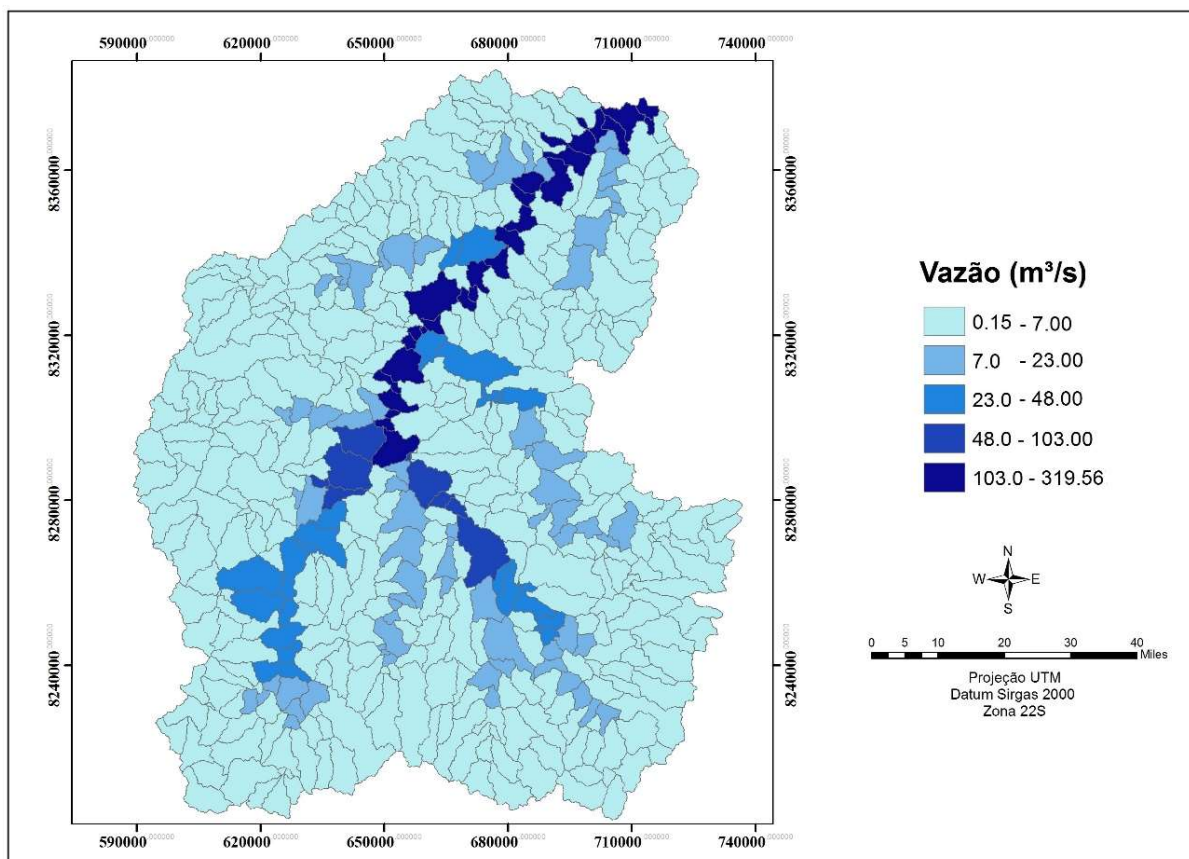


Figura 21 - Distribuição espacial do escoamento superficial para o cenário 3.

4.6 Produção de sedimentos estimada

Após a calibração do modelo para o escoamento superficial da bacia e verificando que a modelagem está refletindo de forma satisfatória os dados observados de vazão, realizou-se a simulação da produção de sedimentos. A produção de sedimentos é um processo importante a ser avaliado, porém é de complexa análise na região da bacia hidrográfica de estudo por depender de muitas variáveis e não se ter dados observados para fazer um comparativo. A estimativa da produção de sedimentos foi calculada para toda a série de dados, com exceção dos três primeiros anos de aquecimento do modelo. As Figuras 22 e 23 a seguir apresentam o comportamento da produção de sedimentos e da precipitação na bacia para os dois cenários de estudo no posto Colônia dos Americanos entre os anos de 1974 a 1988.

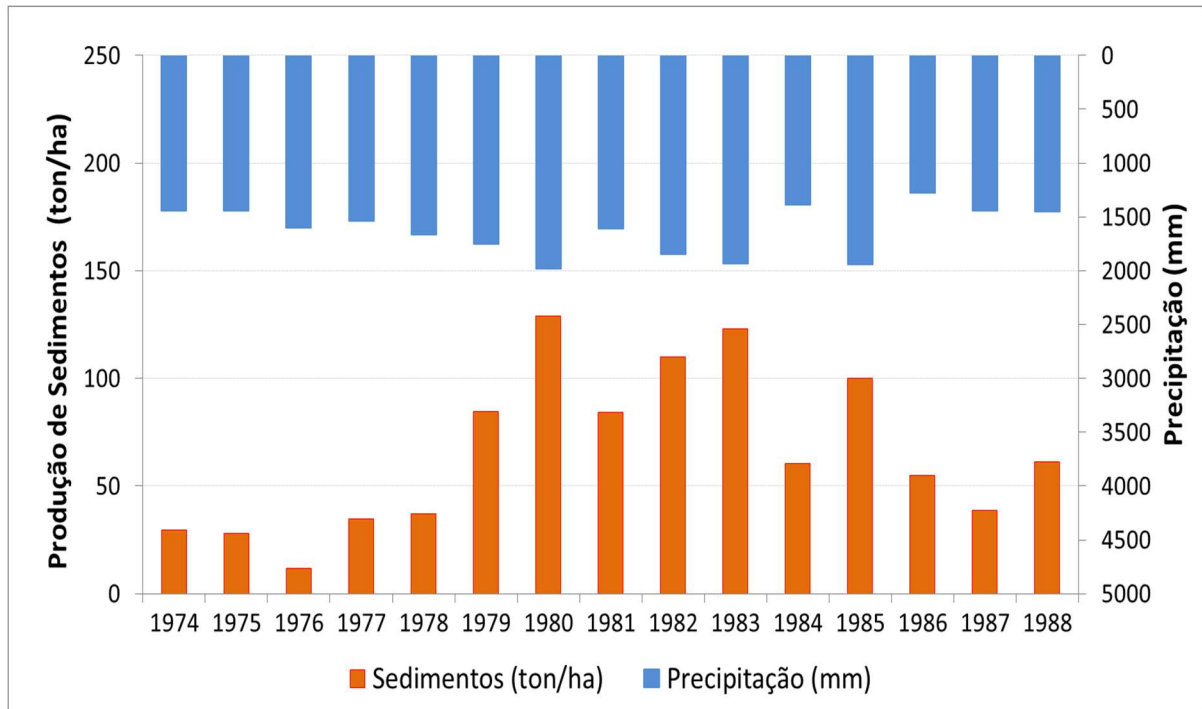


Figura 22 - Precipitação média anual e produção estimada de sedimentos na bacia do rio das Almas para o cenário 1.

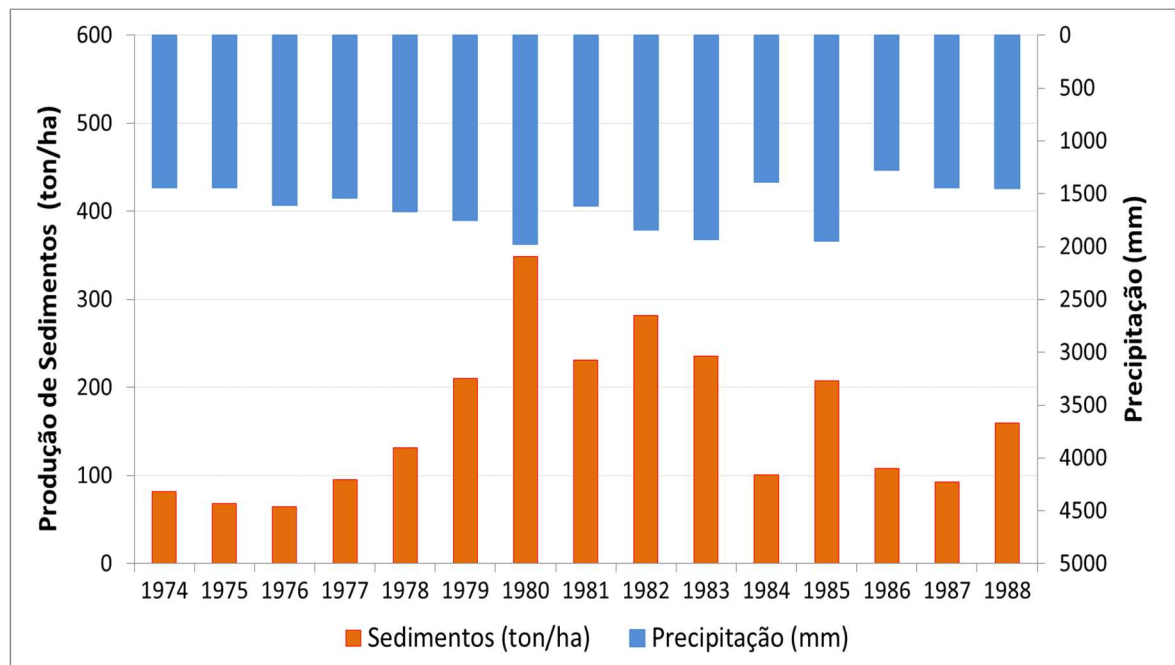


Figura 23 - Precipitação média anual e produção estimada de sedimentos na bacia do rio das Almas para o cenário 2.

A estimativa de produção de sedimentos para o cenário 1 foi de 11,7 a 129 ton/ha/ano. No cenário 2 a variação foi de 64,94 a 348,61 ton/ha/ano. Pode-se observar que existe uma relação entre o comportamento da precipitação, da vazão e a produção de sedimentos na bacia. Para os períodos com maior índice de chuva, também se apresentou maior produção de sedimentos. O cenário 2, que superestimou o volume do escoamento na bacia e teve dificuldade de simular o fluxo de base, apresentou a maior produção de sedimentos. Isso é esperado visto que a produção de sedimentos é calculada pelo MUSLE, integralmente relacionada com o volume do escoamento superficial. Como o modelo busca fazer o maior ajuste para se obter bons coeficientes estatísticos, forçou um pouco a calibração e acabou superestimando a vazão e produção de sedimentos. O cenário 1 mostrou o mesmo comportamento simulado na vazão, com uma menor produção de sedimentos.

Observando o comportamento da relação entre os dados de vazão observada e de produção de sedimentos calculada para ambos os casos, observou-se, com base nos resultados, que a relação vazão-erosão foi alta para os dois casos, apresentando um coeficiente de $R^2 = 0,79$ para o cenário 1 e $R^2 = 0,90$ para o cenário 2, como mostram as Figuras 24 e 25.

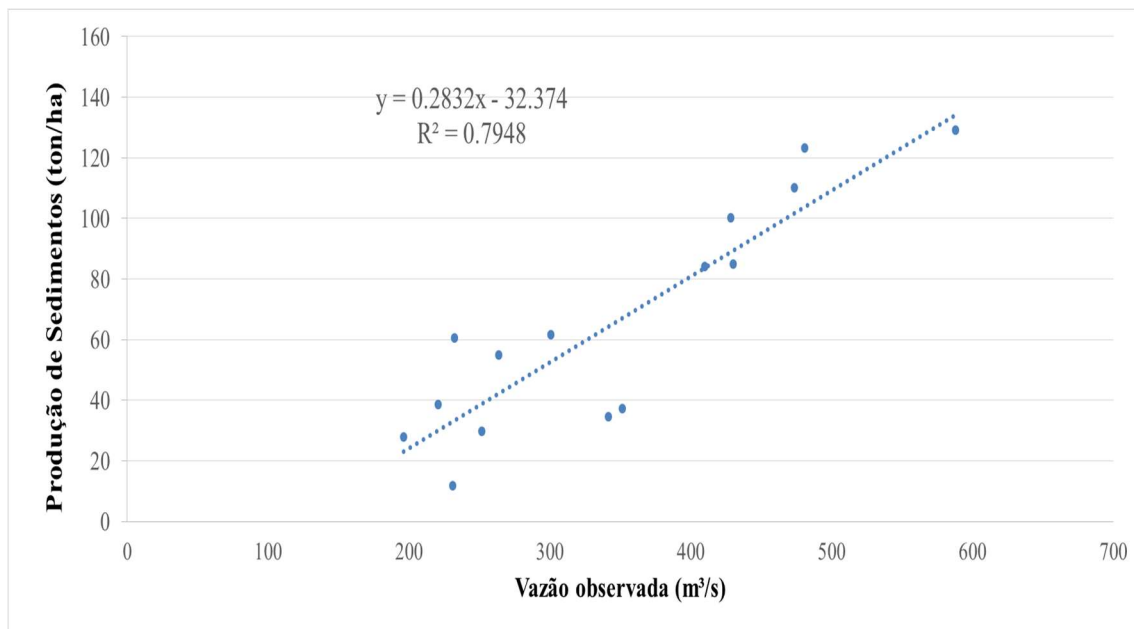


Figura 24 - Relação entre vazão observada e a produção de sedimentos no Cenário 1.

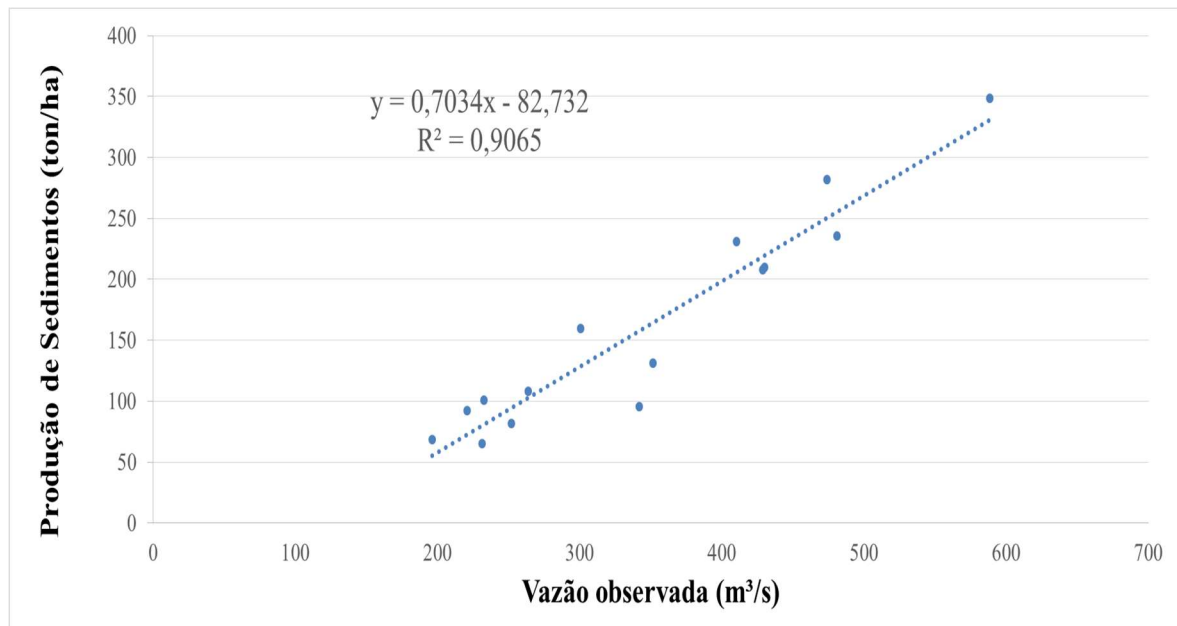


Figura 25 - Relação entre vazão observada e a produção de sedimentos para o Cenário 2.

Assim como para o escoamento superficial, o SWAT permite que se especialize a perda de solo nas sub-bacias de forma a melhor visualizar o comportamento da produção de sedimentos na bacia hidrográfica. Como o cenário 3 foi definido para retratar a bacia, a Figura 26 apresenta o mapa da perda de solo para cada sub-bacia nesse cenário. É importante ressaltar que a perda de solo na sub-bacia é diferente da produção de sedimentos. A produção de sedimentos apresentada nos gráficos anteriormente considera o desprendimento, o transporte e a sedimentação e é calculada pela MUSLE, levando em consideração o escoamento. Como o modelo superestimou e subestimou alguns pontos de vazão, optou-se por fazer o gráfico da perda de sedimentos, que é quanto o solo perde no plano por hectares e é calculada por outras equações existentes no modelo levando em conta outros fatores como o tipo do solo, o uso do solo e a declividade.

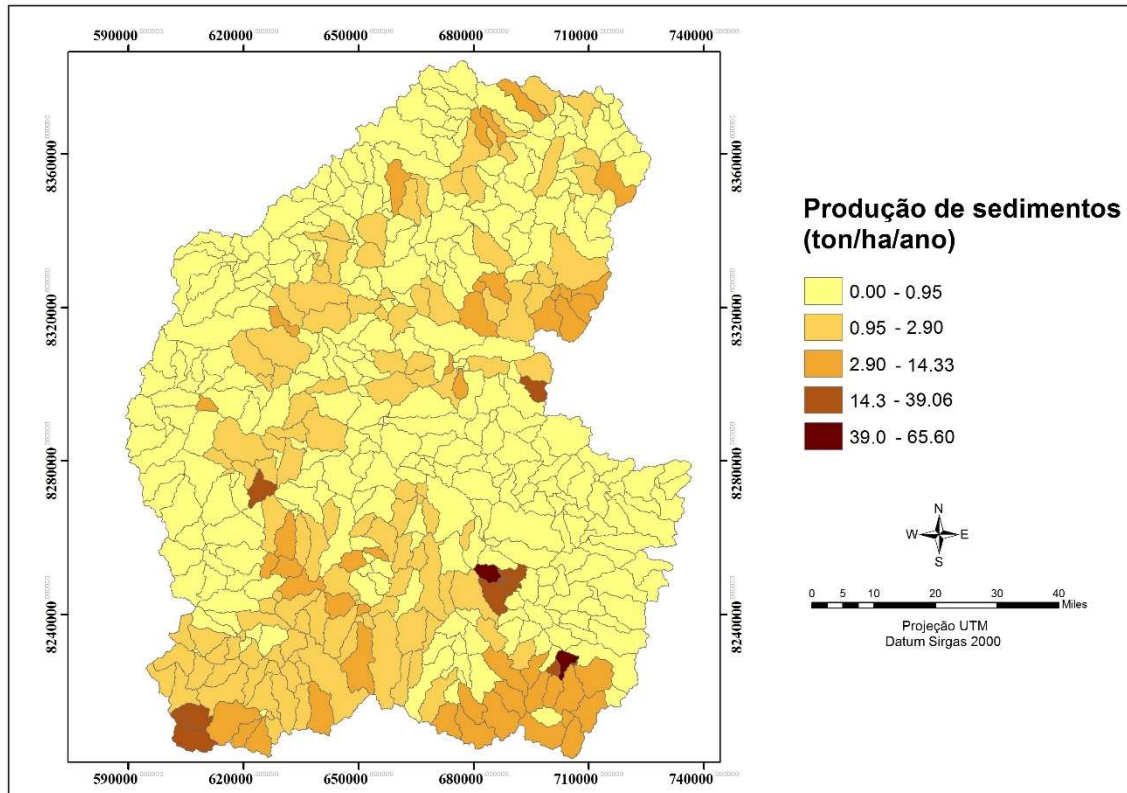


Figura 26 - Distribuição espacial da perda de solo nas sub-bacias para o cenário 3.

Pode-se observar que a perda de solo varia de 0 a 65,6 ton/ha/ano, mas que tem uma perda semelhante para toda a sub-bacia. Comparando o mapa de perda de solo com a classificação do uso do solo apresentado na Figura 19, nota-se que as regiões com maior perda de solo foram as com maior concentração de áreas voltadas a agricultura.

As sub-bacias 210, 281, 363, 373, 379, 383, 454, 463, 487 e 502 foram as que apresentaram maior perda de solo na bacia variando de 14,3 a 65,50 ton/ha.ano. Todas elas apresentaram as mesmas características predominantes de solo, tendo a agricultura como principal uso, o tipo de solo é o cambissolo e a declividade variando de 1 a 10%.

4.7 Balanço hídrico da bacia do rio das Almas

Após a análise da simulação do SWAT para os dois cenários, o modelo gerou uma estimativa do balanço hídrico médio anual que pode ser visto através do SWAT Check. Na Figura 27 é apresentado o esquema do balanço hídrico para a melhor parametrização na representação da bacia.

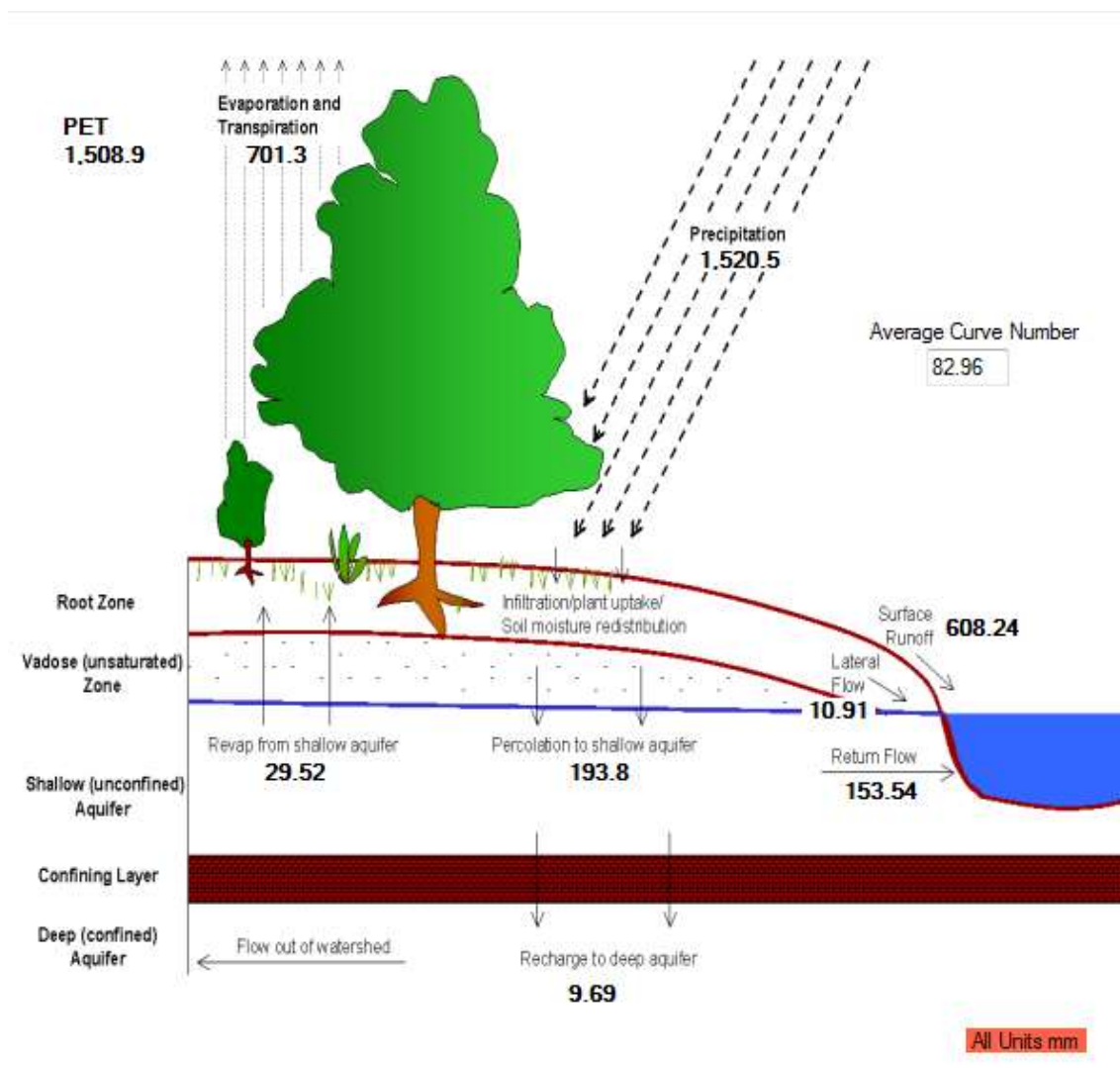


Figura 27 - Representação dos processos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio das Almas pelo SWAT.

Na simulação do balanço hídrico da bacia, o modelo apresentou uma precipitação média anual de 1520,54 mm. A evapotranspiração real foi estimada em 701,3 mm, enquanto a evapotranspiração potencial na bacia é de 1508,9 mm. Obteve-se que 608,24 mm da precipitação foi convertida em escoamento superficial, 10,91 mm em escoamento sub-superficial e 153,54 em fluxo de base que descarga no aquífero. Além disso, apresentou 193,8 mm disponível para a percolação e 9,69 mm para recarga do aquífero profundo. A capilaridade foi de 29,52 mm e a média da curva número apresentado foi de 82,96.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do modelo SWAT sem calibração não conseguiu reproduzir de forma satisfatória o comportamento da bacia, mostrando uma tendência do modelo em superestimar as vazões de pico nos meses chuvosos e subestimar as vazões de base em épocas secas. Assim, foi preciso um ajuste dos parâmetros mais sensíveis ao modelo para que se atingissem os resultados esperados por meio da calibração. Os parâmetros encontrados como mais influentes no modelo apresentaram coerência e foram similares aos obtidos em outros estudos para bacias do bioma cerrado.

O dado de entrada do uso do solo tem impacto direto na calibração do modelo. Aplicando a calibração automática para os cenários 1 e 2 sob as mesmas condições climáticas e diferentes usos o solo, o cenário 1 apresentou a melhor parametrização obtida para representar a bacia. No cenário 1, mesmo subestimando levemente o volume do escoamento, a modelagem representou bem o escoamento de base para todo o período e mesmo não alcançando alguns picos de vazão, seguiu a tendência da vazão observada. No cenário 2 pôde-se observar que apesar da calibração representar bem seu período ela não foi representativa para as características da bacia no período de validação.

O modelo com a parametrização do cenário 1 tem representatividade para toda a área de estudo, visto que analisando espacialmente o escoamento superficial, o modelo apresentou bons resultados ao comparar os dados simulados e observados em outro ponto, na sub-bacia de Jaraguá. Também foi possível verificar que a modelagem tem representatividade sob diferentes usos do solo, considerando que o cenário 3 para essa parametrização apresentou resultados satisfatórios em seus coeficientes estatísticos de análise.

Com relação a estimativa da produção de sedimentos, observa-se que existe uma relação entre o comportamento da precipitação, vazão e sedimentos. Apesar de apresentar uma perda de solo similar na extensão da bacia, as sub-bacias que apresentam predominância em agricultura, cambissolo e declividade variando de 0 a 10% apresentaram os pontos com maior perda de solo na região. Os resultados obtidos para produção de sedimentos não puderam ser comparados aos dados reais devido a falta de dados observados relativos aos sedimentos na bacia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C. 2011. **SWAT-CUP2009: SWAT Calibration and Uncertainty Programs – a user manual**. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology*, Duebendorf, Switzerland, 95 p.
- ABBASPOUR, K.C. 2015. **SWAT-CUP2012: 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, 100p.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. **An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system**. Journal of Hydrology, v.87, p.45–59.1986.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements**. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, Roma, p.300, 1998.
- 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**. 2012. American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Transactions of the ASABE*, v. 55(4), p. 1491-1508.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. **Large area hydrologic modeling and assessment: Part I: Model development**. 1998. Journal of the American Water Resources Association, v. 34, n. 1, 1998, p. 73-89.
- BEVEN, K. J., AND KIRKBY, M. J. **A physically-based variable contributing area model of basin hydrology**. Hydrology Science Bulletin, v.24, p.43– 69. 1979
- BONUMÁ, N. B. **Modelagem do escoamento, da produção de sedimentos e da transferência de fósforo em bacia rural no sul do Brasil**. 2011. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 136 p.

BORDAS, M.P.; SEMMELMANN, F.R. **Elementos de engenharia de sedimentos**. In: TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFGS; São Paulo: USP/ABRH, 1993. p.915-43.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MEDIONDO, E. M. **Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects**. Int J Agric & Biol Eng. v. 8, n. 3, Julho de 2015.

CALDAS, A. L. R. **Método de diagnóstico para gestão participativa de recursos hídricos: Estudo de caso e modelagem conceitual como com enfoque DPSIR**. Tese de Doutorado. Setembro de 2012 Universidade Federal de Goiás – UFG, Doutorado em Ciências Ambientais – CIAMB p. 35

CARDOSO, M. R. D; MARCUZZO, F. F. N; BARROS, J. R. **Classificação Climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal**. ACTA Geográfica, Boa Vista, v.8, n.16, jan./mar. de 2014. pp.40-55

CARNEIRO, T. G. S. **Modelagem Ambiental: Ferramenta para Definição de Políticas Públicas**. 2009. Universidade Federal de Ouro Preto. Laboratório INPE/UFOP para Simulação e Modelagem dos Sistemas Terrestres.

CARVALHO, F. H. **Uso do modelo SWAT na estimativa da vazão e da produção de sedimentos em bacia agrícola do Cerrado brasileiro**. Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2014, 154p. Dissertação de Mestrado.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental), Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2013.

CHRISTOFOLETTI, A. 1999. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher. 236 pp.

FERRIGO, S. 2011. **Utilização do modelo SWAT na estimativa de produção de sedimentos na bacia do córrego capão comprido no Distrito Federal**. Trabalho de Conclusão do Curso, Instituto de Agronomia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC. 90 p.

FERRIGO, S. 2014. **Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto – DF.**

Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 147 p.

FUKUNAGA, D. C., **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo.** Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. JERÔNIMO MONTEIRO – ES. 2012 . 98f.: il.

GASSMAN, P. W; REYES, M. R; GREEN, C. H; ARNOLD, J. G. 2007. **The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions.** American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol. 50(4): pp. 1211-1250.

GREEN, W. H. e AMPT, G. A. 1911.. Studies on soil physics, 1. **The flow of air and water through soils.** The Journal of Agricultural Science, v. 4(1), p. 1-24.

HARGREAVES, G.H. AND Z.A. SAMANI. 1982. **Estimating potential evapotranspiration.** Tech. Note, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 108(3), p. 225-230.

KAISER, I. M. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos.** 2006. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos. 273p.

KNISEL, W.G. 1980. **CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems.** Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA National Resources Conservation Service.

LIERSCH, S. 2003. The **Program pcpSTAT – User’s Manual.** Disponível em: <http://swat.tamu.edu/software/links-to-related-software/>.

LEONARD, R. A., KNISEL, W. G.; STILL, D. A. (1987) **GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems.** *Transactions of the ASABE*, v. 30(5), p. 1403-1418.

LIMA, J. E. F. W. 2010. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 312p.

LIMA, J. E. F. W. **Situação e perspectiva sobre as águas do cerrado**. Ciência e Cultura, vol. No 3. *On-line version* ISSN 2317-6660. São Paulo, Julho de 2011.

McCULLOCH, J.S.G.; ROBINSON, M. **History of forest hydrology**. Journal of Hydrology, 150:189-216, 1993.

MEDEIROS, I. C. **Modelagem do balanço hídrico da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 106p.

MONTEITH, J.L. 1965. **Evaporation and the environment**. In The state and movement of water in living organisms, XIXth Symposium. Soc. For Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press, p. 205-234.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n.3, 2007.885-900p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation - Version 2009**. Agricultural Research Service. Texas A&M University System, 2011. 618 p.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R. & WILLIAMS, J.R. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - version 2005**. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 2005. 494p.

NRCS. Natural Resources Conservation Service. **Chapter 7: Hydrologic Soil Groups**. In: NRCS. Natural Resources Conservation Service. National Engineering Handbooks Hydrology Chapters (Part 630). Washington, DC: USDA, 2009, p. 1-5.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) –

Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

PERH. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás**. Setembro de 2015.

PINTO, N. L. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. Edgard Blücher, São Paulo. 1976. 278 p.

PRIESTLEY, C.H.B. AND R.J. TAYLOR. 1972. **On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters**. Monthly Weather Review, v. 100, p. 81- 92.

RALLISON, R. E.; MILLER, N. **Past, present and future SCS runoff procedure**. P. 353-364. In V.P. Singh (ed.). Rainfall runoff relationship. Water Resources Publication, Littleton, CO. 1981.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L.; SAXTON, K. E. **Estimation of Soil Water Properties**. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, v. 25, n. 5, 1982, p. 1316-1328.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas - relatório técnico parcial. MCT/INPE. São José dos Campos: INPE, 2000. 60p.

SALLES, L. 2012. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, p. 130.

SALTER, P. J.; WILLIAMS, J. B. **The influence of texture on the moisture characteristics of soils. IV: A method of estimating the available-water capacities of profiles in the field**. Journal of Soil Science, v. 18, n. 1, 1967, p. 174-181.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco – Brasil)**. 205f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SANTOS, S.; MONTEIRO, A.; MOURATO, S.; FERNANDEZ, P. **Os sistemas de informação geográfica na modelagem hidrológica**. In: Congresso Nacional de Tecnologias de la información geográfica, 12, 2006, Granada, Espanha. p. 465-479.

SANTOS, J. Y. G.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Aplicação do modelo SWAT para estimativa da produção de sedimentos na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. 2014.

SEVAT, E.; DEZETTER, A. **Selection of calibration objective functions in the context of rainfall-runoff modeling in a Sudanese savannah area.** Hydrological Sciences Journal, London, v. 36, n. 4, p. 307-330. 1991.

SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. 1990. **EPIC – Erosion productivity impact calculator: Model Documentation.** Washington: U.S: Department of Agriculture, 145p.

SILVA, R. M; SANTOS, C. A. G. Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, V. 12, n. 5, p. 520-526, 2008.

SILVEIRA, I. A; PESSOA, O. A. A.; FLORES, S. B. L. **Análise geomorfológica do município de Pirenópolis no estado de Goiás utilizando Sistema de Informação Geográfica.** XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 2009.

SINGH, V.P.; WOOLHISER, D.A. 2002. **Mathematical modeling of watershed hydrology.** Journal of hydrological engineering, v.7, n.4, p. 270-292. 2002

STEYAERT, L.T. **A perspective on the state of environmental simulation modeling.** In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. Environmental modeling with GIS. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 3, p. 16-30.

TEIXEIRA NETO, A. 2006. **Pequena história da agropecuária goiana.** Observatório Geográfico de Goiás. Disponível em:<https://observatoriogeogoiias.iesa.ufg.br/up/215/o/teixeira_net_ant_nio_pequena_hist_a_gropecu_ria.pdf>. Acesso em:12/10/2018.

TSVETSINSKAYA, E. A.; SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; DICKINSON, R. E.; ZENG, X.; LUCHT, W. **Relating MODIS-derived surface albedo to soils and rock types over Northern Africa and the Arabian peninsula.** Geophysical Research Letters, v. 29, n. 9, 2002, p. 67-1-67-4.

TUCCI, C.E.M. 1998. **Modelos Hidrológicos.** Porto alegre – RS. Ed. Universidade UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 652p.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. Dissertação de Mestrado, Instituto de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 130p.

VISSMAN, JR. W.; LEWIS, G. L. 2002. **Introduction to Hydrology**. Ed. 5. Pearson Education, Inc. p. 612.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor, In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. Washington D.C.: USDA, 1975, p. 244–252.

WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. 1984. **The EPIC model and its application**. Proc., ICRISAT-IBSNAT-SYSS Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer, 111–121.

WHITE, M. J; HARMEL, R. D.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. **SWAT Check: A Screening Tool to Assist Users in the Identification of Potential Model Application Problems**. Journal of Environmental Quality, EUA, 2012.