



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THAISE SUANNE GUIMARÃES FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIACHO MIMOSO –
PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Caruaru

2019

THAISE SUANNE GUIMARÃES FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIACHO MIMOSO –
PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

F383m Ferreira, Thaise Suanne Guimarães.
Modelagem hidrológica da bacia do Riacho mimoso - Pernambuco utilizando o Modelo Swat. / Thaise Suanne Guimarães Ferreira. – 2019.
78 f. il. : 30 cm.

Orientador: José Almir Cirilo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Semiárido. 2. Balanço hidrológico. 3. Barragens e açudes. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Título.

CDD 620 (23. ed.) UFPE (CAA 2019-002)

THAISE SUANNE GUIMARÃES FERREIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIACHO MIMOSO –
PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade
Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito
para a disciplina Trabalho de Conclusão de
Curso II.

Área de concentração: Recursos Hídricos

A banca composta pelos professores abaixo, considera a aluna THAISE SUANNE
GUIMARÃES FERREIRA APROVADA COM NOTA _____.

Caruaru, 14 de janeiro de 2019.

Banca examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Dr. Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Elder Alpes de Vasconcelos _____

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

À minha mãe, Tânia Maria, por todo amor e incentivo durante todos os meus anos de vida. Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser guia e companheiro em todos os momentos, mostrando que tudo é possível para aquele que crê.

À minha pessoa favorita e dona de todo amor que há em mim, minha mãe, Tânia Maria, por tantos motivos que palavras nunca seriam o bastante. Sinto-me privilegiada e honrada em ser filha de uma pessoa exemplo de força e bondade. À minha irmã, Tâmilly Suelen, por ser colo e razão que me motivam a crescer.

À minha avó (In Memoriam), por sempre estar presente.

Às minhas tias, por todo amor e incentivo nessa jornada. À minha família, pelas orações e confiança depositadas.

Às melhores irmãs de coração que a vida poderia ter me dado, Bruna Cordeiro, Emanuele Santos, Maryane Cordeiro e Sabrina Bezerra, pelos longos anos de amizade, por serem porto seguro, por me aceitarem e incentivarem a ser melhor, por todas as vezes que em meio aos meus desesperos com a faculdade me confortaram, por acreditarem mais em mim do que eu mesma.

Aos maiores presentes que a graduação trouxe, Lucas Caitano e Sabrina Corrêa, por me permitirem participar de suas vidas, pelas risadas em meio aos sufocos, pelo companheirismo, pelos conselhos, por serem as razões pelas quais ainda há sanidade em mim. Amo-os infinitamente.

À “cirilete” Maria Alice, pela parceria e amizade nesse último ano de graduação. Aos amigos Ariely, Bruno, Deborah, Eylla, Evaldo, Elyfas, Flaviane, Gabyzete, Heglantini, Julia, Lucas, Manuelle, Mariana, Pedro, Raquel, Raiane, Rodrigo, Thaciana e Weberton por serem as melhores pessoas do mundo.

Ao meu orientador, Prof. D.Sc. José Almir Cirilo, pela oportunidade e confiança, pelo exemplo e inspiração como profissional e pessoa, pela imensurável contribuição em minha formação, e pela paciência e disposição na realização desse trabalho.

A todos os professores do curso, pelos conhecimentos e dedicação.

Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento, por todo o tempo de convívio, risadas e companheirismo, em especial a Edmilton, pelo suporte e parceria desde o início desse grupo.

À todos aqueles que compõe o Campus Agreste, por sua contribuição na interiorização da educação pública superior de qualidade.

“You must do the thing you think you cannot do.” (Eleanor Roosevelt)

RESUMO

A escassez hídrica no semiárido brasileiro compromete o desenvolvimento econômico e social da região. Dessa forma, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem a tomada de decisão quanto ao uso dos recursos hídricos torna-se extremamente crucial. Modelos matemáticos que simulam os comportamentos hidrológicos e a produção de sedimentos apresentam grande potencial de utilização para esse fim. Este trabalho tem por objetivo a modelagem dos processos hidrossedimentológicos da bacia do Riacho Mimoso, em Pernambuco, utilizando o modelo SWAT e definição das vazões de recarga das barragens subterrâneas Fundão I, Cafundó I e Cafundó II, localizadas na mesma bacia. Dados tabulares de precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação do período de 2007 a 2017 foram utilizados, sendo os anos de 2007 a 2009 utilizados para aquecimento do modelo. Além também, de dados georreferenciados de elevação, do tipo e uso e cobertura do solo. A aplicabilidade do modelo foi avaliada através dos resultados hidrológicos e sedimentológicos simulados pelo mesmo, representados pelo balanço hídrico, sem a utilização da calibração por ainda não se dispor de estação fluviométrica para isso. Os resultados obtidos para a precipitação anual média foi de 342.6 mm. O valor da Curva Número (CN) médio foi de 74.72, alto quando se analisa o escoamento superficial simulado de 14.76 mm, porém a expressiva contribuição do escoamento lateral (111 mm) demonstra a tendência ao escoamento sub-superficial da bacia, o que explica o valor. Os valores de vazão Q5 (valor é ultrapassado em apenas 5% do tempo) de 0.5 m³/s para as barragens de Cafundó I e II e 0.2 m³/s para Fundão II. Os dados demonstraram a eficiência e robustez do modelo, porém a medição de vazão ao longo do riacho poderá melhorar os resultados na medida que será possível a realização da calibração e validação do modelo.

Palavras-chaves: Semiárido. Balanço hídrico. Barragens subterrâneas.

ABSTRACT

The water scarcity in the Brazilian's semi-arid compromises the economic and social development of the region. In this way, the development of tools that helping make decisions regarding the use of water resources becomes extremely crucial. Mathematical models that simulate hydrological behavior and the production of sediments present great potential of use for this purpose. The objective of this work is the modeling of the hydrosedimentological processes of the Riacho Mimoso basin, in Pernambuco, using the SWAT model and definition of the recharge flows of the Fundão I, Cafundó I and Cafundó II underground dams, located in the same basin. Tabular data on precipitation, temperature, relative humidity, wind speed and radiation from the period 2007 to 2017 were used, and the years 2007 to 2009 were used for warm up. In addition, georeferenced elevation data, type and use and land cover. The applicability of the model was evaluated through the hydrological and sedimentological results simulated by the model, represented by the water balance, without the use of the calibration. The results obtained for the mean annual precipitation were 342.6 mm. The value of the mean Curve Number (CN) was 74.72, high, when the simulated surface runoff of 14.76 mm is analyzed, but the significant contribution of lateral flow (111 mm) shows the tendency to sub-surface flow of the basin, which explains the value. The flow values Q5 (value is exceeded in only 5% of the time) were $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ for the Cafundó I and II dams and $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ for Fundão II. The data demonstrated the efficiency and robustness of the model, but the measurement of flow along the stream can improve the results as the calibration and validation of the model will be possible.

Keywords: Semiarid. Hydric balance. Underground dams

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico.	23
Figura 2 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT.	32
Figura 3 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso no estado de Pernambuco.	46
Figura 4 - Mapa dos tipos de solo, definidos pela Embrapa, inseridos na bacia do Riacho Mimoso.	49
Figura 5 - Mapa de altitude da bacia do Riacho Mimoso.	50
Figura 6 - Mapa do uso e cobertura do solo na bacia do Riacho Mimoso.	51
Figura 7 - Mapa de delimitação da bacia, sub-bacias e rede de rios do Riacho Mimoso.	54
Figura 8 - Mapa de classes de declividade, adaptadas de Embrapa (1979), para a bacia do Riacho Mimoso.	55
Figura 9 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Jataúba.	60
Figura 10 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Sanharó.	60
Figura 11 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Brejo da Madre de Deus.	61
Figura 12 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Poção.	61
Figura 13 - Comportamento mensal da precipitação simulado pelo modelo SWAT para os anos de 2010 a 2013.	64
Figura 14 - Comportamento mensal da precipitação simulado pelo modelo SWAT para os anos de 2014 a 2017.	64
Figura 15 - Hidrograma das vazões simuladas pelo SWAT para cada sub-bacia.	65
Figura 16 - Mapa da distribuição do escoamento superficial entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.	66
Figura 17 - Mapa de distribuição da evapotranspiração real entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.	66
Figura 18 - Mapa da distribuição da capacidade de armazenamento do aquífero profundo entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.	67
Figura 19 - Mapa de distribuição da erosão do solo entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.	67
Figura 20 - Mapa de localização das barragens subterrânea dentro da Bacia do Riacho Mimoso.	68

Figura 21 - Curva de Permanência para as barragens subterrâneas Cafundó I e II.	69
Figura 22 - Curva de Permanência para a barragem subterrânea de Fundão II.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Precipitação média mensal (PRE) da região em estudo (PE). Médias mensais para um período de dois anos.....	47
Tabela 2 - Informações das estações plúviométricas utilizadas no estudo.	52
Tabela 3 - Dados climáticos para a estação de Caruaru.....	53
Tabela 4 - Classes de declividade, adaptadas de Embrapa (1979) e seus valores referentes de área na bacia do Riacho Mimoso.....	54
Tabela 5 - Tipos de solo com seus respectivos valores de área na bacia do Riacho Mimoso.	56
Tabela 6 - Parâmetros do solo tipo PVA utilizados para a simulação do SWAT.	56
Tabela 7 - Parâmetros do solo tipo RY utilizados para a simulação do SWAT.....	57
Tabela 8 - Parâmetros do solo tipo RL utilizados para a simulação do SWAT.	57
Tabela 9 - Parâmetros do solo tipo RR utilizados para a simulação do SWAT.....	58
Tabela 10 - Parâmetros do solo tipo SX utilizados para a simulação do SWAT.	58
Tabela 11 - Valores de área das classes de cobertura dos solos considerados para a bacia e seus equivalentes no banco de dados do SWAT.	59
Tabela 12 - Número de HRUs por sub-bacia do Riacho Mimoso.....	62
Tabela 13 - Resultados dos processos hidrossedimentológicos simulados pelo modelo SWAT para a Bacia do Riacho Mimoso.....	63
Tabela 14 - Vazões máximas simuladas por sub-bacia.	65

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANION_EXC	Porosidade
BSh	Clima semiárido extremamente quente de estepe
CN	Curva Número
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)
CH_N2	Coefficiente de Mannig do canal principal ($s/m^{1/3}$)
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
D-8	Algoritmo de oito direções
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho
Dp	Desvio padrão
EPCO	Fator de compensação de águas pelas plantas (adimensional)
EPIC	<i>Erosion-Productivity Impact Calculator</i>
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
H ₂ O	Molécula da água
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MEUPS	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
MDE	Modelo digital de elevação
MDT	Modelo digital de terreno
NRCS	<i>Natural Resource Conservation Service</i>
PCPD	Número de dias de precipitação
PCPMM	Precipitação média mensal
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação máxima
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
QSWAT	Interface do SWAT para o <i>Quantum GIS</i>
R ²	Coefficiente de Determinação
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 hora (mm)

REVAP	Volume devido a ascensão de água na franja capilar devido a evapora
Revapmn	Profundidade limite de água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)
ROTO	<i>Routing Outputs to Outlet</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOL_ALB	Albedo
SOL_AWC	Água disponível no solo
SOL_BD	Densidade aparente
SOL_CBN	Carbono orgânico
SOL_CLAY	Percentagem de argila
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada
SOL_ROCK	Cascalho
SOL_SAND	Areia
SOL_SILT	Silte
SOL_Z	Profundidade da camada
SOL_ZMX	Profundidade da raiz
SOLARAV	Radiação solar
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWRRB	<i>Simulator for Water Resources in Rural Basin</i>
TMPMN	Temperatura mínima
TMPMX	Temperatura máxima
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima
HRU	Unidades de resposta hidrológica
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
USDA-ARS	<i>United States Department of Agriculture -Agriculture Research Service</i>
USLE_K	Erodibilidade
WNSAV	Velocidade do vento
ZAPE	Zoneamento Agroecológico de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

SW_t	Quantidade de água no solo no fim do dia (mm)
SW_0	Quantidade de água no início do dia (mm)
t	Tempo (dias)
P_d	Precipitação no dia (mm)
Q_{sup}	Escoamento superficial (mm)
E_a	Quantidade de água que evapotranspirou no dia (mm)
w_{vad}	Quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm)
Q_{sub}	Quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm)
P	Precipitação (mm)
S	Capacidade máxima de armazenamento (mm)
t_{con}	Tempo de concentração
$t_{c,sup}$	Tempo de concentração do fluxo superficial
$t_{c,can}$	Tempo de concentração do fluxo através do canal
n	Coefficiente de rugosidade de <i>Manning</i>
slp	Declividade média da sub-bacia (m/m)
L	Comprimento do canal (km)
A	Área da sub-bacia (km ²)
slp_{can}	Declividade média do canal (mm)
IAF	Índice de área foliar para determinado dia
IAF_{max}	Índice de área foliar para um determinado dia
E_0	Evapotranspiração potencial (mm)
$E_{solo,z}$	Demanda evaporativa (mm) na profundidade z
E_z^n	Evaporação máxima do solo para o dia (mm)
z	Profundidade do solo (mm)
$Esco$	Coefficiente de compensação da evaporação do solo
$SW_{cam,excesso}$	Quantidade de água disponível para percolar no dia (mm)
SW_{cam}	Quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm)
$w_{perc,cam}$	Quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm)
ΔT	Duração do intervalo de tempo (h)
TT_{perc}	Tempo de percolação entre as camadas (h)

Q_{lat}	Escoamento lateral (mm/dia)
ϕ_d	Porosidade drenável do solo (mm/mm)
W_{rec}	Quantidade de água que adentra os aquíferos no dia “i” (mm)
δ_{aq}	Tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia)
W_{seep}	Quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm)
$W_{rec,i-1}$	Quantidade de água que entre no aquífero no dia i-1 (mm)
W_{prf}	Quantidade de água que entra no aquífero profundo no dia i (mm)
β_{prf}	Coefficiente de percolação do aquífero
$W_{rec,rs}$	Quantidade de água que entra no aquífero raso no dia “i” (mm)
$W_{revap,max}$	Máxima quantidade de água que ascende em resposta ao déficit hídrico
β_{rev}	Coefficiente de Revap
Revap	Volume de água ascendente através das franjas capilares, em função da demanda de evapotranspiração
sed	Produção de sedimentos, após evento de precipitação do dia (ton)
q_{pico}	Taxa de escoamento e pico (m ³ /s)
$\acute{a}rea_{URH}$	Área da unidade de resposta hidrológica na qual a produção de sedimentos é estimada (ha)
K_{EUPS}	Fator de erodibilidade do solo ($t h/MJ mm$)
C_{EUPS}	Fator de uso e manejo do solo
LS_{EUPS}	Fator topográfico
CFRG	Fator de fragmentação esparsa
α_{tc}	Fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração
f_{csand}	Fator que representa o conteúdo de areia grossa
f_{cl-si}	Fator que representa a fração de solo que contém argila e silte
f_{orgC}	Estimativa da contribuição do carbono orgânico
f_{hisand}	Representa o conteúdo de areia fina
m_s	Fração de areia (diâmetros de 0,05 – 2 mm)
m_{silt}	Fração de silte (diâmetros de 0,002 – 0,05 mm)
m_c	Fração de argila (diâmetros < 0,002 mm)
orgC	Percentual de carbono orgânico na camada do solo
rochas	Fração de área de afloramento rochoso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	20
1.1.1	Objetivos Gerais.....	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	Ciclo Hidrológico	21
2.2	Modelos Hidrológicos.....	23
2.3	Integração entre SIG e modelos hidrológicos	25
2.4	Modelos Hidrológicos com destaque pelo uso.....	27
2.5	Barragens subterrâneas	28
3	MODELO SWAT	30
3.1	Descrição geral	30
3.2	Aplicações	33
3.3	Equações	34
3.3.1	Balanço Hídrico	34
3.3.2	Escoamento Superficial	35
3.3.3	Vazão de pico.....	36
3.3.4	Evapotranspiração	37
3.3.5	Armazenamento na copa dos vegetais.....	37
3.3.7	Evaporação do solo	38
3.3.8	Retirada de água pelas plantas	38
3.3.9	Percolação.....	39
3.3.10	Escoamento sub-superficial lateral.....	40
3.3.11	Água Subterrânea	40
3.3.12	Volume de água ascendente através da franja capilar (REVAP).....	41
3.3.13	Crescimento Vegetal	41
3.3.14	Equação Universal da Perda de Solo Modificada	42
3.3.15	Erodibilidade do solo (K)	42
3.3.16	Fator de Uso e Manejo do Solo (C).....	43
3.3.17	Fator topográfico (LS).....	44
3.3.18	Fator de fragmentação esparsa (CFRG)	44

3.4	QSWAT	44
4	MATÉRIAS E MÉTODO	46
4.1	Caracterização da área de estudo.....	46
4.1.1	Localização	46
4.1.2	Características físico-climáticas.....	47
4.1.2.1	<i>Clima</i>	47
4.1.2.2	<i>Geologia e Solos</i>	48
4.1.2.3	<i>Relevo</i>	49
4.1.2.4	<i>Cobertura do solo</i>	50
4.2	Obtenção e pré-processamento dos dados necessários para execução do modelo	52
4.2.1	Precipitação.....	52
4.2.2	Dados climáticos	52
4.2.3	Modelo Digital do Terreno e intervalos de declividade	53
4.2.4	Solo.....	55
4.2.4	Uso e Cobertura do Solo.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1	Análise de consistência	60
5.2	Definição das HRUs.....	62
5.3	Balço hídrico	62
5.4	Estimativa de vazões nas barragens subterrâneas	68
6	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por água tem aumentado anualmente, devido a fatores como o crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças nos padrões de consumo, entre outros, e continuará a aumentar significativamente durante as próximas décadas. O uso da água no mundo aumentou em seis vezes ao longo dos últimos 100 anos (WADA et al., 2016) e continua crescendo de forma constante, com uma taxa em torno de 1% ao ano, segundo a Unesco (2018).

O consumo de água das residências e das indústrias aumentará com maior rapidez do que o consumo da agricultura, mesmo que o setor agrícola ainda continue sendo o com maior consumo em termos gerais. Esse aumento da demanda por água acontecerá especialmente em países com economias em desenvolvimento ou emergentes.

Simultaneamente, o ciclo hídrico mundial se intensifica devido à mudança climática, com a tendência de regiões já úmidas ou secas apresentarem situações cada vez mais extremas. No momento atual, estima-se que 3,6 bilhões de pessoas (quase metade da população mundial) vivam em áreas que apresentem uma potencial escassez de água por pelo menos um mês por ano, e essa população poderá aumentar para algo entre 4,8 bilhões e 5,7 bilhões até 2050 (UNESCO, 2018).

Pela sua dimensão continental e localização tropical e equatorial, o Brasil é o país que dispõe de maior quantidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Entretanto, a água está distribuída de forma desigual nas bacias hidrográficas do país. Em torno de 80% da água superficial brasileira agrupa-se na Região Hidrográfica Amazônica, que possui baixa densidade demográfica e por assim ser, pouca demanda por uso de água.

Entre 2003 e 2016, cerca de 50% (2.783) dos municípios brasileiros decretaram Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública devido à seca ou estiagem (ANA, 2017). De 2013 a 2016, 48 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, sendo quantificados 4.824 eventos de seca associados a danos humanos (ANA, 2017). O ano de 2016 foi classificado como o mais crítico quanto aos impactos da seca sobre a população.

O histórico de longos e frequentes períodos de estiagem na região Nordeste do Brasil é acompanhado de sérias consequências para a população. Em tempos de seca o que ocorre é a drástica diminuição e concentração, seja espacial ou temporal, da precipitação pluviométrica anual. As durações prolongadas desses períodos comprometem a produção agrícola, debilita a

pecuária e exaure as reservas de água superficiais. Colocado dessa forma, é visto que a população rural difusa é inteiramente vulnerável a esse fenômeno.

O correto aproveitamento dos recursos hídricos, já escassos, no semiárido da região é de extrema importância para a superação da situação de subdesenvolvimento econômico e social. É nesse contexto que se faz necessário o surgimento de tecnologias alternativas para armazenamento de água. Uma delas é a barragem subterrânea. Trata-se de uma obra de simples implantação e operação e de baixo custo, cuja finalidade é o armazenamento de água nos vazios do solo aluvial.

Para garantir o sucesso na implantação e operação das barragens subterrâneas é essencial conhecer como ocorre a recarga das aluviões das barragens pelo escoamento superficial provocado pelas chuvas sobre a bacia hidrográfica. Nesse sentido, a modelagem hidrológica é uma ferramenta relevante para o manejo adequado das águas em uma bacia hidrográfica, podendo ser utilizado para estimar a produção de sedimentos, fazer previsões de vazão e ainda analisar as respostas hidrológicas da bacia em face das mudanças de uso e ocupação do solo.

Os modelos hidrológicos são limitados pela qualidade e quantidade dos dados hidrológicos disponíveis para sua parametrização, ademais a dificuldade em expressar matematicamente alguns processos no ciclo hidrossedimentológico. Visto isso, modelos que se baseiam nos processos físicos do ciclo hidrológico vêm ganhando destaque, proporcionando resultados condizentes com a realidade.

Entre os modelos existentes, destaca-se o modelo SWAT (*Soil And Water Assessment Tool*), criado pelo USDA-ARS (*United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*), sendo bastante aplicado em diversas partes do mundo para simulação de bacias hidrográficas, inclusive em diversas regiões do Brasil (GASSMAN et al., 2007; DOUGLASMANKIN et al., 2010; TUPPAD et al., 2011; GARBOSSA et al., 2011; ARAGÃO et al., 2013; SANTOS et al., 2014)

O SWAT é um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso do solo em bacias hidrográficas de diferentes escalas (ARNOLD et al., 2012). A vinculação a um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) faz com que seja possível a consideração da oscilação espacial das propriedades físicas das bacias. O modelo foi desenvolvido para prever o impacto das práticas de manejo da terra na produção de água, sedimentos e produtos químicos agrícolas em grandes bacias hidrográficas complexas

com diferentes solos, uso da terra e condições de manejo durante longos períodos de tempo (NEITSCH et al., 2011).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo central a realização da modelagem hidrológica da Bacia do Riacho Mimoso por meio do modelo hidrossedimentológico SWAT, visando a compreensão dos processos de recarga dos solos aluviais das barragens subterrâneas presentes na bacia. O conhecimento desse regime possibilitará o aconselhamento quanto ao uso adequado dos recursos hídricos para a comunidade que utiliza a água proveniente das barragens subterrâneas.

1.1.2 Objetivos Específicos

A partir do banco de dados necessário para implementação e execução do SWAT, na região da Bacia Hidrográfica do Riacho Mimoso, no estado de Pernambuco, a pesquisa teve como objetivos específicos:

- Simular os processos hidrossedimentológicos na Bacia do Riacho Mimoso;
- Determinar as vazões de recarga das barragens subterrâneas de interesse.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo traz os conceitos relevantes encontrados na literatura que servem como base teórica para o trabalho, abordando os seguintes temas: ciclo hidrológico, modelos hidrológicos, integração entre SIG e modelos hidrológicos, alguns modelos hidrológicos de destaque por suas aplicações e barragens subterrâneas.

2.1 Ciclo Hidrológico

Em sua conceituação, o ciclo hidrológico é associado ao movimento e troca de água em seus variados estados físicos, que se sucedem na hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Segundo Tucci (2009), trata-se de um fenômeno global de fluxo fechado da água entre a superfície e a atmosfera, estimulado pela associação da energia solar à gravidade e à rotação terrestre.

Dentre as causas que influenciam na existência de uma grande variabilidade nas ocorrências do ciclo hidrológico, em torno de toda superfície do globo, podem ser citadas: a discrepância da intensidade dos raios solares nos diferentes lugares, a diferença de comportamento térmico entre os continentes e oceanos, quantidade de vapor de água, a diversidade de solos e coberturas vegetais, o ozônio e o CO₂ contidos na atmosfera, e a atuação da inclinação e rotação do eixo da Terra na movimentação atmosférica.

Inicia-se a descrição do ciclo hidrológico tendo como fator base o vapor de água existente na atmosfera que, conforme condições meteorológicas estabelecidas, condensa-se e forma minúsculas gotículas que ficam suspensas no ar por causa da turbulência natural. A junção dessas com o vapor de água, e circunstanciais partículas de gelo ou poeira, configuram um aerossol chamado de nuvem ou nevoeiro, quando formado junto ao solo. É através desse processo de massas de ar que ocorre a transferência de água relevante da atmosfera para a superfície, conhecida como precipitação.

A forma mais comum de precipitação, a chuva, ocorre quando complexos fenômenos de aglomeração e crescimento das microgotículas em nuvens com umidade considerável (vapor de água) e pontos de condensação (poeira ou gelo), formando uma quantidade considerável de gotas com peso e tamanho suficientes para que a gravidade sobrepuje a turbulência normal ou os movimentos progressivos da atmosfera. A precipitação pode dar-se na forma de neve ou

granizo quando o vapor de água se converte diretamente em cristais de gelo, que atingem peso e tamanho suficientes.

Uma parcela da precipitação transforma-se em evaporação ainda durante seu percurso rumo à superfície da Terra. Há regiões onde essa evaporação é considerável, existindo circunstâncias onde essa precipitação é vaporizada totalmente.

Parte do volume precipitado, ao atingir a superfície que possui cobertura vegetal, é interceptado em caules e folhas, onde sofre evaporação. A água que não é armazenada na superfície dos vegetais, seja devido ao alcance de sua capacidade de armazenamento de água ou a ação dos ventos, chega ao solo.

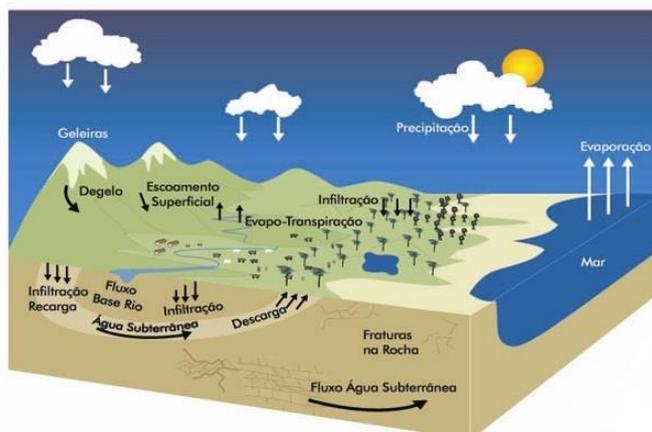
Devido à sua porosidade, toda precipitação que atinge o solo sofre infiltração até a superfície atingir o estado de saturação. A infiltração diminui até uma taxa residual. A partir do instante da saturação superficial do solo e a sequência de saturação a maiores profundidades, o que não é infiltrado gera o escoamento superficial. É a tensão capilar nos poros e a gravidade que comandam a infiltração e percolação no interior do solo. A infiltração contribui para a renovação da umidade do solo, que é aproveitada pelos vegetais, que a absorvem e a devolvem, quase em totalidade, à atmosfera através da transpiração. O que não é aproveitado pelos vegetais contribui para o escoamento de base dos rios através da percolação da água para o lençol freático.

Vencendo o atrito com a superfície do solo, o escoamento superficial é conduzido pela gravidade para as cotas mais baixas. O escoamento superficial manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao microrrelevo do solo. É a erosão das partículas de solo causadas pelos filetes em seus trajetos que moldam a microrrede de drenagem que converge para a rede mais estável de água, formada pelos rios.

O ciclo hidrológico é fechado pela evaporação para a atmosfera. Dependendo da radiação solar, tensões de vapor e influência dos ventos, o que é lançado de volta a atmosfera é a soma da evaporação e da transpiração.

A Figura 1 ilustra os fenômenos envolvidos no ciclo hidrológico.

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2018).

Estabelecida pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, a Política Nacional de Recursos insere normas e princípios para a gestão de recursos hídricos, estabelecendo como objeto de estudo as bacias hidrográficas, existentes em diferentes escalas, que são por definição unidades de estudo e gestão.

Bacias hidrográficas são uma importante unidade espacial utilizadas para gerenciar atividades de uso e conservação dos recursos naturais. Os processos hidrológicos são em termos gerais os responsáveis pelo ciclo hidrológico e, portanto, pela disponibilidade hídrica.

Silveira (2009) afirma que “a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também os infiltrados profundamente”. Os mesmos são considerados os principais processos do ciclo hidrológico, associado a evapotranspiração.

2.2 Modelos Hidrológicos

Modelos são equações matemáticas que pretendem descrever e simular o que ocorre na realidade; há diferentes modelos, que podem ser usados para uma variedade de propósitos, conforme o objetivo que se quer atingir (SOUZA, 2015). A necessidade de representação de processos físicos da natureza em relações analíticas para simulações, proporcionaram o surgimento dos modelos hidrológicos. Segundo a conceituação da Unesco (2005), um modelo hidrológico refere-se a modelagens matemáticas que são utilizadas para prever o escoamento e infiltração de água no solo, além da percolação em aquíferos.

Através da modelagem hidrológica é possível verificar a consistência das informações disponíveis, que são geralmente escassas, apanhadas a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e a calibração dos modelos hidrológicos com base nesses dados nos permite a obtenção de séries sintéticas e serventia dos modelos como instrumentos para aquisição de dados de bacias não monitoradas.

Entretanto, para uma utilização adequada do modelo, é necessário que sua estrutura e limitações sejam compreendidas. Além desses fatos, deve-se ressaltar que muitos modelos necessitam de calibração para que reproduzam o mais próximo possível o fenômeno a ser modelado, uma vez que, devido aos métodos matemáticos utilizados para cada modelo, surge uma série de parâmetros relacionados a estes métodos, que representam as características e os processos físicos da bacia (SANTOS, 2009).

De uma maneira geral, podem ser classificados das seguintes maneiras (TUCCI, 2005):

- Empírico, Conceitual ou de Base Física: modelos empíricos que usam relações matemáticas baseada em observações, não representando os processos físicos e por consequência, são próprios da região e para a condição para os quais foram propostos. São ditos conceituais quando fazem uso de equações empíricas que conseguem descrever o sistema respeitando os processos físicos que dominam aquele fenômeno. Por outro lado, os modelos de base física procuram representar rigorosamente os processos físicos, empregando as principais equações diferenciais do sistema físico, dando um significado a seus parâmetros, que podem ser estimados a partir de medidas reais e devido a isso apresentam grande vantagem de aplicação em áreas de pouco conhecimento, visto que a delegação dos valores dos parâmetros físicos deve ser suficiente para resultar numa simulação razoável.
- Estocástico ou Determinístico: na situação em que uma das variáveis envolvidas na representação da realidade detém conduta aleatória em que se conserva alguma distribuição de probabilidade (em que um mesmo valor de entrada irá gerar diferentes valores de saída, ao acaso), o modelo é dito estocástico. O modelo será definido como determinístico quando gera os mesmos resultados para o mesmo conjunto de entradas, isto é, o comportamento de toda variável é determinado pelas equações que regem o modelo.
- Concentrado ou Distribuído: o que difere o modelo entre concentrado e distribuído é a avaliação da análise espacial que ele representa. É chamado

global um modelo que considera todos os parâmetros de entrada e consequentemente os resultados gerados são característicos da área ou sistema em estudo, isto é, as variáveis espaciais são ignoradas. No modelo distribuído são consideradas as particularidades espaciais de diferentes variáveis, na medida em que são traduzidos diferentes valores de parâmetros representativos de uma determinada área. Modelos distribuídos são, via de regra, conceituais ou de base física na medida em que se faz necessário algum discernimento das propriedades físicas para justificar os valores atribuídos aos parâmetros.

- **Modelo de Evento ou Contínuo:** sistemas naturais são contínuos no tempo, contudo uma representação neste sentido é bastante difícil, fazendo com que os modelos apresentem seus resultados para um determinado intervalo de tempo. O modelo pode ser classificado como de evento quando é indicado para simulações de curto espaço de tempo, que sejam representativas, por exemplo, de um único evento de precipitação. Por outro lado, um modelo contínuo simula os processos durante um amplo período.

De acordo com Tucci (2005), os fundamentais usos para modelos hidrológicos são: favorecer o entendimento dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica; preenchimento de falhas e extensão de séries de vazão; previsão de vazão e previsão de cenários de planejamento perante as consequências de modificações do uso e ocupação do solo – seja no escoamento superficial, erosão do solo ou na vazão do rio. Pode ser feita, ainda, a relação entre os modelos que proporcionam balanço de umidade no solo, mapeamento de áreas propensas à inundações e modelos que são intrínsecos à qualidade de água. Entretanto, uma das principais vantagens dos modelos hidrológicos é a possibilidade de criação de cenários, futuros ou alternativos, levando em consideração o baixo custo e a rapidez no processo que tem capacidade de estimar o comportamento dos fenômenos hidrológicos diante as condições impostas, e dessa forma fornecer informações que auxiliem a tomada de decisão no âmbito da gestão ambiental.

2.3 Integração entre SIG e modelos hidrológicos

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) se inserem como uma ferramenta que possibilita manusear as funções que representam os processos ambientais em várias regiões de forma eficiente, permitindo uma economia de recursos e tempo. O uso dessas ferramentas permite agregar dados de diferentes fontes (modelos de elevação digital, imagens de satélite,

mapas topográficos, mapas de solos, mapas de uso de solo, hidrografia, etc.) e em escalas diferentes. Os resultados geralmente são apresentados em forma de mapas temáticos com as informações desejadas. Deste modo, esses sistemas podem ser encarados como uma tecnologia interdisciplinar que permite a agregação de diferentes ciências, conquanto a localização de algo que seja requisitada (CÂMARA et al., 2001).

A integração do SIG com os modelos hidrológicos e sua aplicação em bacias hidrográficas permitem a realização de um grande número de operações, como projeto, calibração, simulação e comparação entre os modelos.

Atualmente o SIG vem sendo usado extensivamente na área de planejamento e projetos de engenharia de recursos hídricos e, em consequência disso ocorreram várias modificações na forma como essas atividades costumavam ser desenvolvidas (JOHNSON, 2009). Ainda segundo o autor, o fluxo de água em bacias hidrográficas está sujeito à espacialização, dessa forma, o uso do SIG na hidrologia adquiriu motivação e força para se difundir nas mais diversas áreas que envolvem a engenharia de recursos hídricos.

O SIG deverá permitir a integração, numa única base de dados, de informações espaciais provenientes de dados cartográficos, dados demográficos, dados hidrológicos, imagens de satélite, modelos numéricos do terreno, entre outros (MENDES e CIRILO, 2013), agregando a variabilidade espacial considerada nos modelos distribuídos.

Dessa forma, o SIG fornece parâmetros de entrada referentes à distribuição espacial exigidos pelo modelo hidrológico (SAGHAFIAN et al., 2000). Ao fim do processo de simulação, o *software* de geoprocessamento poderá prover meios onde os resultados serão avaliados diante da distribuição executada (PULLAR, 2000). São diversas as abordagens metodológicas que buscam classificar a integração entre SIG e modelos hidrológicos (MELO et al., 2008).

A utilização de SIG, associado aos modelos hidrológicos, é uma das muitas formas de apoiar gestores no processo de tomada de decisão, visto que ela admite um (a):

- Maior facilidade no compartilhamento de informações;
- Análise mais objetiva e um maior entendimento dos resultados, por meio de visualização de imagens, gráficos e tabelas;
- Menor custo para elaboração de saídas gráficas;
- Maior facilidade na identificação de padrões, dentre outros.

Para a gestão de recursos hídricos a interação dos processos de análise habituais com os SIGs representa um avanço inequívoco, na geração de informações mais precisas e com uma

enorme redução do trabalho de aquisição, organização e processamento de dados (MENDES; CIRILO, 2013).

2.4 Modelos Hidrológicos com destaque pelo uso

Como são dependentes de ferramentas computacionais para a sua execução, grande parte dos modelos representa apenas parte dos processos hidrológicos, não sendo prático representar o ciclo hidrológico como um todo (LIMA, 2011).

Segundo Tucci (2005), até à década de 50 os métodos utilizados na hidrologia para quantificação de processos hidrológicos eram os indicadores estatísticos. Com o surgimento dos computadores, surgiram os primeiros modelos hidrológicos que eram os modelos semi-conceituais precipitação-vazão. Dentre os primeiros modelos hidrológicos, os mais conhecidos são o *Streamflow Syntesis and Reservoir Regulation - SSAR* (ROCKWOOD, 1958) e *Stanford IV* (CRAWFORD; LINSLEY, 1966).

Na atualidade, alguns modelos hidrológicos têm se consagrado internacionalmente pelo uso e marcados pela simplicidade. O *GR4J Model* é um deles. Originado na França, desenvolvido no *French Research Institute for Agricultural and Environmental Engineering* (CEMAGREF), o *GR4J Model* é um modelo conceitual que possui quatro parâmetros calibráveis, sendo eles: capacidade máxima do reservatório, coeficiente de troca de águas subterrâneas e a base de tempo do hidrograma unitário. O modelo conta ainda com dois reservatórios iterativos, para armazenamento de produção e armazenamento de calha fluvial, e tem como dados de entradas precipitações diárias e evapotranspiração potencial. A calibração do modelo é realizada por um algoritmo de otimização que se baseia na busca do gradiente local.

Outro modelo conceitual é o *Simple Water Balance Model* (SWB), desenvolvido pelo *US National Weather Service* (NWS). Esse modelo, segundo Nasanova (2011), é conceitual e inclui dois reservatórios, um para interceptação da precipitação e outro para atuação da evaporação e escoamento superficial, cinco parâmetros e duas variáveis de estado. Os parâmetros são calibrados através do *Shuffled Complex Evolution Algorithm* (SCE-UA). Os dados de entrada são a precipitação e a evapotranspiração.

O modelo hidrológico *Campus Agreste Watershed Model* (CAWM) é uma nova ferramenta de modelagem que objetiva a simulação do escoamento superficial em bacias hidrográficas de regiões semiáridas. Criado na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE),

é um modelo concentrado cuja principal característica é a simplicidade e a existência de poucos parâmetros a calibrar.

Dos modelos hidrológicos distribuídos, dois são inevitavelmente citados em livros e artigos sobre o assunto. São eles o SHE - Sistema Hidrológico Europeu (BARTHURST et al., 1995) e TOPMODEL – Modelo Hidrológico Baseado em Topografia (BEVEN; KIRKBY, 1979; BEVEN et al., 1995). Ambos são referências em aplicação para pequenas bacias.

O modelo SHE surgiu através de uma cooperação de centros de pesquisa europeus em 1976 e têm sido desenvolvido desde então de maneira independente pelos seus iniciadores. A descrição de todos os processos se dá por meio de equações que buscam representar da melhor forma a combinação entre o máximo da compreensão teórica atual e a disponibilidade de dados, como, por exemplo, a representação da evapotranspiração pela equação de Penman-Monteith e do escoamento superficial pela equação de continuidade. O modelo exige uma grande quantidade de dados e variáveis a serem calibradas, o que dificulta sua aplicação na maioria dos casos.

O TOPMODEL é um modelo hidrológico baseado na área variável de contribuição (SILVA; KOBIYAMA, 2007). É formado por dois componentes, o balanço hídrico no solo e a propagação do escoamento até o exutório da bacia e constituído em três reservatórios interligados com diferentes tempos de armazenamento, representando a resposta média de saturação do solo em uma sub-bacia homogênea. O modelo, no entanto, é considerado semi-distribuído pois apenas o parâmetro associado à topografia é distribuído enquanto os demais são constantes em toda a bacia.

2.5 Barragens subterrâneas

A barragem subterrânea é uma obra que se caracteriza por um barramento artificial do fluxo de água com finalidade de manter elevado o nível freático e aumentar o armazenamento de água fazendo assim, surgir condições favoráveis de captação a montante, sendo normalmente construída no leito de riachos. Sua construção consiste basicamente na escavação de um depósito aluvional contido na calha do rio ou riacho, na direção transversal ao escoamento d'água até o embasamento cristalino, fazendo a impermeabilização da vala. Esses tipos de barramentos são de rápida e fácil construção, além de ter um baixo custo, podendo ser executados com mão-de-obra local, gerando emprego para comunidade rural no período de seca.

A barragem subterrânea também vem sendo utilizadas como alternativa de armazenamento de água em países que possuem limitações geográficas e ambientais para a construção de barragens superficiais. Segundo Kim (2017), 6 barragens subterrâneas são operadas na Coreia desde a década de 80, a maioria construída no início da mesma década. Experiências na região de Boda-Kalvsvik, na Suécia, buscaram através de ferramentas SIG e sensoriamento remoto localizar possíveis áreas para a construção desse tipo de barragem (JAMALI et al., 2013). O resultado mostrou que 20% da área total estudada tem potencial para barragens subterrâneas. No sul da Índia, na Bacia do Rio Palar, água subterrânea abastece uma estação nuclear nas proximidades, além de irrigação, indústria e usos domésticos. Estudos para implantação de uma barragem subterrânea na localidade concluíram que com a construção da barreira é possível aumentar a exploração de forma significativa (SENTHILKUMAR; ELANGO, 2011).

No Brasil, nenhuma ação no sentido de transformar as barragens subterrâneas em unidades produtivas teve continuidade, exceto no projeto experimental de Mutuca, município de Pesqueira, onde duas das universidades federais de Pernambuco, a UFPE e a UFRPE, desenvolveram projetos de pesquisa. Os trabalhos das universidades e organizações não governamentais (ONGs) têm mostrado o potencial de desenvolvimento econômico e social proporcionados por esse tipo de obra, que, devidamente manejada, garante subsistência e renda para os agricultores (CIRILO et al., 2003).

A modelagem da recarga em barragens desse tipo além de ser necessária para avaliação dos locais mais indicados para sua implantação, comprovando as vantagens desse tipo de intervenção, permitem que haja um monitoramento e controle durante a sua operação, o que é essencial garantir o sucesso do projeto.

3 MODELO SWAT

O presente capítulo apresenta uma revisão do modelo SWAT - *Soil and Water Assessment Tool*, tratando dos principais conceitos e equações utilizadas pelo mesmo para suas simulações dos processos hidrossedimentológicos, bem como resultados de algumas de suas aplicações mais recentes encontrados na literatura.

3.1 Descrição geral

O SWAT (NEITSCH et al., 2011) é um modelo matemático de domínio público, desenvolvido em 1996 nos Estados Unidos da América pelo *United States Department of Agriculture – Agriculture Research Service* (USDA-ARS) com objetivo de estimar o impacto de diferentes práticas agrícolas na quantidade e qualidade da água, na perda do solo e carga de poluentes em uma bacia hidrográfica. Agregando fundamentos de outros modelos (NEITSCH, 2011), como o SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), QUAL2E e ROTO (*Routing Outputs to Outlet*) em sua versão SWAT 2012.

Com isto, é possível perceber que o modelo foi concebido com uma vasta gama de experiências intrínsecas, haja visto que tais adaptações, agregadas pelos diversos modelos, foram feitas visando aprimoramentos (GASSMAN et al., 2007).

O modelo é baseado fisicamente, computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações com longos períodos de tempo para simular o efeito das variações de manejo. São incorporados oito componentes principais na estrutura do SWAT para prover suas simulações, sendo eles (DHAR; MAZUMDAR, 2009):

- Hidrologia: escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem;
- Clima: precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar;
- Sedimentos: produção de sedimentos;
- Temperatura do solo: a temperatura média no centro de cada camada do solo é simulada diariamente com o objetivo do uso nos processos hidrológicos e declínio de resíduos orgânicos;
- Crescimento vegetal;
- Nutrientes: nitrogênio e fósforo;

- Pesticidas e bactérias: a transformação e biodegradação dos pesticidas, além do declive das bactérias;
- Práticas agrícolas: o cultivo associado a irrigação e o manejo de resíduos na terra.

Os cálculos realizados para cada um dos componentes acima são executados no campo das Unidades de Respostas Hidrológicas (do inglês *Hydrologic Responde Units* -HRU), que representam uma combinação única de declividade, uso e tipo de solo. As HRUs são porcentagens da área da sub-bacia e não são identificadas espacialmente dentro de uma simulação. Alternativamente, uma bacia hidrográfica pode ser subdividida em apenas sub-bacias caracterizadas pelo uso dominante da terra, tipo de solo e manejo.

Segundo Melo (2010), a integração do modelo SWAT ao *software* de Sistemas de Informações Geográficas é dita como “acoplamento firme”, no qual existe uma relação avançada em que o modelo opera internamente ao SIG, de maneira conectada, havendo total compartilhamento de dados. O SWAT foi atualizado ao longo dos anos e dentre essas atualizações foi criado uma interface em ambiente *Windows* para atuar como ferramenta no *software Quantum GIS* (QGIS). Essa interface recebe o nome de QSWAT. Diferentes versões são disponibilizadas gratuitamente, compatibilizando-as com a versão do QGIS do usuário. Nesse trabalho foi utilizada a versão 2.16 do QGIS, que é compatível com o QSWAT 1.7.

Para a execução do SWAT são necessários os arquivos geoespaciais do modelo digital do terreno (MDT), mapa do tipo de solo e mapa de uso e ocupação. Dos dados não espaciais são pedidos os valores que definem as condições climáticas e os parâmetros dos dados do tipo de solo e uso e ocupação.

Pode-se destacar do modelo matemático que a parametrização distribuída possibilita o desenvolvimento de diferentes processos físicos que podem ser simulados em bacias hidrográficas com o intuito de analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e sub-superficial, sua produção de sedimentos e também a qualidade da água em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas.

As principais particularidades do modelo, de acordo com Santos et al. (2005), são:

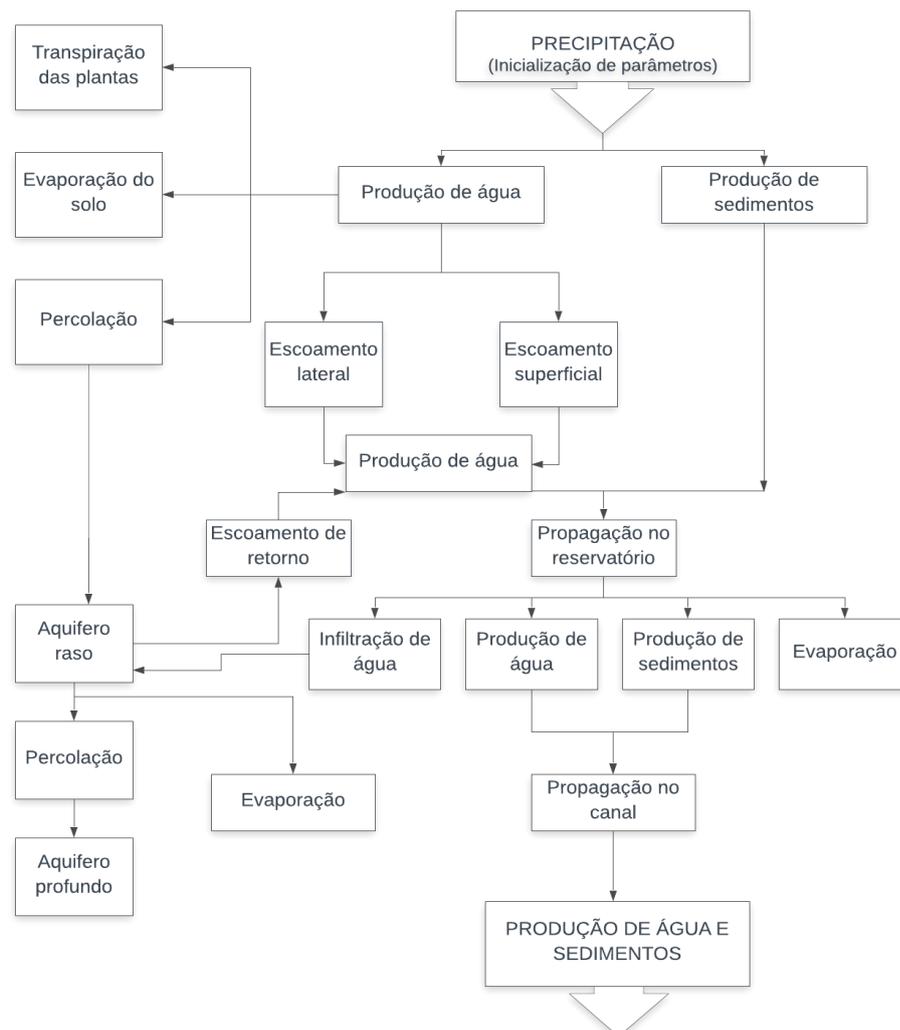
- Trata-se de um modelo de base física, de equações que representam o vínculo entre as variáveis do sistema. Necessita de informações referentes ao clima, solos, relevo, vegetação e uso e manejo do solo. Com esses dados, o SWAT modela os fenômenos físicos relacionados ao movimento da água e dos

sedimentos, crescimento da vegetação, ciclagem de nutrientes, qualidade da água, etc.;

- É um modelo distribuído, no qual a bacia hidrográfica poderá ser subdividida em sub-bacias, melhorando a análise com relação aos diferentes tipos de solo, cobertura vegetal, topografia e uso do solo;
- O modelo faz uso de dados de fácil aquisição, disponibilizados nas agências governamentais, para aplicabilidade de funções mais simples, fazendo com que seja possível a percepção de impactos ambientais que só são notados quando avaliados por períodos consideráveis;
- É computacionalmente eficiente.

A Figura 2 apresenta o fluxograma dos processos realizados pelo SWAT.

Figura 2 - Fluxograma de processamento do modelo SWAT.



3.2 Aplicações

É conferido ao modelo SWAT destaque devido a sua vasta literatura técnico-científica que proporcionaram ótimos resultados e confirma a sua robustez na aplicação da modelagem dos processos hidrológicos.

O modelo foi utilizado por Carvalho Neto (2018) para analisar os serviços ambientais de conservação do solo e estimativas da infiltração de água no solo prestados por áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do Rio Una, em Pernambuco, e mostra que tal assertiva evidenciou que a inexistência das áreas de preservação permanente intensifica os processos erosivos e transporte de sedimentos, bem como ocasionam a redução do tempo de vida dos reservatórios. Fernandes (2015), aplicou o SWAT na estimativa de vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, com resultados confiáveis para estimativa de vazão nas diferentes regiões da bacia, apresentando resultados estatísticos para o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (que avalia o quanto a simulação é melhor previsor que a média dos valores observados) variando entre 0.63 e 0.99 e para o Coeficiente de Determinação (R^2) (que avalia a relação de linearidade entre os dados observados e simulados), variando entre 0.64 e 0.99 que são valores considerados bons e muito bons de acordo com o índice de eficiência estatística.

Souza e Santos (2013) avaliaram a estimativa de vazões mínimas efetuada com a aplicação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. A simulação de vazão com o modelo SWAT apresentou ajuste satisfatório, principalmente no que diz respeito a vazões mínimas, com Nash-Sutcliffe de 0.76. Pode-se concluir que o modelo representou de forma satisfatória o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro.

Nunes (2018) modelou os processos de geração de escoamento superficial, erosão do solo e a recarga potencial subterrânea na bacia do Rio Sucuru a jusante da barragem de Sumé-PB através do modelo SWAT. Foram utilizados dados de precipitação e temperatura do período de 1994 a 2015, além de mapas de tipos de solo, uso e ocupação do solo com as mudanças observadas no período. A simulação dos cenários por meio da utilização dos diferentes mapas de uso do solo permitiu a avaliação de suas influências sobre os processos hidrossedimentológicos de maneira bastante satisfatória e consistente com as realidades no campo e os resultados de outros estudos na região.

Para avaliar a aplicabilidade do SWAT para a simulação de vazões líquidas mensais nas condições da Bacia do Rio Cuiabá, no Mato Grosso, Baldissera (2005) utilizou-se do sistema

de manejo de bacias hidrográficas, com a integração que une a flexibilidade do SIG aplicados a modelos hidrológicos. O modelo foi calibrado para dois cenários: escoamento durante a fase de enchimento da represa da Aproveitamento Múltiplo de Manso (APM Manso) e cobertura da bacia com sua vegetação potencialmente natural. Após calibração, as series de 05/1994 a 01/1998 foram simuladas satisfatoriamente, sem diferenças significativas entre as medias observadas e simuladas.

3.3 Equações

3.3.1 Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico toma como base quatro volumes de controle (TAVEIRA, 2012). São os reservatórios: superficial, sub-superficial, subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo. Dessa forma, o balanço hídrico é representado pela Equação 1:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (P_d - Q_{sup} - E_a - W_a - Q_{sub}) \quad (1)$$

Onde:

SW_t : quantidade de água no solo no fim do dia (mm);

SW_0 : quantidade de água no início do dia (mm);

t: intervalo de tempo (dias);

P_d : precipitação no dia (mm);

Q_{sup} : escoamento superficial (mm);

E_a : evaporação diária (mm);

W_a : quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm), e

Q_{sub} : quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

O balanço hídrico é efetuado para cada Unidade de Resposta Hidrológica identificada, favorecendo melhor precisão e resultando em uma melhor descrição física dos processos (CARVALHO NETO, 2018).

3.3.2 Escoamento Superficial

O escoamento superficial para cada sub-bacia gerada é simulado no modelo SWAT através do Método da Curva-Número. Desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (SCS), é um modelo empírico que começou a ser usado na década de 1950, e por mais duas décadas foi objeto de estudos (NUNES, 2018). Tal metodologia foi desenvolvida para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos, ocupação e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (NEITSCH et al., 2011). O escoamento superficial é calculado por essa metodologia através da Equação 2:

$$Q_{sup} = \frac{(P_{dia} - 0,2S)^2}{(P_{dia} + 0,8S)} \quad (2)$$

Onde:

Q_{sup} : escoamento superficial (mm);

P_{dia} : precipitação (mm) no dia, e

S : capacidade máxima de armazenamento (mm).

O parâmetro S varia espacialmente, lidando com questões relativas a mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (NEITSCH et al., 2012). A relação entre o parâmetro S e o fator CN, em unidades métricas, é dada pela Equação 3:

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

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100 para cada solo, sendo o valor 1 referente a um solo de cobertura permeável e 100, cobertura impermeável.

O *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) apresentou uma classificação hidrológica dos solos, no qual solos que oferecem um determinado potencial de escoamento superficial para a mesma intensidade de precipitação são postos no mesmo grupo (NEITSCH et al., 2011). Sartori (2004), elaborou uma classificação hidrológica com base na metodologia

adotada pelo NRCS para o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SBCS). Os quatro grupos hidrológicos do solo, segundo o NRCS (2007) são:

- Grupo A: apresentam elevada taxa de infiltração e transmissão de água mesmo quando úmidos, produzindo conseqüentemente baixo escoamento. São solos tipicamente arenoso, com baixa fração de silte e argila;
- Grupo B: possuem moderado potencial de geração de escoamento superficial e taxa de infiltração quando totalmente saturado. Costumam apresentar uma fração de argila superior a 50%;
- Grupo C: quando saturados, geram escoamento superficial acima da média, correspondente a sua baixa capacidade de infiltração e transmissividade de água. Possuem fração de argila entre 20 a 40%.
- Grupo D: quando saturado gera a maior parcela do escoamento superficial, possuindo dessa forma baixa taxa de infiltração. São aqueles que apresentam fração de argila superior a 40%.

3.3.3 Vazão de pico

Para o cálculo a vazão de pico, é definida como o máximo de escoamento superficial para um determinado evento de precipitação, o modelo SWAT dispõe do Método Racional Modificado aplicado em cada uma das sub-bacias definidas no projeto (NEITSCH et al., 2011).

A equação do Método Racional Modificado, através da qual o modelo realiza suas estimativas, é dada pela Equação 4:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} Q_{sup} A}{3,6 t_{conc}} \quad (4)$$

Onde:

q_{pico} : vazão de pico (m³/s);

Q_{sup} : escoamento superficial (mm de H₂O);

A: área da sub-bacia (km²);

α_{tc} : fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração;

3,6: fator de conversão;

t_{conc} : tempo de concentração (h).

3.3.4 Evapotranspiração

A evapotranspiração é realizada através de todos os processos do qual a água da superfície terrestre é transformada em vapor de água (evaporação das copas das árvores, transpiração, sublimação e evaporação pelo solo) (NUNES, 2018).

O modelo possibilita o cálculo da evapotranspiração potencial através de três métodos: Pennaman-Monteith (MONTEITH, 1965; ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989), Priestley-Taylor (PRIESTLEY-TAYLOR, 1972) e Hargreaves (HARGREAVES et al., 1985).

Uma vez determinada, a evapotranspiração real deve ser calculada conforme três processos: demanda evaporativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal, a transpiração dos vegetais e a evaporação do solo (CARVALHO NETO, 2018).

3.3.5 Armazenamento na copa dos vegetais

Trata-se de uma variável que tem significativa influência sobre os processos de transformação de precipitação ao reduzir a quantidade de água que chega a superfície, diminuindo assim o poder erosivo da chuva. A quantidade de água que pode ser armazenada nas copas é obtida conforme a Equação (5):

$$cop_{dia} = cop_{mx} \frac{IAF}{IAF_{mx}} \quad (5)$$

Sendo:

cop_{dia} : quantidade máxima de água armazenada na copa em um dado dia;

cop_{mx} : quantidade máxima de água armazenada na copa quando esta está completamente desenvolvida;

IAF: índice de área foliar para um determinado dia;

IAF_{mx} : índice de área foliar quando o desenvolvimento vegetal está completo.

3.3.6 Transpiração

O modelo calcula a transpiração da planta considerando as condições de crescimento ideal.

3.3.7 Evaporação do solo

A evaporação do solo é calculada através de uma função exponencial, que considera tanto a profundidade do solo quanto a quantidade de água existente, avaliando dessa forma a evaporação para as diferentes camadas de solo. A Equação 6 resulta na distribuição de profundidade destinada ao cálculo da máxima quantidade de água do solo que irá evaporar.

$$E_{solo,z} = E_z^n \frac{z}{(z + \exp(2,374 - 0,00713z))} \quad (6)$$

Onde:

$E_{solo,z}$: é a demanda evaporativa (mm) na profundidade z ;

E_z^n : evaporação máxima do solo para o dia (mm), e

z : profundidade do solo (mm).

O modelo ainda incorpora um coeficiente de compensação da evaporação do solo (ESCO) para melhorar a estimativa de distribuição da evaporação (Equação 7). O coeficiente ESCO varia entre 0,01 a 1, e quanto menor seu valor mais o modelo é capaz de extrair mais da demanda evaporativa para níveis baixos.

$$E_{solo,cm} = E_{solo,ci} - E_{solo,cs} ESCO \quad (7)$$

Sendo:

$E_{solo,cm}$: demanda evaporativa de determinada camada de solo;

$E_{solo,ci}$: demanda evaporativa na parte inferior da camada de solo;

$E_{solo,cs}$: demanda evaporativa na parte superior da camada de solo.

3.3.8 Retirada de água pelas plantas

O potencial de retirada de água para qualquer profundidade de solo alcançada pelas raízes das plantas é obtido através da Equação (8):

$$w_{up,z} = \frac{E_t}{1 - \exp(-\beta_w)} \left[1 - \exp\left(-\beta_w \frac{z}{z_{raiz}}\right) \right] \quad (8)$$

Onde:

$w_{up,z}$: potencial de retirada da água do solo até determinada profundidade para um determinado dia (mm de H₂O);

E_t : transpiração máxima dos vegetais em um dia (mm de H₂O);

β_w : parâmetro de distribuição de uso da água;

z : profundidade (mm);

z_{raiz} : profundidade da raiz (mm).

Dessa forma, o potencial de retirada de água do solo para qualquer camada é dado por:

$$w_{up,cm} = w_{up,fm} - w_{up,tp} \quad (9)$$

Para qual $w_{up,cm}$ é o potencial de retirada de água do solo para uma determinada camada (mm de H₂O), $w_{up,fm}$ é o potencial de retirada para o limite inferior do solo e $w_{up,tp}$ para o limite superior. Esse valor ainda pode ser ajustado para a situação onde o solo não possui água suficiente para atender as necessidades hídricas das plantas. A correção é feita através do fator de compensação de água pelas plantas (EPCO), que varia de 0 a 1, onde o limite superior indica a maior possibilidade da demanda ser atendida. A Equação 10 é utilizada para realizar o ajuste.

$$w'_{up,cm} = w_{up,cm} + w_{dem} EPCO \quad (10)$$

Na qual $w'_{up,cm}$ é o potencial ajustado para determinada camada e w_{dem} a demanda não cumprida de água.

3.3.9 Percolação

A percolação calculada no modelo considera a propagação do armazenamento de água e o fluxo pelas fendas existentes no solo. Logo, a percolação efetiva da água para a camada inferior é dada pela Equação 11, a seguir:

$$w_{perc,cm} = SW_{cam,excesso} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta T}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (11)$$

Sendo:

$W_{perc,cam}$: quantidade de água efetiva percolada no dia (mm);

$SW_{cam, excesso}$: quantidade disponível para percolar no dia (mm);

ΔT : duração do intervalo de tempo (h), e

TT_{perc} : tempo de percolação entre as camadas (h).

3.3.10 Escoamento sub-superficial lateral

O escoamento sub-superficial lateral é considerado significativo para bacias que apresentam solo com alta condutividade hidráulica, em suas camadas superficiais, e camada impermeável não muito profunda (CARVALHO NETO, 2018). Seu cálculo segue a Equação 12, disposta a seguir:

$$Q_{lat} = 0,024 \left(\frac{2SW_{cam, excesso} K_{sat} slp}{\phi_d} \right) \quad (12)$$

Sendo:

Q_{lat} : escoamento lateral (mm/dia);

K_{sat} : condutividade hidráulica do solo saturada (mm/h);

slp : declividade da encosta (m/m), e

ϕ_d : porosidade drenável do solo (mm/mm).

3.3.11 Água Subterrânea

O volume de água responsável pela recarga dos aquíferos rasos e profundos é obtido através da Equação 13:

$$W_{rec} = \left(1 - \exp \left[\frac{1}{\delta_{aq}} \right] \right) W_{seep} + \exp \left[\frac{1}{\delta_{aq}} \right] W_{rec,i-1} \quad (13)$$

Sendo:

W_{rec} : quantidade de água que adentra os aquíferos no dia “i” (mm);

δ_{aq} : tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia);

W_{seep} : quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm), e

$W_{rec,i-1}$: quantidade de água que entra no aquífero no dia $i-1$ (mm).

Com esse resultado, o modelo regula a quantidade de água que recarrega os aquíferos profundos e rasos segundo as Equações 14 e 15, respectivamente.

$$W_{prf} = \beta_{prf} W_{rec} \quad (14)$$

$$W_{rec,rs} = W_{rec} W_{prf} \quad (15)$$

Nas quais W_{prf} e $W_{rec,rs}$ é a quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo e raso, respectivamente, no dia “i” e β_{prf} o coeficiente de percolação do aquífero.

3.3.12 Volume de água ascendente através da franja capilar (REVAP)

O REVAP é a consideração do modelo para o volume de água ascendente através de franjas capilares, em função da demanda evaporativa. A Equação 16 calcula a máxima quantidade de água que pode ser retirada através do REVAP ($w_{revap,mx}$):

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} E_o \quad (16)$$

Sendo β_{rev} o coeficiente de REVAP e E_o a evapotranspiração (mm) no dia.

3.3.13 Crescimento Vegetal

Para se estimar o desprendimento e arraste das partículas do solo, é de fundamental importância conhecer as condições de cobertura vegetal e de resíduos das culturas (NUNES, 2018). O modelo SWAT simula o crescimento diário das plantas através de uma versão simplificada do modelo EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate Model*) (WILLIAMS, 1995). O EPIC utiliza de conceitos do desenvolvimento fenológico da planta baseado na umidade de calor acumulada por dia, do índice de colheita e do potencial de biomassa e do ajuste do estresse por cauda da água e temperatura.

3.3.14 Equação Universal da Perda de Solo Modificada

O modelo simula seus processos erosivos a partir da “Equação Universal de Perda de Solo Modificada” (MEUPS). A MEUPS substitui o fator “R” da equação original por um fator de escoamento superficial, que proporciona a aplicação do modelo para eventos isolados, estimando a erosão e a carga de sedimentos (WILLIAMS, 1975).

A equação da MEUPS é dada pela expressão a seguir, em suas unidades métricas:

$$sed = 11,8(Q_{sup} q_{pico} \text{área}_{URH})^{0,56} K_{EUPS} C_{EUPS} L S_{EUPS} P_{EUPS} CFRG \quad (17)$$

Sendo:

sed: produção de sedimento, após evento de precipitação, no dia (ton);

Q_{sup} : escoamento superficial (mm H₂O/ha);

q_{pico} : taxa de escoamento de pico (m³/s);

área_{URH} : área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada o aporte de sedimentos (há);

LS: fator topográfico;

CFRG: fator de fragmentação esparsa.

3.3.15 Erodibilidade do solo (K)

Esse fator procura evidenciar a facilidade com que o solo é erodido, por meio do impacto da chuva e/ou do escoamento superficial, sendo, portanto, estimado a partir das características intrínsecas ao tipo de solo e de suas propriedades físicas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

Wichmeier e Smith (1978) propuseram dois pontos de partida para análise da erodibilidade do solo relacionada a suas propriedades físicas: as que comprometem a velocidade de infiltração, permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água; e as que resistem às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento. Um dos pontos de destaque no trabalho de Wichmeier e Smith (1978) foi a constatação de que um solo se torna menos susceptível à erosão quando apresenta menor fração de silte, seja pelo aumento da fração de areia ou argila.

Proposta por Williams (1995), a Equação 17 mostra para o calculo desse fator no modelo SWAT.

$$K_{USLE} = f_{areia,gr} \cdot f_{ar-si} \cdot f_{corg} \cdot f_{areia,fn} \quad (18)$$

Sendo:

$f_{areia,gr}$: fator que representa o conteúdo de areia grossa;

f_{ar-si} : representa a fração do solo que contem argila e silte;

f_{corg} : trata da estimativa da contribuição do carbono orgânico e

$f_{areia,fn}$: é o fator que representa o conteúdo de areia fina.

Cada um dos fatores é calculado separadamente através das Equações (19) a (22), desenvolvidas por Williams (1995):

$$f_{areia,gr} = \left(0,2 + 0,3 \exp \left[-0,256 m_s \left(1 - \frac{m_{silte}}{100} \right) \right] \right) \quad (19)$$

$$f_{ar-si} = \left(\frac{m_{silte}}{m_C + m_{silte}} \right)^{0,3} \quad (20)$$

$$f_{corg} = \left(1 - \frac{0,25 orgC}{orgC + \exp[3,72 - 2,95 orgC]} \right) \quad (21)$$

$$f_{areia,fn} = \left(1 - \frac{0,7 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[5,51 + 22,9 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)]} \right) \quad (22)$$

Sendo:

m_s : percentagem de areia com partículas de diâmetro entre 0,05 e 2 mm;

m_{silte} : percentagem de partículas de silte com diâmetro entre 0,002 a 0,05 mm;

m_C : percentagem de argila com partículas cujo diâmetro é inferior a 0,002 mm;

$orgC$: fração de carbono orgânico para cada camada do solo.

3.3.16 Fator de Uso e Manejo do Solo (C)

Um dos fatores que contribuem para o processo erosivo é a cobertura vegetal. Deve-se buscar avaliar seu efeito combinada de todas as relações das variáveis de cobertura e manejo que levam em conta: tipo de vegetação, população, desenvolvimento, época do ano e manejo da cultura (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

O fator C possui como conceito a relação entre as perdas de solo de um determinado terreno cultivado sob dadas condições e as perdas correspondentes desse mesmo solo na parcela padrão (WISCHMEIER; SWITH, 1978). Variando de um intervalo número de 0 a 1, sendo o limite superior atribuído para um solo desprovido de cobertura e o limite inferior característico de solos com elevada cobertura vegetal, o fator de cobertura do solo define a capacidade da cultura vegetal se dispor como obstáculo ao impacto direto da chuva sobre o solo.

3.3.17 Fator topográfico (LS)

O produto do comprimento do declive (L) e do grau de declive (S) origina o fator topográfico, que considera como a topografia do terreno influencia no efeito da erosão (CARVALHO NETO, 2018).

O fator topográfico é calculado diretamente pelo MDT utilizado para a simulação através do SWAT. O modelo aplica a metodologia de MEUPS, identificando para cada HRU o valor do fator LS. É um processo com alto grau de incerteza associada, tendo em vista que o cálculo do declive é dado pela distância entre os pontos extremos e a declividade é baseada na relação entre a diferença altimétrica e a distância entre os pontos (UZEIKA, 2009).

3.3.18 Fator de fragmentação esparsa (CFRG)

Considera o afloramento de rochas na área, calculado através da Equação 23, onde rochas se refere a fração da área de afloramento rochoso:

$$CFRG = \exp(-0,053 \text{rochas}) \quad (23)$$

3.4 QSWAT

A interface QSWAT é uma extensão para o QGIS (*Quantum GIS*), utilizado como ferramenta de pré e pós-processamento de dados para a execução do modelo hidrológico SWAT. Isto é, é a interface responsável por relacionar o *software* SIG com o SWAT.

Os dados de entrada geoespaciais para a utilização do modelo são os arquivos do Modelo de Digital do Terreno (MDT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE), e mapas de Uso e Ocupação do Solo e Tipos de Solo. Os dados numéricos para caracterização dos dados espaciais são as entradas climáticas, hidrológicas e do solo.

A partir do MDT ou MDE é possível realizar a delimitação da bacia hidrográfica, identificando a rede de drenagem usando o “Algoritmo de Oito Direções” (D-8), juntamente com a obtenção dos demais parâmetros topográficos exigidos pelo modelo. Diante disso, a interface delimita para cada trecho de canal sua respectiva sub-bacia, uma vez que o modelo SWAT exige tal perspectiva para a sua correta execução (WINCHELL et al., 2007).

A configuração das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU) é de extrema importância para o pré-processamento dos dados, pois é na esfera das HRUs que o SWAT realiza as suas simulações.

Como fase final do pré-processamento, a interface fornece um gerador de dados climáticos como velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar, para fornecimento de algumas variáveis e ainda é capaz de atuar com uma organização estrutural dos resultados, promovendo visualização objetiva com diversos arquivos de saída.

4 MATÉRIAS E MÉTODO

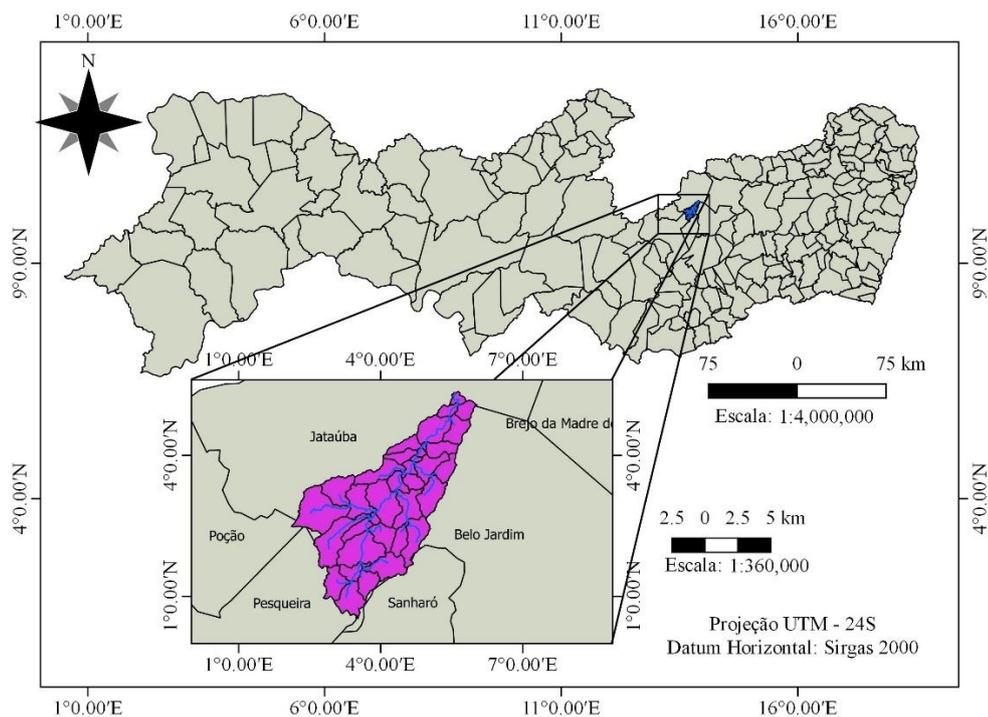
Nesse capítulo faz-se a apresentação da área de estudo e suas características relevantes, como sua localização e características de clima, geologia, solos, relevo e cobertura da região. Para correta execução, o modelo SWAT exige como entrada dados geoespaciais e tabulares. Logo, também são apresentados os mapas de entrada necessários para a realização das simulações do modelo SWAT, bem como os dados hidroclimáticos.

4.1 Caracterização da área de estudo

4.1.1 Localização

A bacia hidrográfica do riacho Mimoso encontra-se entre as latitudes 2°N e 12°N e longitudes 2°E e 9°30'E sendo uma das sub-bacias da bacia do Capibaribe. Ela abrange parte dos municípios de Belo Jardim, Jataúba e Pesqueira, possuindo uma área total de aproximadamente 101 km². O riacho Mimoso apresenta uma extensão aproximada de 54 km em seu rio principal, tendo seu início no encontro dos riachos Algodões e Fundão e fim desaguando no Rio Capibaribe. A localização da bacia é exposta na Figura 3.

Figura 3 - Mapa de localização da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso no estado de Pernambuco.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.1.2 Características físico-climáticas

4.1.2.1 Clima

O clima é uma das características que mais se destacam na região do semiárido pernambucano. As secas periódicas que ocorrem eventualmente impedem a produção agrícola e prejudicam a pecuária, enquanto as secas estacionais ocorrem todos os anos durante o segundo semestre e já fazem parte do regime hidrológico da região.

Segundo a classificação de Koppen, o clima que se apresenta na região é do tipo BSh (clima semiárido extremamente quente de estepe), caracterizado por evapotranspiração potencial superior à precipitação anual e precipitação anual total média compreendida entre 380 e 760 mm e temperatura média anual do ar maior que 18°C.

Costa (2002) obteve dados de precipitação média na região de estudo (Tabela 1) que mostraram um bom reflexo do comportamento do local. As chuvas torrenciais são concentradas no período compreendido entre os meses de março a julho.

Tabela 1 - Precipitação média mensal (PRE) da região em estudo (PE). Médias mensais para um período de dois anos.

Parâmetros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
PRE (mm) ,2000	10.1	52.3	120.3	99.6	79.4	69.7	104.1	37.6	13.5	0.2	14.5	91.3	692.6
PRE (mm) ,2001	12.1	0.0	59.3	5.9	0.0	133.2	7.2	10.8	2.0	0.0	10.1	35.2	275.8

Fonte: COSTA (2002).

A temperatura média mensal do ar varia em torno de 26°C, com mínimas nos 22°C e máximas de 33°C, apresentando pouca variação ao longo dos anos. Com uma umidade relativa do ar baixa, de média anual próxima à 50%, o semiárido do Nordeste é uma das regiões secas mais quentes do planeta (SECTMA, 1998).

Segundo Bastos et. al (2009), a região semiárida nordestina, embora possua um alto potencial para agricultura, apresenta regime irregular de chuvas e elevada taxa de evaporação.

4.1.2.2 Geologia e Solos

O estado de Pernambuco possui uma área de aproximadamente 98.937 km², com uma faixa por volta de 630 km no sentido leste-oeste. Esses fatores contribuem para a existência de uma ampla diversidade de tipos de solo no estado. Além dos fatores de variação de relevo e clima contribuindo para a diversificação dos solos, em termos de profundidade, cor, textura, estrutura, consistência, drenagem, pedregosidade, e fertilidade natural (SILVA JUNIOR, 2010).

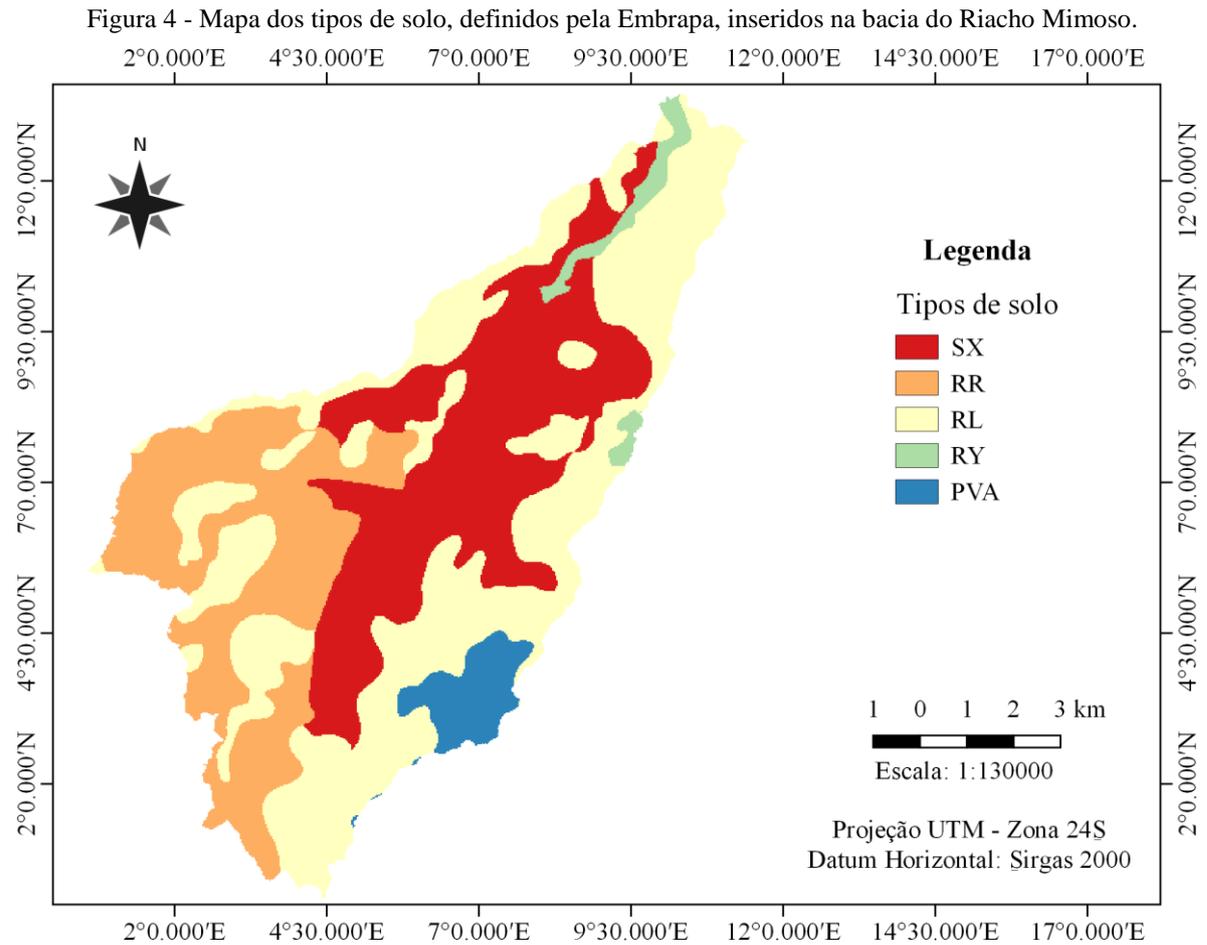
A área de estudo é caracterizada com rochas pertencentes ao Pré-Cambriano, englobando diversas características litoestratigráficas, compostas por rochas do embasamento cristalino (COSTA, 2002). Os solos presentes na região da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso, de acordo com Embrapa (2010), são do tipo Argilossolos Vermelho-Amarelo (PVA), Neossolos Regolíticos (RR), Nossolos Litólicos (RL), Neossolos Flúvicos (RY) (os chamados solos aluviais) e Planossolos Háplicos (SX).

Englobando os solos constituídos por material mineral, os Argilossolos possuem como característica a presença de horizontes texturais de argila de atividade baixa, ou atividade alta conjugada com saturação por bases baixas ou com caráter alumínico (EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos são solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso que não apresenta alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 2018).

Compreendendo solos minerais mal drenados, os Planossolos, possuem horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, adensado, geralmente com acentuada concentração de argila e permeabilidade (EMBRAPA, 2018).

O mapa do solo definido pelo Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco, escala 1:100.000, concluído pela Embrapa (2010), para a área da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso é disposto na Figura 4, onde podem ser identificados as sete classes de solos descritas nessa seção.

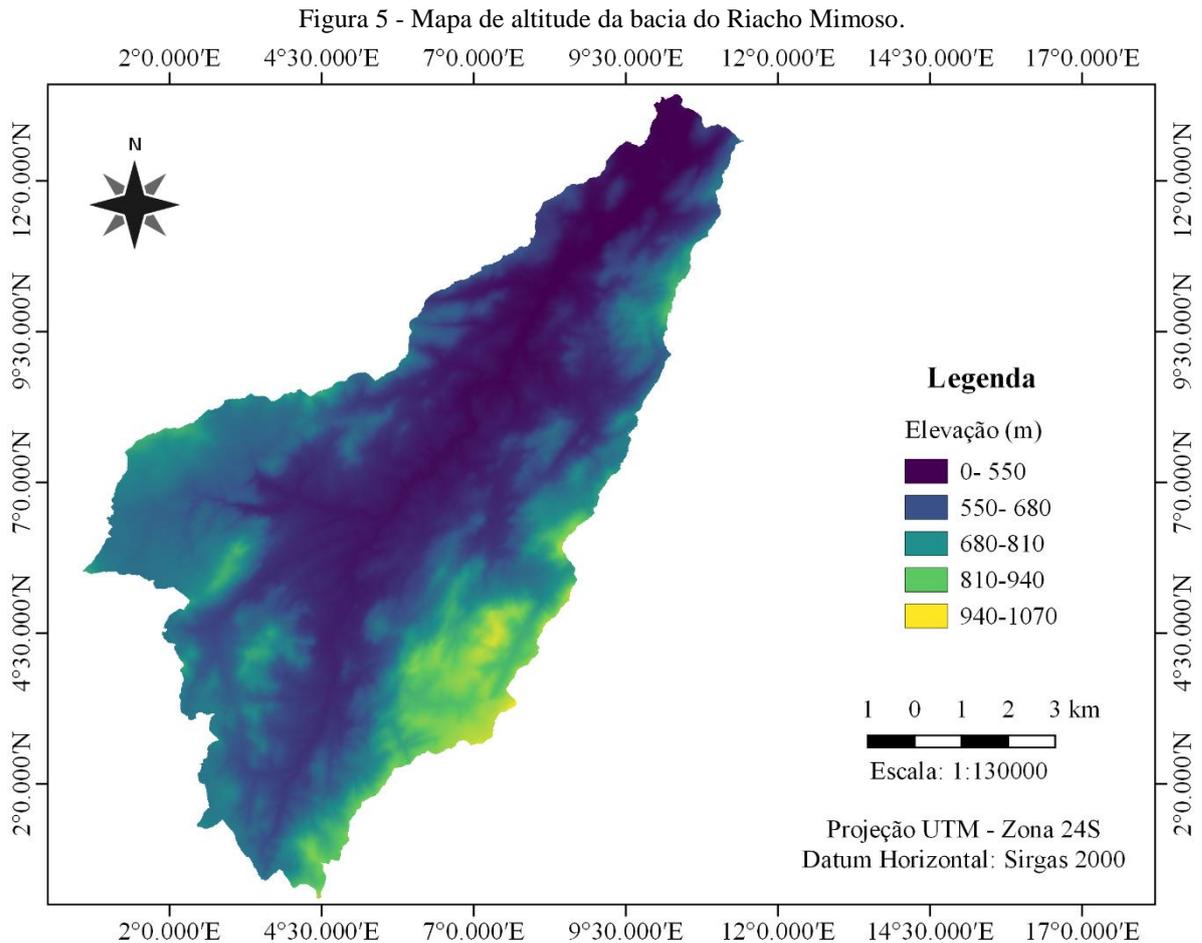


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.1.2.3 Relevo

A Figura 5 apresenta o mapa de altitude para a bacia hidrográfica de estudo, através do Modelo Digital do Terreno obtido com o Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) na escala 1:5000, uma fonte de dados espaciais capaz de gerar resultados com alta precisão.

A menor altitude registrada é de 516 m, já a maior é de 1064 m, ficando para a bacia uma média de elevação de 698,87 m.

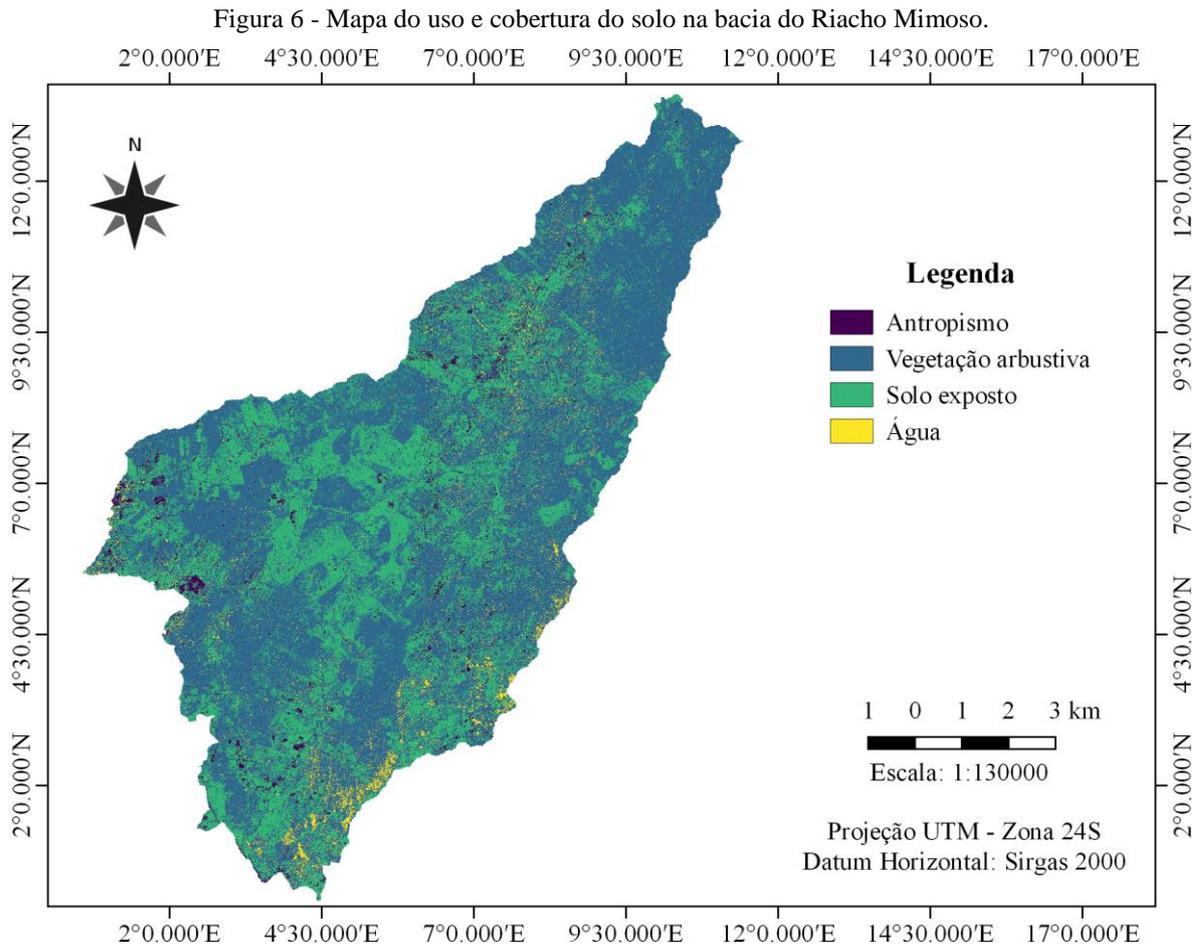


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.1.2.4 Cobertura do solo

A cobertura vegetal da área é típica do semiárido, desenvolvendo uma caatinga do tipo hipo e hiperxerófila, apresentando espécies de porte mais baixo, com caules retorcidos e esbranquiçados que, nos meses secos, perdem suas folhas, reduzindo a transpiração como forma de adaptar-se à falta de água (COSTA, 2002). Porém, em muitos trechos, a vegetação natural é encontrada alterada ou destruída, sendo substituídas por culturas como coentro, milho e beterraba.

Dessa forma, a cobertura do solo na região da bacia hidrográfica do Riacho Mimoso é ilustrada pela Figura 6.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As classes consideradas no presente trabalho são descritas, conforme CPRH (2011), como:

- Antropismo (policultura e pastagens): áreas com atividades predominantemente de cultivo de lavoura de subsistência;
- Vegetação arbustiva: pequenas ocorrências de espécimes arbóreos, predominando indivíduos de médio porte com arbóreos esparsados;
- Solo exposto: áreas desprovidas de vegetação, de exploração mineral ou desmatadas para uso agrícola ou decorrente de erosão;
- Água.

4.2 Obtenção e pré-processamento dos dados necessários para execução do modelo

4.2.1 Precipitação

Pretendia-se, inicialmente, utilizar as estações localizadas dentro da região da bacia hidrográfica, porém, devido a incompatibilidade dos dados disponíveis nessas estações com o período visado para o estudo fez-se necessário a utilização de estações próximas do local.

Dessa forma, para a presente simulação, quatro estações pluviométricas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA), obtidas através do portal Hidroweb no próprio site da ANA, dispostas na Tabela 2, foram utilizadas. A série de dados considerada iam dos anos de 2007 a 2017, sendo os três primeiros anos utilizados como aquecimento do modelo.

Tabela 2 - Informações das estações pluviométricas utilizadas no estudo.

Código da estação	Município	Latitude	Longitude
736040	Jataúba	-7.99	-36.5
836043	Sanharó	-8.37	-36.56
836092	Brejo da Madre de Deus	-8.15	-36.37
836093	Poção	-8.19	-36.56

Fonte: Dados compilados pelo autor (2019).

Para a obtenção de um melhor resultado, realizou-se a interpolação dos dados de precipitação através do método do inverso do quadrado das distâncias, estimando a chuva no centroide da bacia, criando assim uma estação fictícia no local, utilizada como a entrada de precipitação no modelo. A validade desse ajuste foi verificada realizando uma análise de consistência traçando um gráfico com os totais acumulados de precipitação nas estações e os totais acumulados na estação fictícia. O alinhamento dos pontos no gráfico indica a proporcionalidade entre os dados.

4.2.2 Dados climáticos

Os dados climáticos requisitados pelo modelo foram adquiridos pela estação climática de Caruaru, de responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os valores diários de velocidade do vento, umidade relativa do ar, radiação solar e temperaturas máxima e mínima foram utilizados para a obtenção das variáveis necessárias para banco de dados da

simulação através do gerador climático *Weather Database*, que encontrasse disponível no próprio site do SWAT. Os dados referentes a essas variáveis são exibidos na Tabela 3.

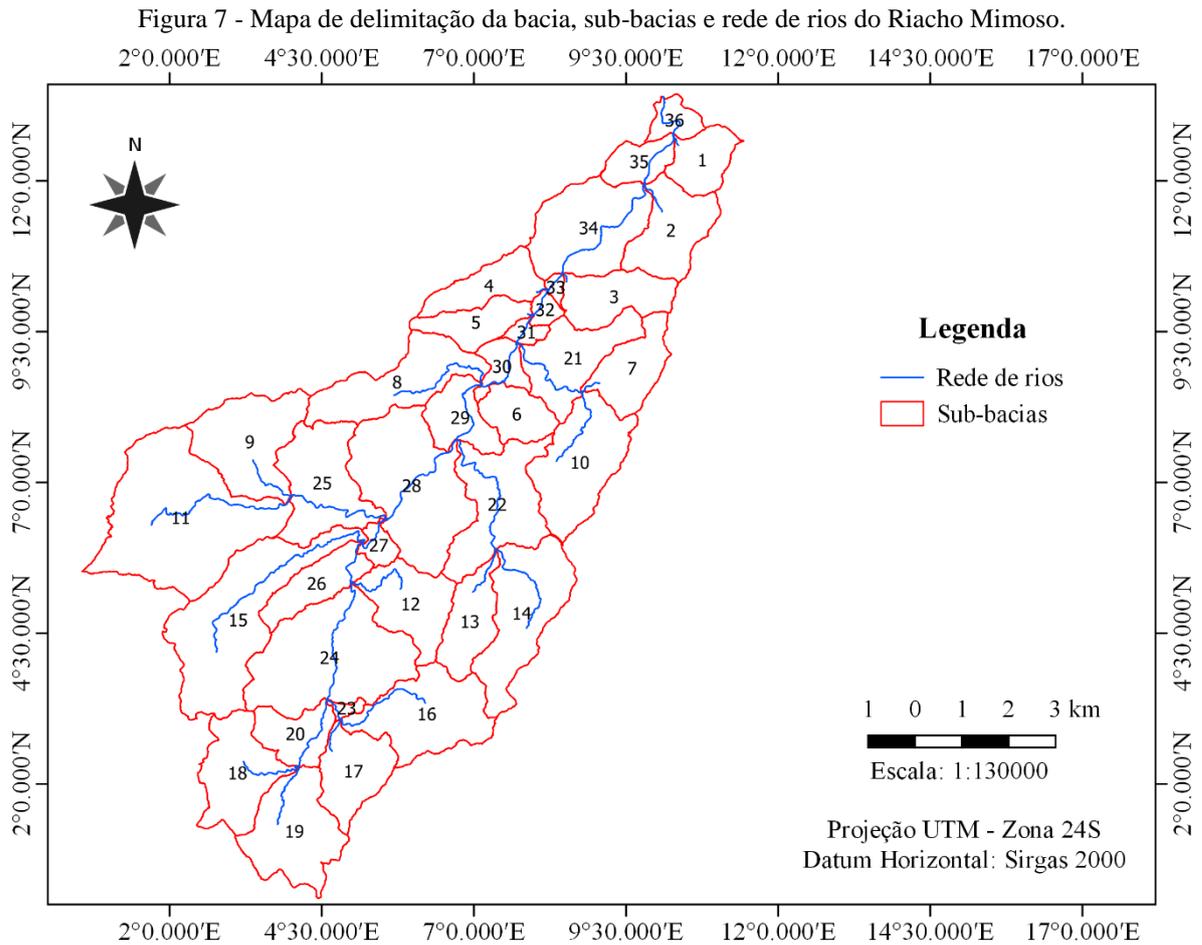
Tabela 3 - Dados climáticos para a estação de Caruaru.

Dados	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	25.31	25.31	25.39	25.01	23.79	22.40	21.42	21.65	22.73	24.10	24.86	25.53
TMPMN	23.92	23.95	24.03	23.72	22.68	21.39	20.41	20.47	21.38	22.67	23.35	24.04
TMPSTDMX	1.20	1.06	0.95	1.21	1.08	0.88	0.82	0.87	1.09	0.93	0.93	1.13
TMPSTDMN	1.05	0.94	0.88	1.05	0.95	0.82	0.76	0.81	1.01	0.90	0.92	0.98
PCPMM	1.82	1.38	1.93	3.43	2.54	3.17	2.82	1.70	0.72	0.42	0.31	0.75
PCPSTD	0.23	0.21	0.20	0.32	0.24	0.45	0.22	0.13	0.08	0.06	0.10	0.14
PCPSKW	5.85	7.02	5.40	4.96	6.79	10.93	4.45	6.29	7.14	7.22	14.41	8.97
PR_W1	0.16	0.19	0.20	0.29	0.38	0.45	0.46	0.42	0.24	0.14	0.10	0.10
PR_W2	0.42	0.40	0.52	0.59	0.67	0.78	0.81	0.74	0.55	0.42	0.28	0.35
PCPD	6.64	6.70	8.82	12.10	16.60	16.30	18.67	19.13	10.11	6.11	3.20	4.18
RAINHHMX	0.23	0.27	0.25	0.39	0.25	0.38	0.23	0.15	0.09	0.07	0.08	0.17
SOLARAV	1.64	1.64	1.66	1.58	1.30	1.25	1.22	1.45	1.60	1.64	1.74	1.66
DEWPT	69.43	70.69	72.62	76.00	78.59	82.97	84.47	80.39	74.72	70.42	67.82	66.88
WNDVAV	3.17	3.00	2.71	2.71	2.79	2.91	3.23	3.34	3.34	3.44	3.41	3.45

Fonte: Compilação de dados executada pelo autor (2019).

4.2.3 Modelo Digital do Terreno e intervalos de declividade

O modelo digital do terreno (MDT) utilizado no presente estudo é originado do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D), do governo do estado de Pernambuco, obtido por meio de perfilamento laser com erro máximo de 25 cm, na escala de 1:5000. O MDT é usado pelo modelo para a delimitação da bacia. Para discretização da bacia, definiu-se um valor mínimo para a área das sub-bacias de 1,5 km², criando assim 36 sub-bacias (Figura 7).



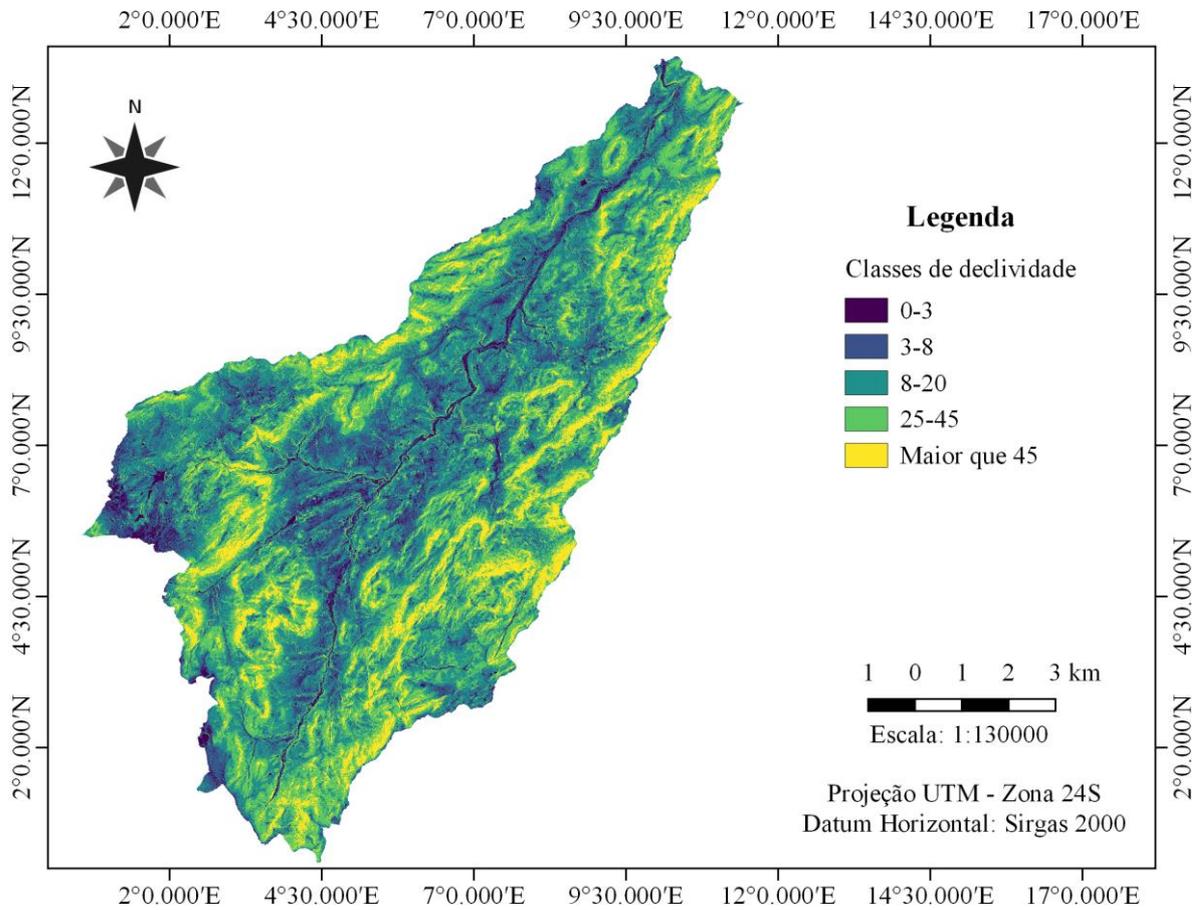
As classes de declividade utilizadas foram adaptadas das definidas pela Embrapa (1979), devido a limitação do modelo a cinco intervalos. A Tabela 4 exibe as classes definidas e a área inserida em cada uma, e a Figura 8 mostra o mapa de distribuição da declividade que foi obtida a partir do MDT (Figura 5).

Tabela 4 - Classes de declividade, adaptadas de Embrapa (1979) e seus valores referentes de área na bacia do Riacho Mimoso.

Classes de declividade	Descrição	Área (km ²)	Área (%)
0-3	Plano	3.93	3.89
3-8	suave-ondulado	15.91	15.74
8-20	Ondulado	36.91	36.54
20-45	forte ondulado	33.23	32.89
> 45	Montanhoso	11.05	10.94
Total		101.02	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 8 - Mapa de classes de declividade, adaptadas de Embrapa (1979), para a bacia do Riacho Mimoso.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.2.4 Solo

Foi utilizado o *shapefile* do Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE), desenvolvido pela Embrapa, para identificação dos tipos de solo presentes na área. A Tabela 5 mostra o valor da área referente a cada solo. As definições das características de cada um foram obtidas com base nos perfis disponíveis no Sistema de Informações de Solos Brasileiros, de responsabilidade da Embrapa, para áreas próximas a bacia.

Tabela 5 - Tipos de solo com seus respectivos valores de área na bacia do Riacho Mimoso.

Tipos de solo	Símbolo	Área (km²)	Área (%)
Argiloso Vermelho-Amarelo	PVA	3.91	3.87
Neossolo Flúvico	RY	2.14	2.12
Neossolo Litólico	RL	42.27	41.84
Neossolo Regolítico	RR	23.12	22.89
Planossolo Háptico	SX	29.58	29.28
Total		101.02	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O cálculo dos parâmetros de solo exigidos pelo modelo foi realizado através da planilha Excel desenvolvida por Saxton e Rawls (2006), que faz uso da Função de Pedotransferência (PTF) para gerar seus resultados. Os parâmetros do solo requisitados pelo modelo para cada um dos tipos de solo abrangentes na bacia estudada podem ser vistos nas Tabelas 6 a 10.

Tabela 6 - Parâmetros do solo tipo PVA utilizados para a simulação do SWAT.

Tipo de solo	Classificação hidrológica	Parâmetros				
		SOL_ZMX	180			
		ANION_EXCL	0.5			
		SOL_CRK	0.5			
		TEXTURE	SC			
		Camadas	1	2	3	4
		SOL_Z	40.00	55.00	140.00	180.00
		SOL_BD	0.78	1.28	1.34	1.35
		SOL_AWC	0.18	0.12	0.12	0.12
PVA	D	SOL_K	63.02	3.30	0.99	1.68
		SOL_CBN	14.20	8.20	3.10	3.40
		CLAY	23.52	46.53	50.49	46.53
		SILT	0.11	0.04	0.04	0.05
		SAND	49.00	31.68	27.72	28.71
		ROCK	2.00	1.00	1.00	1.00
		SOL_ALB	0.00	0.00	0.07	0.06
		USLE_K	0.03	0.02	0.02	0.02
		SOL_EC	1.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 7 - Parâmetros do solo tipo RY utilizados para a simulação do SWAT.

Tipo de solo	Classificação hidrológica	Parâmetros				
RY	C	SOL_ZMX	150			
		ANION_EXCL	0.5			
		SOL_CRK	0.5			
		TEXTURE	SCL			
		Camadas	1	2	3	4
		SOL_Z	20.00	80.00	130.00	150.00
		SOL_BD	1.32	1.42	1.50	1.45
		SOL_AWC	0.11	0.11	0.11	0.12
		SOL_K	15.62	12.06	0.93	0.43
		SOL_CBN	7.60	5.20	1.60	1.50
		CLAY	26.19	26.88	42.78	47.04
		SILT	0.02	0.03	0.01	0.02
		SAND	64.99	61.44	43.71	42.14
		ROCK	3.00	4.00	7.00	2.00
		SOL_ALB	0.00	0.02	0.20	0.21
USLE_K	0.02	0.02	0.01	0.02		
SOL_EC	1.00	0.00	0.00	0.00		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 8 - Parâmetros do solo tipo RL utilizados para a simulação do SWAT.

Tipo de solo	Classificação hidrológica	Parâmetros				
RL	B	SOL_ZMX	35			
		ANION_EXCL	0.5			
		SOL_CRK	0.5			
		TEXTURE	SC			
		Camadas	1	2	3	4
		SOL_Z	15.00	35.00	-	-
		SOL_BD	0.85	1.56	-	-
		SOL_AWC	0.17	0.16	-	-
		SOL_K	175.60	62.62	-	-
		SOL_CBN	10.00	3.60	-	-
		CLAY	4.32	2.70	-	-
		SILT	0.20	0.14	-	-
		SAND	55.44	33.75	-	-
		ROCK	28.00	55.00	-	-
		SOL_ALB	0.00	0.05	-	-
USLE_K	0.06	0.06	-	-		
SOL_EC	1.00	0.00	-	-		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 9 - Parâmetros do solo tipo RR utilizados para a simulação do SWAT.

Tipo de solo	Classificação hidrológica	Parâmetros					
RR	B	SOL_ZMX					120
		ANION_EXCL					0.5
		SOL_CRK					0.5
		TEXTURE					SL
		Camadas	1	2	3	4	5
		SOL_Z	12.00	35.00	65.00	90.00	120.00
		SOL_BD	1.34	1.48	1.54	1.57	1.60
		SOL_AWC	0.07	0.06	0.09	0.10	0.10
		SOL_K	122.52	91.02	50.71	32.06	29.59
		SOL_CBN	4.10	2.20	2.30	2.00	1.90
		CLAY	3.84	5.76	9.79	13.35	13.44
		SILT	0.22	0.14	0.12	0.11	0.09
		SAND	83.52	81.60	65.86	58.74	55.44
		ROCK	4.00	4.00	11.00	11.00	16.00
		SOL_ALB	0.04	0.13	0.12	0.15	0.16
		USLE_K	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
SOL_EC	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 10 - Parâmetros do solo tipo SX utilizados para a simulação do SWAT.

Tipo de solo	Classificação hidrológica	Parâmetros				
SX	C	SOL_ZMX				70
		ANION_EXCL				0.5
		SOL_CRK				0.5
		TEXTURE				C
		Camadas	1	2	3	4
		SOL_Z	25.00	50.00	70.00	-
		SOL_BD	1.41	1.44	1.51	-
		SOL_AWC	0.13	0.12	0.12	-
		SOL_K	8.99	3.95	9.19	-
		SOL_CBN	4.70	3.30	2.50	-
		CLAY	30.60	35.72	26.39	-
		SILT	0.05	0.04	0.06	-
		SAND	44.10	41.36	46.41	-
		ROCK	10.00	6.00	9.00	-
		SOL_ALB	0.02	0.06	0.11	-
		USLE_K	0.02	0.02	0.02	-
SOL_EC	1.00	0.00	0.00	-		

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

4.2.4 Uso e Cobertura do Solo

A Figura 6, apresentada no Capítulo 4, é resultado da classificação de imagem realizada para a área através das ortofotos disponibilizadas pelo PE3D, cujas imagens datam do ano de 2016. Buscou-se uma analogia a cada cobertura de solo definida com as apresentadas no banco de dados do modelo, tendo como base as equivalências consideradas na literatura disponível do modelo. Foi definida a utilização da analogia da CPRH (2011), ilustrada para o presente estudo na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores de área das classes de cobertura dos solos considerados para a bacia e seus equivalentes no banco de dados do SWAT.

Cobertura do solo	Equivalentes da base do SWAT	Área (km²)	Área (%)
Antropismo	<i>Agricultural Land-Generic</i>	3.73	3.69
Vegetação arbustiva	<i>Range Grass</i>	61.43	60.81
Solo exposto	<i>Onion</i>	32.77	32.44
Água	<i>Water</i>	3.09	3.06
Total		101.02	100.00

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

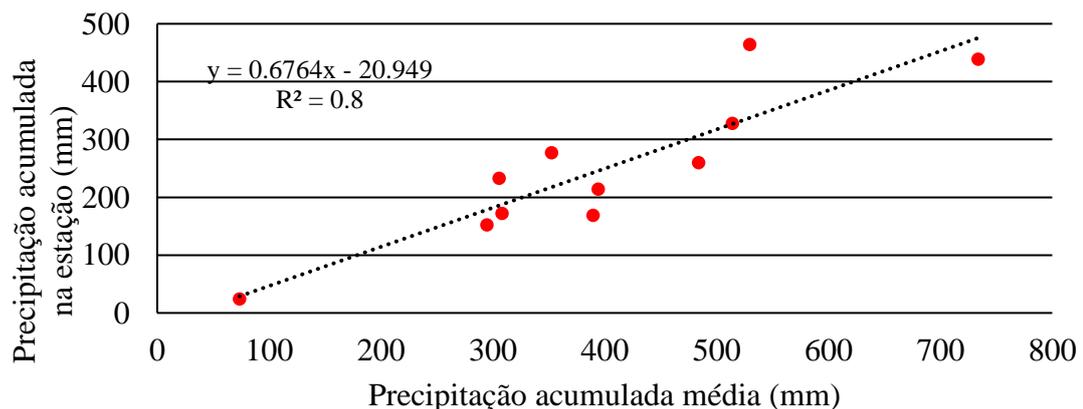
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para análise de consistência dos dados de chuva utilizados, a simulação dos processos hidrossedimentológicos da Bacia do Riacho Mimoso, bem como das vazões simuladas com o modelo para as sub-bacias das barragens subterrâneas de interesse.

5.1 Análise de consistência

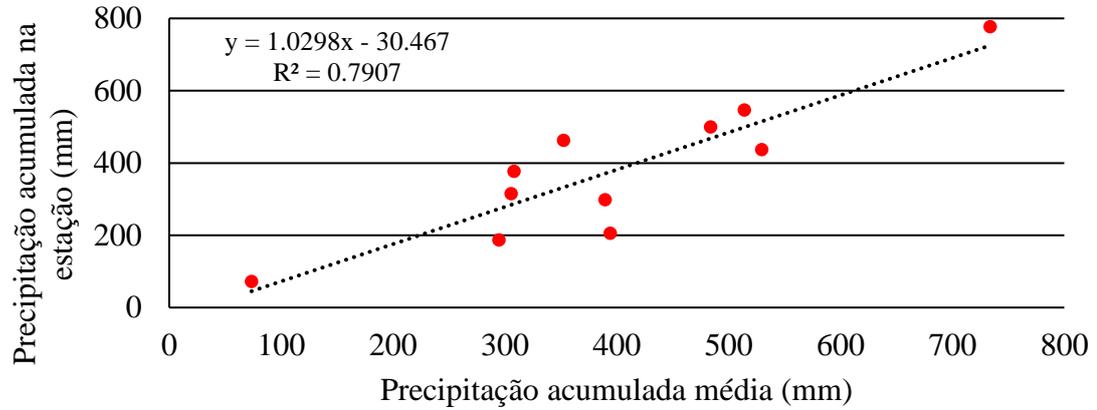
A análise de consistência disposta entre as Figuras 9 e 12 mostram a homogeneidade das informações nas estações reais e na estação fictícia para a precipitação. É possível observar pelo gráfico que os valores de chuva são bem ajustados aos valores do posto fictício adotado, apresentando coeficientes de determinação entre 0.6 e 0.8, considerados de bons à ótimos resultados, mostrando assim que não ocorreram inconsistências nos dados pluviométricos durante a modelagem. Contudo, segundo Paz (2004), embora os dados possam indicar à primeira vista coerência, é possível existirem inconsistências nas informações totais de precipitação originados de diversos fatores ligados aos registros dos dados na estação pluviométrica.

Figura 9 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Jataúba.



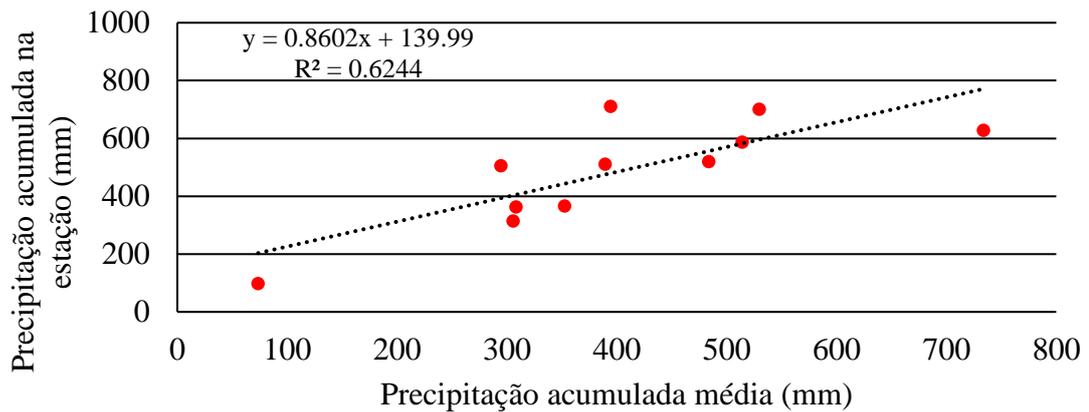
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 10 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Sanharó.



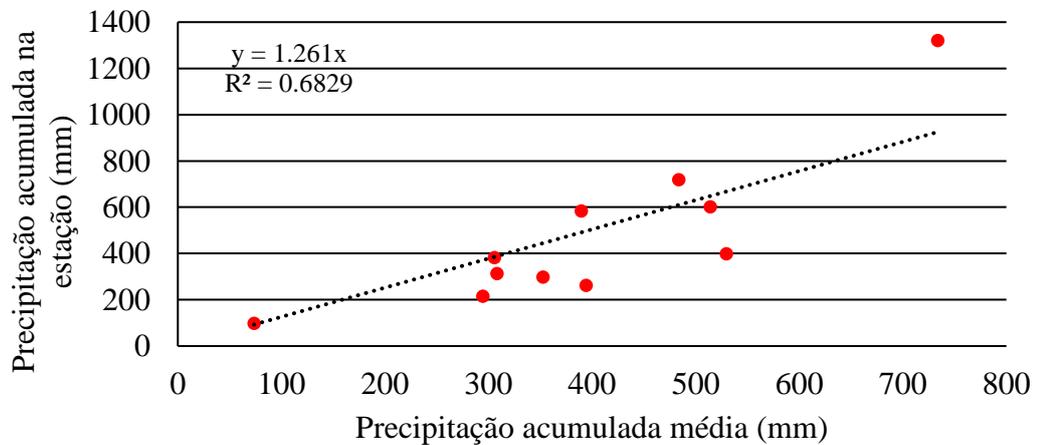
Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 11 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Brejo da Madre de Deus.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 12 - Análise de consistência dos dados pluviométricos da Estação de Poção.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.2 Definição das HRUs

De acordo com Arnold et al. (1998), a correta delimitação das sub-bacias em um projeto possibilita extrair os melhores resultados a partir da criação dos HRUs através da união dos mapas de solo, declividade e cobertura do solo. Quando consideradas na simulação sub-bacias com áreas de contribuição muito pequenas quando relacionadas a área total da bacia o modelo pode ter seus resultados mascarados, sendo seu funcionamento comprometido.

Na presente simulação, o processo resultou em 279 HRUs, através da definição do nível de sensibilidade de 20% para tipo e cobertura do solo e 10% para a declividade. O número de HRUs varia em cada uma das 36 sub-bacias delimitadas, sendo sua distribuição exibida na Tabela 12.

Tabela 12 - Número de HRUs por sub-bacia do Riacho Mimoso.

Sub-bacia	HRU	Sub-bacia	HRU	Sub-bacia	HRU	Sub-bacia	HRU
1	2	10	12	19	8	28	15
2	2	11	11	20	12	29	6
3	4	12	9	21	8	30	4
4	8	13	12	22	9	31	4
5	10	14	12	23	6	32	6
6	8	15	9	24	14	33	7
7	4	16	9	25	10	34	11
8	9	17	3	26	8	35	5
9	8	18	6	27	4	36	4

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

A geração das HRUs permite uma melhor discretização do problema, detalhando o máximo possível a região e proporcionando resultados mais precisos na simulação.

5.3 Balanço hídrico

Um dos *outputs* do modelo é o balanço hídrico da área. A Tabela 13 ilustra os resultados anuais, para o período analisado, da simulação dos processos hidrológicos na Bacia do Riacho Mimoso, obtidos através da modelagem com o SWAT. As médias anuais foram de 342.6 mm para a precipitação, 95 mm para a evapotranspiração potencial e 34 mm para a evapotranspiração real.

O escoamento superficial simulado foi de 14.76 mm. O valor médio anual para fluxo lateral e subterrâneo foram, respectivamente, 111 mm e 172.52 mm. A elevada precipitação apresentada no modelo em 2010 é um reflexo das fortes chuvas que ocorreram no estado nesse ano.

Tabela 13 - Resultados dos processos hidrossedimentológicos simulados pelo modelo SWAT para a Bacia do Riacho Mimoso.

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Precipitação (mm)	483.80	529.60	73.60	307.80	352.90	305.80	293.50	393.40
Escoamento Superficial (mm)	37.28	40.58	0.59	7.06	4.53	8.14	7.74	12.19
Fluxo lateral (mm)	158.23	168.48	25.02	102.70	115.64	99.81	95.19	122.92
Fluxo subterrâneo (mm)	238.48	259.82	55.01	141.39	184.38	169.97	148.64	182.43
Evapotranspiração potencial (mm)	76.19	115.33	63.80	68.29	83.06	96.53	95.46	161.60
Evapotranspiração real (mm)	28.00	44.85	12.84	20.01	39.16	32.51	32.74	61.79
Percolação (mm)	261.08	275.13	41.75	171.63	193.69	165.24	157.82	197.76
Produção de sedimentos (t/ha)	6.26	5.88	0.06	1.27	0.69	1.10	1.12	2.27
Potencial de recarga subterrânea do aquífero profundo(mm)	7.13	7.53	1.39	7.48	7.48	7.62	7.57	6.42

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

O valor da Curva Número (CN) médio obtida foi de 74.72, relativamente alto ao se considerar que o escoamento superficial na bacia é pouco expressivo. Por outro lado, o fluxo lateral corresponde a 32,4% da precipitação total anual. Juntamente com o escoamento superficial, correspondem a aproximadamente 36,7% do volume precipitado que é convertido em escoamento. Assim, o modelo indica que a água tende a infiltrar e escoar sub-superficialmente.

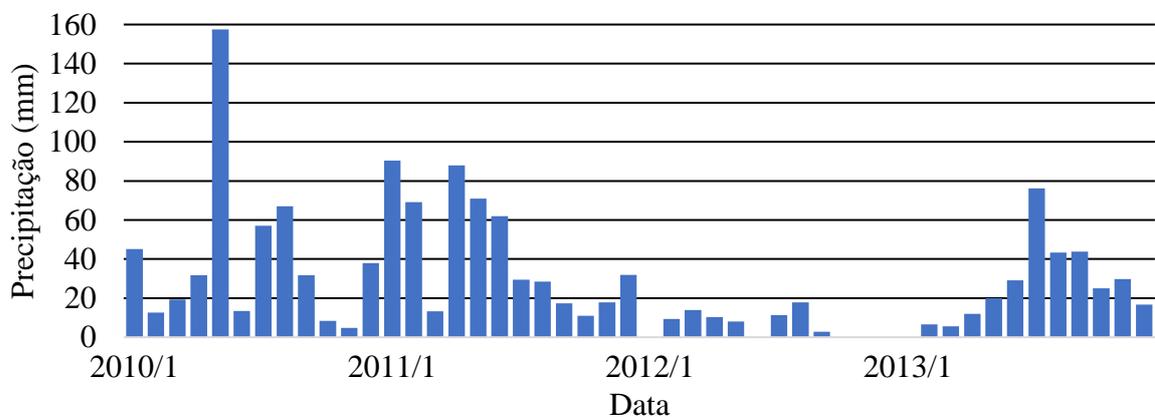
Além disso, outros fatores podem estar influenciando o comportamento do CN como por exemplo a boa distribuição temporal das chuvas no período estudado, contribuindo para a manutenção da umidade, o que torna o volume do fluxo subterrâneo um indicio que a umidade do solo se conserva nos períodos sem chuva.

No geral, da precipitação média foi estimado que 9,92% (34 mm) são convertidos em evapotranspiração e dos 87,06% (298.28 mm) convertidos em escoamento, onde 4,95% é

composto por escoamento superficial, 37,21% por escoamento lateral ou sub-superficial e os 57,84% restantes correspondem ao escoamento subterrâneo ou de base.

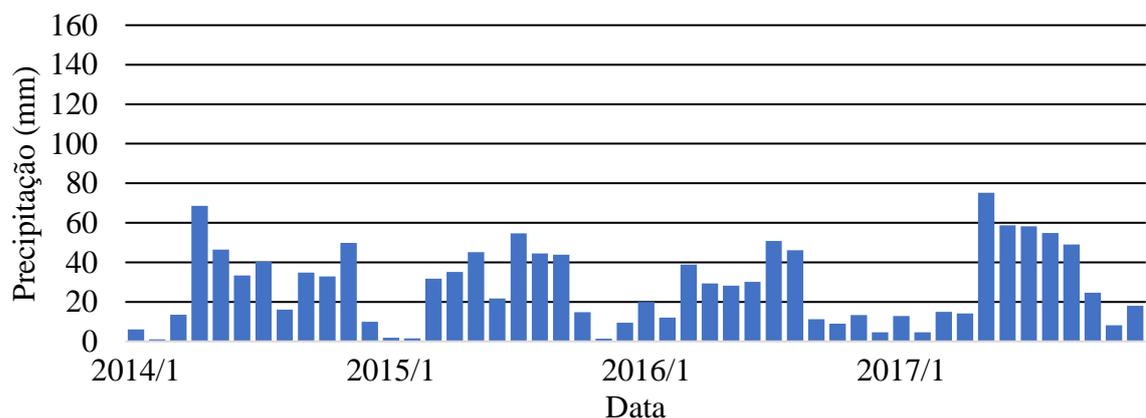
A precipitação simulada mensal para o período de estudo é disposta nas Figuras 13 e 14. Os baixos valores simulados entre os anos de 2012 e 2013 são reflexos do período de seca que atingiu todo o Nordeste durante esses anos. Por tratar-se do início do ciclo hidrológico para o modelo, a quantidade de água precipitada na bacia influencia diretamente os resultados dos processos hidrossedimentológicos.

Figura 13 - Comportamento mensal da precipitação simulado pelo modelo SWAT para os anos de 2010 a 2013.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 14 - Comportamento mensal da precipitação simulado pelo modelo SWAT para os anos de 2014 a 2017.

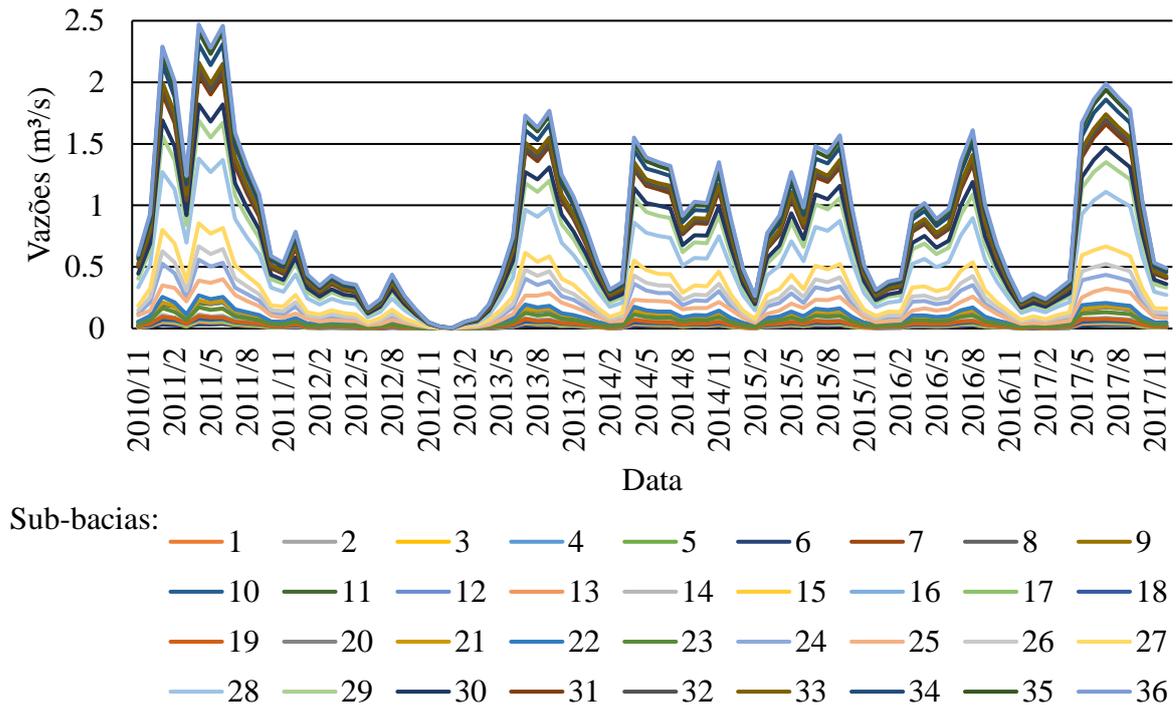


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Foi prevista a realização da calibração da vazão na bacia, porém, com a ausência de estações fluviométricas na região ou em regiões próximas cujo regime se assemelhassem ao da área e com disponibilidade de dados consistentes para o período simulado, essa etapa da modelagem não pôde ser realizada. No entanto, o modelo SWAT foi desenvolvido com o propósito de ser aplicado em bacias não monitoradas, sendo assim a avaliação de sua

aplicabilidade na bacia pode ser realizada sem esse processo a partir da análise de outros parâmetros, como por exemplo a influência do CN no escoamento superficial, do ESCO na produção de sedimentos, entre outros. Os hidrogramas para as vazões em cada sub-bacia criada é mostrado na Figura 15. Os valores máximos de vazões são dispostos na Tabela 14.

Figura 15 - Hidrograma das vazões simuladas pelo SWAT para cada sub-bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 14 - Vazões máximas simuladas por sub-bacia.

Sub-bacia	Vazão (m³/s)										
1	0.04	7	0.06	13	0.06	19	0.10	25	0.40	31	2.06
2	0.07	8	0.09	14	0.12	20	0.22	26	0.67	32	2.11
3	0.06	9	0.10	15	0.18	21	0.23	27	0.86	33	2.16
4	0.05	10	0.11	16	0.10	22	0.27	28	1.38	34	2.31
5	0.04	11	0.21	17	0.07	23	0.17	29	1.69	35	2.41
6	0.04	12	0.07	18	0.08	24	0.56	30	1.82	36	2.47

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

As Figuras 16 a 19 mostram distribuição anual, considerando os anos de 2010 a 2017, de algumas das variáveis consideradas no balanço hídrico da bacia pelo modelo SWAT nas 36

sub-bacias criadas. É possível notar que a maior intensidade das quatro variáveis é concentrada no centro da bacia, salve algumas exceções.

Figura 16 - Mapa da distribuição do escoamento superficial entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho

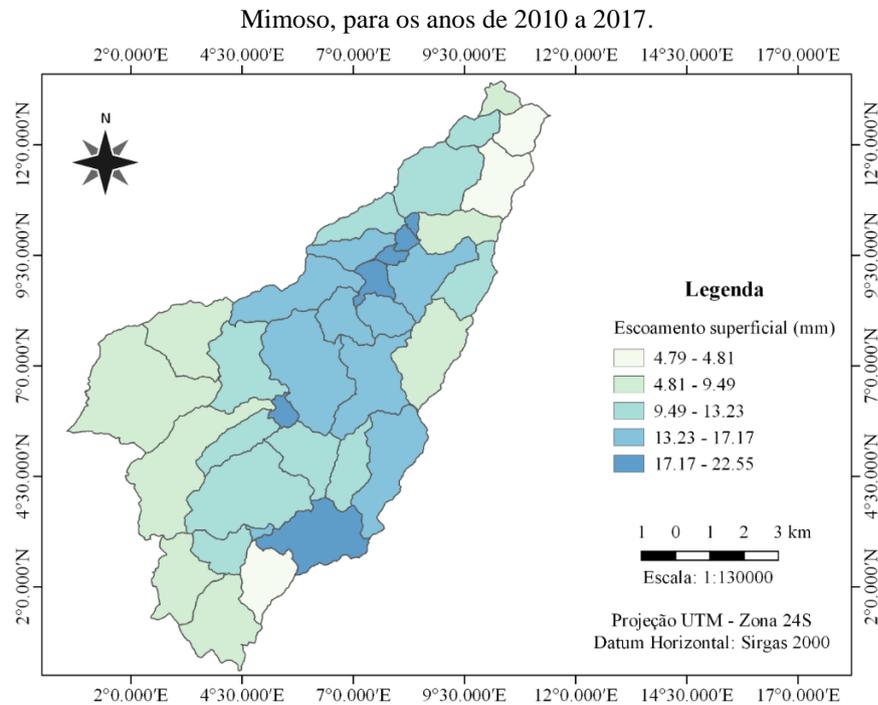


Figura 17 - Mapa de distribuição da evapotranspiração real entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho

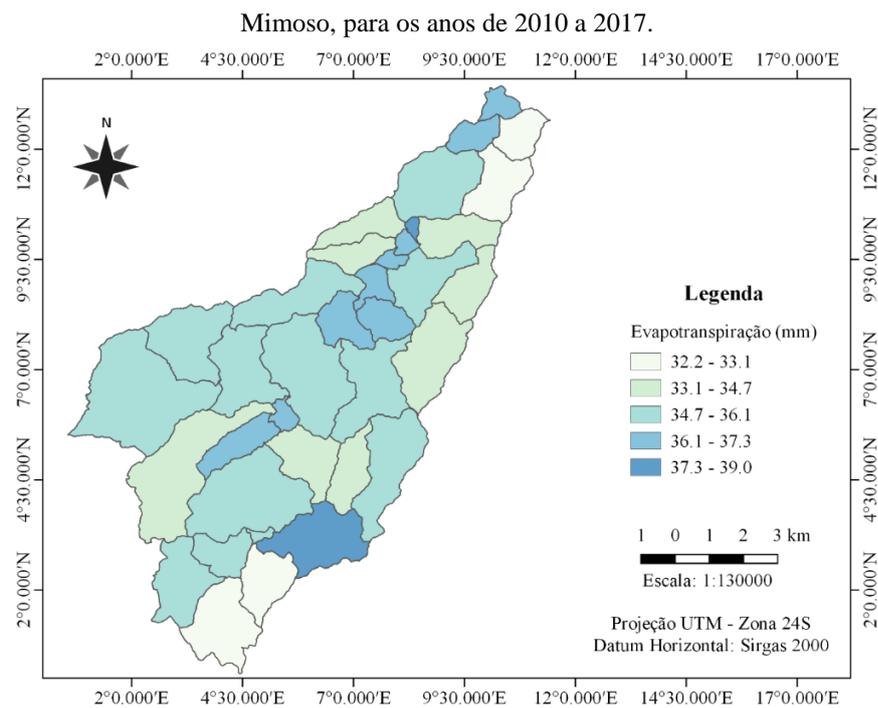
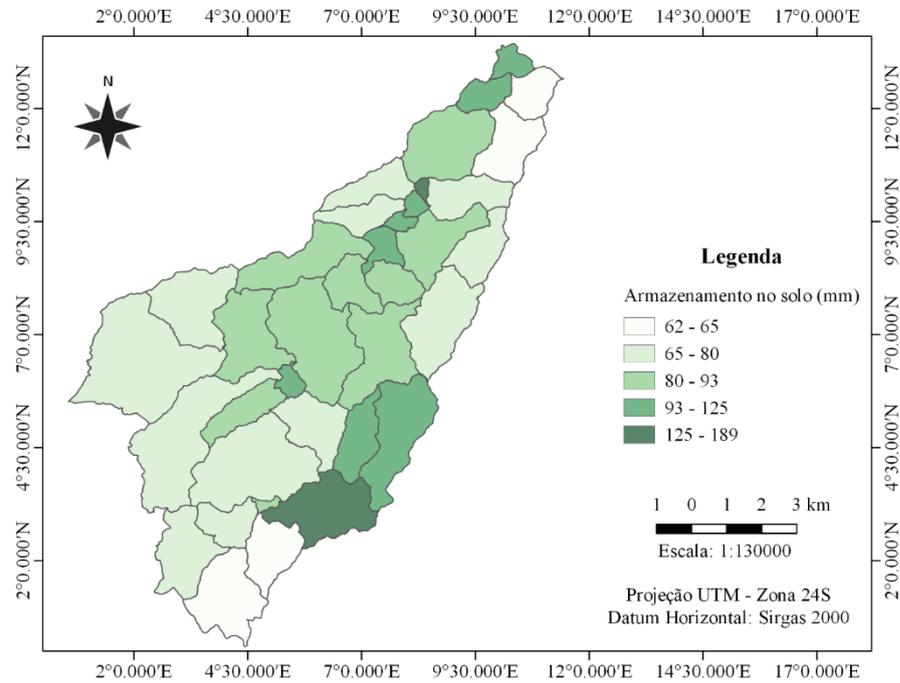
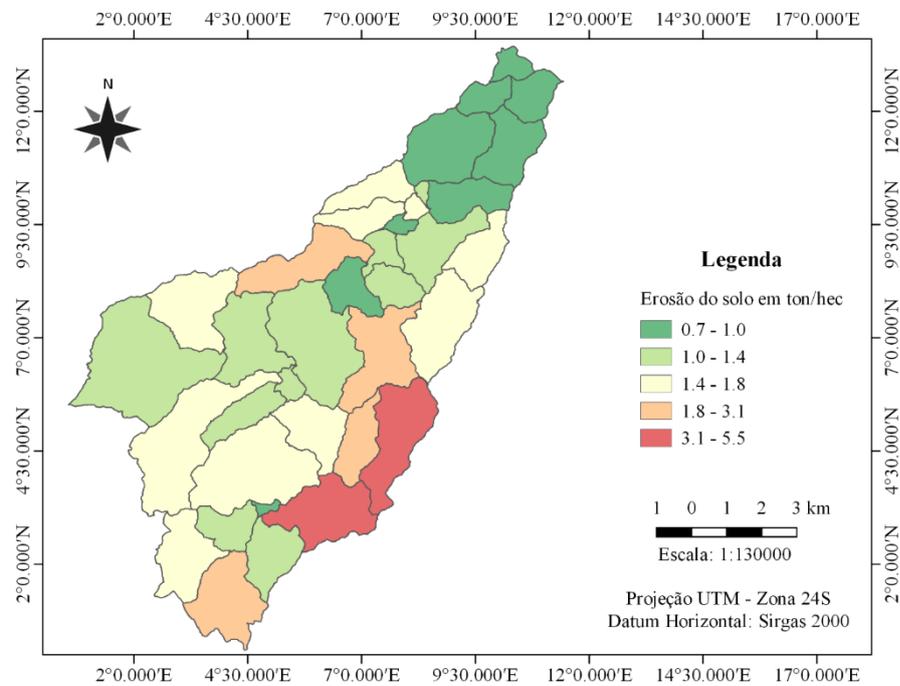


Figura 18 - Mapa da distribuição da capacidade de armazenamento do aquífero profundo entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 19 - Mapa de distribuição da erosão do solo entre as sub-bacias componentes da Bacia do Riacho Mimoso, para os anos de 2010 a 2017.

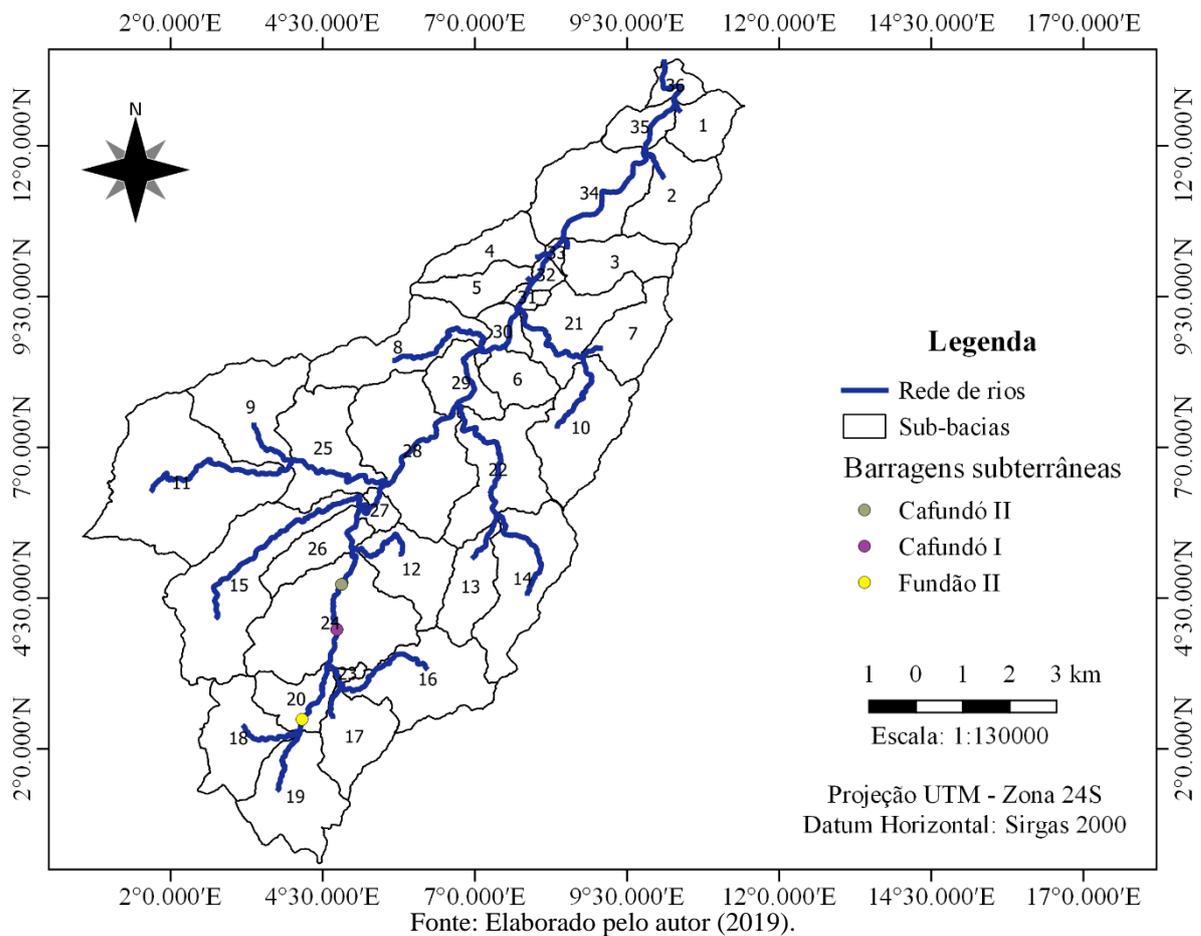


Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

5.4 Estimativa de vazões nas barragens subterrâneas

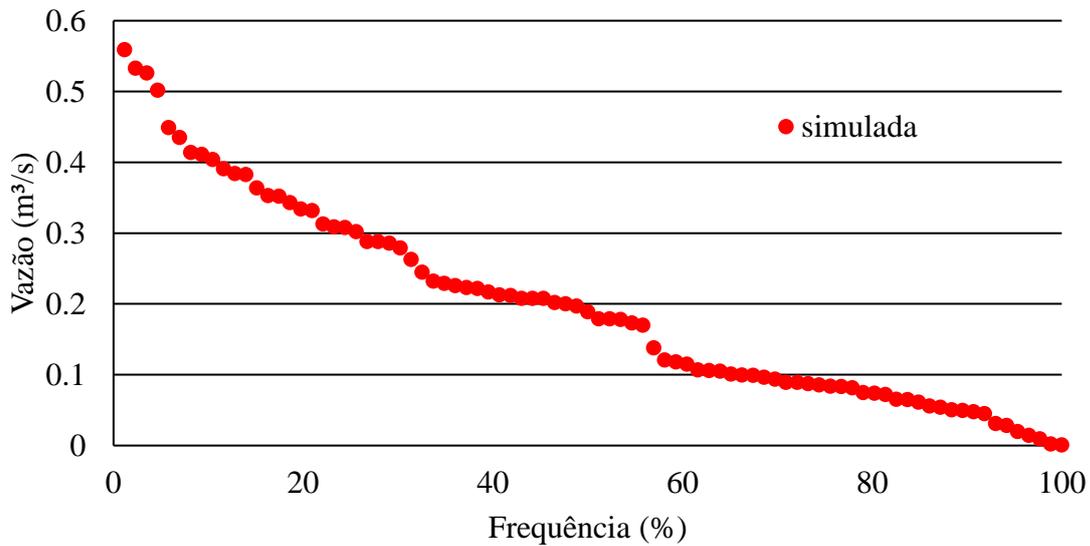
As vazões para os locais das barragens subterrâneas de Cafundó I, Cafundó II e Fundão II (a Figura 20 mostra suas localizações dentro da bacia), foi obtida a partir das vazões simuladas pelo modelo SWAT para diferentes pontos da bacia. As barragens de Cafundó I e II se encontram na área da sub-bacia 24, enquanto que a de Fundão II é contida na sub-bacia 20.

Figura 20 - Mapa de localização das barragens subterrânea dentro da Bacia do Riacho Mimoso.



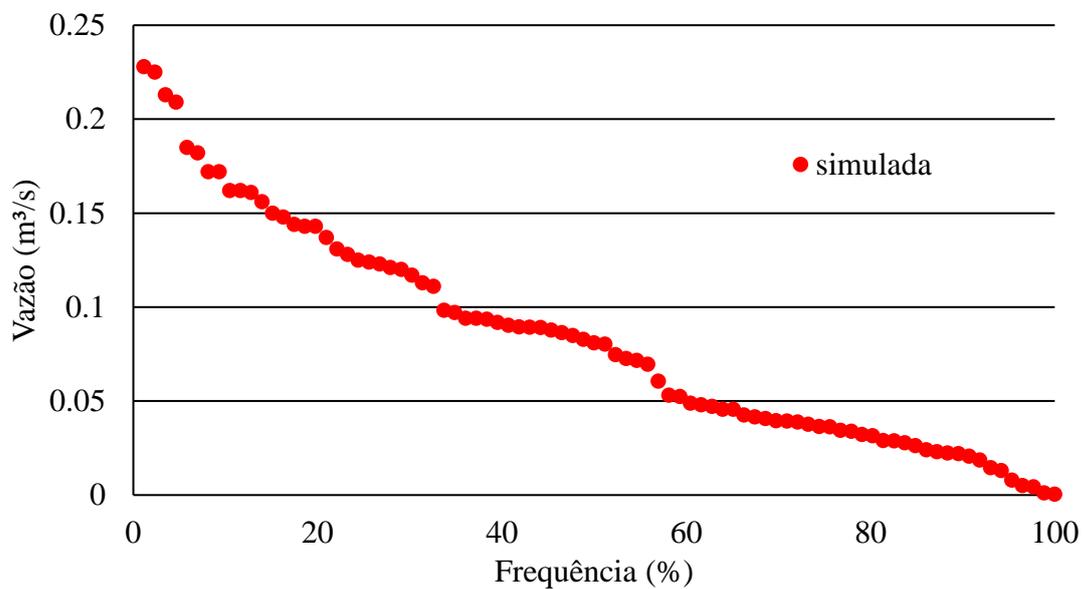
A partir da vazão simulada em cada uma das sub-bacias, nas quais as barragens estão inseridas, foram obtidas as curvas de permanência (Figura 21 e 22), que relaciona a vazão com sua probabilidade de ocorrência.

Figura 21 - Curva de Permanência para as barragens subterrâneas Cafundó I e II.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Figura 22 - Curva de Permanência para a barragem subterrânea de Fundão II.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Os valores de referência para a vazão de recarga dos aquíferos artificiais formados pelas barragens subterrâneas, bem como para realização de obras especiais no local, como a construção de vertedouros, são dados pela Q_5 , vazão que é ultrapassada em apenas 5% do tempo considerado. A Q_5 para as barragens de Cafundó I e II é de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, já para Fundão II a vazão estimada é de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Como se trata de curso d'água intermitente, a permanência de vazões nulas é elevada, havendo escoamento somente em enxurradas durante o período chuvoso.

6 CONCLUSÃO

O modelo SWAT permite a modelagem do comportamento das variáveis hidrológicas ao longo do tempo, disponibilizando ao final de sua execução diversos resultados, demonstrando uma ampla gama de aplicações por fazer uso de base física, espacial e análise dinâmica do sistema em suas simulações.

Por meio dos resultados apresentados, é compreendido que boa parte da precipitação (média anual de 342.6 mm) na bacia sofre percolação no solo e fica armazenada nos aquíferos. Isso se dá, devido a presença das aluviões na região, que possuem alto potencial de armazenamento de água. O escoamento na bacia fica em torno de 298.28 mm anuais, sendo composto por escoamento superficial (4,95%), sub-superficial (37,21%) e subterrâneo (57,84%).

Para a modelagem sem o processo de calibração é perceptível que o modelo consegue representar adequadamente a variação dos parâmetros no tempo. Como o conhecimento das vazões de 0,5 m³/s para Cafundó I e II e de 0,2 m³/s para Fundão II é essencial para os estudos sobre as barragens subterrâneas, a modelagem suprirá essa necessidade, pretendendo-se, porém, instalar pequenos vertedouros ao longo do curso d'água para determinação das vazões. Isso irá permitir o aprimoramento da modelagem, com a calibração e validação do modelo SWAT para a Bacia do Riacho Mimoso.

Também pode-se ter como meta o melhoramento do modelo a partir a utilização de dados de campo para a caracterização do solo e de dados climáticos próprios da região.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno**. Brasília: ANA, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Hidroweb**. Disponível em: < http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf >. Acesso: Jun. 2017

ARAGÃO, R DE.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E., SRINIVASAN; V. S. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do Modelo SWAT e Simulação dos Processos Hidrossedimentológicos em uma Bacia no Agreste Nordestino. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v..37, p. 1091-1102, 2013.

ALLEN, R. G. A. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Idaho, Ohio, United States, v.112, p. 348-368, 1986.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of evapotranspiration. **Agronomy Journal Abstract**, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: **model development**, **JAWRA**, v. 34, n, 1, p. 73-89, 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.; VANLIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model use calibration and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

BALDISSERA, G. C. **APLICABILIDADE DO MODELO DE SIMULAÇÃO HIDROLOGICA SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL), PARA A BACIA HIDROGRAFICA DO RIO CUIABÁ/MT**. 148 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, 2005.

BATHURST, J. C.; WICKS, J. M.; O'CONNEL, P. E. The SHE / SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: Singh, V. P. (editor) **Computer models of watershed hydrology**. **Water Resources Publications. Highlands Ranch**, 1130p, 1995.

BASTOS, D. C. O.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. Avaliação de Alternativa de irrigação suplementar com água moderadamente salina em vale aluvial no semiárido: experimentação e modelagem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p.27-36, 2009.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8ª ed. São Paulo: Ícone, 355 p. 2012.

BEVEN, K; KIRKBY, M. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Science Bulletin**, v.24, p. 43-69, 1979.

BEVEN, K. J.; LAMB, R; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. Topmodel. In: SINGH, V. P. Computer Models of Watershed. **Water Resources Publication**, p. 627-668, 1995.

BRASIL. Lei n. 9.433, de 08 de jan. de 1997. **Lei das Águas**. Brasília, jan. 1997.

CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. **Introdução a ciência da geoinformação**. INPE, São José dos Campos, 2001.

CARVALHO NETO, J. G. **Modelagem e valoração de serviço ambiental hidrológico na bacia hidrográfica do rio Una – Pernambuco**. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

CIRILO, J. A.; COSTA, M. R.; ABREU, G. H. F. G. BALTAR, A M.; AZEVEDO, L. G. Soluções para o suprimento de água de comunidades rurais difusas no semiárido brasileiro: avaliação de barragens subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, n.4, p.5-24, 2003.

CPRH. **Relatório de Monitoramento da Qualidade da Água de Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco em 2010**. Recife, 100p, 2011.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. K. Digital Simulation in Hydrology: Stanford Watershed Model IV. **Technical Report nº 39**, Department of Civil Engineering, Stanford University, p. 210, 1996.

COSTA, M. R. **Avaliação do potencial de aproveitamento de reservatórios constituídos por barragens subterrâneas no semiárido**. 198 f. Dissertação (Mestrado em Recursos

Hídricos), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, 2002.

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. Hydrological modelling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 2394–2406, 2009.

DOUGLAS-MANKIN, K. R.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Soil and water assessment tool (SWAT) model: current developments and applications. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 53, p. 1423-1431, 2010.

EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p, 1979.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª edição. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio De Janeiro: Embrapa Solos, 2018.

EMBRAPA. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco**. Recife: Embrapa Solos UEP Recife/SPRRA-PE, 2010.

FERNANDES, J. G. **ESTIMATIVA DE VAZÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, UTILIZANDO O MODELO SWAT**. 185f. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, CFCH, Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R. C.; LAPA, K. R.; BRAINSKI, E. & PINHEIRO, A. The use and results of the soil and water assessment tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: **INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE & WORKSHOPS**. Toledo. Proceedings Toledo, Texas A&M University, p. 127, 2011.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 01, n. 02, p. 96-99, 1985.

INMET. **Dados históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso: Jun. 2018.

JAMALI, I. A.; OLOFSSON, B. O.; MORTBERG, U. Locating suitable sites for the construction of subsurface dams using GIS. **Environ Earth Sci**, v. 70, p. 2511–2525, 2013.

JOHNSON, L. E. Geographic Information Systems. In: **Water Resources Engineering**, CRC Press, p. 340, 2009.

KIM, Jong-Tae; KIM, Man-II; CHOO, Chang-Oh; JOEONG, Gyo-Cheol. Validity evaluation of a groundwater dam in Oshipcheon River, eastern Korea using a SWAT–MODFLOW model. **Environ Earth Sci**, p. 760-769, 2017.

KING, K. W.; ARNOLD J. G.; WILLIAMS, J. R.; SCRINIVASAN R. Soil and Water Assessment Tool–SWAT. Texas: USDA, **Agricultural Research Service**, p. 450, 1996.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica**. 95p. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de sistemas Ambientais), instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos hídricos: Princípios, integração e Aplicação**. 2ª Edição Revista e Ampliada. Porto Alegre: Editora ABRH, v.1, 572 p, 2013.

MELO, H. A., CUNHA, J. B. L., NÓBREGA, R. L. B., RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. O. Modelos Hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica (SIG): Integração possível. **IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2008.

MELO, H. A. **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica**. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Ciclo hidrológico: Águas Subterrâneas e o Ciclo Hidrológico**. Brasília, DF, 2018.

MONTEITH, J. L. Evaporation and the Environment. **19th Symposia of the Society for Experimental Biology**, 19, 205-234, 1965.

NASONOVA, O. N. Application of a land surface model for simulating rainfall streamflow hydrograph: 2. Comparison with hydrological models. **Water Resources**, v. 38, n. 3, p. 274-283, 2011.

NRCS, Natural Resources Conservation Service. “Chapter 7: Hydrologic Soil Groups”. In: National Engineering Handbook: Part 630, **Hydrology**. 2007. Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/>>. Acesso em: set. 2018.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil And Water Assessment Tool – Input/Output File Documentation. Temple: Blackland **Research Center**, Soil and Water Research Laboratory. 541p. 2012.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical documentation version 2009. Temple: Blackland **Research Center**. Texas Agricultural Experiment Station, 2011.

NUNES, F. M. S. **AVALIAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DE UMA BACIA SEM DADOS DE VAZÃO UTILIZANDO O MODELO SWAT**. 188p. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PAZ, A. R. Apostila de Hidrologia Aplicada. **Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Caxias do Sul**, 138p, 2004.

PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional (PE3D)**. Disponível em: <<http://www.pe3d.pe.gov.br/>>. Acesso em: out. 2018.

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

PULLAR, D.; SPRINGER, D. Toward integrating GIS and catchment models. **Environmental Modelling and Software**, v. 15, p. 451-459. 2000.

QGIS BRASIL. Disponível em: < www.qgis.org/pt_BR/site/>. Acesso em: Jun. 2018.

ROCKWOOD, D. M. Columbia Basin stream-flow routing by computer. **American Society of Civil Engineers, Journal of Waterways and Harbors Division**, v. 84, n. 1, 1958.

SAGHAFIAN, B.; LIESHOUT, A. M. V.; RAJAEI, H. M. Distributed catchment simulation using raster GIS. **JAG**, v. 2, p. 199-203, 2000.

SANTOS, I.; ANDRIOLO, M. V.; GIBERTONI, R. C.; PEREIRA FILHO, D. L. B. Desenvolvimento de modelo de avaliação da qualidade de água e transporte de sedimentos para pequenas e médias centrais elétricas: modelagem da erosão e transporte de sedimentos. **Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)**. Curitiba- PR, 91 p, 2005.

SANTOS, I. **Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrogeomorfológicos: Mecanismos de Geração de Escoamento e Conectividade Hidrológica**. 167p. Tese (Doutorado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SANTOS, J. Y. G. S.; SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Aplicação do modelo SWAT para a estimativa da produção de sedimentos na Bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. In: **XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**, João Pessoa – PB. 2014. Anais do XI ENES.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campinas, 2004.

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

SECTMA. Secretaria de Ciências, Tecnologia e Meio Ambiente. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. Recife-PE, 1998.

SHENTHILKMAR, M.; ELANGO, L. Modeling the impact of a subsurface barrier on groundwater flow in the lower Palar River basin, southern India. **Hydrogeology Journal**, v.19, p. 917-928, 2011.

SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. TOPMODEL: Teoria integrada e revisão. **Revista RA'EGA**, Curitiba, n. 14, p. 97-110, Editora UFPR, 2007.

SILVA JUNIOR, V. P. **Investigação do escoamento superficial e produção de sedimentos em bacia representativa do semiárido**. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Departamento de Tecnologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica**. In: Tucci, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação, 2ª edição, Porto Alegre. Universidade/UFRGS: ABRH, p 35- 51, 2009.

SOUZA, V. A. S. **Monitoramento Hidrossedimentológico com Suporte do Modelo SWAT na Amazônia Ocidental – Bacia do Rio Machado/RO**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Estimativa da Variabilidade Espacial de Vazões Mínimas na Bacia Hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, Região Sul-Brasileira, com Aplicação do Modelo SWAT. Raega - O Espaço Geográfico em Análise, [S.l.], v. 28, p. 134-153, jun. 2013.

SWAT, **Soil & Water Assessment Tool**. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/>>. Acesso em: Abr. 2018.

TAVEIRA, I. M. L. M. **Avaliação de alternativas de uso do solo através da simulação hidrossedimentológica da bacia representativa de Sumé com o modelo SWAT**. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 2, ed. Porto Alegre, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 4, ed. Porto Alegre, 2009. 943 p.

TUPPAD, P.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; LEE, T.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic/water quality model: Extended capability and wider adoption. **Transaction of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1677-1684, 2011.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018: Soluções Baseadas na Natureza para a Gestão da Água**. 2018.

UNESCO. **World Water Assessment Programme**. Disponível em: <http://www.unesco.org/water/iyfw2/water_use.shtml>. 2005. Acesso em: Jul de 2018.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soil And Water Assessment Tool) na Simulação da Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural**. 144f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

WADA, Y., M.; FLÖRKE, N. Hanasaki, S.; EISNER, G.; FISCHER, S.; TRAMBEREND, Y.; SATOH, M.T.H. van; VLIET, P.; YILLIA, C. Ringler; WIBERG, D. Modeling global water

use for the 21st century: Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. **Geosci. Model Dev.**, v. 9, p. 175-222, 2016.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. Washington D.C., USDA, **Agriculture Research Service**. 58p. (Agriculture Handbook, 735). 1978.

WINCHELL, M.; SRINIVASAN, R.; LUZIO, M.; ARNOLD, J. ArcSWAT Interface for SWAT 2005 – User’s guide. **Temple: Blackland Research Center, Soil and Water Research Laboratory**. 436p. 2007.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor. **Transactions of the ASABE**. v. 12, p. 100-103, 1975.

WILLIAMS, J. R. Chapter 25: The EPIC model. V.P. Singh (ed). Computer models of watershed hydrology. **Water Resources Publications**, p. 909-1000, 1995.