

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCIANA DE OMENA GUSMÃO

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA
NO ESTADO DE PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Recife

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCIANA DE OMENA GUSMÃO

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA
NO ESTADO DE PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Anildo Monteiro Caldas

Recife

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

G982b Gusmão, Luciana de Omena
Modelagem hidrossedimentológica de uma bacia hidrográfica no
Estado de Pernambuco utilizando o modelo SWAT / Luciana de
Omena Gusmão. – Recife, 2017.
98 f.: il.

Orientador(a): Marcus Metri Corrêa.

Coorientador(a): Anildo Monteiro Caldas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Recife, BR-PE, 2017.

Inclui referências.

1. Erosão Hídrica 2. Bacias hidrográficas 3. Engenharia
ambiental 4. Sistema de Informação Geográfica 5. Sedimentologia
I. Corrêa, Marcus Metri, orient. II. Caldas, Anildo Monteiro,
coorient. III. Título

CDD 628

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA
NO ESTADO DE PERNAMBUCO UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Dissertação de Mestrado elaborada por

LUCIANA DE OMENA GUSMÃO

Aprovada em 21/08/2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

Orientador – Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE

Prof. Dr. Vicente de Paula Silva

Departamento de Tecnologia Rural da UFRPE

Prof^a. Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP – Jaboticabal

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, que me deu força, coragem e esperança nos momentos difíceis.

Dedico ao meu esposo Eduardo Cabral, pelo incentivo, ajuda, amor, paciência, dedicação e esforço em todos os momentos e ao meu filho Guilherme de Omena Cabral por todo amor e paciência.

Ofereço aos meus pais José de Gusmão e Carmem Lucia por todo amor, incentivo e apoio.
Aos meus irmãos Lucas Gusmão e Rubiana Gusmão pelo apoio e carinho em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que foi minha fortaleza me dando coragem e esperança nos momentos difíceis, me fazendo prosperar e me dedicar com entusiasmo e amor em todas as etapas da minha vida.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPEAMB) pela oportunidade de formação no curso de mestrado em Engenharia Ambiental.

Ao meu esposo Eduardo Cabral da Silva, por todo amor e dedicação e por me acompanhar em cada etapa da minha vida.

Ao Meu filho Guilherme Omena, por todo carinho, pelos momentos maravilhosos, pelas lindas palavras nos momentos que precisei, e por sempre transmitir alegria, paz e amor.

Aos meus pais José de Gusmão e Carmem Lucia, que sempre estiveram presente em todos os momentos da minha vida, pelo amor, cuidado, e incentivo em todas as situações.

Aos meus irmãos José Lucas e Rubiana Omena, por me apoiar, pela amizade, carinho, momentos de felicidade e união que serviram de alicerce nesse jornada.

A minha cunhada e prima Maria das Graças Cabral, por me acompanhar, me escutar, me aconselhar quando precisei e, por todo amor e carinho.

A minha prima e cunhada Silvana Cabral da Silva e ao meu cunhado José Carlos Carvalhos da Silva, por todo carinho, palavras de incentivo e ensinamento transmitidos que foram de grande valor.

Ao meu primo e cunhado João Roberto Cabral da Silva e minha cunhada Núbia Roberta Sobral, por todo carinho, incentivo, ensinamentos e hospitalidade na minha chegada em Recife.

As minhas primas e sogras Jandira Feijó Cavalcante e Cícera Cabral da Silva, por todo amor, carinho e ajuda em todos esses anos.

Ao Prof. Dr. Marcus Metri Correa, pela orientação, pelos valiosos ensinamentos, apoio e confiança durante essa jornada.

Ao Prof. Anildo Caldas Monteiro, por sua orientação, experiência passada, ensinamentos, momentos de descontração, apoio e amizade.

A Prof.^a. Teresa Tales Pissara, por me ajudar com o modelo SWAT, em todos momentos que precisei, pelo apoio e carinho.

Ao professor Vicente de Paulo Silva, pelo conhecimentos repassado e pela dedicação como professor.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, por todo ensinamento repassado.

As secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Ednalva Gomes Santana (Nana) e Valquiria de Brito Nascimento, por toda responsabilidade, agilidade e carinho.

A Prof.^a Dr.^a. Rosa de Lima Ramos Mariano, pelo incentivo, ensinamento, apoio, carinho e amizade.

A minha amiga Jacirleide Oliveira Gouveia por me incentivar, estar presentes em todos os momentos que precisei, pela amizade durante todos esses anos, por todo amor e carinho.

Ao meu amigo Helton José dos Santos Oliveira Gouveia, pelas informações técnicas prestadas e pela amizade.

As minha amigas Renata Sérgia Cordeiro Chaves e Lídia Cristina dos Santos Alencar Magliano, pela amizade, apoio e bons momentos de descontração.

As minha amigas Sara Gomes Pinheiro e Adriana Aparecida Megumi Nishiwaki, pela troca de experiências, pelos momentos descontraídos e pela amizade construída.

A Géssica de Paula Alves Marinho e Sunamita Batista de Andrade, pela ajuda na organização do banco de dados.

Aos amigos do PPEAMB, Albédson Palácio, Alcione Moraes, Thaís Póvoas, Rivaldo Gerônimo, Valdemir, Lílina Santos, pelos bons momentos juntos.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco FACEPE, pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Os recursos hídricos têm papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico de uma região, e a utilização desordenada tem gerado problemas quali-quantitativos. Os processos erosivos acentuados em bacias hidrográficas são extremamente danosos à boa qualidade dos corpos hídricos. Devido ao grande entrave em quantificar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, assim como o efeito da escala da bacia sobre os processos hidrossedimentológicos, sua estimativa tem sido realizada por meio de modelagem. Em geral, os modelos são relacionados com as características fisiográficas, do solo e do clima. O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) integrado ao Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem sido bastante utilizado em estudos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas em todo o mundo, apresentando bons resultados. A escolha da bacia hidrográfica do rio Ipojuca se deu pelo fato da sua grande relevância para o Estado de Pernambuco, pois representa um via de comunicação hídrica entre o Sertão e o Litoral do Estado e engloba cidades de grande importância econômica e turística, como exemplo, as Cidade de Caruaru, Bezerros, Gravatá e Ipojuca. A bacia apresenta um ambiente de grande complexidade, evidenciando dessa forma, contrastes climáticos, de relevo, de solos, de cobertura vegetal, além de fatores socioeconômicos que exigem um modelo de gestão hídrica e ambiental, que atenda as peculiaridades locais. O rio Ipojuca tem uma extensão de cerca de 320 km cruzando as regiões fisiográficas do agreste, mata sul e metropolitana. Ao longo do seu percurso, extensivamente com regime hídrico temporário, é observado diversos problemas de degradação ambiental, o que lhe rende a classificação de um dos mais poluídos do Brasil. Baseado nas informações supracitadas, o presente trabalho busca estimar a vazão e analisar a distribuição espacial da produção de sedimentos na Bacia hidrográfica do Rio Ipojuca no modelo SWAT. As estimativas geradas pelo modelo permitem também que sejam avaliadas, além da produção de sedimentos, a deposição e o transporte em cada sub-bacia. Os dados do modelo foram comparados com os dados medidos na estação fluviométrica no período compreendido entre 1993 e 2006. Os dados climáticos utilizados na entrada no modelo foram obtidos na plataforma *Global Weather Data for SWAT*, os dados pluviométricos foram obtidos no sítio eletrônico da Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC – para cinco estações contidas na bacia. Utilizou-se ainda, na entrada do modelo, os mapas do uso e tipo de solo e o modelo de elevação digital do terreno (MDE). A análise dos parâmetros estatísticos que avaliam a eficiência do modelo apontaram que houve boa colinearidade entre os valores estimados e observados ($R^2=0,74$). No entanto, o valor do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE = -1,4) indicou que as médias dos valores observados representam melhor as vazões do que os valores simulados. Já o valor do Índice de Acordo – PBIAS – (-28%) indica que o modelo superestimou de forma insatisfatória os dados de campo. A produção de sedimentos estimada pelo modelo ao longo da bacia foi bastante heterogênea, com maiores valores na porção oeste. A distribuição espacial da produção de sedimentos simulada pelo SWAT, assim como, a sua correlação com a precipitação e o escoamento superficial não se mostrou satisfatória em diversas sub-bacias, mesmo quando foi avaliado outros parâmetros influentes, tais como, declividade, elevação, tipo e uso do solo. A avaliação temporal da produção de sedimento se mostrou bem correlacionada com o escoamento, indicando que o modelo apresenta bons resultados quantitativos, mas necessita de calibração para melhorar os resultados qualitativos. Sugere-se, portanto, que seja realizado a calibração do modelo para a adequada simulação hidrossedimentológica da bacia do rio Ipojuca.

Palavras-chaves: Hidrossedimentologia. SIG. Variabilidade espaço-temporal.

ABSTRACT

Water resources play a fundamental role in the socioeconomic development of a region, and its disordered use has generated qualitative and quantitative problems. Erosive processes accentuated in river basins are extremely damaging to the health of water bodies. Due to the great obstacle in quantifying the sediment production in watersheds, as well as the effect of the basin scale on the hydrosedimentological processes, its estimation has been made through modeling. In general, the models are related to the physiographic, soil and climatic characteristics. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) integrated into the Geographic Information System (GIS) has been widely used in hydrosedimentological studies in river basins around the world, presenting good results. The choice of the hydrographic basin of the Ipojuca River was due to the fact that it is of great relevance to the State of Pernambuco, since it represents a water communication route between the backwoods and the Coast of Pernambuco and encompasses cities of great economic and tourist importance, The City of Caruaru, Bezerros, Gravatá and Ipojuca. The basin presents an environment of great complexity, evidencing in this way, climatic contractions, relief, soils, vegetation cover, as well as socioeconomic factors that require a model of water and environmental management, that meets the local peculiarities. The river Ipojuca has an extension of about 320 km crossing the physiographic regions of the wild, south woods and metropolitan. Throughout its course, largely intermittent, several problems of environmental degradation are observed, which gives it the classification of one of the most polluted in Brazil. Based on the aforementioned information, the present work seeks to estimate and analyze the spatial distribution of sediment production in the Ipojuca River basin through the SWAT model. The estimates generated by the model also allow the evaluation, besides sediment production, of deposition and transport in each sub-basin. The data of the model were compared with the data measured in the fluvimetric station in the period between 1993 and 2006. The climatic data used to enter the model were obtained from the Global Weather Data for SWAT platform. Rainfall data were obtained from Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) website for five stations in the basin. In the model entry, the land use and soil type maps and the digital terrain elevation model (MDE) were also used. However, the value of the Nash-Sutcliffe coefficient ($NSE = -1.4$) was found to be statistically significant, indicating that there was good colinearity between the estimated and observed values ($R^2 = 0.74$) Indicated that the means of the observed values represent better the flows than the simulated values. The value of the Agreement Index - PBIAS - (-28%) indicates that the model overestimated the field data unsatisfactorily. The sediment yield estimated by the model along the basin was quite heterogeneous, with higher values in the western portion. The spatial distribution of sediment yield simulated by SWAT, as well as its correlation with precipitation and surface runoff, was not satisfactory in several sub-basins, even when other influential parameters such as slope, elevation, Type and land use. The temporal evaluation of the sediment production was well correlated with the flow, indicating that the model presents good quantitative results, but it needs a calibration to improve the qualitative results. Therefore, it is suggested that the calibration of the model for the adequate hydrosedimentological simulation of the Ipojuca river basin be carried out.

Keywords: Hydrosedimentology. GIS. Spatio-temporal variability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bacias hidrográficas de Pernambuco. Fonte: Sistema de Informações Geoambientais de Pernambuco – CABURÉ.....	25
Figura 2. Ciclo hidrológico (Fonte: adaptado de EPA, 1998).	26
Figura 3. Processos que atuam no transporte de sedimentos. (Fonte: CHRISTOFOLETTI, 1981).	32
Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.....	39
Figura 5. Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. Fonte: PHI, 2010.....	41
Figura 6. Distribuição espacial do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.....	43
Figura 7. Distribuição espacial dos Tipos de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. (Fonte: EMBRAPA, 2013).	44
Figura 8. Fluxograma das etapas de execução do modelo SWAT	54
Figura 9. Localização das estações pluviométricas, climática e fluviométrica consideradas para a simulação hidrossedimentológica na Bacia do rio Ipojuca-PE.	55
Figura 10. Modelo de Elevação Digita do Terreno – MDE (cenas 24S e 25S) utilizado para delimitação da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca-PE	58
Figura 11. Interface do ArcSWAT na fase de delimitação das sub-bacias, aplicada a bacia hidrográfica do Rio Ipojuca.	61
Figura 12. Interface do ArcSWAT na fase de definição das HRUs	62
Figura 13. Interface do ArcSWAT para definição das HRUs, fase de definição dos níveis mínimos de sensibilidade.....	62
Figura 14. Banco de dados do SWAT, arquivo SWAT2012.mdb, editado. Acrescentou-se duas classes de solos contidas na Bacia do Rio Ipojuca.	63
Figura 15. Interface do ArcSWAT para edição do banco de dados. Na tela está detalhado a edição do banco de dados de solos.	63
Figura 16. Banco de dados do SWAT, arquivo SWAT2012.mdb, editado. Acrescentou-se estação climática do INMET da Recife.	64
Figura 17. Interface do ArcSWAT para edição do banco de dados. Na tela está detalhado a edição das estações climatológicas.	64
Figura 18. Diretório de instalação do ArcSWAT onde se localiza os arquivos exemplares de entrada de dados no modelo.....	65
Figura 19. Interface do ArcSWAT. Em detalhes a tela para a inserção dos dados climáticos.	66
Figura 20. Variabilidade sazonal da precipitação média das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.	71

Figura 21. Variabilidade anual da precipitação média de cada estação utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.	72
Figura 22. Variabilidade espacial da precipitação média anual na bacia do rio Ipojuca-PE... ..	74
Figura 23. Variabilidade sazonal das médias da temperatura máxima, mínima e da umidade relativa do ar na bacia do rio Ipojuca-PE para o período entre 1993 e 2006.....	75
Figura 24. Variabilidade espacial das variáveis Temperatura máxima, Temperatura mínima e Umidade Relativa (%) para a bacia do rio Ipojuca-PE.	75
Figura 25. Variabilidade sazonal dos valores médios da velocidade do vento e da insolação na bacia do rio Ipojuca-PE para o período entre 1993 e 2006.....	76
Figura 26. Variabilidade espacial das variáveis Velocidade do vento e Radiação solar para a bacia do rio Ipojuca-PE.....	76
Figura 27. Sub-bacias geradas pelo Modelo SWAT, com base no Modelo Digital de Elevação, para a bacia do rio Ipojuca-PE.	77
Figura 28. Espacialização da declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.	78
Figura 29. Distribuição espacial do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca-PE.....	80
Figura 30. Distribuição espacial dos Tipos de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. (Fonte: EMBRAPA, 2013).	81
Figura 31. Hidrograma das vazões diárias medidas na estação fluviométrica e estimadas pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca-PE no período de março de 1993 a julho de 2006.	82
Figura 32. Hidrograma das vazões ias medidas na estação fluviométrica e estimadas pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca-PE no período de março de 1993 a julho de 2006.	83
Figura 33. Variabilidade espacial da produção de sedimentos estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.	86
Figura 34. Variabilidade espacial do escoamento superficial estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.	86
Figura 35. Figura 24. Variabilidade espacial da precipitação estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.	87
Figura 36. Correlação entre as médias anuais da produção de sedimentos e o escoamento superficial.....	88
Figura 37. Distribuição espacial da classificação da perda de solo para a bacia do rio Ipojuca-PE.....	89
Figura 38. Fração de sedimentos transportada por trecho de rio na bacia do rio Ipojuca-PE.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. Áreas dos municípios da Bacia do Ipojuca	39
Tabela 3. Tipos de uso de solos existentes na Bacia do Rio Ipojuca.....	42
Tabela 4 Tipos de Solos existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca	43
Tabela 5. Descrição das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.....	56
Tabela 6. Descrição dos parâmetros exigidos pelo modelo SWAT para cada tipo de solo.....	59
Tabela 7. Classificação da declividade.	61
Tabela 8. Relação das estações climáticas globais utilizadas para a modelagem hidrossedimentológica na bacia do rio Ipojuca-PE.....	66
Tabela 9. Classificação das perdas de solo em bacias hidrográficas, adaptada de Carvalho (2008).....	68
Tabela 10. Dados medidos no período entre 1993 e 2006 na estação fluviométrica contida na bacia do rio Ipojuca-PE.....	68
Tabela 11. Classificação da eficiência da modelagem do modelo SWAT por meio da análise do R ² , NSE e PBIAS.	70
Tabela 12. Precipitação média anual (mm), mínima, máxima e desvio padrão das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Ipojuca-PE.....	72
Tabela 13. Distribuição da declividade da Bacia do Rio Ipojuca.	78
Tabela 14. Unidades de Respostas Hidrológicas - HRUs criadas a partir da sobreposição de mapas na bacia do rio Ipojuca-PE.....	79
Tabela 15. Distribuição das classes de uso do solo na bacia do rio Ipojuca-PE.....	80
Tabela 16. Distribuição dos tipos de solos existentes na Bacia do Rio Ipojuca-PE.	81
Tabela 17. Resultado dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliação da modelagem da vazão diária pelo modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca-PE	83
Tabela 18. Resultado dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliação da modelagem da vazão média anual pelo modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca-PE.....	84
Tabela 19. Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos médios para a bacia do rio Ipojuca-PE.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Alpha_BF	Constante de recessão do fluxo de base (dias)
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ARS	<i>Agricultural Research Service</i>
Biomix	Eficiência do revolvimento biológico (mm)
CFARM	<i>Carbon Cycling Routine</i>
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm/h)
CH_N2	Coefficiente de Manning do canal principal (s m ^{-1/3})
CN	Curva Número
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC/INPE	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do INPE
CREAMS	<i>Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management System</i>
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho
DHSVM	<i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>
DiCaSM	<i>Distributed Catchment-Scale Model</i>
Epc0	Fator de compensação de água 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>
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
EUPSM	Equação Universal de Perda de Solo Modificada
FC	Capacidade de campo
FPA	Frente Polar Atlântica
GLEAMS	<i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management</i>
GW_Delay	Retardo do escoamento subterrâneo (dias)
GW_Revap	Coefficiente de reevaporação da água subterrânea (adimensional)
Gwqmn	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno (mmH ₂ O)
HadGEM2-ES	<i>Hadley Center Global Environmental Model version 2</i>
HYDGRP	Grupos de saturação
HYMO	<i>Problem-oriented computer language for hydrologic modeling</i>
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
<i>Kineros</i>	<i>Kinematic Erosion Model</i>
MDE	Modelo digital de elevação
MGB-IPH	Modelo Hidrológico de Grandes Bacias
NRCS	<i>Natural Resource Conservation Service</i>
PBIAS	Tendência Percentual
PCPD	Número de dias de precipitação
PCPMM	Precipitação média mensal
PCPSKW	Coefficiente de assimetria para a precipitação máxima
PCPSTD	Desvio padrão da precipitação
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos
PRMS	<i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>
Rchrg_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (adimensional)
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>

REHISA	Rede de Hidrologia do Semiárido
Revapmn	Profundidade limite da água no solo para a ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)
ROTO	<i>Routing Outputs to Outlets</i>
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SEBAL	<i>Surface Energy Balance Algorithm for Land</i>
SED_OUT	Quantidade de sedimento transportado pela água que atinge a saída do canal (exutório)
SHE	<i>System Hydrologic Europe</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
Slsubbsn	Comprimento da declividade média (m)
SOL_ALB	Albedo
SOL_AWC	Água disponível no solo
SOL_BD	Densidade aparente
SOL_CBN	Carbono orgânico
SOL_CLAY	Porcentagem 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
SRES	Relatórios Especiais sobre Previsões de Emissões
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWRRB	<i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>
SYLD	Produção de sedimentos (t/ha)
TMPMN	Temperatura mínima
TMPMX	Temperatura máxima
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima
TOPMODEL	<i>Topographic Based Hydrological Model</i>
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
UR	Umidade relativa do ar
URH	Unidades de resposta hidrológica
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USLE_K	Erodibilidade
Uso1_RCP4.5	Uso do solo de 2001 e cenário de mudanças climáticas RCP4.5
Uso1_RCP8.5	Uso do solo de 2001 e cenário de mudanças climáticas RCP8.5
Uso2_RCP4.5	Uso do solo hipotético e cenário de mudanças climáticas RCP4.5
Uso2_RCP8.5	Uso do solo hipotético e cenário de mudanças climáticas RCP8.5
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>
WESP	<i>Watershed Erosion Simulation Program</i>
WNDV	Velocidade do vento
WP	Ponto de murcha
WXGEN	Gerador climático do modelo SWAT

LISTA DE SÍMBOLOS

SWt	Quantidade de água no solo no fim do dia (mm)
SW0	Quantidade de água no início do dia (mm)
t	Tempo (dias)
Pd	Precipitação no dia (mm)
Qsup	Escoamento superficial (mm)
Ea	Quantidade de água que evapotranspirou no dia (mm)
wvad	Quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm)
Qsub	Quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm)
P	Precipitação (mm)
S	Capacidade máxima de armazenamento (mm)
CN I	Condição de seca
CN II	Condição normal
CN III	Condição úmida
tcon	Tempo de concentração
tc,sup	Tempo de concentração do fluxo superficial
tc,can	Tempo de concentração do fluxo através do canal
Lslp	Comprimento da encosta (m)
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
slp	Declividade média da sub-bacia (m/m)
L	Comprimento do canal em quilômetros
A	Área da sub-bacia (km ²)
slpcan	Declividade média do canal (mm)
Q'sup	Quantidade de água gerada em determinada sub-bacia no dia (mm)
Qarm,i-1	Quantidade de água em atraso gerada no dia anterior (mm)
Surlag	Coefficiente de atraso do escoamento superficial
λE	Densidade do fluxo de calor latente (MJ/m ² /dia)
E	Profundidade da taxa de evaporação (mm/dia)
Δ	Inclinação da curva pressão-temperatura de saturação do vapor (kPa/°C)
Hnet	Radiação líquida (MJ/m ² /dia)
G	Densidade de fluxo de calor para o solo (MJ/m ² /dia)
ρ_{air}	Densidade do ar (kg/m ³)
cp	Calor específico (MJ/kg/°C)
ez0	Pressão de vapor de saturação do ar na altura z (kPa)
ez	Pressão de vapor de água do ar na altura z (kPa)
γ	Constante psicrométrica (kPa/°C)
rc	Resistência do dossel da planta
ra	Resistência aerodinâmica
candia	Quantidade máxima de água que é interceptada e armazenada no dossel em um determinado dia (mm)
Canmx	Quantidade máxima de água que pode ser interceptada e armazenada no dossel quando este está totalmente desenvolvido (mm)
IAF	Índice de área foliar para um determinado dia
IAFmax	Índice de área foliar máximo para a planta
E0	Evapotranspiração potencial (mm)
Rint	Água interceptada no dossel (mm)
Rint(f)	Quantidade de água interceptada no dia (mm)

Rint(i)	Quantidade água interceptada no início do intervalo de tempo pela evapotranspiração potencial (mm)
Ecan	Evaporação da quantidade de água livre existente no dossel da planta em um determinado dia (mm)
Esolo,z	Demanda evaporativa (mm) na profundidade z
E''_z	Evaporação máxima do solo para o dia (mm)
z	Profundidade do solo (mm)
<i>Esoil,ly</i>	Demanda evaporativa para a camada ly (mm)
<i>Esoil,zl</i>	Demanda evaporativa do limite inferior da camada do solo
<i>Esoil,zu</i>	Demanda evaporativa do limite superior da camada do solo
Esco	Coefficiente de compensação da evaporação do solo
SWcam,excesso	Quantidade de água disponível para percolar no dia (mm)
SWcam	Quantidade diária de água em uma determinada camada do solo (mm)
FCcam	Quantidade de água na capacidade de campo (mm)
wperc,cam	Quantidade de água que efetivamente percola no dia (mm)
ΔT	Duração do intervalo de tempo (h)
TTperc	Tempo de percolação entre as camadas (h)
SATcam	Quantidade de água no solo completamente saturado (mm)
Ksat	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
Qlat	Escoamento lateral (mm/dia)
Φ_d	Porosidade drenável do solo (mm/mm)
Wrec	Quantidade de água que adentra os aquíferos no dia “i” (mm)
	Tempo de drenagem sob as camadas de solo (dia)
Wseep	Quantidade de água que percolou através da última camada de solo (mm)
Wrec,i-1	Quantidade de água que entra no aquífero no dia i-1 (mm)
Wprf	Quantidade de água (mm) que entra no aquífero profundo no dia i
B_{prf}	Coefficiente de percolação do aquífero \square
Wrec,rs	Quantidade de água (mm) que entra no aquífero raso no dia “i” (mm)
aqrs,i	Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia (mm)
aqrs,i-1	Quantidade de água armazenada no aquífero raso no dia i-1” (mm)
Qaq	Escoamento subterrâneo que recarrega o canal principal (fluxo de base) (mm)
Wrevap	Quantidade de água que ascende por franjas capilares (mm)
Wbomba,rs	Quantidade de água retirada através de bombas (mm)
Revap	Volume de água que ascende através de franjas capilares, em função da demanda de evapotranspiração
Wrevap,max	Máxima quantidade de água (mm) que ascende em resposta ao déficit hídrico
B_{rev}	Coefficiente de Revap
E0	Potencial de evapotranspiração (mm) daquele dia aqrs
aqlim,rv	Valor limite do nível de água a ser superado para ocorrer o processo Revap (mm)
Sed	Produção de sedimentos, após evento de precipitação do dia (ton)
qpico	Taxa de escoamento de pico (m^3/s)
áreaURH	Área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada a produção de sedimentos (ha)
KEUPS	Fator de erodibilidade do solo ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)
CEUPS	Fator de uso e manejo do solo
PEUPS	Fator de práticas conservacionistas

LSEUPS	Fator topográfico
CFRG	Fator de fragmentação esparsa
αc	Fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração
fcsand	Fator que representa o conteúdo de areia grossa
fel-si	Representa a fração do solo que contém argila e silte
forgC	Estimativa da contribuição do carbono orgânico
fhisand	Fator que representa o conteúdo de areia fina
ms	Fração de areia (diâmetros de 0,05 – 2 mm)
msilt	Fração de silte (diâmetros de 0,002 – 0,05 mm)
mc	Fração de argila (diâmetros < 0,002 mm)
orgC	Percentual de carbono orgânico na camada do solo
rochas	Fração da área de afloramento rochoso
Δarm	Volume armazenado no trecho (m^3)
V_{in}	Volumes de entrada no segmento (m^3)
$V_{out,2}$	Volume que saí do trecho no fim do intervalo de tempo (m^3)
SC	Coefficiente de armazenamento
V_{arm}	Volume armazenando no início do intervalo de tempo (m^3)
TT	Tempo de viagem
qout	Vazões de saída no tempo (m^3/s)
concsed,mx	Concentração máxima de sedimentos que pode ser transportada pela água (ton/m ou kg/L)
vpc	Velocidade de pico (m/s)
csp e spexp	Coefficientes de ajuste
seddep	Quantidade de sedimentos depositada (t)
concsed,0	Concentração no início do intervalo de tempo (kg/L ou t/ m^3)
sedero	Quantidade de sedimentos que é erodida (t)
Kca	Fator de erodibilidade do canal (cm/hr-1Pa-1)
Kca	Fator de erodibilidade do canal (cm/hr-1Pa-1)
Cca	Fator de cobertura do canal
sedat	Estimativa final das partículas existentes no trecho
sedout	Concentração de sedimentos que sai do trecho (t)
V_{out}	Volume que sai no intervalo de tempo (m^3)
V_{ca}	Volume de água no trecho (m^3)
Corg	Teor de carbono orgânico na em cada camada (kg/kg)
es	Pressão de saturação de vapor
tar	Dado referente a temperatura diária
ea	Vapor atual
Fs	Fração de sedimentos
Qss	Descarga sólida ou fluxo de sedimentos em suspensão (t/dia)
Q	Descarga líquida ou vazão (m^3/s)
Css	Concentração de sedimentos em suspensão (mg/L)
a e b	Constantes
Yobs	Variável observada
Ysim	Variável simulada pelo modelo
\bar{Y}_{obs}	Média da variável observada
\bar{Y}_{sim}	Média da variável simulada
e	Quantidade de eventos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS.....	21
2.1 Geral.....	21
2.2 Específico.....	21
3. REVISÃO DE LITERATURA	22
3.1 A importância da água.....	22
3.2 Bacia Hidrográfica	22
3.3 Ciclo Hidrológico.....	25
3.4 Erosão do Solo	27
3.7 Modelagem Hidrológica.....	32
3.8 Geoprocessamento	34
3.9 O Modelo SWAT	35
4. MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1 Descrição da área	38
4.1.2 Caracterização Climática.....	40
4.1.3 Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca	41
4.1.4 Uso e Ocupação do Solo	42
4.1.5 Tipos de solos.....	43
4.2 Modelagem e descrição do modelo SWAT.....	45
4.2.1 Rotinas de Execução do Modelo SWAT.....	46
4.2.1.1 Fase da terra	46
4.2.1.2 Fase da água ou de propagação	50
4.3 Etapas de Execução.....	53
4.3.1 Geração do Banco de Dados do modelo SWAT	54
4.3.1.1 Dados climáticos e fluviométricos	54
4.3.2 Dados Cartográficos.....	57
4.3.2.1 Modelo de Elevação Digital.....	57
4.3.2.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo	58
4.3.2.3 Parâmetros do solo	59
4.4 Modelagem Inicial.....	60

4.4.1 Entrada de dados Climáticos	64
4.5 Análise dos processos erosivos	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1 Climatologia da bacia do rio Ipojuca	71
5.1.1 Dados Pluviométricos	71
5.1.2 Dados meteorológicos das estações globais	74
5.2 Processamento dos dados de entrada	76
5.3 Modelagem Hidrológica da bacia do rio Ipojuca	81
5.4 Processos Erosivos	84
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	91
REFERÊNCIAS	93

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos têm um importante papel no desenvolvimento de qualquer sociedade e a sua utilização desordenada tem gerado problemas quanto à quantidade e qualidade, principalmente devido às ações antrópicas no meio ambiente.

A erosão é um grande problema de preocupação global, pois atinge tanto o meio urbano como o rural, tomando proporções que influenciam na quantidade e na qualidade dos corpos hídricos disponíveis para a população e os animais. Programas de manejo para revitalização de bacias hidrográficas vêm sendo desenvolvidos com maior frequência fazendo uso de técnicas como a conservação das matas ciliares, que têm como objetivos a diminuição do assoreamento, aumento da disponibilidade hídrica e conservação do meio ambiente.

De maneira geral, a erosão dos solos é desencadeada pelo impacto das gotas da chuva na superfície do solo, o que promove a desagregação das suas partículas e, posteriormente, a movimentação desse material, expondo-o às ações hidrodinâmicas do escoamento superficial (GALERANI et al., 1995; RAMOS, 1995; GUERRA, 1999).

O processo erosivo que se dá com a desagregação, transporte e deposição de sedimentos nas áreas de menores cotas da bacia, tem na erosão hídrica a degradação do meio ambiente nas bacias hidrográficas. Devido à dificuldade de se quantificar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, bem como o efeito de escala sobre os processos hidrossedimentológicos, faz com que sua estimativa seja realizada por meio de modelos de simulação. Em geral, esses modelos são relacionados com as características do solo, elementos climáticos e os fisiográficos.

Dessa forma, a relação dos modelos com as características supracitadas depende da distribuição espacial dos elementos climáticos, do uso e da cobertura do solo na área da bacia hidrográfica, bem como da tendência de ocorrência de chuvas intensas e sua variabilidade espacial (WALLING e WEBB, 1996; DEDKOV, 2004; BIRKINSHAW e BATHURST, 2006).

Estudos com modelos matemáticos e físicos têm sido desenvolvidos para trabalhar com elementos climáticos e seus fatores intervenientes, assim como, as características e modificações do uso e ocupação do solo, com intuito de avaliar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) tem sido utilizado

frequentemente para avaliar a produção de sedimentos, bem como observar se é necessário manejo na bacia hidrográfica, pois o mesmo avalia cenários futuros das bacias hidrográficas.

A escolha do modelo SWAT para o desenvolvimento desse trabalho se deu por ser uma ferramenta robusta para os estudos de avaliação dos efeitos que as modificações no uso e ocupação do solo tem sobre os escoamentos superficial e subterrâneo e na produção de sedimentos.

Além dos estudos de impactos das alterações e ocupação do solo na dinâmica hidrossedimentológica de bacias hidrográficas, o modelo SWAT vem sendo bastante utilizado, nos últimos anos, para análise das implicações das mudanças climáticas no escoamento superficial, vazão e produção de sedimentos em escala de bacia hidrográfica (SANTOS, 2015).

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca foi escolhida para o presente estudo devido a sua grande relevância para o Estado de Pernambuco, pois representa um via de comunicação entre o Agreste e o Litoral de Pernambuco, onde estão localizadas cidades de importância tanto econômica como turística, como por exemplo, as cidades de Caruaru, Bezerros, Gravatá e Ipojuca.

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca, devido a sua grande extensão no sentido leste-oeste, apresenta grande variabilidade climática ao longo da sua área. A bacia hidrográfica se estende por duas mesorregiões do Estado de Pernambuco com comportamentos climáticos e hidrológico distintos. De acordo com o Plano Hidroambiental da Bacia do Rio Ipojuca de 2010, os dados de precipitações mensais apresentam variabilidade no decorrer da área, com valores que vão desde 600 mm/ano (Agreste) a 2100 mm/ano (RMR).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral foi estimar a vazão e a produção de sedimento da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca utilizando o modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool – SWAT.

2.2 Específico

- Analisar a aplicabilidade do modelo SWAT integrado ao SIG na variabilidade espaço-temporal dos dados hidrossedimentológicos da bacia do rio Ipojuca
- Elaborar um banco de dados pluviométricos consistente e espacializado na bacia do rio Ipojuca;
- Elaborar um banco de dados fluviométricos da bacia do Rio Ipojuca;
- Elaborar um banco de dados climáticos a partir da plataforma Global Weather Data para o modelo SWAT.
- Organizar a base cartográfica de entrada exigida pelo modelo SWAT - tipo e uso do solo e modelo de elevação digital – MDE para a bacia do rio Ipojuca;
- Analisar a estimativa da vazão gerada pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca;
- Analisar a variabilidade espaço-temporal da produção de sedimentos na bacia do rio Ipojuca;

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A importância da água

A água é um mineral de fundamental importância para a manutenção da vida. Seus múltiplos usos são indispensáveis a uma série de atividades humanas, nas quais pode-se destacar o abastecimento público e industrial, a irrigação agrícola, a produção de energia elétrica e as atividades de lazer e recreação, bem como a preservação da vida aquática (CASTRO, 2012; LIMA, 2008).

A água ocupa aproximadamente 70% da superfície da Terra e não está distribuída uniformemente no planeta. Segundo o Programa Hidrológico Internacional da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), na América do Sul encontra-se 26% do total de água doce da Terra e apenas 6% da população mundial, enquanto o continente asiático possui 36% do total de água e abriga 60% da população mundial.

Segundo os dados estimados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (Brasil, 2017) e Organização das Nações Unidas - ONU (UNRIC, 2017) para 2017, o Brasil apresenta aproximadamente 3,0 % da população mundial e 12% da água doce do planeta. Apesar da grande quantidade de água doce disponível no território brasileiro, a distribuição é bastante irregular. O fato é ainda é mais agravante quando se leva em consideração a distribuição populacional brasileira. A Bacia Hidrográfica do Amazonas, por exemplo, detêm 70% da água doce do Brasil e, apenas, 5% da população.

3.2 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser entendida como uma área de captação natural de água da precipitação que converge o escoamento para um único ponto de saída, denominado exutório (TUCCI, 2009). Para Rabella et al. (2001), a bacia hidrográfica é um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes e formada, nas regiões de maiores cotas, por divisores de água pelas quais os volumes precipitados, ou escoam superficialmente formando os rios e riachos, ou infiltram no solo para formar as nascentes e recompor o lençol freático.

A Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997, também conhecida como Lei das Águas, estabelece que a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (Brasil, 1997).

As bacias hidrográficas também constituem ecossistemas adequados para avaliação dos impactos causados pela atividade antrópica que podem acarretar riscos ao equilíbrio e à manutenção da quantidade e qualidade da água, uma vez que estas variáveis são relacionadas com o uso do solo (FERNANDES e SILVA, 1994; BARUQUI e FERNANDES, 1985).

Estudar a fisiografia da bacia hidrográfica e do uso e ocupação do solo contribuem grandemente para prevenir a degradação ambiental ou impedir que isto ocorra (TEODORO, 2007).

Em decorrência do crescimento populacional, industrial e urbano, as bacias hidrográficas vêm sofrendo alterações, necessitando manejo para melhor administrar seu uso, como também preservar e gerenciar os recursos hídricos (MIRANDA, 2016).

O uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para bacias hidrográficas é indispensável, uma vez que o mesmo envolve o gerenciamento ambiental e também outras atividades relevantes. A construção de um banco de dados codificados geograficamente contendo informações sobre a área de estudo como: uso e ocupação do solo, tipo de solo, vegetação, hidrologia, relevo, hidrografia etc, é de extrema importância. O banco de dados georeferenciado auxilia no diagnóstico da paisagem, podendo atuar na prevenção de riscos ambientais no solo e corpos hídricos.

As grandes bacias hidrográficas de Pernambuco (Figura 1) possuem duas vertentes: rio São Francisco e Oceano Atlântico. As bacias que escoam para o rio São Francisco formam os chamados rios interiores, sendo os principais: Pontal, Garças, Brígida, Terra Nova, Pajeú, Moxotó, Ipanema, além de grupos de pequenos rios interiores. As bacias que escoam para o Oceano Atlântico, constituem os chamados rios litorâneos, e os principais são: Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém, Una e Mundaú e GL's (Grupo de Bacias de Pequenos rios Litorâneos). O Plano Estadual de Recursos Hídricos (1998) dividiu o Estado em 29 Unidades de Planejamento (UP), caracterizando assim, a Divisão Hidrográfica Estadual, composta de 13 Bacias Hidrográficas, 06 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL1 a GL6), 09 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI1 a GI9) e uma bacia de pequenos rios que compõem a rede de drenagem do arquipélago de Fernando de Noronha. É importante salientar

que a bacia GI-1 drena parte da água para o rio São Francisco (Riacho Traipu) e outra parte para o Oceano Atlântico (Rio Paraíba). A maior parte das grandes bacias hidrográficas pernambucanas situa-se integralmente dentro dos limites do Estado, exceto as bacias dos rios Una, Mundaú, Ipanema e Moxotó que possuem parte de sua área de drenagem no Estado de Alagoas. Além destas, há pequenas bacias compartilhadas com os Estados do Ceará (GI-9), Paraíba (GL-6) e Alagoas (GL-5) - (APAC, 2014).

A bacia do Rio Ipojuca (BHRI) (destacada na Figura 1), está localizada em maior parte no Estado de Pernambuco, entre 08°09'50" e 08°40'20" de latitude Sul, e 34°57'52" e 37°02'48" de longitude Oeste. A BHRI possui uma forma alongada no sentido oeste-leste, tendo uma posição estratégica no espaço estadual, servindo assim de grande calha hídrica ligando a Região Metropolitana do Recife e a região do Sertão do Estado. Os trechos superior, médio e submédio da bacia estão localizados nas regiões do Sertão (pequena porção) e Agreste do Estado, enquanto que o trecho inferior tem a maior parte de sua área situada na zona da Mata Pernambucana, incluindo a faixa litorânea do Estado que limita-se ao norte, com a bacia do rio Capibaribe, grupo de bacias de pequenos rios litorâneos e com o Estado da Paraíba; ao sul, com a bacia do Rio Sirinhaém; a leste, com o Oceano Atlântico; e, a oeste, com as bacias dos Rios Ipanema e Moxotó e o Estado da Paraíba.

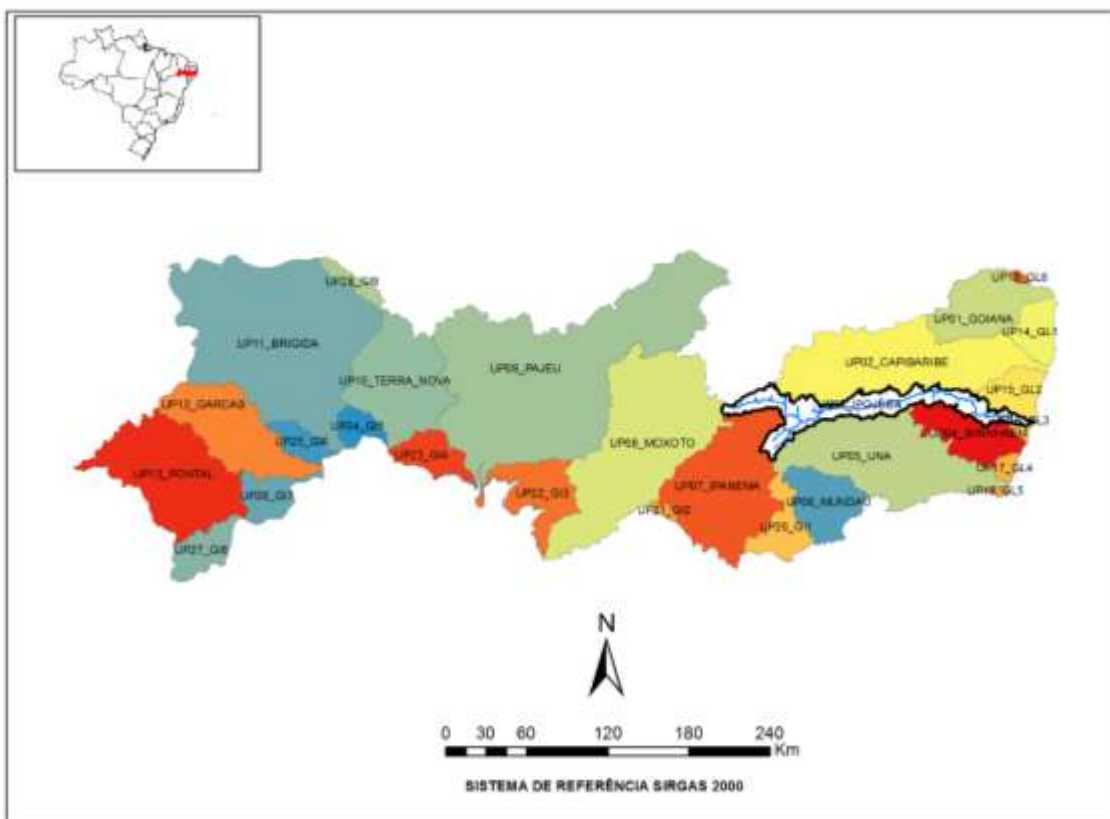


Figura 1. Bacias hidrográficas de Pernambuco. Fonte: Sistema de Informações Geoambientais de Pernambuco – CABURÉ.

3.3 Ciclo Hidrológico

Segundo (TUCCI, 2009), o ciclo hidrológico ou ciclo da água é um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície da terra e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela ação da energia solar associada à gravidade e à rotação da terra.

A Figura 2 apresenta um esquema do ciclo hidrológico, identificando as diversas etapas que o compõem. Observa-se que o fluxo de água se dá entre os reservatórios e quando o fluxo é da superfície para a atmosfera ocorre predominantemente no estado de vapor – devido principalmente ao processo de evapotranspiração. Da atmosfera para a superfície, a transferência de água pode ocorrer nos três estados físicos, sendo a precipitação da chuva o mais representativo (TUCCI, 2009).

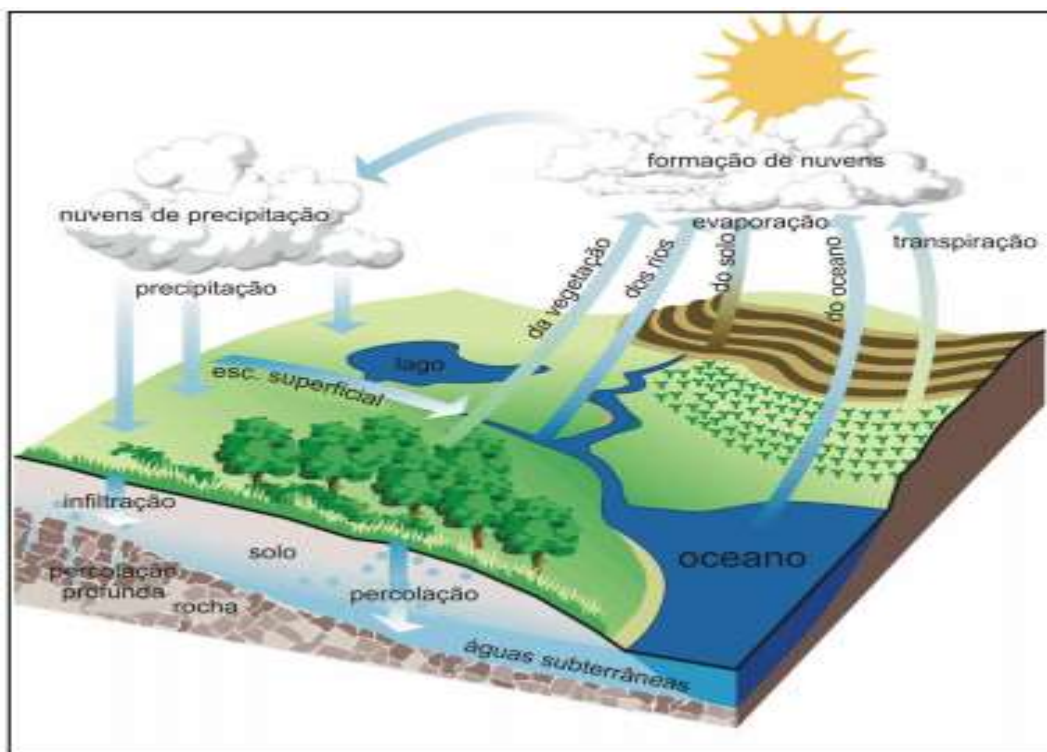


Figura 2. Ciclo hidrológico (Fonte: adaptado de EPA, 1998).

Segundo (PRUSKI et al. 2003), todos os fatores que influenciam a taxa de infiltração da água no solo interferem também no escoamento superficial resultante. O escoamento superficial varia em função de uma série de fatores, podendo ser classificados em agroclimáticos e fisiográficos. Dentre os fatores agroclimáticos, destacam-se a intensidade e duração da precipitação, a cobertura e os tipos de uso do solo, e a evapotranspiração. Os fatores fisiográficos englobam a área, declividade e forma da bacia, tipo de solo, topografia, rede de drenagem e obras hidráulicas presentes na bacia hidrográfica.

O principal processo associado a erosão hídrica é o escoamento superficial, pois o mesmo ocasiona o transporte de partículas do solo, fertilizantes químicos, sementes, agrotóxicos, matéria orgânica e conseqüentemente causam prejuízos diretos na produção agropecuária e causam poluição dos corpos hídricos (BRAGA, 2000).

Todo fator que pode influenciar a taxa de infiltração da água no solo também pode interferir no processo de escoamento superficial. A formação do escoamento superficial está relacionada com uma complexa interação entre área de contribuição, declividade e características do solo, podendo aumentar ou diminuir dependendo da influência destes fatores (SILVA e De MARIA, 2011).

A vegetação atua de forma indispensável no ciclo hidrológico, de acordo com Likens (1992) que determinou por muitos anos o papel da vegetação em uma reserva ecológica (Hubbard Brook, Estados Unidos) quantificou em 38% do total da precipitação é evapotranspirado pela vegetação. A presença da vegetação no fluxo dos rios também foram quantificadas nestes estudos (LIKENS et al. 1992) e ficou demonstrado que o volume de água dos rios mantêm-se aproximadamente constante durante o ciclo estacional devido ao fator regulador da vegetação na quantidade de água escoada.

O desmatamento em bacias hidrográficas ocasiona grandes alterações nos ciclos do fósforo e do nitrogênio, com aumento da concentração desses elementos nos rios como resultados da perda superficial no solo (LIKENS et al. 1970). Como consequência, há uma produção exagerada de nutrientes nas bacias hidrográficas e, conseqüentemente, aumento no aporte de sedimentos, o que acarreta, por sua vez, uma série de problemas para o meio ambiente e para população, demonstrando assim, a complexidade do ciclo hidrológico e a importância dos seu componentes, assim como, a manutenção do seu equilíbrio.

3.4 Erosão do Solo

De acordo com BERTOL et al. (2007) e PUGLIESI et al. (2011), a erosão do solo resulta da ação conjunta dos processos de desagregação por impacto, transporte e deposição de partículas sólidas, provocados pelas forças erosivas das gotas de chuva e do fluxo superficial. Quando acelerada, principalmente pelo desmatamento, a erosão causa impactos ambientais, econômicos e sociais.

A erosão dos solos provoca sérios problemas ao meio-ambiente e também aos reservatórios. Alguns dos grandes problemas causados pela erosão são o aparecimento de ravinas e voçorocas, e a redução da produtividade agrícola. Com relação aos reservatórios, os principais problemas são: transporte de poluentes químicos nos sedimentos, assoreamento do reservatório, e a diminuição da quantidade e qualidade de água armazenada. (SANTOS e SILVA, 2005).

Lima (2010), destaca que a erosão hídrica ocorre devido destacamento das partículas do solo pela ação da precipitação e do escoamento, ocasionando o transporte das partículas para jusante onde se depositam podendo ser novamente destacadas.

A erosão hídrica compreende três fases físicas distintas: desagregação, transporte e deposição. A desagregação é o processo de quebra e individualização das partículas da massa de solo, causada, basicamente, pelo impacto direto das gotas da chuva na superfície e pelo escoamento superficial. As partículas desagregadas salpicam com as gotículas de água e retornam à superfície, podendo vir a selar os poros superficiais, reduzindo a infiltração de água. À medida que a intensidade da chuva passa a ser maior que a taxa de infiltração, tem início o escoamento superficial, dando início à segunda fase do processo, que é o transporte de sedimentos que sofrem deposição somente quando a velocidade do escoamento superficial for reduzida (REICHERT e CABEDA, 1992; OLIVEIRA et al., 2005; SANTOS, 2006).

Existem dois problemas associados a erosão de grande relevância: O primeiro está ligado a perda das camadas férteis do solo, o que influencia na perda da fertilidade dos terrenos utilizados para agricultura; o segundo influencia a geração, transporte e deposição dos materiais erodidos nos leitos dos cursos d'água e reservatórios, interferindo nas funções e usos dos mesmos (JEBARI et al., 2012).

Entre os fatores climáticos a chuva possui a maior importância na erosão dos solos, suas características são as que mais interferem no processo erosivo levando em conta sua intensidade, duração e distribuição ou frequência (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008).

3.5 Impactos ambientais

Os impactos ambientais causados pela ação antrópica são os que mais contribuem para o aporte de sedimentos em bacias hidrográficas, mesmo que o impacto seja ocasionado de forma não intencional acaba agredindo o meio ambiente e a qualidade de vida da população, como consequência o meio sofre alterações. Essas alterações são definidas como qualquer alteração da qualidade ambiental resultando na modificação dos processos naturais ou sociais provocadas por uma ação humana (SÂNCHEZ, 2006).

A bacia hidrográfica é uma das áreas que mais sofre as consequências dos impactos ambientais, principalmente relacionada às atividades agropecuárias. A agricultura e a pastagem potencializam o impacto ambiental por queimadas, desmatamento, poluição por agrotóxicos, erosão do solo etc (FIRMINO e FONSECA, 2008).

As mudanças constantes no uso e na cobertura do solo que são resultantes da agropecuária causam alterações significativas no balanço de água no solo, principalmente em suas camadas superficiais, ocasionando erosão e transporte de sedimentos que causam modificações nos ecossistemas terrestres e aquáticos (TOLEDO, 2001). Outros impactos também contribuem e afetam diretamente o meio ambiente, como as queimadas, desmatamentos, loteamentos em áreas de conservação, assoreamentos em corpos hídricos, contribuindo diretamente nos processos erosivos.

De acordo com (GROSSI, 2006), um fator de grande relevância com relação a degradação ambiental associado às práticas agropecuária é o aumento do uso de fertilizantes, alterando assim a composição química do solo. O uso de herbicidas na agricultura ocasiona seu acúmulo no solo, o que pode afetar e até exterminar microrganismos presentes. Doses excessivas pode destruir a vegetação e espécies invasoras. Com a ocorrência da precipitação, de fertilizantes e herbicidas são transportados para os corpos hídricos, atingindo as águas superficiais e subterrâneas.

3.6 Produção de sedimentos

A produção, o transporte, a deposição e a compactação de sedimentos são resultados de processos hidrossedimentológicos que ocorrem naturalmente. Entretanto, em Bacias Hidrográficas, a intensificação do uso do solo em função do crescimento populacional e econômico associada às práticas agrícolas, acelera esses processos acarretando um aumento na quantidade carreada para o exutório de uma bacia. Isso acaba gerando problemas sociais, econômicos e ambientais, causando o assoreamento de corpos d'água e prejudicando os setores de abastecimento urbano e industrial, irrigação, aquicultura, setor elétrico, entre outros, conforme apresentado por Bertol et al. (2007).

Os processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas englobam as etapas de deslocamento, transporte e deposição de partículas sólidas e são de grande relevância para o ciclo hidrológico (ARROIO JUNIOR, 2013).

A degradação dos solos está associada com a degradação dos recursos hídricos e da vegetação, assim como a ação do homem pode acelerar os processos de degradação e suas consequências, provocando a desertificação em diversas regiões semiáridas no mundo. As ações antrópicas também contribuem para as mudanças climáticas que são potencialmente impactantes para as regiões mais carentes de fenômenos de precipitação (TUCCI, 2009).

A agrupação da degradação das bacias hidrográficas, com ênfase maior pela ação antrópica no uso do solo, aos fenômenos climáticos naturais ocasiona a mobilização de sedimentos em quantidades relativamente maiores em relação as que foram produzidas em centenas de anos sob condições de equilíbrio natural (SIMÕES e COIADO, 2001).

Segundo Minella et al. (2007), existem várias fontes de sedimentos na escala de uma bacia hidrográfica rural, como lavouras, pastagens, florestas, rede fluvial e estradas. Ainda segundo os autores, identificar a origem dos sedimentos é fundamental na compreensão da taxa de emissão de sedimentos e no manejo dos sedimentos erodidos na escala de bacia.

A magnitude da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica depende de três processos distintos: i) da intensidade com que o solo é desagregado por ação da precipitação e do escoamento superficial (erosão bruta); ii) dos processos de transferência dos sedimentos da bacia vertente para a calha fluvial; iii) pela sua propagação na calha fluvial (GOMES et al., 2006).

Os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos nos quais a água é um dos principais agentes causadores do desprendimento de partículas de solo, que percorrem a encosta da bacia até atingir os cursos d'água alcançando o exutório e contribuindo para a produção de sedimentos da bacia. A suscetibilidade à erosão diz respeito à probabilidade de ocorrência de chuvas em uma determinada área, ou seja, ao desgaste que a superfície poderá sofrer quando submetida a qualquer uso sem medidas conservacionistas (XAVIER, 2007).

Os impactos decorrentes de uso do solo em termos hidrológicos e de transporte de sedimentos afetam o escoamento superficial, a vazão máxima de cheia, os fluxos de base, a recarga subterrânea, umidade do solo e o volume de erosão e sedimentação. Os impactos do uso do solo na qualidade da água referem-se à quantidade de matéria orgânica e nutrientes presente no meio, incremento de organismos patogênicos, pesticidas, metais pesados e alterações no regime termal (FAO, 2000; BONNET et al., 2008).

De acordo com Carvalho (2008), a deposição de sedimentos se dá com a redução da força do escoamento levando a uma condição do não deslocamento da partícula, isso ocorre quando o depósito de sedimento encontra-se em localidades mais baixas. Esse processo pode ocorrer em depressões naturais do terreno ou também em locais com uma menor declividade. No entanto esse material pode entrar na rede de drenagem e ser transportados pelos cursos d'água chegando até o oceano ou pode ocorrer de ficar instalado em reservatórios. A formação dos sedimentos ao longo do cursos d'água apresenta diversas formas, pesos e tamanhos. O escoamento e o local determinam o tipo de transporte dos sedimentos, sendo o transporte nos canais organizado como segue e organizados de acordo com a Figura 3:

- Carga sólida de arrasto: ocorre quando as partículas de sedimentos rolam e deslizam através do curso d'água longitudinalmente, essas partículas encontram-se constantemente em contato com o leito.
- Carga sólida saltante: ocorre quando as partículas pulam no decorrer do curso d'água, seja em função da correnteza ou também da ocorrência de outras partículas gerando assim um impacto das mesmas.
- Carga sólida em suspensão: ocorre quando essas partículas são suportadas pelos componentes verticais das velocidades do fluxo, ao mesmo tempo que são transportadas pelas componentes horizontais da mesma velocidade, não permanecendo em suspensão por serem relativamente pequenas.

A origem do material e sua carga nos cursos d'água sofrem influência da quantidade e distribuição das precipitações, entre outros fatores de influência têm-se, a estrutura geológica, as condições da topografia e a cobertura vegetal presente na bacia hidrográfica, sendo esse material oriundo da remoção das vertentes e também da ocorrência erosivas nas margens e do fundo do canal fluvial. Em relação a distribuição do material, está associado a granulometria das partículas e as características do fluxo fluvial (CHRISTOFOLETTI, 1981). A carga total de sedimentos carregados em suspensão ocorre em decorrência das somas das parcelas e também da forma do leito. Essa carga total é composta tanto por materiais oriundos de processos químicos, como também por processos pluviais e por movimento de arraste.

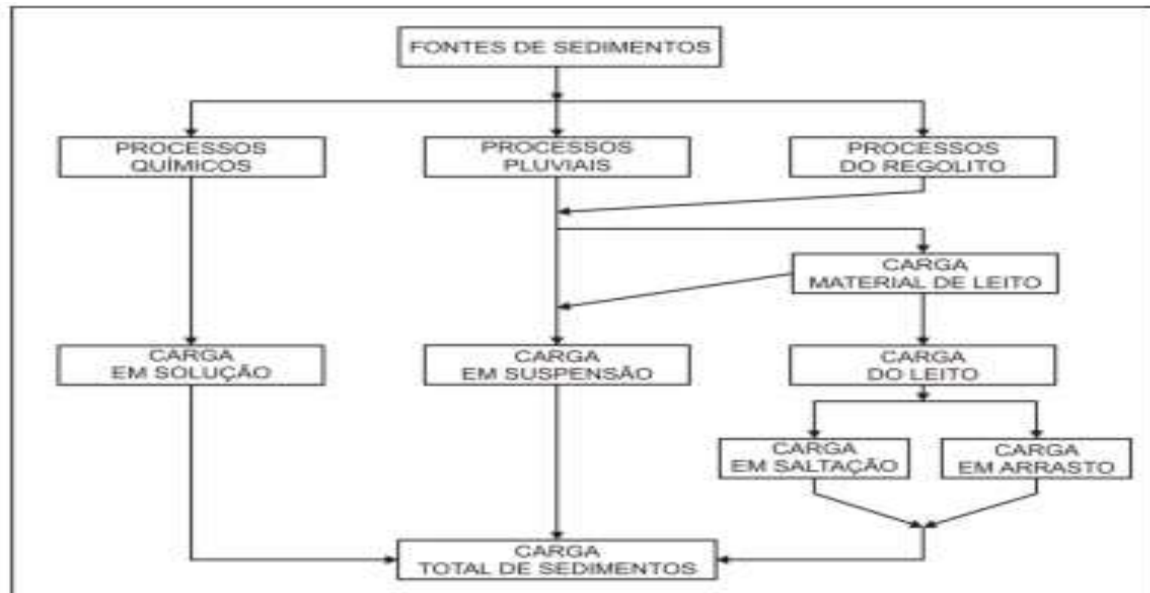


Figura 3. Processos que atuam no transporte de sedimentos. (Fonte: CHRISTOFOLETTI, 1981).

A resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica, a diferentes sistemas de uso e manejo do solo, é importante no processo de modelagem do escoamento superficial. O conhecimento dos efeitos da variação no uso da terra sobre o movimento de sedimentos e água em uma bacia hidrográfica é essencial para a tomada de decisões sobre o manejo de uso da terra (KUHNLÉ et al., 1996).

Sendo a modelagem de extrema importância em nível de bacia e hidrográfica e com ênfase em análise de sedimentos na bacia, (UZEIKA 2009), (CARVALHO NETO et al. 2011) e (FERNANDES, 2015) consideraram como aporte de sedimentos, a quantidade de sedimentos estimada pelo modelo SWAT para as sub-bacias, e como produção de sedimentos apenas a quantidade destes que chega ao exutório da sub-bacia de interesse para análise.

3.7 Modelagem Hidrológica

Estudar o regime hidrológico de bacias hidrográficas é de grande importância no Brasil, pois a maior parte da geração de energia elétrica do país ocorre a partir de rios. Vários trabalhos vem sendo realizados com o intuito de avaliar as diferentes formas manejo para uma boa gestão de recursos hídrico. Nestas pesquisas, a modelagem hidrológica é muito utilizada em bacias

hidrográficas e vários modelos vem surgindo para um melhor aperfeiçoamento nessa área de estudo.

De acordo com Tucci (1998) a modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo. Com o aumento da disponibilidade de sistemas computacionais de informações, a partir do final da década de 1950, criaram-se condições que propiciaram um acelerado processo de desenvolvimento de modelos hidrológicos baseados em conceitos físicos, sendo uma alternativa em relação aos modelos até então existentes e que utilizavam somente métodos estocásticos.

Dentre os modelos hidrológicos existentes, o modelo SWAT possibilita a modelagem de grandes bacias hidrográficas, apresentando diferentes tipos e usos do solo ao longo de grandes intervalos de tempo (NEITSCH et al., 2005). Assim, o SWAT permite a integração com o sistema de informação geográfica (SIG). Para tanto, foi desenvolvida a interface ArcSWAT que funciona como uma extensão do SIG ArcGIS e permite a utilização de suas ferramentas de geoprocessamento como suporte às etapas de modelagem, além de facilitar tornando mais intuitiva a alimentação com os dados de entrada do modelo (JUNIOR, 2014).

Um modelo hidrológico permite equacionar os processos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). O objetivo da modelagem é compreender melhor o sistema e prever situações futuras, algumas vezes também reproduzir o passado para as ações de decisão (MACHADO, 2002).

De acordo com Tucci (1998), quanto aos tipos de modelos, tem-se:

- Modelos distribuídos baseados em processos físicos: consideram as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para descrever o movimento da água sobre a superfície do solo. O cálculo é feito para cada célula da malha que representa a bacia;
- Modelos concentrados: apresentam menor embasamento físico. Baseiam-se na equação da continuidade, não usam diretamente a equação da quantidade de movimento para descrever os processos, mas adotam conceituações plausíveis para representar os mesmos. Estas representações, em geral, consideram diversos reservatórios conectados, utilizando também procedimentos de translação no tempo; e

- Modelos de entrada-saída: consistem na identificação de uma relação entre as entradas (precipitação) e as saídas (vazão), sem se preocupar em descrever os mecanismos internos do processo. Um exemplo clássico é o método do hidrograma unitário, o qual propõe uma relação linear entre a chuva efetiva e o escoamento superficial.

De acordo com (TUCCI, 1998; FAN e COLLISCHONN, 2014) em uma simulação que avalia o comportamento de uma bacia hidrográfica, os modelos utilizam uma série de equações que possuem dados diversos de entrada, como uso e tipo de solo da região em estudo, precipitação e outras variáveis climatológicas. São geradas como resultados, informações hidrossedimentológicas no decorrer de vários pontos da bacia hidrográfica estudada, como vazão nos rios, escoamento superficial, balanços de água no solo e produção de sedimentos. Dessa forma, o maior fator limitante na utilização de modelos hidrológicos é a necessidade de um grande número de dados manipulados em relação à variabilidade espacial e temporal dos parâmetros e variáveis que descrevem a heterogeneidade do comportamento hidrológico.

3.8 Geoprocessamento

O geoprocessamento é um conjunto de procedimentos computacionais, que operando sobre bases de dados geocodificados, executam análises, reformulações e síntese sobre os dados ambientais tornando-os utilizáveis em um sistema de processamento automático integrado ao banco de dados (SILVA et al. 1998). Segundo Santos (2006), os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), apresentam o tipo de estrutura mais relevante na viabilização das atividades de geoprocessamento.

De acordo com Mendes (1998), as técnicas utilizadas de geoprocessamento apresentam-se como um instrumento bastante eficiente e de potencialidade para estabelecer planos integrados de conservação do solo e da água. Com isto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) apresentam-se como uma ferramenta com capacidade de manipulação das funções dos processos ambientais nas diversas regiões, com muita eficácia o que permite economia de recurso e também de tempo. Essas manipulações permitem reunir dados de diferentes fontes (mapas topográficos, mapa de uso e ocupação do solo, imagens de satélite etc.) e de diferentes escalas. Seu uso vem crescendo com a ferramenta de visualização e análise

da informação espacial, bastante usada em aplicações em cartografia de uso de solo, recursos hídricos, e em diversas aplicações na área ambiental.

A utilização de geoprocessamento como ferramenta em questões de preservação ambiental tem aumentado expressivamente, por permitir a atualização em relação a mudanças que o meio vem sofrendo, seja ela de origem natural ou antrópica (MOTA, 2003).

3.9 O Modelo SWAT

O modelo SWAT - *Soil and Water Assessment Tool* é um modelo de base física, com parâmetros distribuídos e simulação contínua. O modelo é de domínio público e foi desenvolvido, para auxiliar no planejamento da conservação do solo e da água pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). Ele permite simular diferentes processos físicos do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica (evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo). Com o modelo SWAT pode-se simular hidrogramas e sedimentogramas e obter informações espaciais por definição de cenários distintos (NEITSCH et al., 2005).

O modelo SWAT se integra ao SIG por meio de uma extensão, denominada ArcSWAT, desenvolvida para o software de SIG ArcGIS® da Environmental Systems Research Institute (ESRI). A interface do ArcSWAT é responsável pelo pré e pós processamento de dados para a execução do modelo hidrológico SWAT e utiliza para isso diversas ferramentas nativas do ArcGIS®.

Dentre os modelos hidrossedimentológicos disponíveis na atualidade, o que apresenta uma grande difusão em todo o mundo é o modelo SWAT, conforme pode ser constatado no trabalho de Gassman et al. (2007), que apresentaram um espectro de mais de 250 aplicações do SWAT realizadas em todo o mundo, e Garbossa et al. (2011), que contabilizaram, até o ano de 2010, mais de 70 trabalhos relacionados à aplicação do modelo SWAT em diferentes regiões brasileiras.

Diferentes tipos de análises têm sido realizados com SWAT, incluindo as alterações climáticas e/ou mudança cenários de uso da terra, melhores estratégias de irrigação, os impactos das melhores práticas de manejo, a adoção de culturas bioenergéticas, e transporte e de sedimentos, nutrientes e/ou poluentes pesticidas, entre outros (GASSMAN et al., 2007).

De acordo com Bonumá et al. (2011), a simulação da produção de sedimentos pode ser comparada aos dados observados obtidos nas estações de monitoramentos. Após a simulação os dados obtidos podem servir para prever a perda de solo devido em relação ao sistema de manejo utilizado ou para o planejamento ambiental. A modelagem da produção de sedimentos é indispensável para determinar impactos, antes mesmo da utilização na área em questão, de determinada cultura ou prática agrícola.

O modelo SWAT permite que diferentes processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica para analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, a produção de sedimentos e a qualidade da água. Para atingir esses objetivos, o modelo baseia-se em características fisográficas da bacia, dados climáticos, uso e tipo de solo, entre outros parâmetros referentes ao manejo de solo, irrigação etc (BALTOKOSKI, et al., 2010).

A ferramenta SWAT é baseada em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos através da bacia hidrográfica. Os maiores componentes do modelo incluem hidrologia, sedimentos, nutrientes, temperatura do solo, clima, crescimentos de plantas, pesticidas e manejo agrícola (ARNOLD et al., 1998). Sua base conceitual faz com que o SWAT exija informações precisas quanto à bacia estudada, requerendo vários dados de entrada que estão relacionados com as características físicas da bacia, tais como informações sobre propriedades do solo, topografia, vegetação e uso e cobertura do solo – além de dados climáticos. Tais especificidades permitem a simulação em bacias sem dados de vazão, erosão e evaporação (NEITSCH et al., 2005).

Utilizando o modelo SWAT, (TIBEBE e BEWKET 2011) analisaram perdas de água e de solo e consideraram como perdas de solo o resultado da erosão nas sub-bacias.

Santos (2015) realizou uma análise espaço-temporal dos processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá –PE utilizando o modelo SWAT. Como resultado o autor verificou que a Bacia sofreu alterações no uso e ocupação do solo, comparando os cenários de uso e ocupação do solo no intervalo entre 1970 e 1995-2012. A vegetação nativa da bacia foi tomada por atividades agrícolas e pecuárias, destacando a cana-de-açúcar, ocasionando assim uma grande produção de sedimentos no cenário entre 1995-2012.

O modelo tem como base uma estrutura de comandos com intuito de propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos na bacia. Os maiores constituintes do modelo incluem hidrologia, clima, sedimentos, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes,

pesticidas e manejo agrícola (ARNOLD et al., 1998). O modelo requer dados diários de precipitação, temperaturas (máxima e mínima) do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa.

A metodologia tradicional de monitoramento hidrossedimentométrico é baseada na obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos que possibilita o cálculo do fluxo de sedimentos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área

O presente estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Rio Ipojuca (Figura 4), a qual é considerada uma das treze bacias hidrográficas mais importantes, no contexto hídrico, do Estado de Pernambuco. A Bacia está localizada entre os paralelos 08° 09' 50'' e 08° 40' 50'' de latitude sul e os meridianos 34° 57' 52'' e 37° 02' 48'' de longitude oeste, cobrindo assim uma superfície total de 3.433,58 km², o que representa 3,5% do território pernambucano.

A Bacia do Rio Ipojuca estende-se desde o litoral pernambucano até o zona de transição entre o Agreste e o Sertão. Possui uma posição estratégica no espaço estadual devido a sua conformação alongada. Esse fato, permite também que a bacia desempenhe o papel de calha hídrica de ligação entre a Região Metropolitana do Recife – RMR e a região do sertão (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Os limites da bacia se dão ao norte, com a bacia hidrográfica do rio Capibaribe (UP 2), ao sul, com as bacias hidrográficas dos rios Una (UP 5) e Sirinhaém (UP 4), a leste, com o segundo e o terceiro grupos de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos, GL 2 (UP 15) e GL 3 (UP 16) e o Oceano Atlântico e, a oeste, com as bacias hidrográficas dos rios Ipanema (UP 7) e Moxotó (UP 8) e o Estado da Paraíba (PHI, 2010).

Devido a sua grande extensão no sentido oeste-leste, a bacia do rio Ipojuca alberga espaços territoriais de vários municípios relevantes economicamente e que atuam como polos de desenvolvimento regionais e locais. As microregiões do Sertão do Moxotó (Mesoregião do Sertão Pernambucano), Vale do Ipojuca e Brejo Pernambucano (Mesoregião do Agreste Pernambucano), Vitória de Santo Antão e Mata Meridional (Mesoregião da Mata Pernambucana) e Suape (Mesoregião Metropolitana do Recife), as quais incluem as Regiões de Desenvolvimento do Sertão do Moxotó, do Agreste Central, da Mata Sul e Metropolitana estão abarcados pela bacia do Ipojuca (PHI, 2010).

Na Tabela 2 estão apresentados os municípios situadas no interior da bacia rio Ipojuca e mais 12 municípios com sedes nas bacias vizinhas mas, que contêm áreas distribuídas na bacia do Ipojuca.

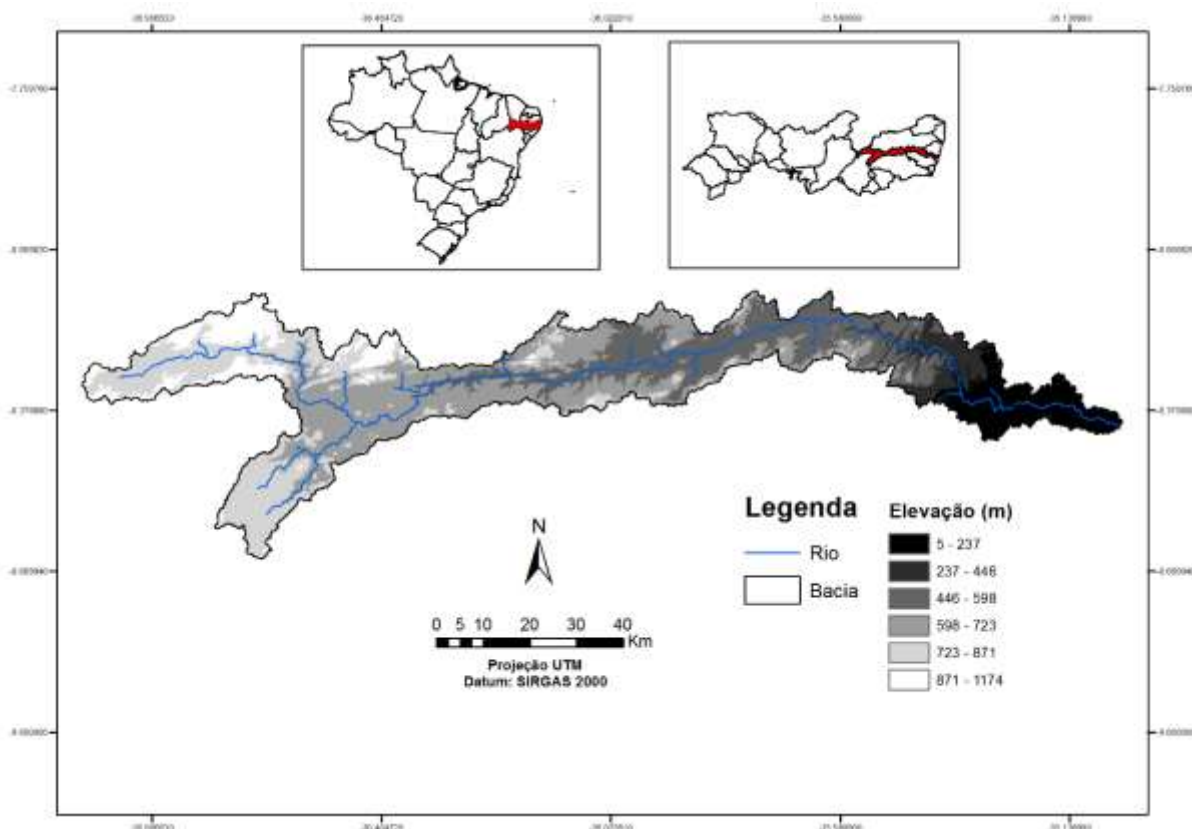


Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.

Tabela 1. Áreas dos municípios da Bacia do Ipojuca

MUNICÍPIOS	Áreas dos Municípios			Áreas da bacia ocupadas pelos municípios
	Total km ²	Pertencentes à bacia km ²	%	%
1 ALAGOINHA	180,10	54,61	30,32	1,59
2 ALTINHO	452,60	6,70	1,48	0,20
3 AMARAJI	238,80	60,89	25,50	1,77
4 ARCOVERDE	380,60	104,09	27,35	3,03
5 BELO JARDIM *	653,60	230,92	35,33	6,73
6 BEZERROS *	545,70	226,95	41,59	6,61
7 CACHOEIRINHA	183,20	1,81	0,99	0,05
8 CARUARU *	932,00	387,62	41,59	11,29
9 CHÃ GRANDE *	83,70	68,52	81,86	2,00
10 ESCADA *	350,30	203,73	58,16	5,93
11 GRAVATÁ *	491,50	169,03	34,39	4,92
12 IPOJUCA *	514,80	150,84	29,30	4,39
13 PESQUEIRA	1036,00	606,79	58,57	17,67
14 POÇÃO *	212,10	189,62	89,40	5,52
15 POMBOS	236,10	66,51	28,17	1,94
16 PRIMAVERA *	96,50	79,09	81,96	2,30
17 RIACHO DAS ALMAS	313,90	8,19	2,61	0,24
18 SAIRÉ	198,70	75,88	38,19	2,21
19 SANHARÔ *	247,50	235,45	95,13	6,86
20 SÃO BENTO DO UNA	715,90	70,15	9,80	2,04
21 SÃO CAETANO *	373,90	262,37	70,17	7,64
22 TACAIMBÓ *	210,90	131,81	62,50	3,84
23 VENTUROSA	325,10	2,22	0,68	0,06
24 VITÓRIA DE SANTO ANTÃO	345,70	39,79	11,51	1,16
TOTAL	-	3.433,58	-	100

Fonte: SECTMA, 1998 (* Municípios com sede urbana na bacia)

4.1.1 Rede Hidrográfica

A nascente do Rio Ipojuca localiza-se na cidade de Arcoverde, nas encostas da serra do Pau d'Arco, a uma altitude de aproximadamente 900 m. O rio, ao longo de seu percurso de 324 km com direção oeste-leste, apresenta dois tipos de regime fluvial, a saber, intermitente até as proximidades do seu médio curso (entre os municípios de Caruaru e Gravatá) e perene até seu estuário, na cidade de Ipojuca. A construção de grandes empreendimentos na região estuarina, tais como, o Porto de Suape e a Termopernambuco, acarretou alterações significativas em sua estrutura e, conseqüentemente, houve grande alterações nas características físico-químicas e batimétricas da área (LINS, 2002).

4.1.2 Caracterização Climática

O extenso alongamento da bacia na direção oeste-leste faz com que esta estenda-se por regiões climáticas distintas. A parte da bacia situada na zona da mata, apresenta precipitações elevadas, com valores anuais em torno de 1.800,0 mm. Os meses chuvosos da região encontram-se entre maio e agosto, os quais concentram mais de 60% da precipitação total anual. Já o período seco, concentra-se entre os meses de outubro e dezembro e representa pouco mais de 8% do total anual. As temperaturas nessa área da bacia também são elevadas, com média de 27°C. A parte oeste da bacia localiza-se na zona de transição entre a região agreste e a sertão. Nessa porção da bacia, a temperatura média do ar é em torno de 27,7°C. Já a pluviometria da área, é bastante variável, com valores que vão de 380,0 mm a 600,0 mm. O período chuvoso da porção agreste da bacia coincide com o da porção contida na zona da mata. No entanto, os percentuais de distribuição entre o período chuvoso com relação ao total anual são bastante variáveis, 42% (mais a oeste – zona de transição do agreste para o sertão) a 60 % (mais a leste – zona de transição entre o agreste e a zona da mata) (PHI, 2010).

A Variabilidade espacial da precipitação ao longo da bacia, com redução dessa variável no sentido leste-oeste, explica-se tanto pelo distanciamento do litoral quanto pela altitude e disposição do relevo, sobretudo a partir da elevação da chapada da Borborema, a qual as escarpas chegam a 800 m de altitude. Essa barreira topográfica funciona como um anteparo para os ventos alísios de sudeste, e ocasionam precipitações (orográficas) a barlavento e, conseqüentemente, reduzem a umidade das massas de ar que seguem para a sotavento (PHI, 2010; SILVA, 2016).

4.1.3 Relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca encontra-se estruturada sobre terrenos predominantemente cristalinos de idade pré-cambriana constituídos pelas rochas metamórficas dos complexos Belém do São Francisco e Cabrobó, com pequenas manchas dos Complexos Surubim e Vertentes. No município de Ipojuca, nas imediações da PE-60, encontra-se a bacia sedimentar do Cabo, constituída pelas Formação Cabo (sedimentar) e Formação Ipojuca (vulcânica) (PHI, 2010).

A atividade tectônica exerce um forte controle sobre o Rio Ipojuca e conseqüentemente sobre a área da sua bacia hidrográfica. O Lineamento Pernambuco (Figura 5) representa um sistema de falhamento transcorrente de direção geral Leste-Oeste, que acompanha a bacia, aproximadamente ao longo da rodovia BR-232, a partir de Pombos e Gravatá, seguindo até Pesqueira e Arcoverde, prosseguindo para além da bacia até Santa Filomena, no limite com o Estado do Piauí. A expressão do falhamento no relevo se dá pela Serra das Russas e pela feição alongada e encaixada em rochas, da bacia hidrográfica do rio Ipojuca (PHI, 2010).

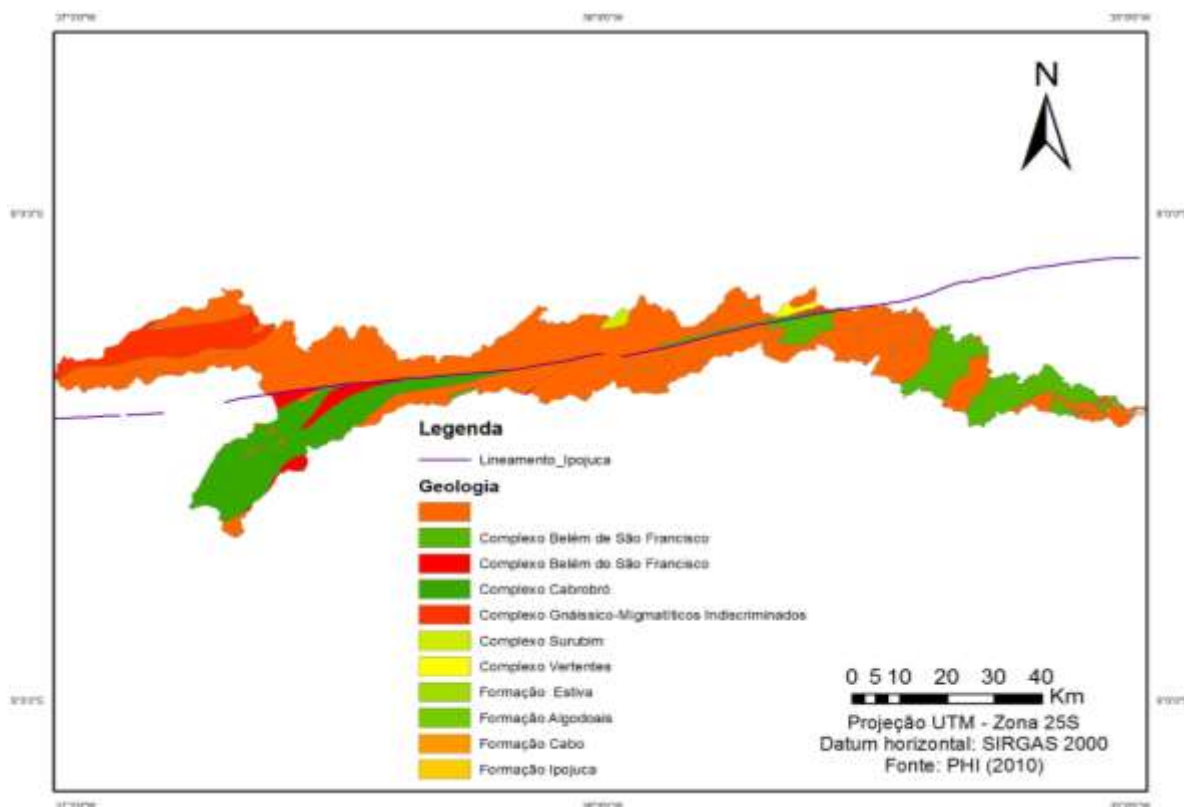


Figura 5. Geologia da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. Fonte: PHI, 2010

4.1.4 Uso e Ocupação do Solo

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca inclui a sede de municípios importantes no âmbito do estado, tais como Caruaru, Gravatá e Bezerros, além de parte de Ipojuca palco de grandes transformações socioeconômicas atuais e futuras. Tal situação, acarreta a dinamicidade da área da bacia, podendo evidenciar conflitos de uso e ocupação que afetem a disponibilidade e o consumo da água no seu território. A Tabela 3 apresenta os tipos de uso dos solos ao longo da bacia, assim como, suas respectivas áreas. Nota-se que a classe de uso predominante na área é agricultura genérica (38,0 %), seguida de pastagem (36%) e cana-de-açúcar (19%). As demais classes de uso se dividem em área urbana (3%), área agrícola com vegetação fechada (2,5%), água (1%) e floresta (0,5%), respectivamente (PHI, 2010).

Tabela 2. Tipos de uso de solos existentes na Bacia do Rio Ipojuca

Uso e ocupação do solo	Área (km ²)	Área (%)
Área agrícola	78,7	2,5
Área Urbana	94,3	3
Corpo Hídrico	33,0	1
Agropecuária com Remanescentes Florestais	634,0	19
Vegetação Campestre com Áreas Agrícolas	1.285,9	38
Vegetação Florestal com Áreas Agrícolas	3,7	0.5
Pastagem	1.224,0	36

Fonte: PHI, 2010

A Figura 6 apresenta a espacialização das classes de uso do solo da bacia do rio Ipojuca. Nas áreas com presença de “Vegetação Campestre com Áreas Agrícolas” existem formações vegetais de porte elevado e, portanto, de maior grau de cobertura. Nessa classe também estão presentes os remanescentes florestais, Mata Atlântica, Mata Serranas (Brejos de Altitude) e “Caatinga Arbórea”. A classe denominada “Agropecuária com Remanescentes Florestais” predomina a cultura de cana-de-açúcar com pequenas ilhas de vegetação natural, assim como, áreas de manguezais na zona estuarina da bacia. A área de Pastagem, por sua vez, engloba as áreas de pastagem cultivadas ou nativas, contínuas ou não; criação extensiva de bovinos, caprinos e/ou ovinos (pecuária); e agricultura, na maioria de subsistência, com plantios de milho, mandioca e feijão.

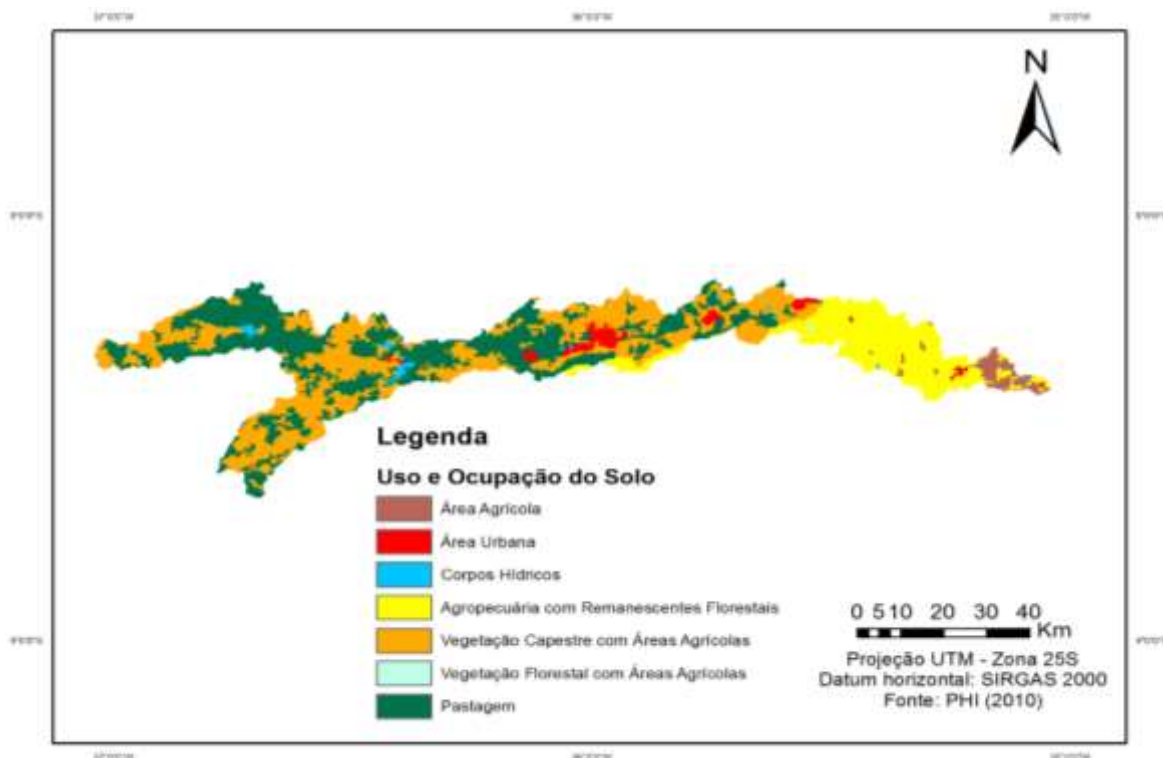


Figura 6. Distribuição espacial do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.

4.1.5 Tipos de solos

A Tabela 4 apresenta os tipos de solos que predominam na bacia do rio Ipojuca. Os solos que predominam na bacia são os argissolos, os quais representam mais de 50%, seguidos dos planossolos (24,0 %), argissolos (17,0 %) e latossolos (3,6 %).

Tabela 3 Tipos de Solos existentes na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca

Tipos de solos	Área (km ²)	Área (%)
Argissolo	570.7	17.0
Latossolo	120.7	3.6
Planossolo	817.5	24.4
Regossolo	1.845,0	55.0

Os latossolos estão presentes na porção leste da bacia (Figura 7). Nessa área há predominância de áreas agrícolas, manguezais e, também, onde localiza-se o estuário da bacia. Os latossolos são constituídos de material mineral em avançado estágio de intemperização. Esses solos variam de fortemente a bem drenados e, geralmente, apresentam profundidades superiores a 1 m (EMBRAPA, 2013).

Os argissolos estão em seguida dos latossolos, na direção oeste. Nessa área da bacia predomina os plantios de cana-de-açúcar e fragmentos de mata atlântica. Essa classe de solos apresenta profundidade variável e vão de forte a imperfeitamente drenados. A textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B (EMBRAPA, 2013).

Na porção central da bacia predominam os planossolos. Esses solos variam de imperfeitamente a mal drenados com transições de textura abruptas entre os horizontes A e B. Apresentam, geralmente, acentuadas concentrações de argila e possuem permeabilidade de lenta a muito lenta (EMBRAPA, 2013).

Finalmente, na porção oeste da bacia encontra-se os solos dominantes na bacia, os regossolos (55%). O novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da Embrapa enquadrou os regossolos na ordem dos neossolos regolíticos (EMBRAPA, 2013). Santos et al. (2012), estudando as características de neossolos regolíticos no semiárido pernambucano, concluíram que sua textura é predominantemente arenosa, com baixos teores de matéria orgânica e reduzida capacidade de retenção e disponibilidade de água e nutrientes, o que pode ser limitante a produção agrícola.

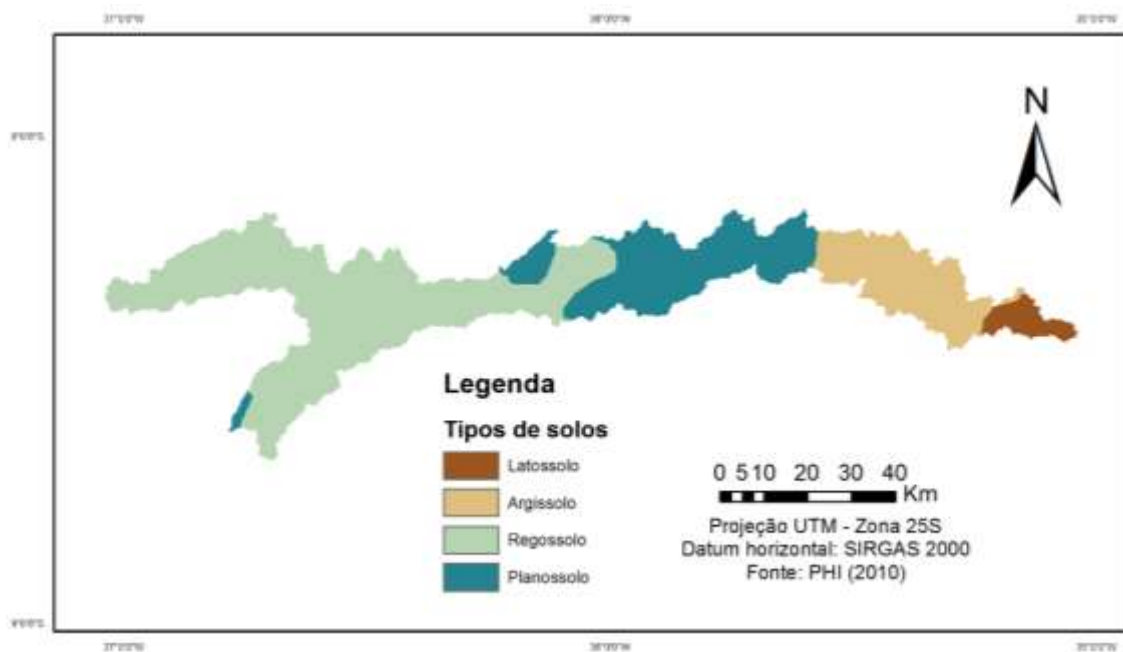


Figura 7. Distribuição espacial dos Tipos de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. (Fonte: EMBRAPA, 2013).

4.2 Modelagem e descrição do modelo SWAT

Um modelo hidrológico tem como definição um sistema físico por meio de equações matemáticas, onde o mesmo precisa de uma série de dados de entrada que tem como finalidade alimentar o modelo, e de dados de saída que é a resposta que o modelo originou com base na série de dados de entrada. Um modelo hidrológico é utilizado para fazer simulações como por exemplo: avaliar o nível de qualidade de água na bacia, analisar aporte de sedimentos, entre outras (MARINHO FILHO et al., 2012).

O SWAT é um modelo de domínio público, fruto de cerca de 30 anos de trabalhos conduzidos pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e *Agricultural Research Service* (ARS), que agrega em si diversos fundamentos de outros modelos, como o *Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS) (KNISEL, 1980), o *Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems* (GLEAMS) (LEONARD et al., 1987) e o *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC) (WILLIAMS et al. 1984). O modelo SWAT atual é descendente direto do *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) (WILLIAMS et al. 1985), juntamente com outros modelos, como o *Routing Outputs to Outlets* (ROTO) (ARNOLD et al., 1995), QUAL2E (BROWN e BARNWELL, 1987), *Carbon Cycling Routine* (CFARM) (KEMANIAN, 2011), além de um gerador de clima, uma rotina de transporte de sedimentos e um submodelo de água subterrânea (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012).

De acordo com NEITSCH et al. (2011), o modelo SWAT possui como principais características:

- É um modelo de base física, que ao invés de incorporar equações de regressão para descrever a relação entre as variáveis de entrada e saída, requer informações quanto ao clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo e gerenciamento da terra para a sua devida execução;
- É distribuído, permitindo a análise da variabilidade espacial dos fenômenos modelados;
- É contínuo no tempo, o que favorece as simulações de longos períodos (até 150 anos, de acordo com Winchell, 2010).
- Utiliza dados normalmente disponíveis, como dados de clima, solos, topografia e uso da terra;

- Possibilita a análise do impacto das alterações em dados de entrada, como o uso e ocupação do solo e clima;
- É computacionalmente eficiente, sendo capaz de simular bacias de diferentes tamanhos com estabelecimento de diferentes cenários e estratégias de manejo da terra, por longos períodos, com baixo investimento de capital;

Para a modelagem, o SWAT divide a bacia em sub-bacias e gera a rede de drenagem com base nas características topográficas do terreno. Cada sub-bacia, por sua vez, é dividida em unidades de resposta hidrológica (URH), com base no tipo de solo, uso e ocupação do solo e declividade. Uma ou mais combinações de uso da terra, classes de solo e declividade podem ser criadas para cada sub-bacia. O modelo SWAT prevê a hidrologia em cada URH usando a equação do balanço hídrico, que inclui precipitação diária, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e componentes de retorno de fluxo (BETRIE et al., 2011).

4.2.1 Rotinas de Execução do Modelo SWAT

Existem duas rotinas que caracterizam o modelo SWAT que são a Fase da Terra e a Fase de Propagação e as principais relações entre estes processos são apresentadas a seguir:

4.2.1.1 Fase da terra

Nessa fase os cálculos se referem ao fracionamento da precipitação nos diversos processos do ciclo hidrológico baseados na equação do balanço hídrico.

São considerados quatro volumes presente nesse modelo de controle para serem baseados de acordo com o balanço hídrico. São os reservatórios: superficial, sub-superficial, subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo. O balanço hídrico fica assim representado:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{t=1}^t (Pd - Q_{sup} - Ea - W_{vad} - Q_{sub}) \quad (1)$$

Em que, SW_t é a quantidade de água no solo no fim do dia (mm), SW_0 é a quantidade de água no início do dia (mm), t representa o intervalo de tempo em dia, P_d é a precipitação no

dia (mm), Q_{sup} : representa o escoamento superficial (mm), E_a é a quantidade de água que evapotranspirou no dia (mm), W_{vad} é a quantidade de água que entrou na zona vadosa no dia (mm) e Q_{sub} é a quantidade de água que alcança o aquífero subterrâneo (mm).

Para o cômputo do escoamento superficial, o modelo SWAT utiliza os métodos da Curva Número (CN) (SCS, 1972), o qual consta detalhadamente no trabalho de Santos (2015). A evapotranspiração foi obtida pela equação de Penman-Monteith, conforme recomendado por Castro (2013) e Lelis (2011).

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

O modelo hidrossedimentológico SWAT estima a produção de sedimentos causado pelo escoamento superficial (SYLD) a partir da Equação Universal de Perda do Solo Modificada (EUPSM) (Eq. 2). Essa equação é uma variante da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), desenvolvida por Wischmeier (1978), as quais diferem no fator de impulso da erosão. Enquanto a EUPS considera que a média anual bruta da erosão ocorre em função da intensidade da chuva, a EUPSM atribui ao fator escoamento. Segundo Neitsh et al. (2011), essa alteração de fator de propulsão, além de melhorar a projeção de sedimentos, permite que a equação se aplique a eventos individuais de chuva.

$$sed = 11,8(Q_{sup} * q_{pico} * A_{HRU})^{0,56} * K_{EUPSM} * C_{EUPSM} * L_{EUPSM} * P_{EUPSM} * CFRG \quad (2)$$

em que, sed é a produção de sedimento, após evento de precipitação, no dia (ton); Q_{sup} é o escoamento superficial (mm/ha); q_{pico} é a taxa de escoamento de pico (m^3/s); A_{HRU} é a área da unidade de resposta hidrológica na qual é estimada o aporte de sedimentos (ha); K_{EUPSM} é o fator de erodibilidade do solo (t.h/MJ.mm); C_{EUPSM} é o fator de uso e manejo do solo; P_{EUPSM} é o fator de práticas conservacionistas, L_{EUPSM} é o produto do comprimento do declive e o grau do declive que proporciona o denominado “fator topográfico”, e $CFRG$ é o fator de fragmentação esparsa.

- Escoamento Superficial (Q_{sup})

O escoamento superficial calculado no MEUPS, na rotina de simulação do SWAT, se dá através do Método de Curva Número, elaborado em 1954 pelo Serviço de Conservação do Solo (*Soil Conservation Service, atualmente Natural Resources Conservation Service*) dos Estados Unidos (Zhang, 2009). Tal método foi desenvolvido para fornecer, de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (NEITSCH, 2005). Com diversas revisões, este método possui relevante popularidade entre os hidrólogos, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das previsões (ZHANG, 2009). O escoamento superficial por este método se dá conforme equação 3:

$$Q_{sup} = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (3)$$

em que, Q_{sup} é o escoamento superficial (mm), P é a precipitação (mm) e S é a capacidade máxima de armazenamento (mm).

O parâmetro S varia espacialmente, considerando mudanças no tipo, uso e cobertura, manejo e declividade do solo, além das condições prévias de umidade (NEITSCH, 2005). Sua determinação considera o fator CN (Curva Número), e é dado pela seguinte Eq. 4 – em unidades métricas:

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

O fator CN é determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo o limite inferior representativo de um solo totalmente permeável e o limite superior de um solo que converterá toda a precipitação em escoamento (totalmente impermeável) (NEITSCH, 2005).

O “*Natural Resources Conservation Service*” propôs uma classificação hidrológica dos solos, na qual solos que oferecem um determinado potencial de escoamento superficial para a mesma intensidade de precipitação são postos no mesmo grupo. Com isto, foram propostos quatro grupos hidrológicos do solo (NEITSCH, 2005). São eles:

- Grupo A: possuem elevada taxa de infiltração - por consequência produzem baixo escoamento superficial – mesmo quando úmidos. São solos arenosos profundos com pouco silte e argila, que possuem elevada transmissão de água, superior a 7,6 mm/h (RAWLS, 1993).
- Grupo B: possuem infiltração moderada. São solos menos arenosos e menos profundos que o do grupo A e com moderada transmissão de água, entre 3,8 a 7,6 mm/h (RAWLS, 1993).
- Grupo C: gera escoamento superficial acima da média, devido a sua baixa capacidade de infiltração. São solos que possuem uma fração considerável de argila e são pouco profundos. Sua taxa de transmissão está situada no intervalo entre 1,3 a 3,8 mm/h (RAWLS, 1993).
- Grupo D: gera a maior proporção de escoamento superficial, motivo de sua baixa capacidade de infiltração. Solos que contém argilas expansivas e são poucos profundos. Possuem taxa de transmissão de água inferior a 1,3 mm/h (RAWLS, 1993).

Por fim, a consideração da umidade antecedente do solo pode corrigir o valor de CN, quando há uma situação seca, ponto de murcha, ou uma situação em que está saturado, capacidade de campo (Neitsch, 2005). A condição de CN 2 expressa a condição normal do solo, CN 1 indica a condição do solo em ponto de murcha enquanto que CN 3 o solo na capacidade de campo. O cálculo de CN 1 e 3 se dá através uso do valor médio, CN 2, conforme as equações (3.6) e (3.7).

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20*(100-CN_2)}{(100-CN_2+exp[2,533-0,0636*(100-CN_2)])} \quad (5)$$

$$CN_3 = CN_2 * exp[0,00673 * (100 - CN_2)] \quad (6)$$

- Vazão de Pico (q_{pico})

Vazão de pico é considerada como o máximo do escoamento superficial, para um determinado evento de precipitação, sendo um indicador do potencial erosivo usado no cálculo da produção de sedimento para aquele fenômeno. O Método Racional, utilizado para encontrar a vazão de pico, é comumente usado para bacias pequenas, mas no modelo SWAT o cálculo é feito para as diversas Unidades de Resposta Hidrológica (Eq. 7) (NEITSCH et al., 2005).

Este método baseia-se na consideração de que um evento de precipitação com intensidade “i”, começando no tempo $t = 0$ e continuando indefinidamente, proverá um aumento na taxa do escoamento superficial até que atinja o tempo de concentração, $t = t_c$, e desta maneira toda a área estará contribuindo com o fluxo no exutório (NEITSCH, 2005).

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} * Q_{sup} * A}{3,6 * t_c} \quad (7)$$

em q_{pico} é a vazão de pico (m^3/s); α_{tc} é a fração da precipitação que ocorre durante o tempo de concentração; Q_{sup} é o escoamento superficial (mm); A é a área da sub-bacia (km^2) e t_c é o tempo de concentração (h).

4.2.1.2 Fase da água ou de propagação

Nesta fase são realizados os cálculos do movimento da água e dos elementos nela presentes.

a) Propagação da vazão líquida no canal

A propagação da vazão líquida no canal foi modelada a partir da utilização do método de armazenamento variável, desenvolvido por Williams (1969) e utilizado nos modelos de *Problem-oriented computer language for hydrologic modeling* (HYMO) (WILLIAMS E HANN, 1973). Este método considera o canal de seção trapezoidal e sua vazão e velocidade calculadas a partir da equação de Manning, sendo o tempo de propagação calculado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade.

Nesse método, o cálculo da propagação da vazão líquida é dado para um segmento do canal por um determinado intervalo de tempo, considerando a equação da continuidade, de modo que se torna possível encontrar o volume armazenado no trecho, dado pela Eq. 8.

$$\Delta_{arm} = V_{in} - V_{out} \quad (8)$$

em que Δ_{arm} é o volume armazenado no trecho (m^3); V_{in} e V_{out} são os volumes de entrada e saída no segmento, respectivamente (m^3).

Assim, utilizando o “tempo de viagem” e o coeficiente de armazenamento, encontra-se o volume de água que sai do trecho em um determinado intervalo de tempo, conforme as Eq. 9.

$$V_{out,2} = SC(V_{in} + V_{arm,1}) \quad (9)$$

em que $V_{out,2}$ é o volume que saí do trecho no fim do intervalo de tempo (m^3); SC é o coeficiente de armazenamento; V_{in} é o volume de água que entra no início do intervalo de tempo (m^3); e $V_{arm,1}$ é o volume armazenado no início do intervalo de tempo (m^3).

O coeficiente de armazenamento (SC) é dado por:

$$SC = \left(\frac{2.\Delta T}{2.TT + \Delta T} \right) \quad (10)$$

O intervalo de tempo é dado por ΔT , e a variável TT (s) significa o “tempo de viagem” encontrado na razão da divisão entre o volume armazenado e o fluxo de saída. Essa variável parte do princípio de que a relação que se estabelece é constante, assim:

$$TT = \frac{V_{arm}}{q_{out}} = \frac{V_{arm,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{arm,2}}{q_{out,2}} \quad (11)$$

sendo V_{arm} , $V_{arm,1}$ e $V_{arm,2}$ os volumes armazenado no tempo (m^3); q_{out} , $q_{out,1}$ e $q_{out,2}$ são as vazões de saída no tempo (m^3/s)

O volume de entrada no segmento é conhecido nos cálculos anteriores, e o volume de saída o é no início do intervalo de tempo. O fluxo no canal é submetido a perdas por transmissão e evaporação.

b) Propagação da vazão sólida no canal

O transporte de sedimentos no canal é encarado como função dos processos de degradação e deposição, operando simultaneamente no curso d'água. Tais processos são estimados pelo modelo utilizando uma adaptação do método de potência do fluxo proposto por Bagnold (1977). De início, a quantidade máxima que pode ser transportada pelo fluxo em determinado trecho é dada por:

$$conc_{sed, mx} = c_{sp} \cdot v_{pc}^{sp exp} \quad (12)$$

em que $conc_{sed, mx}$ é a concentração máxima de sedimentos que pode ser transportada pela água (ton/m ou kg/L); v_{pc} é a velocidade de pico (m/s); e c_{sp} e $spexp$ são coeficientes de ajuste.

O coeficiente linear pode variar entre 0,0001 e 0,01, enquanto o expoente pode assumir valores entre 1 e 2.

A concentração máxima de sedimentos é comparada com a concentração de sedimentos existente no início de cada intervalo de tempo. No caso da concentração no início do intervalo de tempo ser superior à máxima, tem-se o processo de deposição predominando e estimado por:

$$sed_{dep} = (conc_{se,0} - conc_{sed, mx}) \cdot v_{pc} \quad (13)$$

A quantidade de sedimentos depositada é dada pela variável sed_{dep} (t), enquanto a concentração no início do intervalo de tempo é dada por $conc_{sed,0}$ (kg/L ou t/m³).

No caso da concentração atual ser inferior à máxima possível, a erosão é o processo que domina, sendo estimada por:

$$sed_{ero} = (conc_{sed, mx} - conc_{sed, 0}) \cdot v_{pc} \cdot K_{ca} \cdot C_{ca} \quad (14)$$

em que sed_{ero} é a quantidade de sedimentos que é erodida (t); K_{ca} é o fator de erodibilidade do canal (cm/hr-1Pa-1); e C_{ca} é o fator de cobertura do canal.

O fator de erodibilidade do canal segue a mesma premissa do fator referente ao solo, sendo comumente inferior em uma ordem de magnitude deste último, enquanto o fator de cobertura do canal busca estimar a proteção do leito devido à existência de vegetação.

Uma vez calculadas a quantidade de sedimentos que deposita e erode, tem-se a estimativa final das partículas existentes no trecho sed_{at} (ton), através da Eq. 15.

$$sed_{at} = sed_{sed, 0} - sed_{dep} + sed_{ero} \quad (15)$$

Por fim, a quantidade de sedimento que sai do trecho do canal é estimada com uso da Eq. 16:

$$sed_{out} = sed_{at} \cdot \frac{V_{out}}{V_{ca}} \quad (16)$$

em que sed_{out} indica a concentração de sedimentos que sai do trecho (t), V_{out} trata do volume que sai no intervalo de tempo (m^3) e V_{ca} diz respeito ao volume de água no trecho (m^3).

4.3 Etapas de Execução

As etapas de execução para modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Ipojuca pelo modelo SWAT estão apresentadas no fluxograma da Figura 8. Os itens a seguir detalham cada processo da etapa de execução.

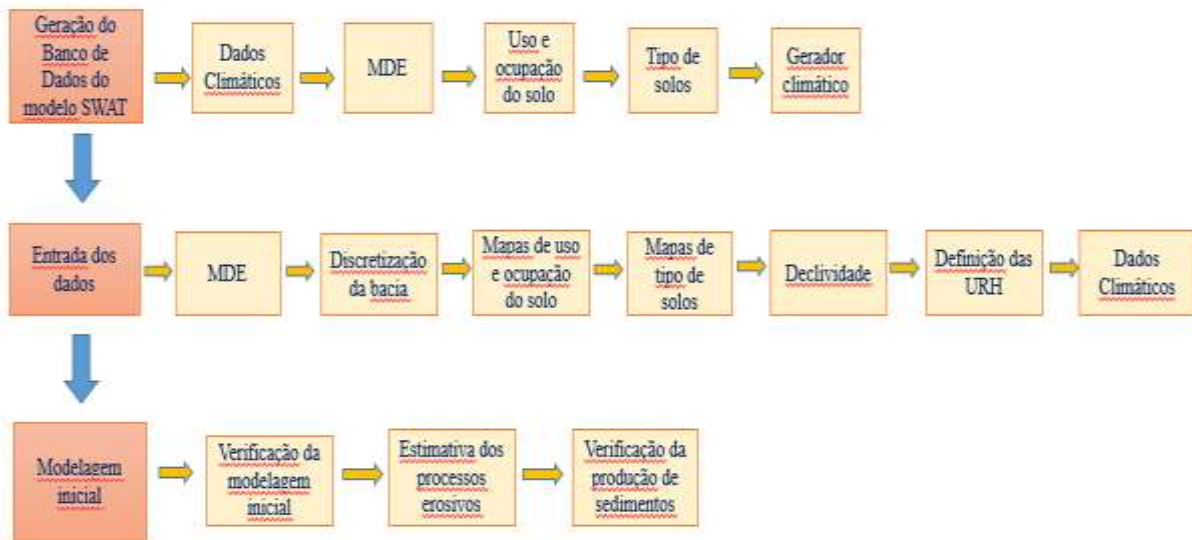


Figura 8. Fluxograma das etapas de execução do modelo SWAT

4.3.1 Geração do Banco de Dados do modelo SWAT

O modelo SWAT tem sua interface acessível por meio da integração de uma extensão, denominada ArcSWAT, ao SIG. Essa extensão foi desenvolvida para o software ArcGIS®, da *Environment Systems Research Institute (ESRI)*. Esse software em SIG é o responsável pelo pré e pós processamento de dados para a execução do SWAT.

Para a simulação, o modelo SWAT necessita dos arquivos geoespaciais relativos ao modelo de elevação digital (MDE), mapa de uso e ocupação do solo e o mapa dos tipos de solos. Além dos dados geoespaciais, o modelo requer dados tabulares referentes as condições climáticas.

A extensa quantidade de informações de entrada necessária para que o modelo efetue a simulação se torna uma das etapas mais trabalhosas e importantes para a qualidade das simulações.

4.3.1.1 Dados climáticos e fluviométricos

A modelagem hidrossedimentológica da Bacia do Rio Ipojuca foi realizada introduzindo os dados climáticos obtidos através na plataforma *Global Weather Data for SWAT*, disponível no link <http://globalweather.tamu.edu/>. Os dados fazem parte de uma

coleção de 36 anos, no período entre 1979 e 2014, obtidos *pele National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) para fornecer melhores estimativas das interações superfície-oceano-atmosfera. O *Climate System Reanalysis* (CFSR), como é designado o conjunto de dados, encontra-se em escala diária e englobam dados de precipitação pluviométrica, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa e temperatura do ar. Esses dados estão em formato para serem inseridos e trabalhados na extensão do ArcSWAT.

A bacia do rio Ipojuca contém apenas uma estação fluviométrica com uma série histórica significativa de dados para a realização da simulação hidrossedimentológica pelo modelo SWAT. A localização dessa estação (Figura 9 - Engenho Tabocas) serviu como seção de controle para evitar que o modelo SWAT viesse a considerar os processos erosivos a jusante da estação, o que geraria uma superestimativa.

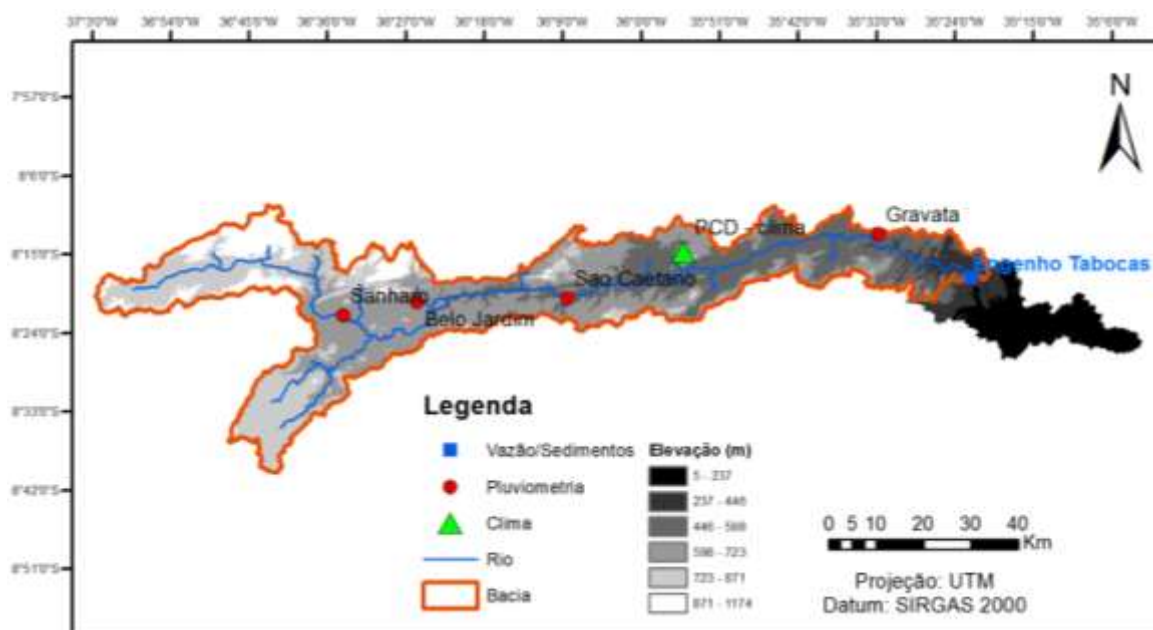


Figura 9. Localização das estações pluviométricas, climática e fluviométrica consideradas para a simulação hidrossedimentológica na Bacia do rio Ipojuca-PE.

Os dados fluviométricos foram obtidos no portal Agência Nacional de Águas (ANA) na Internet – Hidroweb. O posto fluviométrico de código de código 39360000, localizado no Engenho Tabocas, é operado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A coleta de dados no posto é bastante variável ao longo do ano. Os parâmetros medidos são: cota (cm), vazão (m^3/s), área molhada (m^2), velocidade média (m/s) e concentração (mg/L).

O método utilizado para a coleta de sedimentos foi o de Igual Incremento de Largura (IIL), realizado pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). Nesse método, as amostras são

coletadas na posição vertical e passam pelos centroides de áreas com igual incremento de largura. Com a utilização desse método, o volume da amostra coletada individualmente em cada vertical é proporcional à velocidade média nos locais amostrados. O número mínimo de verticais a serem amostradas foram dez, e todas as velocidades devem ser iguais e as amostras devem ter volumes proporcionais em relação ao produto da velocidade média.

De acordo com Minella (2007), a metodologia tradicional de monitoramento hidrossedimentométrica tem como base a obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos, possibilitando assim, o cálculo do fluxo de sedimentos caracterizado pela descarga sólida de sedimentos em suspensão (massa por unidade de tempo) e também a produção de sedimentos, que é a integração do fluxo de sedimentos em determinado tempo. A precisão dos resultados será mais apurada quanto maior for a frequência de amostragem. Sendo assim um número maior de amostras com um menor intervalo de tempo aumenta a probabilidade de coincidir o momento da coleta com os eventos de cheia, os quais são os principais responsáveis pela maior parte da produção de sedimentos. No entanto, a amostragem de sedimentos na presente área de estudo é irregular e acontece poucas vezes ao ano.

Os dados pluviométricos foram obtidos em cinco estações, operadas pela a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, contidas na bacia. As estações foram escolhidas devido a existência de uma série histórica significativa para o presente estudo. As estações pluviométrica apresentaram uma boa distribuição espacial na bacia, assim como, contiveram pequenos ou nenhuma falha. O preenchimento de falhas foi realizado pelo gerador climático do modelo SWAT (WXGEN).

As estações pluviométricas e a fluviométrica utilizadas no presente estudo estão sinalizadas na Tabela 5, assim como, seus códigos, de acordo com o seu operador, intervalo de dados utilizados, e suas respectivas coordenadas.

Tabela 4. Descrição das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE

Nome	Código	Tipo	Série Histórica	Responsável	Latitude	Longitude
Primavera	108	Pluviométrica	1993 - 2006	APAC	-8.3483	-35.3475
Gravata	58	Pluviométrica	1993 - 2006	APAC	-8.2006	-35.5431
Belo Jardim	20	Pluviométrica	1993 - 2006	APAC	-8.3367	-36.4253
São Caetano	122	Pluviométrica	1993 - 2006	APAC	-8.3283	-36.1375
Sanharó	114	Pluviométrica	1993 - 2006	APAC	-8.3639	-36.5664
Engenho Tabocas	39360000	Fluviométrica	1993 - 2006	CPRM	-8.2819	-35.3647
Caruaru - PCD	484	Climática	1993 - 2006	APAC	-8.2383	-35.9158

4.3.2 Dados Cartográficos

Os detalhes sobre os dados cartográficos que alimentaram o modelo SWAT referente aos mapas de elevação (MDE), tipos de solo e uso e ocupação do solo seguem descritos nos tópicos abaixo.

4.3.2.1 Modelo de Elevação Digital

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido através do site da EMBRAPA (<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>), missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 90 m.

A inserção do MDE é a primeira etapa após a criação do projeto na extensão do ArcSWAT. A inserção do MDE é necessária para a discretização da bacia hidrográfica, direcionamento e acumulação do fluxo de escoamento superficial no terreno, geração da rede hidrográfica, sub-bacias e dos exutórios de cada uma delas; as etapas de delimitação da bacia hidrográfica com base na definição de seu exutório; e cálculo dos parâmetros relacionados à topografia em cada sub-bacia também são fruto desse passo, ou seja, o MDE realiza uma série de operações espaciais da área que se deseja estudar, que variam desde a discretização da bacia hidrográfica, curvas de nível e declividade da área de estudo.

Antes de ser utilizado pelo ArcSWAT, o MDE foi mosaicado e processado digitalmente em ambiente SIG para preenchimento de falhas inerente ao processo de aquisição de dados obtidos por sensoriamento remoto.

A Figura 10 apresenta as duas cenas utilizadas para a delimitação da bacia do rio Ipojuca.

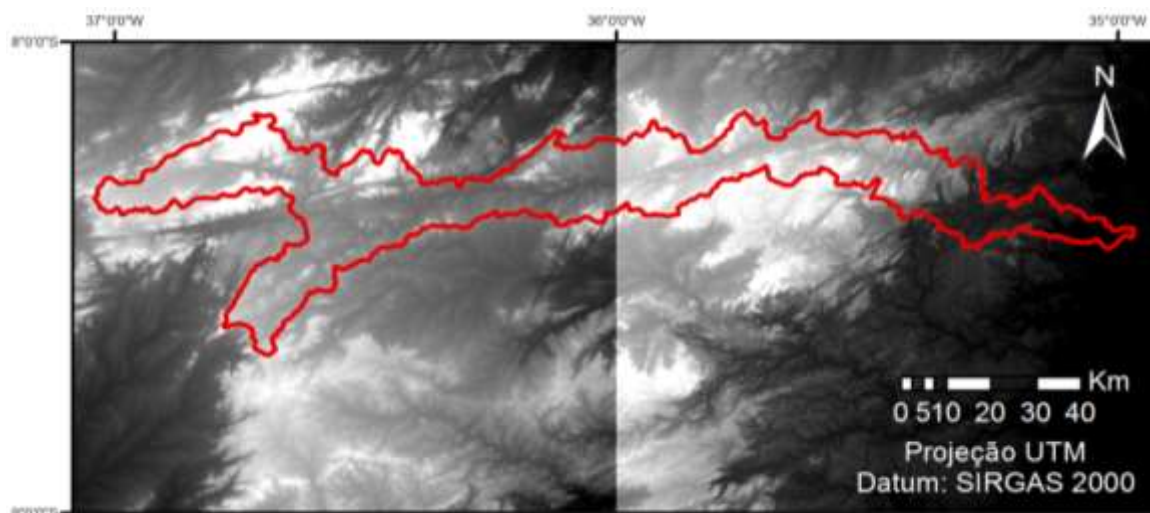


Figura 10. Modelo de Elevação Digital do Terreno – MDE (cenas 24S e 25S) utilizado para delimitação da bacia hidrográfica do Rio Ipojuca-PE

4.3.2.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

Para elaboração do mapa de uso do solo foram utilizadas duas imagens do Mapeador Temático do Satélites Landsat 5. Utilizou-se a composição colorida – RGB 543 devido a melhor representação dos alvos. As imagens foram adquiridas gratuitamente no Departamento de Geração de Imagem do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE), nas órbitas e pontos 214/66 e 215/66, as quais abordam toda a bacia do Rio Ipojuca. O formato das imagens adquiridas é o geotiff com projeção/datum UTM/SAD-69, as quais foram, posteriormente, projetada para UTM/SIRGAS2000.

O pré-processamento das imagens de satélite e a aplicação dos índices escolhidos foi realizado por meio do software ArcGIS 9.2 (licença do Departamento de Tecnologia Rural - DTR da Universidade Federal Rural de Pernambuco) para conversões de datum, montagens de *layout* e georreferenciamento das imagens.

O georreferenciamento das imagens obtidas foi realizado no intuito de reduzir os deslocamentos existentes entre as imagens de épocas distintas, embora que, as imagens em formato geotiff do DGI/INPE já tenham passado por um processo de registro. O processo de georreferenciamento adotado foi o processo de correção geométrica, utilizando imagens ortorreficadas disponível no *National Aeronautics and Space Administration* – NASA. No software ArcGis foram escolhidos 8 pontos de controle com base no reconhecimento dos padrões radiométricos, utilizando o modo de transformação polinomial de 2ª ordem.

A classificação do uso do solo foi realizada pelo método da máxima verossimilhança (MAXVER). Esse método é largamente utilizado para classificação supervisionada de imagens do tipo pixel-pixel, o qual utiliza a informação espectral de cada pixel isoladamente para identificar as regiões homogêneas. As classes temáticas de uso adotadas foram sete, a saber, área agrícola, área urbana, corpos hídricos, agropecuárias com remanescentes florestais, vegetação campestre com áreas agrícolas, vegetação florestal com áreas agrícolas e pastagem.

4.3.2.3 Parâmetros do solo

O modelo SWAT necessita de um mapa com o tipo de solos da área que se deseja fazer a modelagem hidrossedimentológica com o intuito de relacionar às características físico-hídricas de cada classe de solo. O mapa de tipos de solo (Figura 7) utilizado no presente estudo foi desenvolvido pela Embrapa (1999) em uma escala de 1:100.000 e adaptado para que se trabalhasse apenas com os grandes grupos de solo, de acordo com a nova classificação de solos brasileiros.

O banco de dados do SWAT já possui cadastrado diversos tipos de solo, com seus respectivos parâmetros, existente em território americano e, que por vezes, se assemelham aos existentes em outros lugares do mundo. No entanto, para que se alcance modelagens mais aguçadas, é recomendado o cadastro dos parâmetros obtidos nos solos da área de estudo. Os parâmetros para cada novo tipo de solo a ser cadastrado no banco de dados do SWAT estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 5. Descrição dos parâmetros exigidos pelo modelo SWAT para cada tipo de solo

Parâmetro	Descrição
SNAM	Nome dado à classe de solo
HYDGRP	Números de camadas (horizontes) do solo
SOL_ZMX	Grupo hidrológico do solo (A, B, C e D)
ANION_EXCL	Fração de porosidade máxima possível de alcance da raiz (mm)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm ³)
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm/hr)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânica do solo (% peso do solo)
CLAY	Porcentagem de argila no solo (%)

SILT	Porcentagem de silte no solo (%)
SAND	Porcentagem de areia no solo (%)
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (%)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal)
USLE_K	Fator de erodibilidade K da equação USLE

4.4 Modelagem Inicial

A primeira etapa da modelagem de uma bacia hidrográfica pelo modelo SWAT, é a delimitação e discretização da bacia, utilizando para isso, o MDE. A Figura 11 mostra a primeira tela apresentada pela extensão ArcSWAT após a criação do projeto. Utilizou-se o valor padrão estabelecido pelo software, de 2% da área total do MDE, para a área de drenagem mínima de contribuição para a formação de um canal. Para a bacia do Rio Ipojuca, a área foi de 6.867.16 hectares. Nessa etapa também, foi adicionado um ponto de monitoramento (exutório) a jusante da estação fluviométrica da bacia, dessa forma, foi gerada uma sub-bacia a montante da estação, que corresponde a 85% da área total da bacia. Em seguida, após a definição do exutório, e conseqüentemente a delimitação da bacia, foram calculados os parâmetros físicos de cada sub-bacia.

Na sequência, é realizada a definição das unidades de respostas hidrológicas (HRU). Nessa etapa, são inseridos os mapas de uso e ocupação do solo e tipo de solo para que cada classe de uso e cada tipo de solo seja relacionado com os seus respectivos parâmetros no banco de dados do SWAT, o qual já foi incrementado pelo usuário. Nessa etapa, também são definidos os intervalos de declividade. No presente trabalho foi utilizada a classificação da declividade estabelecida pela Embrapa (1979), como descrito na Tabela 7.

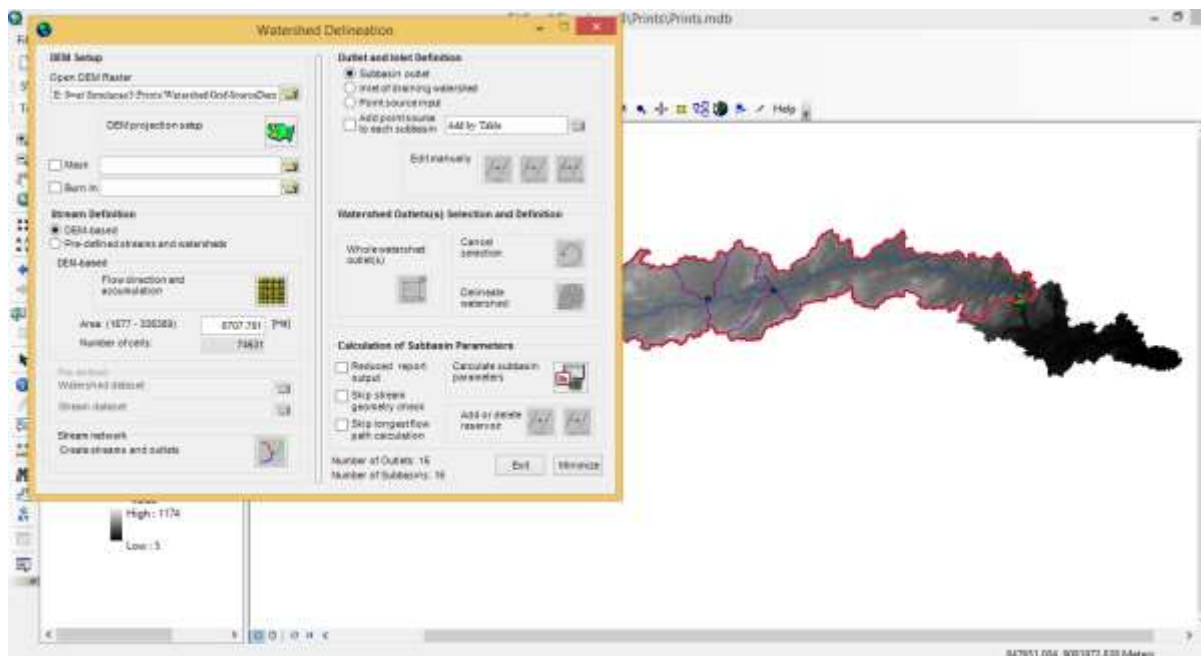


Figura 11. Interface do ArcSWAT na fase de delimitação das sub-bacias, aplicada a bacia hidrográfica do Rio Ipojuca.

Tabela 6. Classificação da declividade.

Classes de Declividade (%)*	Relevo*
0 a 3	Plano
3 a 8	Suave ondulado
8 a 20	Ondulado
20 a 45	Forte Ondulado
>45	Montanhoso e escarpado

Fonte: Embrapa, 1979 e adaptado em 2004.

A Figura 12 mostra a interface do ArcSWAT para a definição das HRUs, na etapa de definição dos intervalos de declividade. Nessa fase os mapas de uso e tipo de solo devem estar projetados para o sistema plano e devidamente configurados (os arquivos *raster* devem ter igual número de linhas e colunas, tamanho do pixel e calibração radiométrica) para que a sobreprojeção fique acima de 97,5%, mínimo permitido pelo software.

Já a Figura 13 detalha a definição de níveis mínimos de sensibilidade na formação das HRUs. No presente trabalho, utilizou-se o valor de 10% para os três parâmetros.

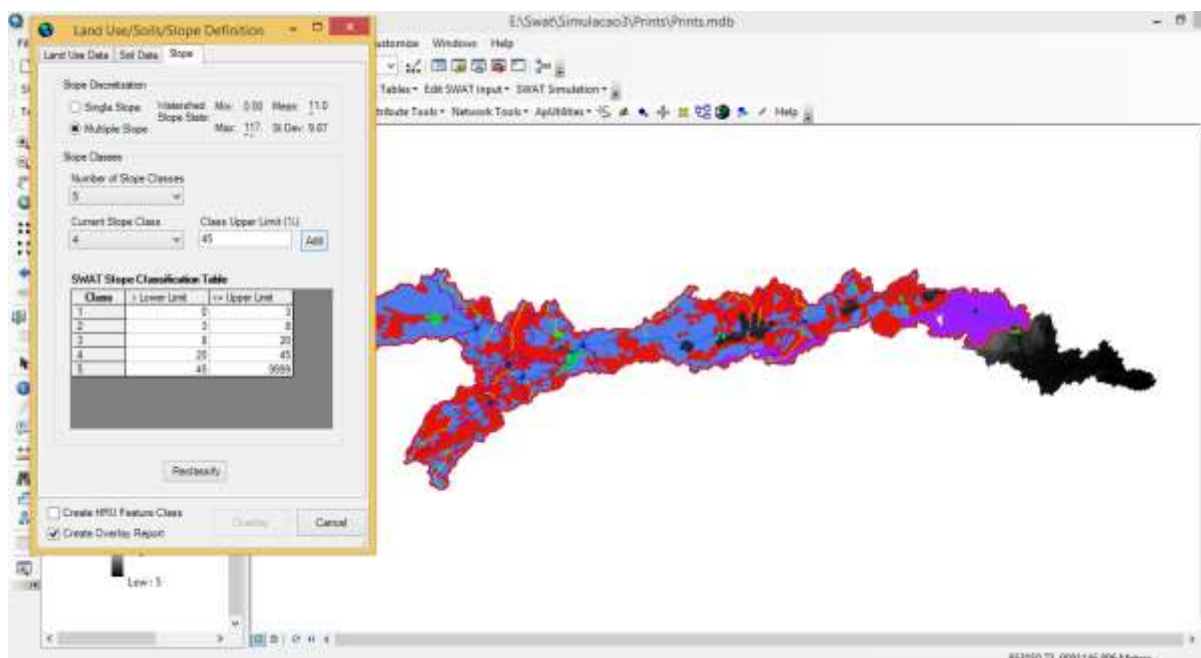


Figura 12. Interface do ArcSWAT na fase de definição das HRUs

A edição do banco de dados do SWAT, a fim de incrementar os dados das novas características das classes de uso e tipos de solos, pode ser realizada após a criação do projeto. Recomenda-se que a edição do banco de dados, através do *Microsoft Access*[®], seja realizada no arquivo criado pelo projeto, chamado SWAT2012.mdb, que se encontrará na pasta na qual o projeto foi criado. A Figura 14 mostra o banco de dados do projeto acrescentado de dois tipos de solos existente na bacia do Ipojuca.

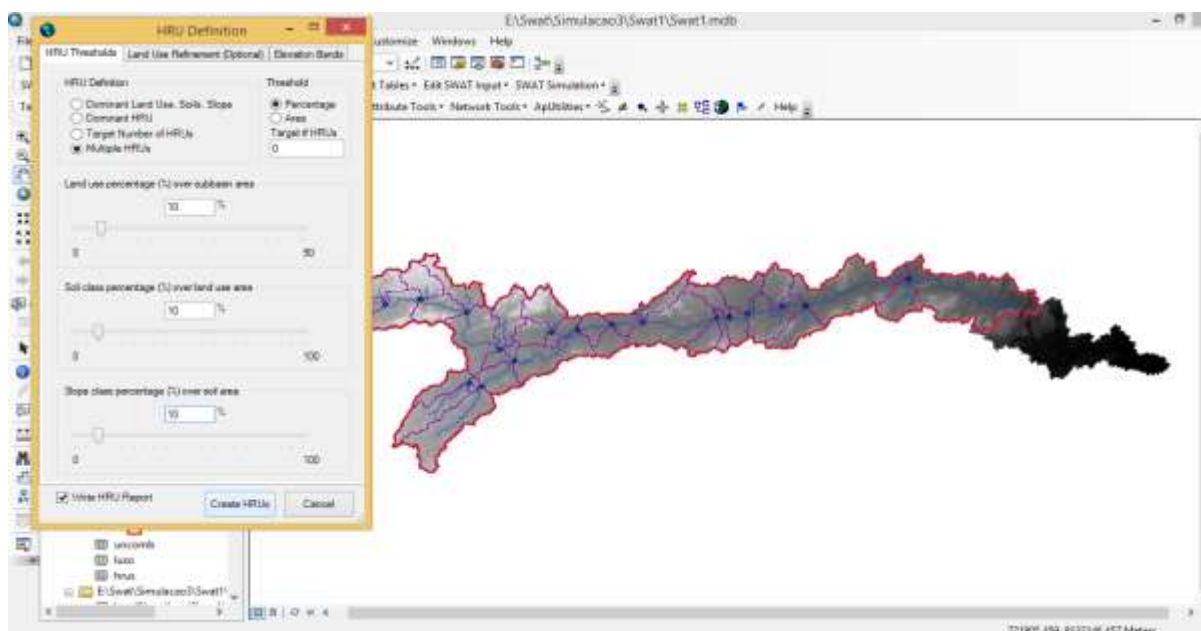


Figura 13. Interface do ArcSWAT para definição das HRUs, fase de definição dos níveis mínimos de sensibilidade.

OBJECTID	MUJO	SEQN	SNAM	SSID	CMPACT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EX	SOL_C
1			1 REGOSSOLO		100	2 A		800		0.5
2			1 PLANOSSOLO		100	4 B		1500		0.26
3	VT002	3	POOTATUCK	CT0064		13	3 B		1651	0.5
4	VT002	4	GROTON	CT0046		6	4 A	1828.800049		0.5
5	VT002	6	ADRIAN	MA0028		5	2 A		1524	0.5
6	VT002	12	BELGRADE	MA0076		3	3 B		1524	0.5
7	VT002	18	FREDON	NJ0038		1	3 C		1524	0.5
8	VT002	21	HERG	CT0047		1	3 B		1524	0.5
9	VT003	6	GALWAY	NY0218		4	4 B	838.2000122		0.5
10	VT004	19	KILLINGTON	VT0097		1	3 D	457.2000122		0.5
11	VT004	4	MACAMBER	NV0321		8	3 C	609.5999756		0.5
12	VT004	13	BERKSHIRE	MA0030		2	3 B		1651	0.5
13	VT006	6	ENCHANTED	ME0024		5	4 B	1193.800049		0.5
14	VT006	8	HOGBACK	VT0077		5	3 C	406.3999939		0.5
15	VT007	4	TIGSA	NV0075		6	3 B	1828.800049		0.5
16	VT007	7	FINNEBOG	MD282		5	3 A		1524	0.5
17	VT007	8	CASTLE	NY0199		5	3 B		1524	0.5
18	VT007	10	QUONSET	MA0058		5	3 A		1524	0.5
19	VT007	11	TISBURY	CT0053		4	3 B		1524	0.5
20	VT007	15	KINGSBURY	NY0170		4	3 D		1524	0.5

Figura 14. Banco de dados do SWAT, arquivo SWAT2012.mdb, editado. Acrescentou-se duas classes de solos contidas na Bacia do Rio Ipojuca.

A outra forma de fazer a inserção dos dados referentes às características das novas classes de uso e tipos de solo no SWAT, é através da ferramenta do ArcSWAT, *Edit SWAT Input* (Figura 15).

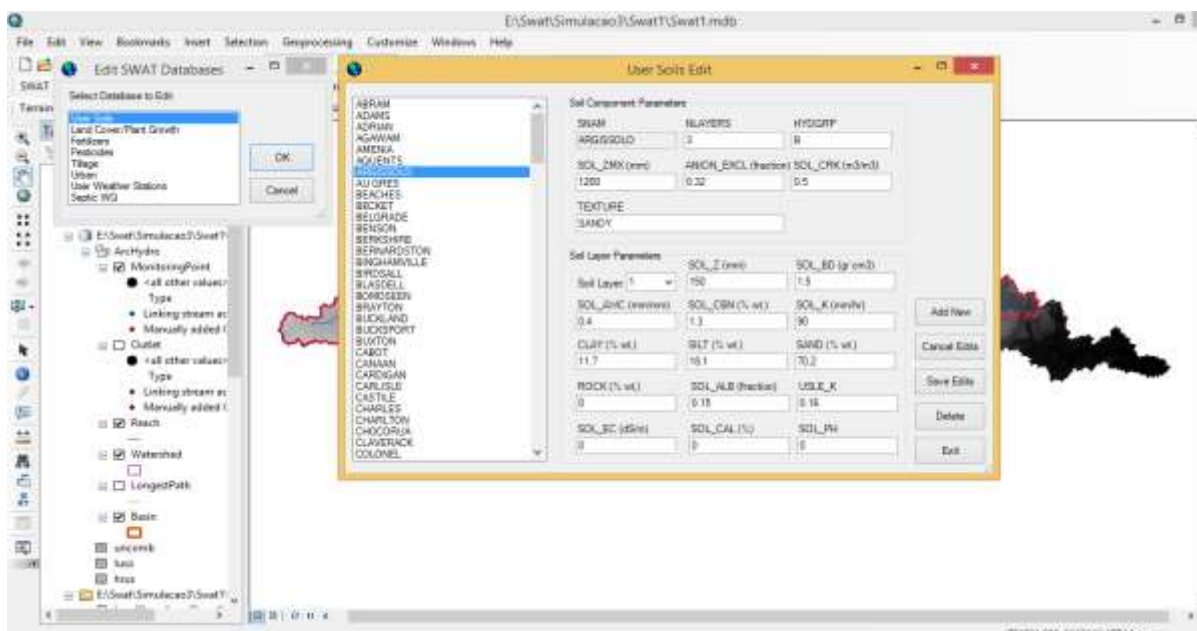


Figura 15. Interface do ArcSWAT para edição do banco de dados. Na tela está detalhado a edição do banco de dados de solos.

Da mesma forma como descrito anteriormente, para a edição dos dados de solos e classes de uso, podem ser inseridos os dados climáticos das estações locais (Figura 16 e 17).

TMPMX10	TMPMX11	TMPMX12	STATION	WLATTITUDE	WLONGITUDE	WELEV	RAIN_YRS	TMPMN1	TMPMN2	TMPMN3
25.7	18.4	13.1	Sample	33.65	-95.69	179.8	83	-0.2	1.6	
25.74	18.38	13.08	wea62	33.01	-95.92	179.8	10	-0.22	1.57	
25.74	18.38	13.08	wea43	33.25	-95.78	179.8	50	-0.22	1.57	
25.74	18.38	13.08	wea80	33.45	-95.55	179.8	10	-0.22	1.57	
29	30.1	30.2	Recife	-8.05	-34.95	10	55	22.4	22.7	

Figura 16. Banco de dados do SWAT, arquivo SWAT2012.mdb, editado. Acrescentou-se estação climática do INMET da Recife.

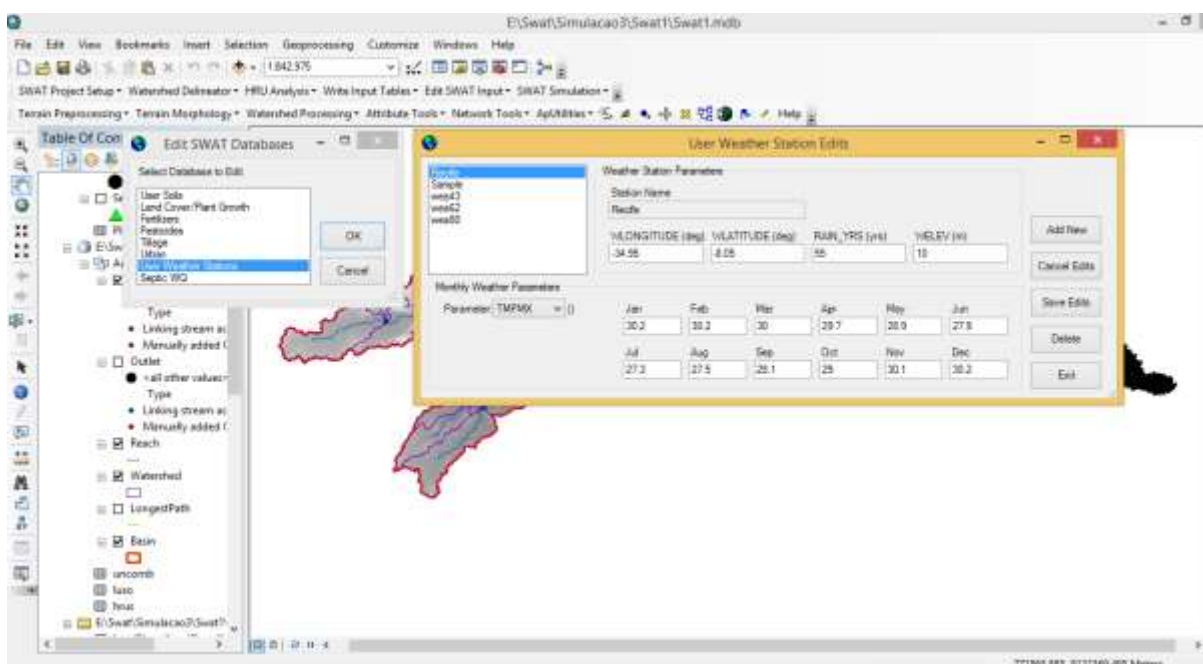


Figura 17. Interface do ArcSWAT para edição do banco de dados. Na tela está detalhado a edição das estações climatológicas.

4.4.1 Entrada de dados Climáticos

Após a definição das HRUs, é necessário a importação dos dados climáticos para a execução do modelo. Antes de importar os arquivos relativos aos dados de clima, os dados devem ser organizados, em escala diária, em arquivos de texto (bloco de notas). Na pasta de instalação do ArcSWAT (C:\SWAT\ArcSWAT\Databases\Example1, quando instalado na raiz

C:) estão os arquivos modelos para a organização dos dados (Figura 18). O arquivo de texto que contém os dados climáticos iniciam-se pela data de início (formato americano – ano, mês e dia) da série de dados. Além da configuração do arquivo de dados, é necessário configurar os arquivos que serão introduzidos na interface do SWAT (*Weather Data Definition*) (Figura 19). Esse arquivo é responsável por introduzir no modelo todas as estações desejadas para a modelagem, atentando apenas, para o fato de que todas as estações devem possuir o mesmo intervalo de dados. Os exemplos aqui colocados por meio das Figuras, apesar de tratar apenas dos dados pluviométricos, são válidos para todas as variáveis climáticas.

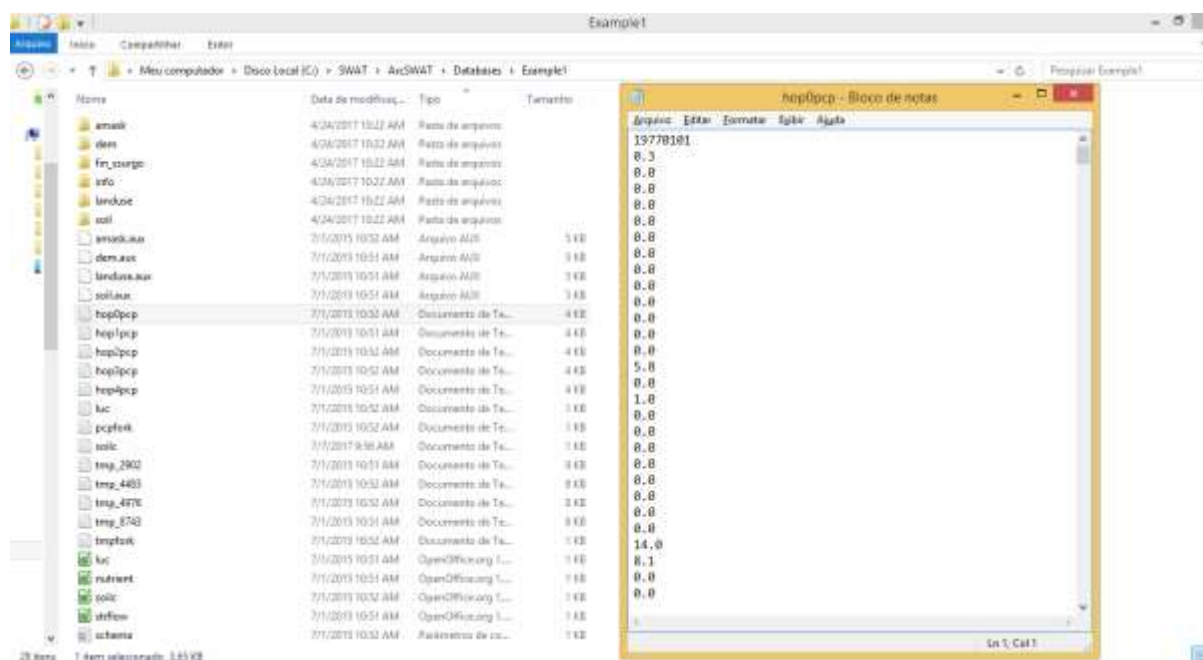


Figura 18. Diretório de instalação do ArcSWAT onde se localiza os arquivos exemplares de entrada de dados no modelo.

No presente estudo, devido à ausência de estações climáticas com séries históricas significativas para o desenvolvimento da modelagem hidrossedimentológica pelo modelo SWAT, utilizou-se os dados da plataforma global de dados, disponível no endereço: <https://globalweather.tamu.edu/>. A Tabela 8 mostra os detalhes das estações climáticas utilizadas no presente estudo.

As informações relativas as estações e aos dados pluviométricos utilizadas no presente estudo estão detalhadas no item 4.2.2.1.

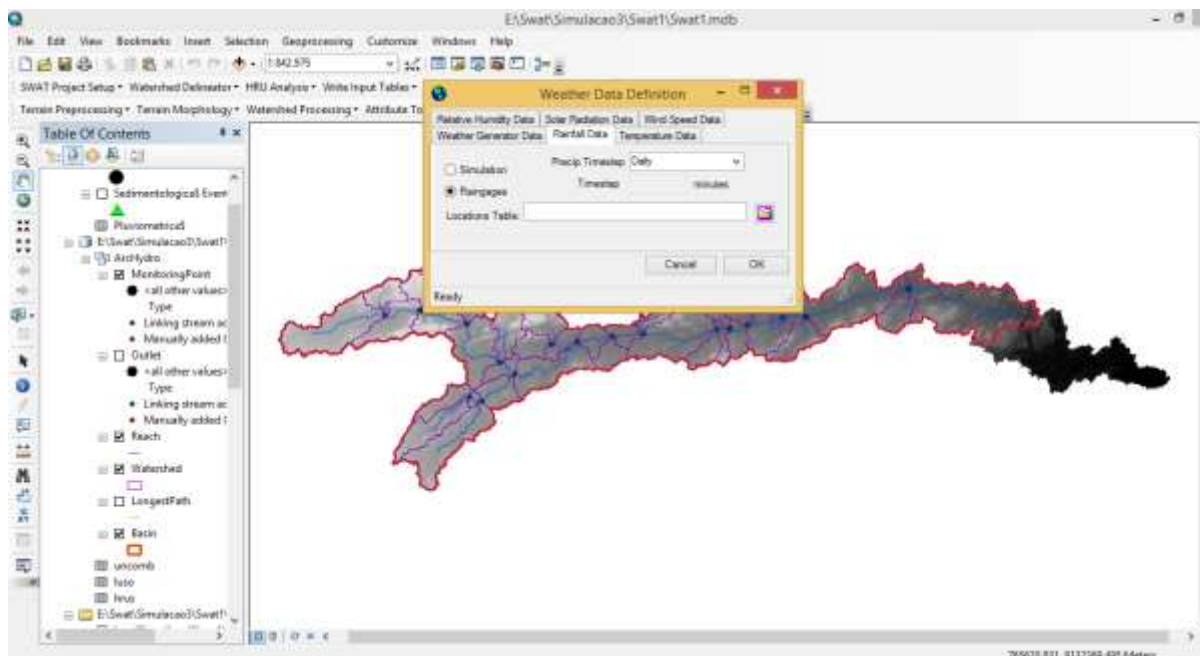


Figura 19. Interface do ArcSWAT. Em detalhes a tela para a inserção dos dados climáticos.

Tabela 7. Relação das estações climáticas globais utilizadas para a modelagem hidrossedimentológica na bacia do rio Ipojuca-PE

NOME	LATITUDE	LONGITUDE	ELEVAÇÃO (m)
p-86-369	-8.586	-36.875	628
p-83-369	-8.274	-36.875	841
p-86-366	-8.586	-36.563	760
p-83-366	-8.274	-36.563	808
p-86-363	-8.586	-36.250	567
p-83-363	-8.274	-36.250	575
p-86-359	-8.586	-35.938	404
p-83-359	-8.274	-35.938	456
p-86-356	-8.586	-35.625	262
p-83-356	-8.274	-35.625	534
p-86-353	-8.586	-35.313	133
p-83-353	-8.274	-35.313	301
p-86-350	-8.586	-35.000	23
p-83-350	-8.274	-35.000	14

Após a inserção dos dados climáticos, o modelo terá informações suficientes para ser executado.

4.5 Análise dos processos erosivos

A modelagem hidrossedimentológica pelo modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca foi realizada no período 1993 a 2006, período esse, que estão disponíveis os dados de vazão observados e a série pluviométrica para as cinco estações selecionadas na bacia.

A produção de sedimentos estimada pelo SWAT numa sub-bacia (SYLD) é calculada a partir da EUPSM e, considerada como a contribuição de sedimentos das HRUs que compõem uma sub-bacia. O modelo considera que o sedimento gerado em uma sub-bacia alcança o corpo hídrico. Nessa etapa, o modelo utiliza a metodologia da Teoria de potência do fluxo (BAGNOLD, 1977) para considerar a erosão e a deposição de sedimentos na calha do rio e, finalmente, estimar a produção de sedimentos final da sub-bacia (SED_OUT). A soma desses processos em todas as sub-bacias, ao longo do canal principal até atingir o exutório da bacia, gera a produção de sedimentos total da bacia. No presente trabalho, o exutório se situou imediatamente a jusante da estação fluviométrica para que o modelo não produzisse superestimativas devido ao fator área.

Na modelagem da propagação de sedimentos em cada trecho de rio, ou seja, análise da quantidade de sedimentos que entra (SED_IN) e que sai (SED_OUT) de uma sub-bacia, o SWAT identifica se houve deposição ou erosão da calha fluvial. A presente análise, descreve a fração de sedimentos (F_s) que cada trecho rio transporta para o trecho subsequente e pode ser calculado pela Eq. 17.

$$F_s = \frac{SED_OUT}{SED_IN} \quad (17)$$

A análise e classificação da produção de sedimentos da bacia do rio Ipojuca e de suas sub-bacias foi realizada com base na metodologia de Carvalho (2008), a qual define seis classes para a análise de perdas de solo em bacias hidrográficas (Tabela 9).

A variabilidade espacial da produção de sedimentos também foi avaliada por técnicas de SIG. Os dados da produção de sedimentos estimados pelo modelo foram comparados com os dados medidos na única estação fluviométrica existente na bacia (Tabela 5). Os dados coletados na citada estação fluviométrica estão dispostos na Tabela 10, a saber, cota (cm), vazão (Q em m³/s), área molhada (A. Molhada em m²), largura (m), velocidade média (Vel. Média em m/s) e a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss} em mg/L).

Tabela 8. Classificação das perdas de solo em bacias hidrográficas, adaptada de Carvalho (2008).

Perdas de solo (t/há/ano)	Interpretação
<10	Nula ou pequena
10-15	Moderada
15-50	Média
50-120	Média a forte
120-200	Forte
>200	Muito Forte

Tabela 9. Dados medidos no período entre 1993 e 2006 na estação fluviométrica contida na bacia do rio Ipojuca-PE.

Data	Cota (cm)	Q (m ³ /s)	A. Molhada (m ²)	Largura (m)	Vel. Media (m/s)	Css (mg/L)
3/12/1993	14	1.0	4.4	25.0	0.2	8.9
7/29/1993	36	3.7	9.1	25.0	0.4	11.1
9/14/1993	19	1.8	5.8	19.0	0.3	22.9
12/8/1993	13	0.5	3.8	15.0	0.1	12.1
3/23/1994	19	0.7	4.1	14.5	0.2	14.5
8/19/1994	115	15.2	26.9	24.0	0.6	0.0
12/1/1994	22	2.0	8.4	21.0	0.2	8.3
2/8/1995	15	1.2	6.5	20.0	0.2	24.1
6/12/1995	58	5.9	19.8	28.0	0.3	19.8
10/5/1995	29	2.7	8.7	21.0	0.3	4.1
11/9/1995	27	2.5	8.3	22.0	0.3	1.1
5/6/1996	40	4.3	10.3	20.0	0.4	12.5
6/21/1996	58	6.0	13.8	25.0	0.4	45.3
11/11/1996	40	4.3	11.2	24.0	0.4	19.6
6/2/1997	94	14.0	27.1	27.0	0.5	26.6
6/13/1997	50	6.6	15.3	24.0	0.4	15.0
10/16/1997	19	3.0	10.2	23.0	0.3	20.9
8/3/1999	32	2.3	12.0	23.0	0.2	4.8
11/1/1999	22	1.2	10.4	24.0	0.1	7.1
6/18/2000	82	11.4	27.5	26.0	0.4	40.9
9/11/2000	87	13.9	44.5	26.0	0.3	47.3
10/21/2000	47	6.7	27.6	22.0	0.2	2.3
6/12/2001	40	3.6	18.6	19.5	0.2	16.8
7/23/2001	66	9.0	22.2	21.0	0.4	22.2
11/22/2001	10	1.2	11.8	17.5	0.1	23.3
4/29/2002	120	2.4	13.9	16.8	0.2	5.2
7/2/2002	206	18.2	53.7	21.0	0.3	72.6
9/16/2002	130	4.1	16.9	20.4	0.2	9.4
12/9/2002	108	1.5	13.0	19.4	0.1	19.7
3/26/2003	136	1.6	14.3	19.8	0.1	32.4
7/29/2003	152	4.7	19.6	21.6	0.2	18.3
7/9/2004	216	23.0	53.9	25.0	0.4	96.3

9/19/2004	149	7.2	35.2	22.5	0.2	25.5
11/23/2004	112	2.2	14.0	22.0	0.2	18.3
6/17/2005	258	37.8	66.3	26.0	0.6	121.7
7/20/2006	162	9.4	26.9	25.0	0.3	16.7

Fonte: ANA, 2017.

A descarga sólida de cada evento foi obtida pela Eq. 18.

$$Q_{SS} = 0,0864 * Q * C_{SS} \quad (18)$$

em que Q_{SS} é a descarga sólida ou fluxo de sedimento em suspensão (t/dia), Q é a descarga líquida ou vazão (m³/s) e C_{SS} é a concentração de sedimentos em suspensão (mg/L).

A avaliação da modelagem hidrossedimentológica pelo SWAT foi realizada nas escalas diária, analisando os dias nos quais foram feitas as coletas na estação, e anual, média dos valores medidos durante o ano.

O resultado da modelagem do modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca foi analisada pelo coeficiente de correlação (Eq. 19), Índice de Eficiência de Nash-Nutcliffe (Eq. 20) e a Tendência Percentual (PBIAS) (Eq. 21), os quais já foram utilizados por diversos autores em modelagens com o SWAT em diferentes discretizações temporais e locais distintos (Wu e Chen, 2009; Morasi et al., 2007; Santos, 2015).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^e [(y_{obs} - \bar{y}_{obs})(y_{sim} - \bar{y}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^e (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2 \sum_{i=1}^e (y_{sim} - \bar{y}_{sim})^2} \right] \quad (19)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^e (y_{obs} - \bar{y}_{sim})^2}{\sum_{i=1}^e (y_{obs} - \bar{y}_{obs})^2} \right] \quad (20)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^e (y_{obs} - y_{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^e (y_{obs})} \right] \quad (21)$$

A Tabela 11 mostra a classificação, apresentada por Morasi et al. (2007), da eficiência da modelagem do SWAT por meio dos três índices acima apresentados quando utilizada uma escala temporal mensal, no entanto, os autores afirmam que para a escala diária as classificações podem ser menos rigorosas.

Tabela 10. Classificação da eficiência da modelagem do modelo SWAT por meio da análise do R^2 , NSE e PBIAS.

Classificação	R^2	NSE	PBIAS(%)
Muito boa	$0,80 < R^2 \leq 1,00$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$
Boa	$0,70 < R^2 \leq 0,80$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 < PBIAS \leq \pm 15$
Satisfatória	$0,60 < R^2 \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 < PBIAS \leq \pm 25$
Insatisfatória	$R^2 \leq 0,60$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Santos (2015), adaptado de Moriasi et al. (2007).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Climatologia da bacia do rio Ipojuca

5.1.1 Dados Pluviométricos

Os períodos chuvosos e secos apresentam-se com uma variabilidade sazonal das médias mensais da precipitação obtida nos postos meteorológicos localizados próximos e no interior da superfície da bacia do rio Ipojuca, conforme observa-se na Figura 20, para o período compreendido entre 1993 e 2006.

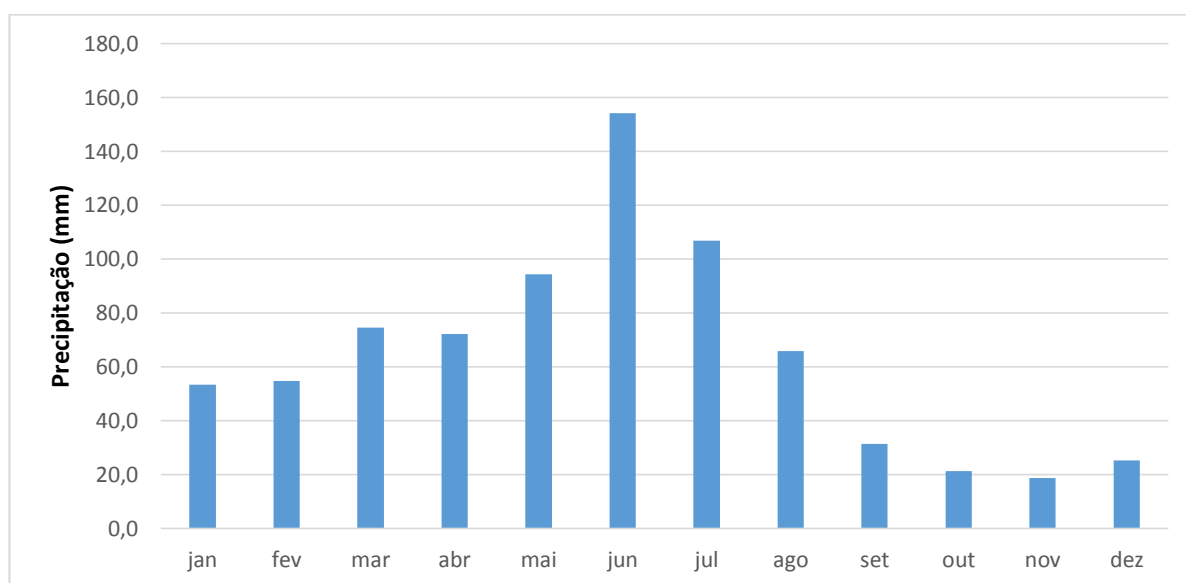


Figura 20. Variabilidade sazonal da precipitação média das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.

Nota-se que os meses de maiores totais de chuva são maio, junho e julho, com totais mensais acima de 80mm. Esses três meses mais chuvosos correspondem a 46% do total anual. O período menos chuvoso da bacia ocorre entre os meses de setembro a dezembro, com precipitações médias abaixo de 35 mm no mês e representando, apenas, 13% do total anual. Observa-se também, um período de transição entre o período seco e o chuvoso, período intermediário, que vai de janeiro a abril, com precipitações superiores a 50 mm mensais. Comportamento similar ao último grupo citado observa-se no mês de agosto, atuando assim, como mês de transição entre o período chuvoso e o período seco da bacia.

A variabilidade temporal da precipitação anual para cada estação pluviométrica utilizada no presente estudo (Figura 21) mostra que a estação Primavera apresenta totais pluviométricos médios (3.766,0 mm/ano) bem acima das demais estações analisadas, fato esse que se dar pela proximidade da estação do litoral, haja vista que esta localiza-se na zona da mata pernambucana, enquanto que as demais situam-se no agreste. A estação de Gravatá apresentou, em seguida, os maiores totais anuais observados entre as estações observadas (1.414,4 mm/ano). As demais estações alternaram os maiores totais registrados ao longo do tempo. O ano de 2000 foi o que registrou os maiores totais anuais para todas as estações observadas, com exceção da estação de São Caetano, a qual teve seu ápice pluviométrico no ano de 2004 (624,2 mm/ano).

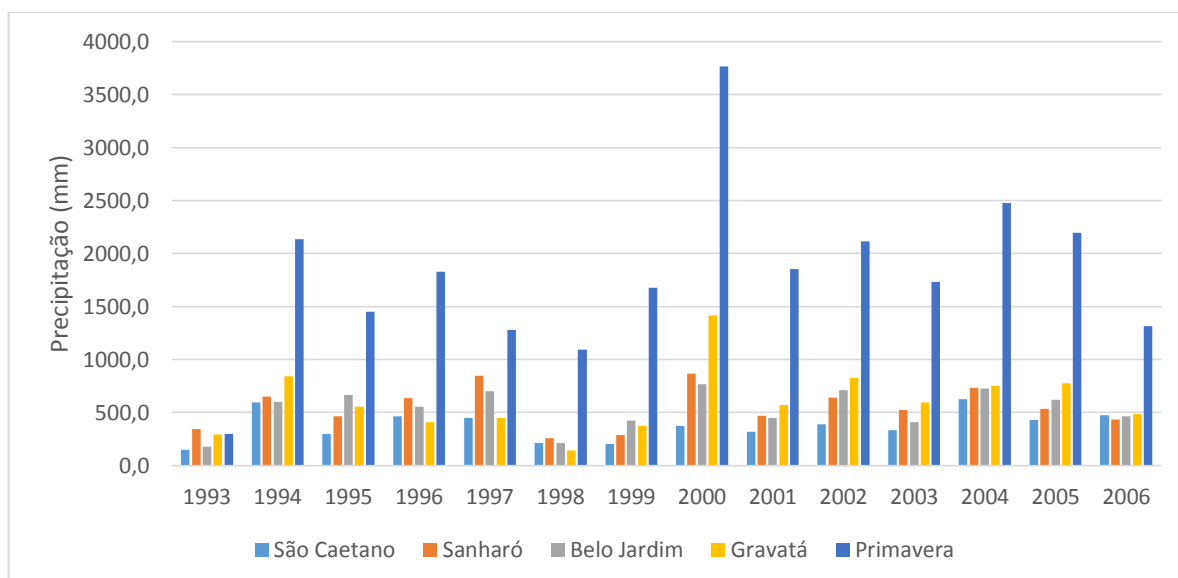


Figura 21. Variabilidade anual da precipitação média de cada estação utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE.

A Tabela 12 apresenta a precipitação média, máxima e mínima anual, assim como, o desvio padrão para todas as estações utilizadas no presente estudo.

Tabela 11. Precipitação média anual (mm), mínima, máxima e desvio padrão das estações utilizadas na modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio Ipojuca-PE.

Estações	Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
Primavera	1800.8	789.5	297.4	3766.0
Gravatá	605.2	310.8	142.4	1414.4
Sanharó	547.8	191.0	257.0	866.6
Belo Jardim	533.5	185.3	178.6	766.3
São Caetano	378.0	140.4	145.4	624.2

A variabilidade espacial da precipitação anual tem grande relevância para o entendimento da modelagem hidrológica e sedimentológica em bacias hidrográficas, além de outras aplicabilidades, tais como, planejamento agrícola e melhor gerenciamento dos recursos hídricos. A variabilidade espacial da precipitação média anual da bacia do rio Ipojuca (Figura 22) mostra que os maiores totais anuais ocorrem na porção leste da bacia. Os valores nessa faixa variam entre 1200 mm e 1800 mm. Na faixa litorânea os valores oscilam entre 1200 mm e 1500 mm, os quais são superados (1500 mm a 1800 mm) pela faixa imediatamente a oeste, onde estão localizados os extensos plantios de cana-de-açúcar - região da mata sul pernambucana. A transição entre a zona da mata e o agreste é marcado por um forte gradiente pluviométrico que pode ser explicado pelo fator topográfico. Nessa faixa da bacia é encontrada a borda ocidental do Planalto da Borborema, na qual fica localizada a Serra das Russas, cuja altitude de suas escarpas variam de 400m a 800m. As chuvas orográficas são constantes a barlavento das serras e, por isso, os totais pluviométricos são mais acentuados (1200 mm), no entanto, a sotavento, a umidade reduz significativamente, assim como as precipitações (650 mm). Nas porções central e oeste da bacia os totais pluviométricos variam entre 370 mm e 660 mm. Essa área com menores totais pluviométricos coincide com as áreas onde o rio Ipojuca passa a ser de regime hídrico temporário.

A proximidade da parte leste da bacia com o litoral é fundamental para a ocorrência dos maiores totais pluviométricos. Os mecanismos, tanto de mesoescala quanto de escala sinótica, vindos do oceano Atlântico atuam diretamente nessa parte da bacia, enquanto na porção central e oeste da bacia atuam apenas os fenômenos de escala sinótica, os quais são mais presentes no período chuvoso da região.

Dentre os mecanismos de escala sinótica que atuam na faixa leste da bacia e, com menor intensidade na porção central, pode-se citar a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), os Distúrbios Ondulatórios nos Ventos de Lestes (DOLs), as Ondas de Leste, e as perturbações associados aos sistemas frontais (MOLION e BERNARDO, 2002; ALVES et al., 2006; CRUZ, 2008). As brisas marítimas e terrestres atuam em todas as épocas do ano na região, constituindo um importante mecanismo causador de precipitação de mesoescala, assim como os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (MOLION e BERNARDO, 2002).

Os mecanismos supracitados podem atuar com intensidades e padrões distintos anualmente, dependendo dos padrões oceânicos que modificam o padrão de circulação geral da atmosfera, tais como, El-Niño/La-Niña e Dipolo do Atlântico (MOURA et al., 2009).

Os períodos de estiagem e as altas temperaturas na região agreste e sertão da bacia são responsáveis pela redução das vazões específicas. Com isso, os cursos d'água no cristalino não têm suporte de vazão de base nem de superfície o ano todo para manterem o rio perene (PHI, 2010).

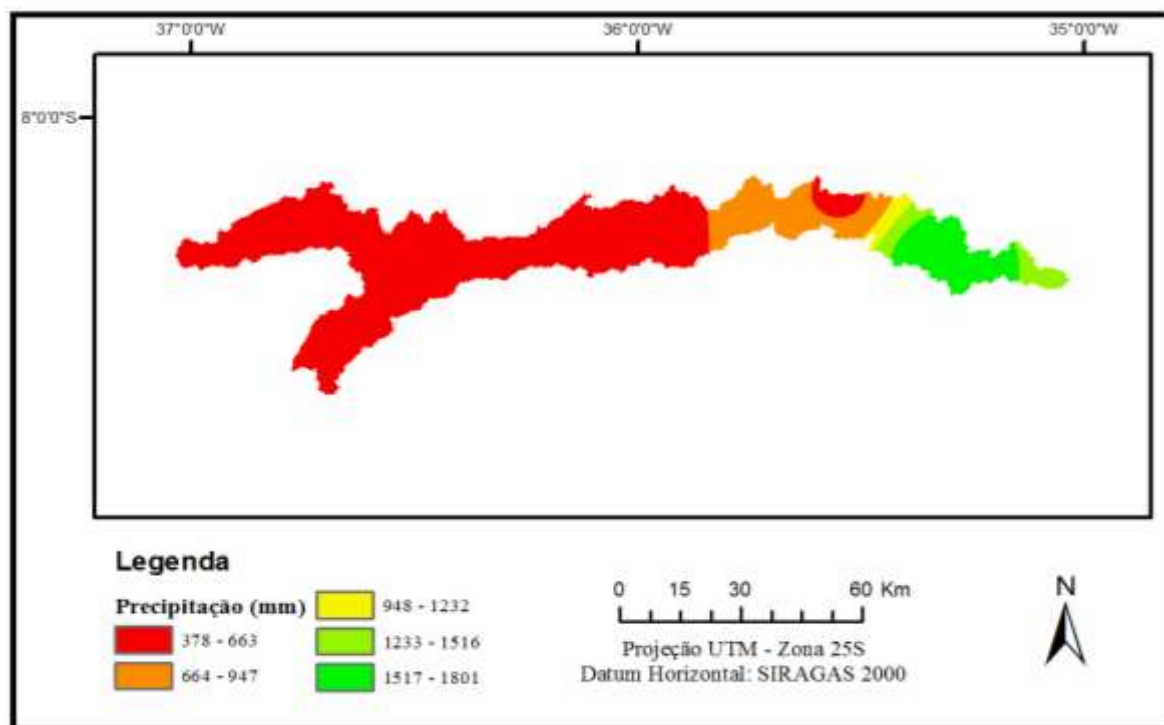


Figura 22. Variabilidade espacial da precipitação média anual na bacia do rio Ipojuca-PE.

5.1.2 Dados meteorológicos das estações globais

A variabilidade sazonal das médias da temperatura máxima (Tmax), mínima (Tmin) e umidade relativa (UR) do ar, para todas as estações globais utilizadas entre os anos de 1993 e 2006, está disposta na Figura 23. O valor máximo observado para a variável Tmax ocorreu no mês de janeiro (30,3 °C), enquanto o valor mínimo, se deu no mês de julho (24,6 °C). Já os valores de Tmin variaram entre 17,3 °C (novembro) e 19,7 °C (fevereiro, março e abril). A umidade relativa do ar esteve sempre acima dos 73%, com valor máximo de 88% nos meses mais chuvosos da bacia (julho e julho). As variáveis acima analisadas apresentam comportamento bastante adequado para a região estudada, assim como, a tendência sazonal. Os maiores valores de temperatura foram observados nos meses de verão, período seco da região – baixos valores de umidade relativa – e os menores valores ocorreram nos meses de inverno, período chuvoso – altos valores de umidade relativa.

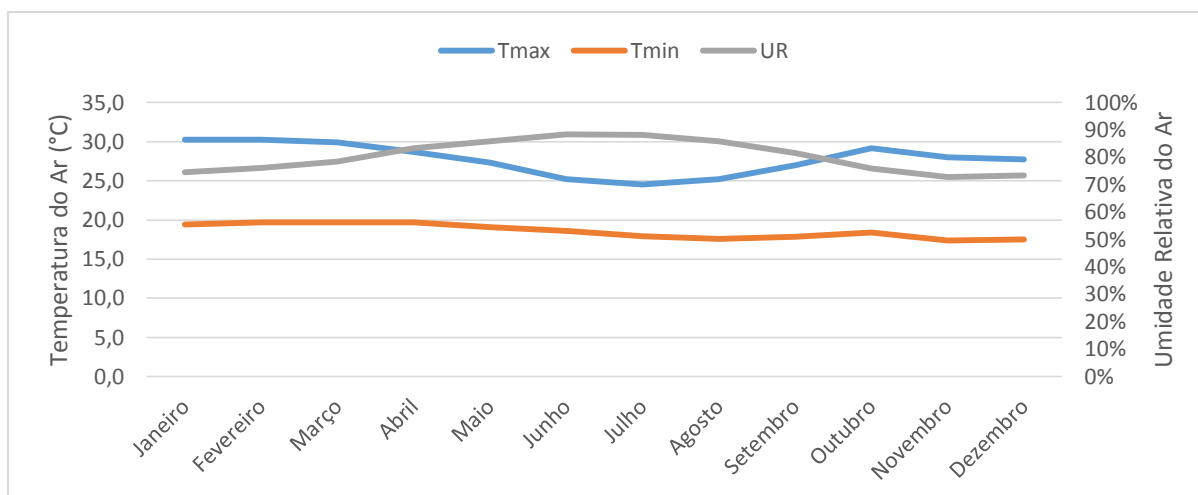


Figura 23. Variabilidade sazonal das médias da temperatura máxima, mínima e da umidade relativa do ar na bacia do rio Ipojuca-PE para o período entre 1993 e 2006.

A variabilidade espacial das variáveis Tmax, Tmin e UR está disposta na Figura 24. A Tmax e a UR decrescem no sentido leste-oeste, já a Tmin apresenta comportamento contrário.

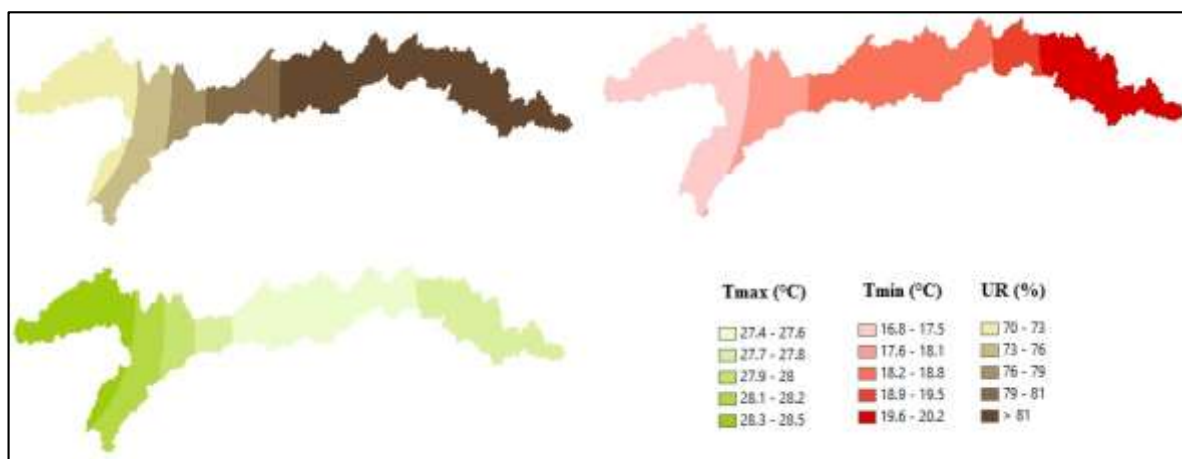


Figura 24. Variabilidade espacial das variáveis Temperatura máxima, Temperatura mínima e Umidade Relativa (%) para a bacia do rio Ipojuca-PE.

Os valores médios da velocidade do vento (Vv) e da insolação (Rs) para o período compreendido entre 1993 e 2006 estão dispostos na Figura 25. Os valores de Vv variaram entre 2,5 m/s (abril) e 3,5 m/s (outubro e novembro), já os valores de Rs ficaram no intervalo de 13,6 MJ/m².dia a 22,8 MJ/m².dia.

A variabilidade de Vv e de Rs está descrita na Figura 22. Observa-se para essas duas variáveis distribuição similar, com aumento dos valores no sentido leste-oeste.

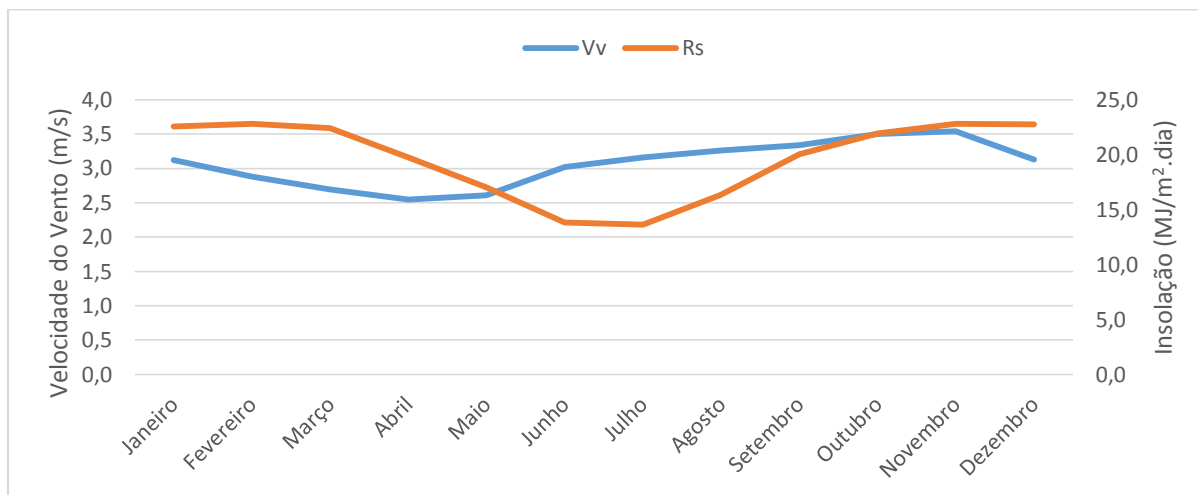


Figura 25. Variabilidade sazonal dos valores médios da velocidade do vento e da insolação na bacia do rio Ipojuca-PE para o período entre 1993 e 2006.

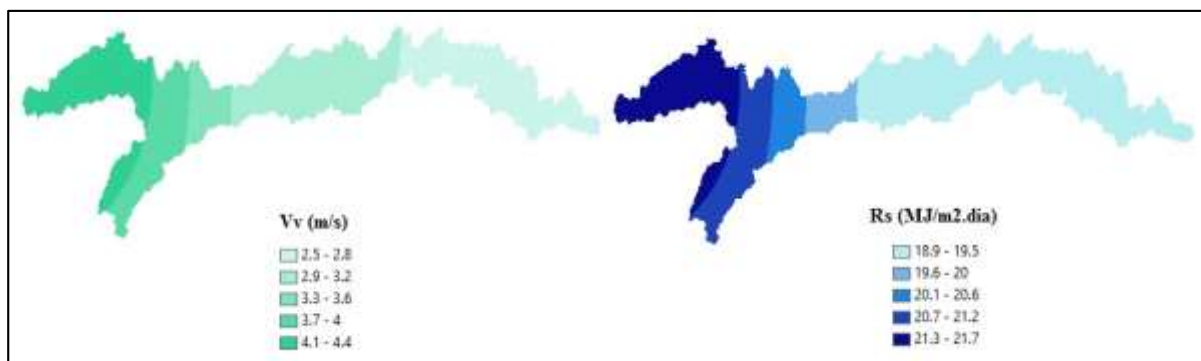


Figura 26. Variabilidade espacial das variáveis Velocidade do vento e Radiação solar para a bacia do rio Ipojuca-PE.

5.2 Processamento dos dados de entrada

O processo de discretização e delineamento da bacia hidrográfica do rio Ipojuca pelo modelo SWAT, baseado no Modelo de Elevação Digital – MDE, gerou 35 sub-bacias (Figura 27) com áreas que variam entre 42 km² (sub-bacia 21) e 2.938 km² (sub-bacia 11). Essa última sub-bacia foi criada a partir do ponto incluído como exutório, imediatamente a jusante da estação fluviométrica da bacia e representa 12% da área.

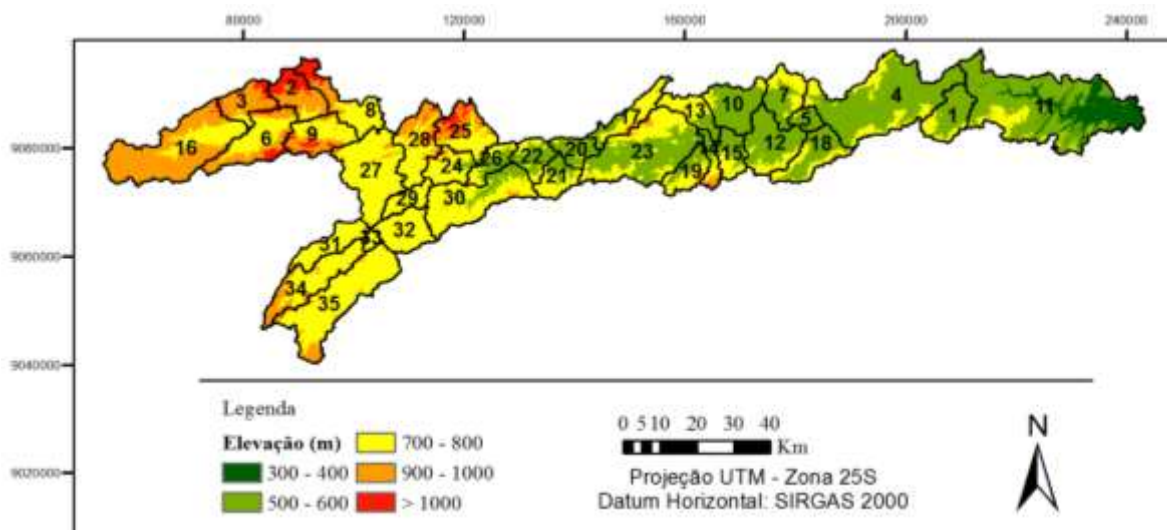


Figura 27. Sub-bacias geradas pelo Modelo SWAT, com base no Modelo Digital de Elevação, para a bacia do rio Ipojuca-PE.

As áreas mais elevadas da bacia situam-se na porção oeste enquanto as de menores elevações estão próximas ao exutório. As elevações variaram entre as faixas de 300 a 400, no extremo leste da sub-bacia 11, a faixa de valores maiores que 1.000 m – partes das sub-bacias 2, 3, 6, 9 e 25.

Para que fossem geradas as HRUs, o mapa de declividade da bacia foi gerado a partir do MDE, de acordo com as seguintes classes de declividade proposta pela Embrapa (2004): 0 a 3% (plano); 3 a 8% (suave ondulado); 8 a 20% (ondulado); 20 a 45% (forte ondulado); e superior a 45% (montanhoso e escarpado).

A Figura 28 mostra a variabilidade espacial da declividade da bacia do rio Ipojuca, na qual se pode observar que o relevo ondulado e forte ondulado predominam na porção leste da bacia, sub-bacia 11. Essas classes de relevo supracitadas ocorrem em toda a bacia, no entanto, na porção central e oeste prevalecem ondulações suaves. As áreas planas ocorrem em toda a bacia, mas de forma bastante intermitente. Já as montanhas e escarpas da bacia predominam próximo ao exutório, sub-bacia 11, e a oeste, sub-bacias 9, 24, 25 e 28.

A distribuição das classes de relevo na bacia estão dispostas na Tabela 13. O relevo suavemente ondulado são os que predominam (40,3%), seguido do ondulado (32,8%). Com um percentual bem inferior, seguem os relevos fortemente ondulados (14,2%), planos (11,5%) e montanhosos e escarpados (1,2%).

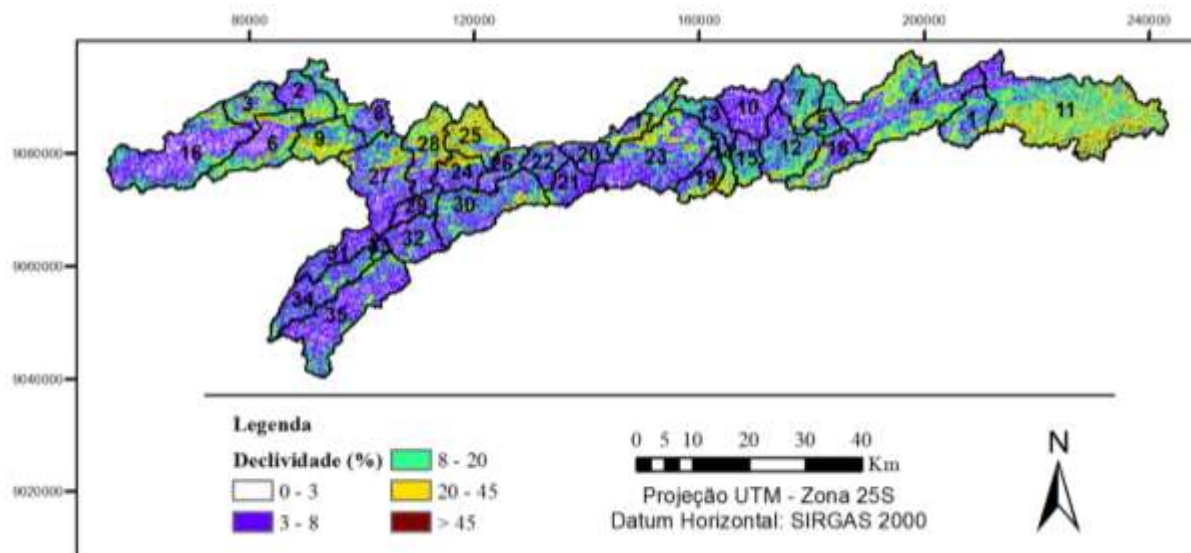


Figura 28. Espacialização da declividade da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca.

Tabela 12. Distribuição da declividade da Bacia do Rio Ipojuca.

Classes de Declividade (%)*	Relevo	Área (km ²)	Área (%)
0 a 3	Plano	338,4	11,5
3 a 8	Suave ondulado	1.185,6	40,3
8 a 20	Ondulado	963,3	32,8
20 a 45	Forte Ondulado	415,2	14,2
> 45	Montanhoso e escarpado	34,6	1,2

*Embrapa (2004).

Com base na sobreposição dos mapas de uso e ocupação do solo, tipos de solo e declividade, foram geradas as HRUs para a Bacia do Rio Ipojuca. No total 254 HRUs foram geradas, as quais estão dispostas na Tabela 14. As sub-bacias que tiveram o maior número de HRUs foram as de número 10 e 14, com 15 HRUs cada. Ambas as sub-bacias encontram-se na parte central da bacia e representam juntas pouco mais de 3% da área total. O número menor de HRUs por sub-bacias foi 3, ocorrendo nas de número 2 e 9.

Tabela 13. Unidades de Respostas Hidrológicas - HRUs criadas a partir da sobreposição de mapas na bacia do rio Ipojuca-PE.

Sub-bacias	Área (km ²)	Área (%)	HRU	Sub-bacias	Área (km ²)	Área (%)	HRU
1	62,05	2,11	5	19	43,39	1,48	11
2	61,37	2,09	3	20	33,43	1,14	6
3	53,45	1,82	6	21	41,87	1,43	6
4	243,32	8,28	6	22	41,51	1,41	6
5	20,19	0,69	6	23	182,32	6,34	9
6	96,81	3,30	6	24	46,65	1,59	6
7	60,03	2,04	5	25	75,48	2,57	5
8	72,60	2,47	6	26	35,77	1,22	6
9	69,98	2,38	3	27	139,37	4,74	7
10	74,11	2,52	15	28	83,92	2,86	6
11	333,25	11,24	9	29	31,79	1,08	6
12	91,02	3,10	11	30	131,45	4,47	6
13	42,96	1,46	7	31	51,60	1,76	6
14	24,05	0,82	15	32	62,76	2,14	6
15	40,08	1,36	11	33	8,99	0,31	6
16	198,80	6,77	6	34	93,24	3,17	11
17	51,98	1,77	9	35	164,58	5,60	6
18	69,73	2,37	10				

A variabilidade espacial do uso e ocupação do solo na bacia do rio Ipojuca e as suas distribuições percentuais estão dispostas na Figura 29 e Tabela 15, respectivamente. A área da bacia ocupada com vegetação campestre com áreas agrícolas é a mais expressiva, com aproximadamente 1.286 km² (43,8%). Nessa classe estão presentes os remanescentes florestais, mata atlântica, mata serranas (Brejos de Altitude) e “Caatinga Arbórea”. A classe de uso do solo imediatamente a supracitada é a pastagem, com área de 1.224 km² (41,7%). Essa categoria engloba as áreas cultivadas ou nativas, contínuas ou não, criação extensiva de bovinos, caprinos e/ou ovinos (pecuária); e agricultura, na maioria de subsistência, com plantios de milho, mandioca e feijão. Essas duas primeiras classes são observadas ao longo de toda a bacia, exceto na porção leste, na qual predomina a agropecuária com remanescente florestais. Essa última classe, abrange a área de 307,2 km² (10%) e caracteriza-se pelas extensas plantações de cana-de-açúcar com pequenas ilhas de vegetação natural e manguezais na zona estuarina (sub-bacia 11). As áreas urbanas representam pouco menos de 3% (área de 85,6 km²), os corpos hídricos pouco mais de 1% (área de 31,6 km²) e as de vegetação florestais com áreas agrícolas 0,13% (área de 3,7 km²).

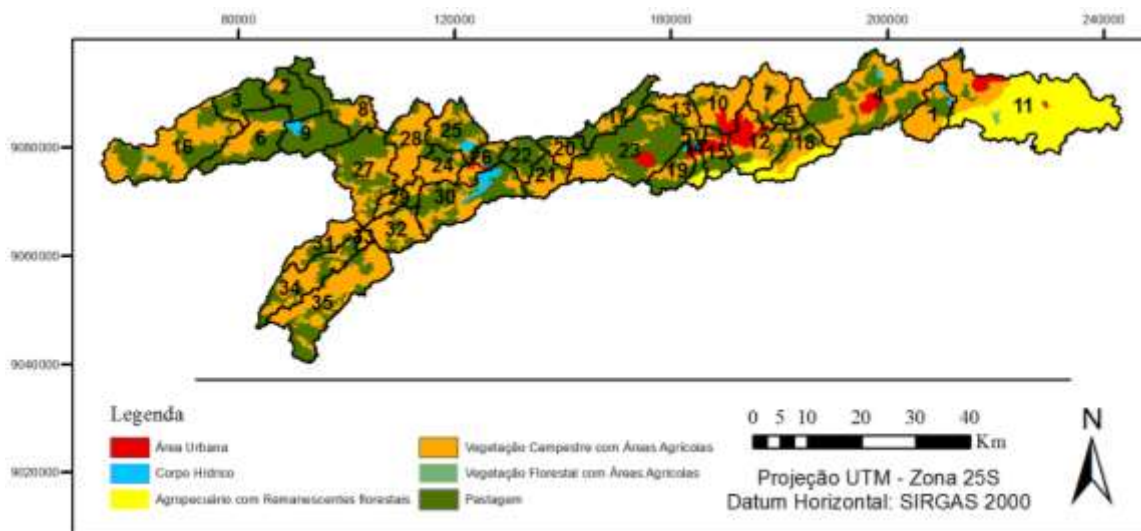


Figura 29. Distribuição espacial do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca-PE.

Tabela 14. Distribuição das classes de uso do solo na bacia do rio Ipojuca-PE.

Uso e ocupação do solo	Área (km²)	Área (%)
Agrorpecuária com remanescentes florestais	307,15	10,45
Área Urbana	85,61	2,91
Corpos Hídricos	31,63	1,08
Vegetação campestre com áreas agrícolas	1.285,90	43,77
Vegetação florestal com áreas agrícolas	3,71	0,13
Pastagem	1.224,06	41,66

A variabilidade espacial do tipo de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (Figura 30) mostra a distribuição bastante homogênea. Os argissolos estão concentrados na sub-bacia 11 e correspondem ao menor percentual da área (9,4%) (Tabela 16). Nessa área predominam as extensas culturas de cana-de-açúcar com pequenas áreas de vegetação e, os manguezais na zona estuarina. Em seguida, na direção oeste, estão os planossolos, responsáveis por ocupar a área superior a 817 km² (27,8%). Esse tipo de solo predomina na zona de transição entre a zona da mata e agreste e tem, principalmente, o solo com vegetação campestre com áreas agrícolas e pastagem. Esses solos também são encontrados, de forma descontínua, nas sub-bacias 17 e em parte das sub-bacias 23 e 34. Os regossolos são os solos predominantes na bacia, com área superior a 1.880 km² (62,8%). O uso do solo nessa área é pastagem e vegetação campestre com áreas agrícolas. Área ocupada por esse tipo de solo vai da parte central da bacia até o extremo oeste, envolvendo parte do agreste pernambucano e a zona de transição para o sertão.

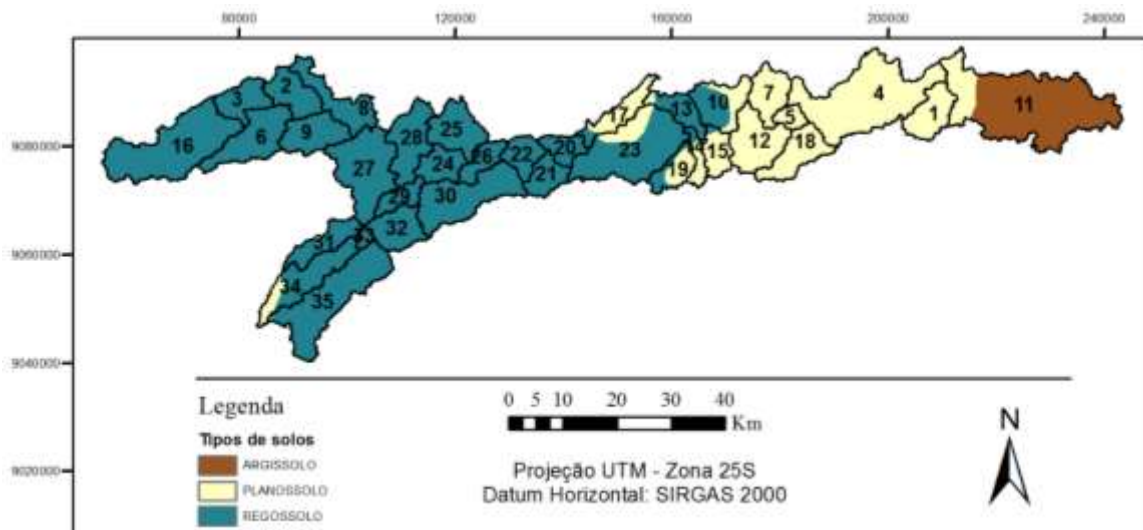


Figura 30. Distribuição espacial dos Tipos de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca. (Fonte: EMBRAPA, 2013).

Tabela 15. Distribuição dos tipos de solos existentes na Bacia do Rio Ipojuca-PE.

Tipo do solo	Área (km ²)	Área (%)
Regossolo	1.884,8	62,8
Planossolo	817,5	27,8
Argissolo	275,7	9,4

5.3 Modelagem Hidrológica da bacia do rio Ipojuca

A modelagem da vazão pelo SWAT na escala diária (Figura 31), para os dias que foram realizadas as medições na estação fluviométrica (Tabela 10), não se mostrou totalmente eficiente. Os picos de vazões simuladas pelo SWAT foram mais elevadas que as observadas na estação fluviométrica. O modelo, superestima as vazões e não representa bem as vazões de base, haja vista que nos períodos secos as vazões simuladas chegam a zero, enquanto, as vazões medidas têm um limite inferior de 1,2 m³/s. Resultado similar foi encontrado por Salles (2012), na simulação das vazões com o modelo SWAT para a bacia do rio Pípiripau, no Distrito Federal, sendo necessário a verificação dos parâmetros de sensibilidade para a modelagem da vazão e, posteriormente, a calibração.

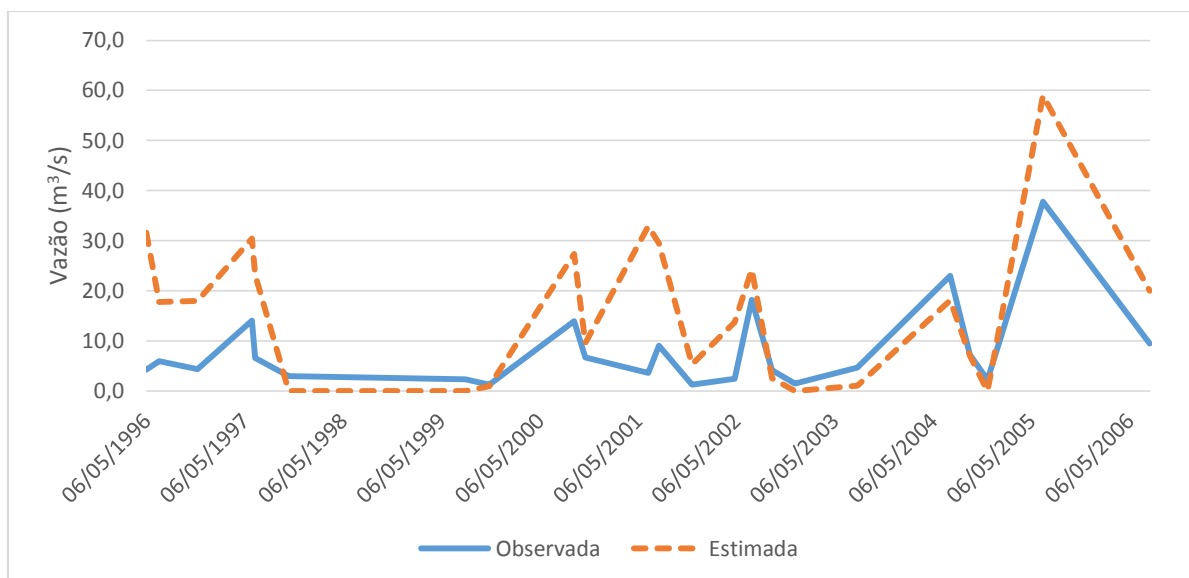


Figura 31. Hidrograma das vazões diárias medidas na estação fluviométrica e estimadas pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca-PE no período de março de 1993 a julho de 2006.

O grau de satisfação dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliar a qualidade da modelagem pelo modelo SWAT referencia-se por diversos trabalhos já desenvolvidos em bacias hidrográficas brasileiras (MELO NETO, 2013; ANDRADE et al., 2013; UZEIKA, 2009; MORIASI et al., 2007). Na Tabela 11, dispõem-se de um resumo com a classificação da eficiência da modelagem das vazões pelo modelo SWAT, a qual foi adotada no presente trabalho para efeito de comparação.

Entre os parâmetros estatísticos adotados para avaliar a qualidade das estimativas, dois estão nos intervalos considerados insatisfatório (Tabela 12), a saber, o NSE (-1,4) e o PBIAS (-28%). O coeficiente de correlação (R^2), apresentou-se como bom (0,74), mostrando que houve uma boa colinearidade entre a estimativa das vazões pelo modelo e os valores observados. No entanto, segundo Santos (2015), a classificação da qualidade das simulações em escala diária podem ser menos rigorosas que na escala mensal, contudo, os valores contidos na Tabela 11 podem sofrer alterações. Nesse sentido, a classificação da simulação pelo PBIAS poderá ser elevada a satisfatória, haja vista que o valor encontrado foi -28% e o valor a ser considerado satisfatória, na escala mensal, é de 25%.

Tabela 16. Resultado dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliação da modelagem da vazão diária pelo modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca-PE

Simulação Estatística	Resultado	Classificação
R ²	0,74	Boa
NSE	-1,4	Insatisfatório
PBIAS	-28%	Insatisfatório*

*Se considerada a escala mensal de classificação (Tabela 11).

A média anual das vazões estimadas também foram comparadas com as medidas na estação fluviométrica. Os resultados apontam que as vazões simuladas superestimam as observadas em todo o intervalo (Figura 32). Apesar do modelo não apresentar uma boa eficiência em estimar as vazões na escala anual, as vazões de base foram melhor representadas quando comparadas a simulação na escala diária.

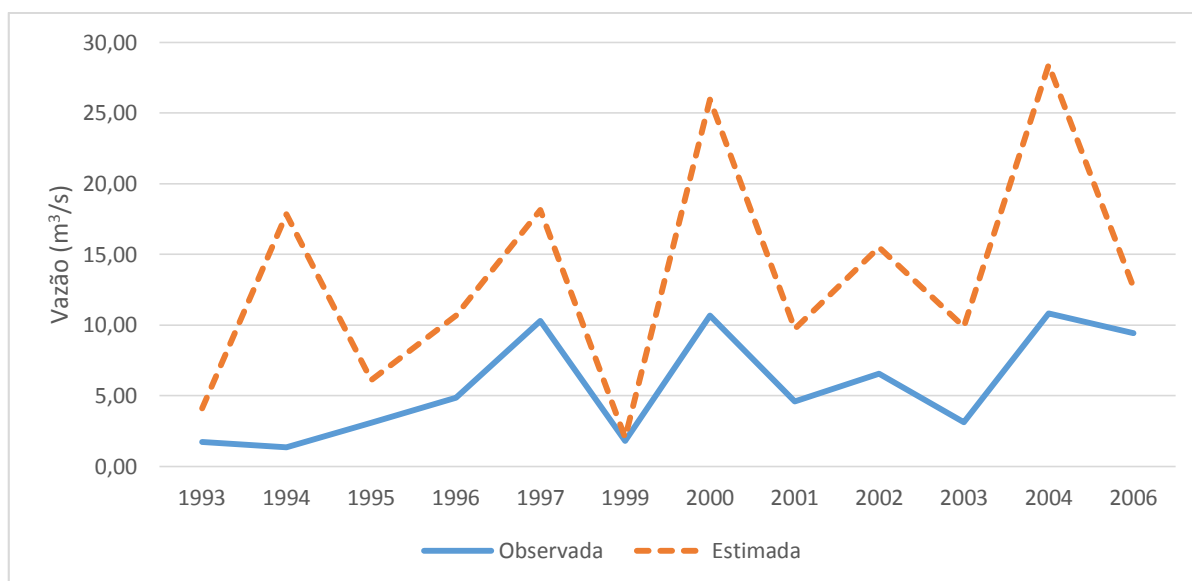


Figura 32. Hidrograma das vazões medidas na estação fluviométrica e estimadas pelo modelo SWAT para a bacia do rio Ipojuca-PE no período de março de 1993 a julho de 2006.

O coeficiente de correlação para a modelagem da vazão média anual foi melhor ($R^2=0,77$) quando comparado ao da simulação na escala diária ($R^2=0,74$), os quais indicam que houve uma boa correlação entre os valores medidos e estimados. Já os valores dos parâmetros NSE (-6,2) e PBIAS (-136%) foram classificados como “Insatisfatório” e superaram os encontrados na escala diária. Os resultados desses dois últimos parâmetros estatísticos indicam que a média dos valores observados representa melhor os dados observados quando comparados a simulação pelo modelo e, que a tendência dos valores médios simulados, superestimam os dados observados, respectivamente.

Tabela 17. Resultado dos parâmetros estatísticos utilizados para avaliação da modelagem da vazão média anual pelo modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca-PE.

Simulação Estatística	Resultado	Classificação
R ²	0,77	Boa
NSE	-6,2	Insatisfatório
PBIAS	-136%	Insatisfatório

Em busca de eliminar a superestimativa das vazões pelo modelo SWAT, considerando o fator área, colocou-se o exutório da bacia imediatamente a jusante da estação fluviométrica. No entanto, nenhum procedimento foi realizado para que o modelo considerasse a longa intermitência do rio Ipojuca, logo, é absolutamente compreensível que o resultado da modelagem hidrossedimentológica superestime os valores medidos. O formato da bacia, bastante alongado, também pode ter contribuído para os resultados insatisfatórios apresentados pelo modelo. Um terceiro fator de ponderação, que tem a ver com o alongamento da bacia no sentido leste-oeste, para os baixos resultados da modelagem hidrológica, é a variabilidade climática. A bacia do rio Ipojuca se estende desde a faixa litorânea até a zona de transição entre o agreste e o sertão, apresentando assim, uma grande variabilidade climática, de tipo e uso do solo e, principalmente, do seu regime pluviométrico.

5.4 Processos Erosivos

Os processos erosivos para a bacia do rio Ipojuca foram simuladas pelo modelo SWAT para o período de 1993 a 2006 e, juntamente com o SIG foi avaliada a distribuição espacial da produção de sedimentos (Figura 33), o escoamento superficial médio na bacia (Figura 28), a precipitação (Figura 34) média estimada pelo modelo e a fração de sedimentos transportada por cada trecho de rio (Figura 35).

A produção de sedimentos na bacia do rio Ipojuca se mostrou bastante heterogênea, com maiores valores observados na porção oeste. As sub-bacias 27 e 28 foram as que produziram maiores quantidade de sedimentos, entre 44 e 66 t/ha/ano. Nessas duas sub-bacias, o escoamento superficial (118 mm a 230) e a precipitação (565 mm) foram elevados. As classes de uso predominantes são pastagem e agricultura, as quais são mais propícias a produção de sedimentos, quando comparadas a áreas de floresta nativa, por exemplo. A declividade elevada em diversos pontos das sub-bacias, principalmente, na sub-bacia 28, é outro fator contribuinte para a produção de sedimentos elevada. Nas áreas circunvizinhas as sub-bacias 28 e 29 (sub-

bacias 2, 9, 25, 29 e 31) observa-se uma redução da produção de sedimentos, entre 20 e 28 t/ha.ano, devido a redução do escoamento (18 mm a 44 mm) e da precipitação (sub-bacia 25 – 387 – e 2 – 561). As sub-bacias 2, 9 e 25 há predominância de pastagens e de relevo fortemente ondulado. Nas demais sub-bacias da porção oeste observa-se valores entre 29 e 43 t/ha.ano de sedimentos. Nessas áreas, predominam a agricultura, relevos de pouca ondulação e escoamento e precipitação elevadas. Na faixa que engloba as sub-bacias 13, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 26 e 30 a produção de sedimentos reduz para a faixa compreendida entre 20 e 28 t/ha.ano, acompanhando o escoamento superficial (45 mm a 87 mm) e a precipitação (387 mm). Nessa área predominam grandes áreas de pastagens envolvidos por áreas agrícolas. As sub-bacias 14 e 19 têm produção de sedimentos que variam entre 20 e 29 t/ha.ano, valores esses que fazem da área ter uma tendência inesperada diante do mapa (Figura 33), mas que pode ser explicado por estar imediatamente após uma área urbana. As áreas urbanas produzem índices alarmantes de degradação ambiental de corpos hídricos devido, principalmente, a desmatamento das matas ciliares, ocupação das calhas dos rios, supressão dos riachos urbanos, entre outros. No entanto, observando o mapa da variabilidade da produção de sedimentos estimada pelo modelo SWAT (Figura 33), observa-se que as sub-bacias 1, 4, 5, 7, 10, 12, 15 e 18, as quais abrigam áreas urbanas – Cidade de Caruaru incluída na sub-bacia 23 -, por exemplo, apresenta uma baixa produção de sedimentos. Esperava-se, no entanto, que a produção de sedimentos nessas áreas fosse expandida devido ao acúmulo das degradações ambientais acima citadas. Diversos trabalhos trazem a tona a temática sobre a degradação do rio Ipojuca em seu trajeto pela Cidade de Caruaru. Segundo Alexandre (2016), a degradação da mata ciliar do rio Ipojuca na Cidade de Caruaru é classificada com média e alta, o que favorece enormemente para a produção de sedimentos. Na área na qual concentra-se o município de Caruaru, o escoamento superficial é alto, no entanto, as precipitações são baixas. A sub-bacia 11 é, sem sombra de dúvida, a que gerou a discussão mais interessante em torno da produção de sedimentos. A sub-bacia 11 tem como principal ocupação de solo os extensos plantios de cana-de-açúcar com pequenas ilhas de floresta e manguezais. O rotineiro manejo do solo nos cultivos de cana, principalmente na entressafra, fazem com que as partículas de solo desagreguem e sejam facilmente transportada pelo escoamento superficial, diante de um evento de precipitação. Com isso, espera-se que os valores da produção de sedimentos seja alto, no entanto, os valores estimados pelo modelo foram os mais baixos – 5 a 9 t/ha.ano. Outro fator para nossa hipótese, é a forte ondulação do terreno, a predominância dos argissolos – alto fator de erodibilidade – alto escoamento – 231 a 471 mm- e precipitações elevadas – 617 mm.

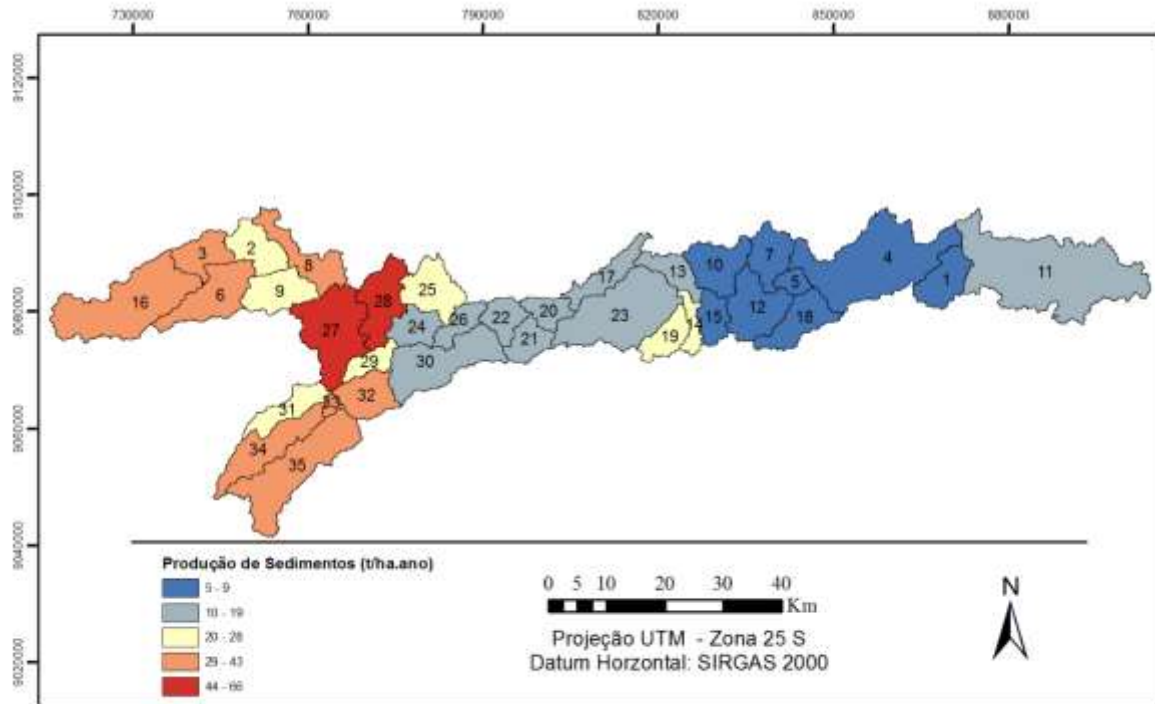


Figura 33. Variabilidade espacial da produção de sedimentos estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.

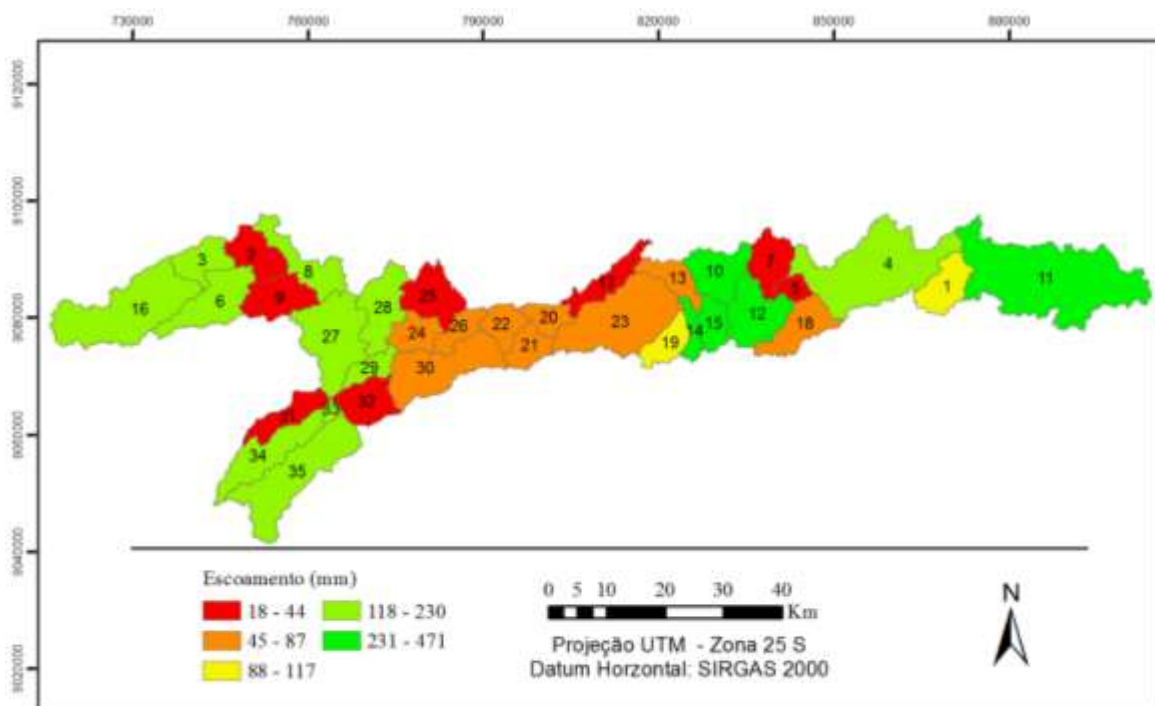


Figura 34. Variabilidade espacial do escoamento superficial estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.

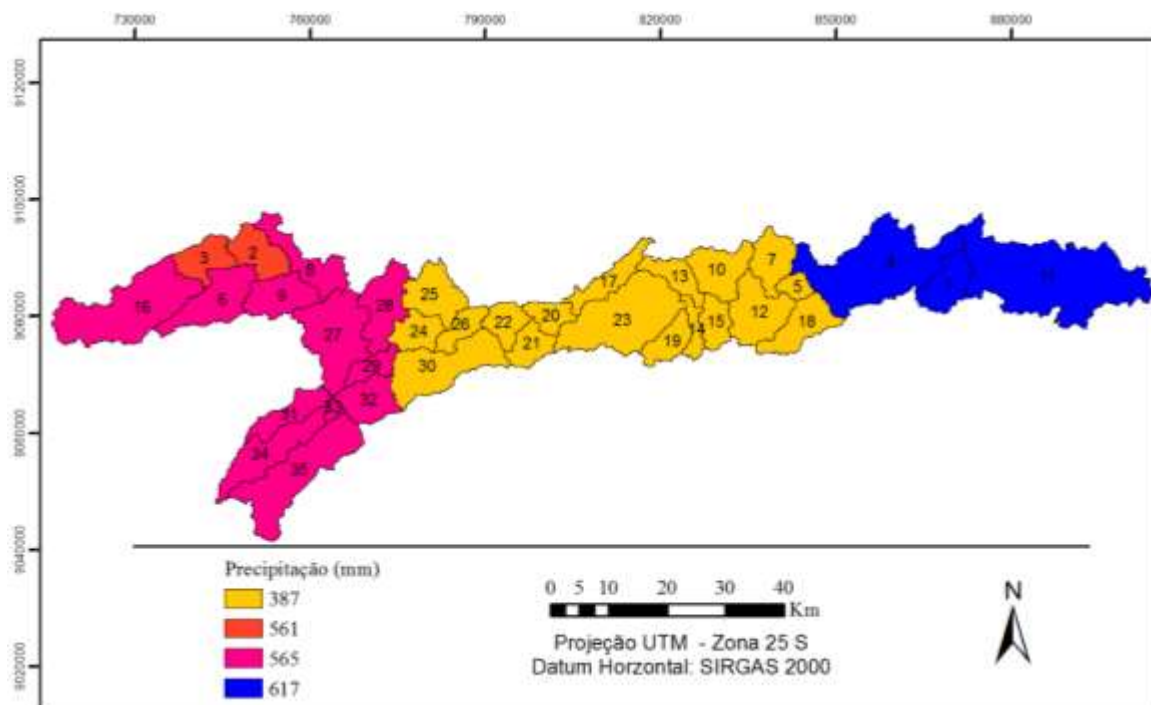


Figura 35. Figura 24. Variabilidade espacial da precipitação estimada pelo modelo SWAT, período de 1993 a 2006, na bacia do rio Ipojuca-PE.

A produção de sedimentos média anual estimada pelo SWAT na bacia do rio Ipojuca para o período compreendido entre 1993 e 2006 (Tabela 19) atingiu o valor máximo de 11,6 t/ha.ano em 1997. Nesse ano a precipitação média simulada pelo SWAT foi de 609,7 mm e o escoamento superficial de 47,0 mm. No ano de 1999 o modelo estimou que não houve produção de sedimentos na bacia, a média pluviométrica foi de 273,4 mm e o escoamento superficial de 1,8 mm.

Tabela 18. Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos médios para a bacia do rio Ipojuca-PE.

Ano	Precipitação	Escoamento superficial	Produção de Sedimentos
1996	520.0	14.3	3.1
1997	609.7	47.0	11.6
1998	215.8	1.8	0.1
1999	273.4	1.8	0.0
2000	799.0	57.2	4.73
2001	432.4	12.0	1.4
2002	583.9	12.4	1.3
2003	465.0	11.7	1.54
2004	695.3	41.2	6.3
2005	545.7	20.7	1.2
2006	458.3	17.3	2.5

A média anual da produção de sedimentos estimada pelo SWAT se mostrou bem correlacionada com o escoamento superficial (Figura 36a e 36b), com coeficiente de correlação de 0,65. O mesmo resultado foi obtido por Tibebe e Bewket (2011), para uma bacia hidrográfica na Etiópia. Santos (2015), obteve um coeficiente de correlação de 0,76 numa sub-bacia do rio Capibaribe-PE.

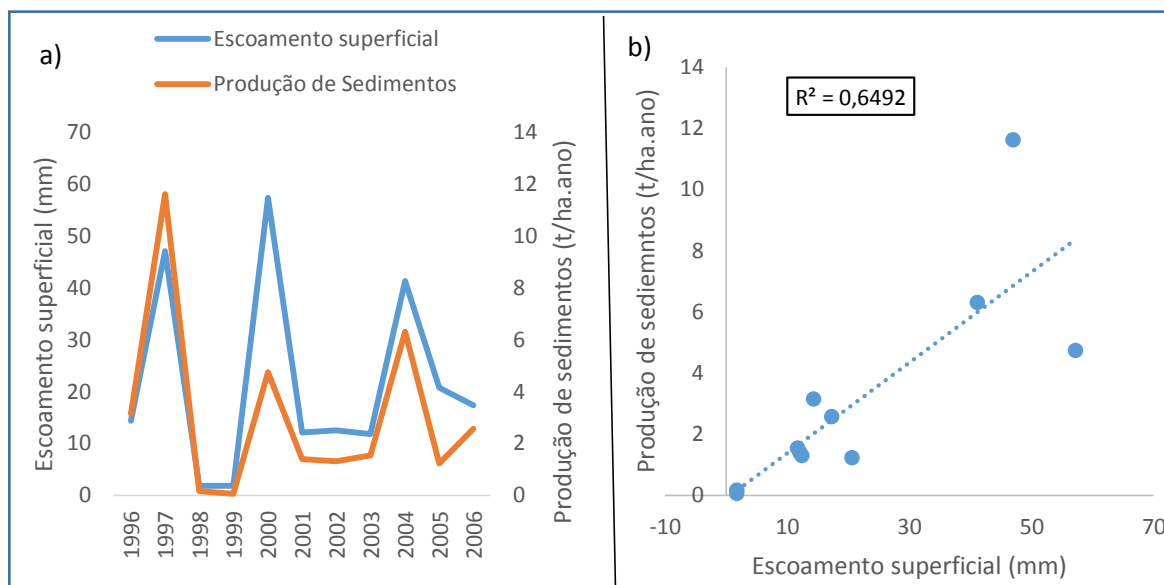


Figura 36. Correlação entre as médias anuais da produção de sedimentos e o escoamento superficial.

A identificação das áreas onde ocorrem grande perdas de solos em bacias hidrográficas é fundamental para o desenvolvimento e implementação de práticas conservacionistas que visam a conservação ambiental e o melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Para o presente trabalho foi adotada a classificação proposta por Carvalho (2008) (Tabela 9), para avaliar qualitativamente as perdas de solo na bacia do rio Ipojuca, cuja espacialização está disposta na Figura 37. As áreas classificadas com perdas de solo nula ou pequenas representam 23% da bacia e englobam as sub-bacias 1, 4, 5, 7, 10, 12, 15 e 18. As áreas de moderada perda de solo somam 17%, das quais fazem parte as sub-bacias 17, 20, 21, 22, 24, 26 e 30 – porção oeste da bacia. O maior percentual da classificação foi para as área com perdas de solo média (74%). As sub-bacias com essa classificação encontram-se nas porções extrema leste, oeste e central da bacia. Já as áreas com perdas de solo classificadas de média a forte representam, apenas, 3% - sub-bacia 28.

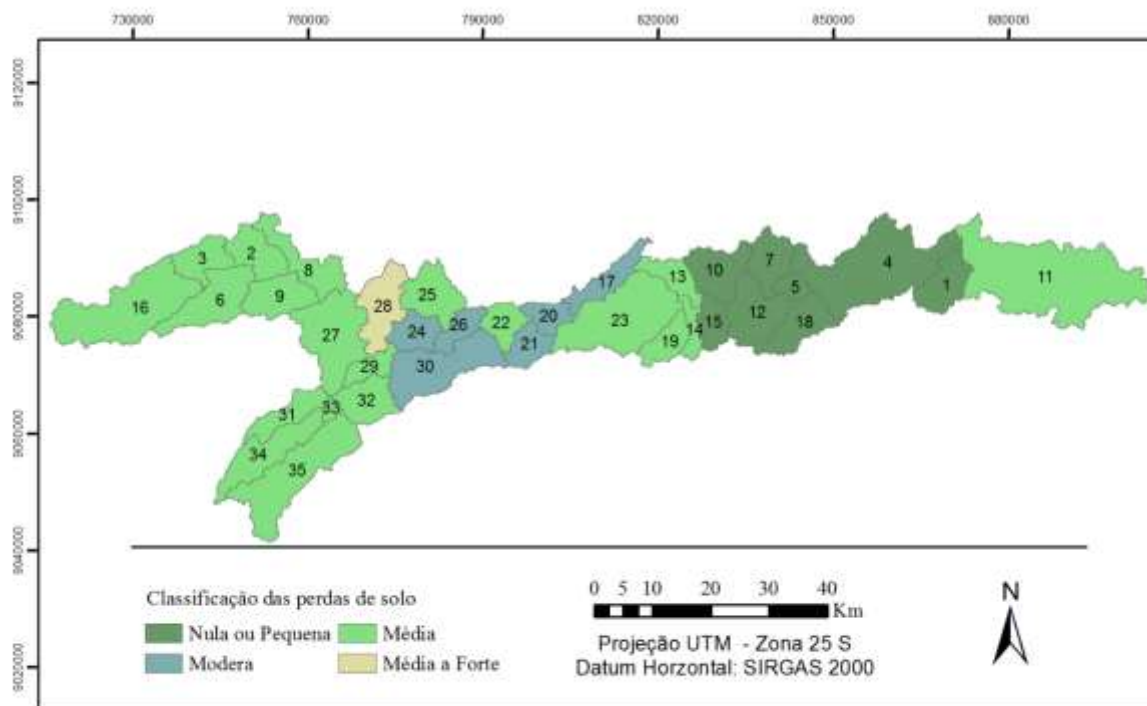


Figura 37. Distribuição espacial da classificação da perda de solo para a bacia do rio Ipojuca-PE.

A avaliação da propagação de sedimentos na rede de drenagem pelo modelo SWAT, por trecho de rio, para a bacia do rio Ipojuca está disposta na Figura 38. Observa-se que nas bacias, ou parte delas, em que os trechos de rios são de primeira ordem, a fração de sedimentos é próxima ou igual a 1, indicando que há pouca ou nenhuma deposição de sedimentos.

Os trechos de rio que cortam as sub-bacias 6, 9, 27, 29, 32 e 33 tiveram frações de sedimentos baixas, indicando que houve deposição de sedimentos nessas sub-bacias. Isso justifica-se devido a produção de sedimentos nessas áreas, as quais foram classificadas com perda de solo de média a forte, e das maiores declividades a montante. Resultados análogos foram encontrados por Santos et al. (2013) e Santos (2015), os quais estimaram que, praticamente, todo a produção de sedimento nas regiões de maior altitude a montante se depositou nas sub-bacias subsequentes – menor altitude. Imediatamente a esse trecho, na direção oeste-leste, observa-se ainda uma grande deposição de sedimentos nas sub-bacias. Nas áreas que seguem, há uma alternância dos valores das frações de sedimentos, indicando, ora maior deposição ora maior transporte de sedimento. Isso pode justificar-se pela variabilidade espacial, tanto da produção de sedimento, quanto pelo escoamento superficial. Na sub-bacia 11, extremo leste da bacia, observa-se que não há deposição de sedimento, haja vista que a produção de sedimento é baixa e o escoamento superficial é elevado.

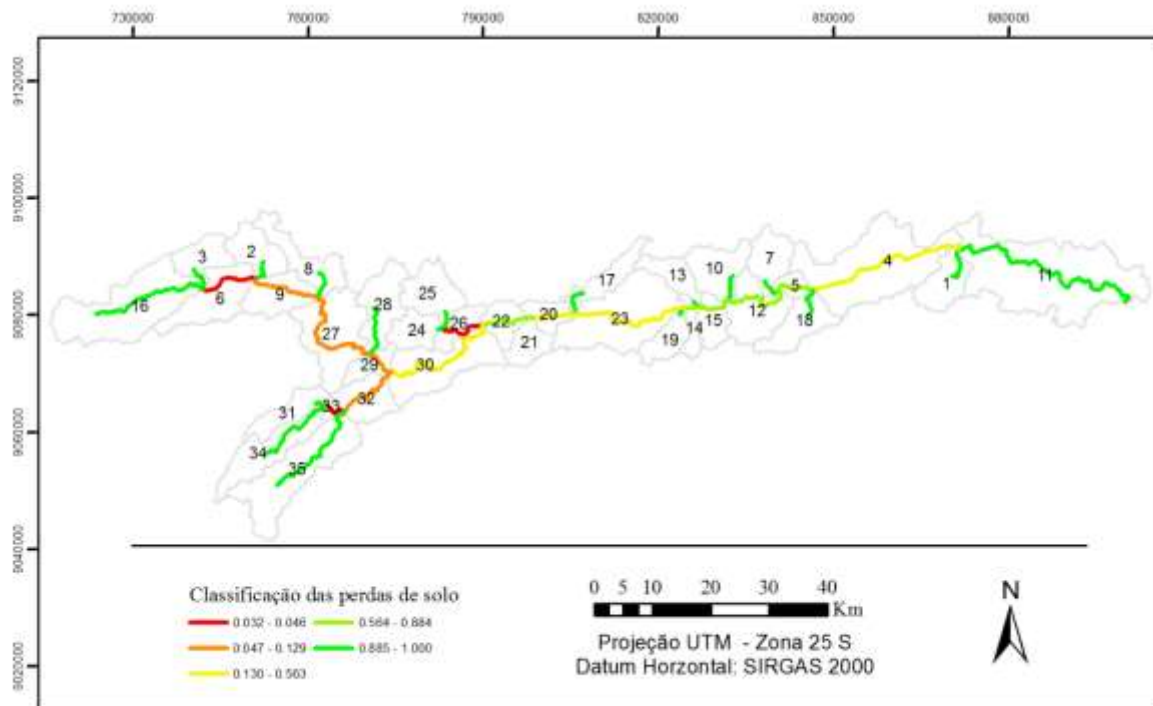


Figura 38. Fração de sedimentos transportada por trecho de rio na bacia do rio Ipojuca-PE.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo SWAT não apresentou performance totalmente satisfatória na estimativa das vazões na bacia do rio Ipojuca, tanto na escala diária (eventos) quanto na escala anual (médias anuais). Os valores dos três parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da modelagem foram: $R^2 = 0,74$ ($R^2 = 0,77$) na escala diária (anual), $NSE = -1,4$ ($NSE = -6,2$) na escala diária (anual) e $PBIAS = -28\%$ ($PBIAS = -136\%$) na escala diária (anual), dos quais os dois últimos se mostraram insatisfatória de acordo com a literatura. Pela análise desses parâmetros percebe-se que os dados modelados pelo SWAT apresentam boa colinearidade com os observados, no entanto, as médias dos valores observados representam melhor os dados observados que os apresentados pelo modelo e, que esse, superestima demasiadamente os dados observados.

A irregularidade e o pequeno número de medições hidrossedimentológicas na estação fluviométrica dificultam a execução de estudos na área e deixam incertezas nos processos de modelagem.

A maior produção de sedimentos na bacia ocorreu na porção oeste, com destaque para as sub-bacias 27 e 28 (44 a 66 t/ha.ano). Já os menores valores foram observados numa faixa a oeste da sub-bacia 11 (extremo leste da bacia) e a leste das sub-bacias 13 e 14. O modelo se mostrou inconsistente na distribuição espacial da produção de sedimentos na bacia, principalmente, quando correlacionado ao escoamento superficial e a precipitação. A distribuição temporal da produção de sedimento, por outro lado, se mostrou bem correlacionada com o escoamento superficial ($R^2 = 0,65$). Baseado nessas duas informações, pode-se inferir que o modelo apresentou bons resultados quantitativos, no entanto, qualitativamente foi insatisfatório.

As áreas com perdas de solo classificadas como “média” (15–50 t/ha.ano) representaram 74% e foram observadas em todos os setores da bacia, mas com predomínio na porção oeste.

A avaliação do transporte de sedimento por trecho de rio permitiu a avaliação das áreas que há uma maior deposição de sedimentos nas calhas de rio. A porção oeste foi a que mais teve deposição de sedimento, o que já era previsível, haja vista que a produção de sedimentos também foi maior nessa área. Próxima a estação fluviométrica a fração de sedimentos transportada foi elevada, mostrando que a deposição de sedimentos é pequena ou nula.

Devido ao fato do rio Ipojuca apresentar regime hídrico temporário em diversos trechos, principalmente, no período de estiagem, sugere-se que a bacia seja seccionada para estudos de modelagem hidrossedimentológica com o modelo SWAT.

A irregularidade das medições hidrossedimentológicas na estação fluviométrica da bacia do rio Ipojuca é um fator limitante dos estudos, logo recomenda-se que para estudos futuros de modelagem com o SWAT sejam realizadas medições de campo contínuas das variáveis hidrossedimentológicas.

A calibração do modelo se mostrou necessária, de acordo com a avaliação dos parâmetros NSE e PBIAS, assim como pelos resultados inconsistentes apresentados pela variabilidade espacial da produção de sedimentos, logo, recomenda-se a calibração do modelo SWAT para a estimativa dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Ipojuca.

A relevância do trabalho se deu devido ao pioneirismo da aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Ipojuca, a qual apresenta características fisiográficas peculiares, grande variabilidade climática, de relevo e de regime fluvial. O banco de dados montado para a execução do presente trabalho também constitui um acréscimo de informações para a bacia hidrográfica e para o estado de Pernambuco. Os resultados do estudo subsidiarão a confecção de outros trabalhos na bacia do rio Ipojuca, assim como, em outras bacias com características similares.

REFERÊNCIAS

- Alexandre, J. I. S. **Análise da degradação da mata ciliar ao longo do rio Ipojuca no perímetro urbano da cidade de Caruaru/PE**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental (Associação Caruaruense de Ensino Superior – ASCES). Caruaru, 2016.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R S. & WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v.34, p.73-89, 1998.
- Arroio Junior, P. P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, municípios de Itaripina e Brotas – SP**. 2013. 134p f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 2013.
- Baltokoski, V.; Tavares, M. H. F.; Machado, R. E.; Oliveira, M. P. Calibração de Modelo para simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 34, p. 235 – 26, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v34n1/a26v34n1>>. Acesso em 12 de nov. 2017.
- BARUQUI, A. M.; FERNANDES, M. R. **Práticas de conservação do solo**. Belo Horizonte. Informe Agropecuário, Belo Horizonte. v. 11, n. 128. p. 55-69, ago. 1985.
- BARRELLA, W.; PETRERE JÚNIOR. M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. F. A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. *Matas ciliares: conservação e recuperação* 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.
- BESKOW, S.; MELLO, C.R.; NORTON, L.D.; CURI, N. VIOLA, M.R.; AVANZI, J.C. (2009). Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, 49-59.
- BECKER, F. G. Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica em Ecologia e Manejo de Bacias Hidrográficas. In: SCHIAVETTI, A. (org.). **Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações**/ Editores Ilhéus, Ba: Editus, 2002.293p.:il
- BETRIE, G.D.; MOHAMED, Y.A.; GRIENSVEN, A.; SRINIVASAN, R. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model Hydrol. *Earth Syst. Sci.*, v. 15, p. 807–818. 2011.
- BERTOL, I.; COGO, N.P.; SCHICK, J.; GUDAGNIN, J.C. & AMARAL, A.J. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 31:133-142, 2007.
- BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. Ed. São Paulo, Ícone, 2008, 355p.
- BONUMÁ, N. B. et al. Simulação da Vazão e da Produção de Sedimentos Utilizando o Modelo SWAT. In: Engenharia de Sedimentos - **Na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento**. Porto Alegre - RS: ABRH, 2011, p.325 -341.

BONNET, B. R. P.; FERREIRA, L. G.; LOBO, F. C. Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 311-322. 2008.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação**. Disponível em:

<<https://ww2.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em 28 de out. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Lei n. 9.433**: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BROWN, L.C.; BARNWELL, T.O. (1987). The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: **documentation and user manual**. Env. Res. Laboratory. US EPA, EPA /600/3-87/007, Athens, GA, 189p.

CARVALHO, N. de O. **Hidrossedimentologia prática**. 2º ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 599 p.

CARVALHO NETO. J.G. (2011). **Simulação Hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 194p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª ed. rev. e ampliada, Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

CASTRO, K.B. (2013). **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 117p.

CHRISTOFOLLETTI, Antonio. **Geomorfologia fluvial**. Edgar Blucher. São Paulo, 1981.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FAN, F.M.; COLLISCHONN, W. (2014). Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19: 243-254.

FERNANDES, J.G. (2015). **Estimativa de vazão e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, utilizando o modelo SWAT**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 185p.

FIRMINO, R.G.; FONSECA, M.B. **Uma visão econômica dos impactos ambientais causados pela expansão da agricultura**. In: X ENCONTRO DE EXTENSÃO, 2008, João Pessoa. Anais...João Pessoa: UFPB. Disponível em: <http://www.prac.ufpb.br/anais/xenex_xienid/x_enex/ANAIS/Area5/5CCSADFCOUT01.pdf>. Acesso em: 28 out. 2016.

FERNANDES, M.R. e SILVA, J. C. **Programa Estadual de Manejo de Sub-Bacias Hidrográficas: Fundamentos e estratégias** - Belo Horizonte: EMATERMG. 24p. 1994.

GARBOSSA, L. H. P.; VASCONCELOS, L. R.; LAPA, K. R.; BLAINSKI, E.; PINHEIRO, A. (2011). The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: **Anais do International SWAT Conference & Workshops**. Toledo - Spain. pp. 1-27.

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

GOMES, J. P. M.; MERTEN, G. H. & RIBEIRO, G. S. (2006) **Estimativa da umidade antecedente do Solo e sua Influência na produção de sedimentos**. VII ENES. Porto alegre. CD-ROM.

GROSSI, Paolo. **História da propriedade e outros ensaios**. Tradução de: Luiz Ernani Friotolo e Ricardo Marcelo Fonseca- Revisão de técnica de: Ricardo Marcelo, Rio de Janeiro: Renovar, 2006.

LIKENS, G. E. The ecosystem approach: its use and abuse. Excellence in Ecology. **Ecology Institute**, Oldendorf/Luhe, Germany, v.3, 1992. P. 167.

KEMANIAN, A.R.; JULICH, S.; MANORANJAN, V.S.; ARNOLD, J.G. (2011). Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. **Ecological Modelling**, 222(12): 1913-1921.

KUHNLE, R. A. et al. **Effect of land use changes on sediment transport**. Water Research, v.32, NUMERO, p.3189-3196, 1996.

JACOMINE, P.K.T. Solos sob caatinga: Características e uso agrícola. **In: ALVAREZ V., V. H.; FONTES, L. E. F. e FONTES, M. P. F., O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG, SBCS/UFV/DPS, 1996. p. 95-111.

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

Lima, C. S. R. **ÁGUA DE ABASTECIMENTO PÚBLICO NO MUNICÍPIO DE RECIFE-PE – UMA REVISÃO**. Monografia de Especialista em Gestão de Vigilância Sanitária e Qualidade de Alimentos. Recife: Universidade Federal Rural do Semi-árido – UFERSA. 2008.

LIMA, Herlander Mata. **Introdução à Modelação Ambiental: Erosão Hídrica**. Funchal (Portugal), 2010.

JEBARI, S.; BERNDTSSON, R.; OLSSON, J. BAHRI, A. Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation. **Journal of Hydrology**, v 436–437. p.102–110, 2012.

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

MACHADO, Ronalton Evandro **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002 Tese de doutorado (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

MACHADO R. E; VETTORAZZI C. A.; XAVIER A. C. Simulação de Cenários Alternativos de Uso da Terra em uma Microbacia Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 27, p. 727-733, 2003.

Marinho Filho, G. M.; Andrade, R. S.; Zukowski Junior, J. C.; Magalhães Filho, L. N. L. Modelos Hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47. 2012.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R. (2007) **Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas**. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa – MG, v. 31, n. 6: pp. 1637-1646.

Miranda, A. S. Gerenciamento de bacias hidrográficas – estudo de caso da bacia hidrográfica do rio Iguazu no município de Nova Iguaçu. **Revista Tamoios**, São Gonçalo, v. 13, n. 1, p. 37-49, jan-jun, 2017. Disponível em: <<http://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/tamoios/article/viewFile/22675/20739>>. Acesso em 28 out. 2017.

MOTA, Suetônio. **Urbanização e Meio Ambiente/Suetônio Mota**: 3 ed. – Rio de Janeiro: ABES, 2003.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: Theoretical documentation - Version 2005**. Temple: Agricultural Research Service (USDA) e Texas Agricultural Experiment Station (Texas A&M University). 2005. 541p.

Pruski, F. F.; Brandão, V. S.; Silva, D. D. 2003. **Escoamento superficial**. Viçosa, UFV. 88p.

PUGLIESI, A.C.V.; MARINHO, M.A.; MARQUES, J.F. & LUCARELLI, J.R.F. **Valoração econômica do efeito da erosão em sistemas de manejo do solo empregando o método custo de reposição**. Bragantia, 70:113-121, 2011.

RAWLS, W.J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D, L.; SHIRMOHAMMADI, A. (1993). **Infiltration and Soil Water Movement**. In: Handbook of Hydrology. McGRAW-HILL, 2ª ed,

REICHERT, J.M.; CABEDA, M.S. (1992). **Salpico de partículas e escoamento superficial**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 16(3): 390-6.

Salles, L. A. **Calibração e validação do Modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do Ribeirão Pipiripau**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

SÁNCHEZ, Luis Enrique. **Avaliação de Impacto Ambiental**: conceitos e métodos. São Paulo: Oficinas de Textos, 2006. p. 19-464.

Santos, Alexandre R. dos, **Apostila de Geoprocessamento** (impresso) 2006.

Santos, J. C. B.; Souza Junior, V. S.; Corrêa, M. M.; Ribeiro, M. R.; Almeida, M. C.; Borges, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, n. 1, p. 683-695. 2012.

Santos, J. Y. G. (2015). Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na bacia do rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil). **Tese de Doutorado**, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 206p.

SANTOS, C.A.G.; SILVA, R.M. (2005). **Análise geoespacial da produção de sedimentos através de técnicas de modelagem e geoprocessamento: o estudo de caso da bacia do Rio Pirapama**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa: ABRH.

- SANTOS, R.O.; SCUDELARI, A.C.; CUNHA, C.L.N.; RIGHETTO, A.M. Avaliação da Produção e Aporte de Sedimentos para o Rio Potengi, RN. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 149-163. 2013.
- SANTOS, T.E.M. (2006). **Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semiárido Pernambucano**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, 69p.
- SILVA, R. L. & De MARIA, I. C. Erosão em sistema plantio direta: Influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n.6, p.554–561, 2011.
- SILVA, A. M. **Princípios Básicos de Hidrologia**. Departamento de Engenharia. UFLA. Lavras-MG. 1995.
- SILVA, E.M. et al. **Pesquisa operacional: programação linear, simulação**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 1998. 184p.
- SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. (2001) **Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas, in: Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Org. por De PAIVA, J.B.D.; De PAIVA, E.M.C.D., Porto Alegre: ABRH. p. 365-394.
- Teodoro, W. L. I.; Teixeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica local. **Revista Uniara**, n. 20, 2007. Disponível em: <http://www.uniara.com.br/legado/revistauniara/pdf/20/RevUniara20_11.pdf>. Acesso em 28 out. 2017.
- TIBEBE, D.; BEWKET, W. (2011). Surface runoff and soil erosion estimation using the SWAT model in the Keleta Watershed, Etiópia. **Land Degradation & Development**, 22: 551- 564.
- TOLEDO, A. M. A. **Evolução espaço-temporal da estrutura da paisagem e sua influência na composição química das águas superficiais dos ribeirões Piracicamirim e Cabras (SP)**. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2001.
- Tucci, C.E.M. (1998) **Modelos hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 669p.
- TUCCI, C.E.M. (2009). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: ABRH. 943p.
- UNRIC – Centro Regional de Informação das Nações Unidas. **Relatório das Nações Unidas estima que a população mundial alcance os 9,6 mil milhões em 2050**. Disponível em: <<http://www.unric.org/pt/actualidade/31160-relatorio-das-nacoes-unidas-estimaque-a-populacao-mundial-alcance-os-96-mil-milhoes-em-2050->>. Acesso em 28 de out. 2017.
- UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ RS. 2009.
- WILLIAMS, J.R; NICKS, A.D.; ARNOLD, J.G. (1985). Simulator for water resources in rural basins. **Journal of Hydraulic Engineering**, 111(6): 970-986.

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

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: Guide to conservation farming. **US Department of Agriculture Handbook**, n. 537. 58p.

XAVIER, F. V.; CUNHA, K. L.; SILVEIRA, A. Análise do risco à erosão em contribuição aos processos de conservação do solo na bacia hidrográfica do rio quilombo, chapada dos Guimarães. **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Mato Grosso - MT, 2007.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R. (2009). Gis-based spatial precipitation estimation: a comparison of geostatistical approaches. **Journal of the American Water Resources Association**, 45(4): 894-906.