



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A SUB-BACIA DO
RIO ARAPEPÓ (SALINÓPOLIS/PA).**

BELÉM

2014



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A SUB-BACIA DO RIO ARAPEPÓ (SALINÓPOLIS/PA).

**Dissertação apresentada à
Universidade Federal Rural da
Amazônia, como parte das exigências
do Curso de Mestrado em Ciências
Florestais: linha de pesquisa Manejo
de Bacias Hidrográficas, para
obtenção do título de mestre.**

**Orientador: Prof. Dr. Adriano
Marlisom Leão de Sousa.**

BELÉM
2014

Santos, Joyse Tatiane Souza dos

Aplicação do modelo hidrológico swat para a sub-bacia do Rio Arapepó (Salinópolis/PA) / Joyse Tatiane Souza dos Santos. - Belém, 2014.

84 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2014.

1. Hidrologia 2. Ciclo Hidrológico 3. Modelagem hidrológica 4. Rio Arapepó – Sub bacia I. Título.

CDD – 551.48



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA – UFRA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

JOYSE TATIANE SOUZA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SWAT PARA A SUB-BACIA DO
RIO ARAPEPÓ (SALINÓPOLIS/PA).

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, da
Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências deste para
obtenção do título de mestre.

Aprovado em Junho de 2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa – Presidente
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha – 1º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

Prof. Dr. Rodrigo Otávio Rodrigues de Melo Souza – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e
ver a vida passar;
É melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-
se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias
tristes me esconder.
“Prefiro ser feliz, embora louco, que em
conformidade viver...”.

Martin Luther King.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus Pais Maria Assunção e
Ivo Guedes (em memória).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela força e conforto no momento em que pensei que não fosse suportar, quando um pedaço de mim se foi, junto com o orgulho e a esperança de ver uma filha mestranda, descanse em paz meu querido Pai Ivo Guedes, e tenha a certeza que não desistirei mesmo diante das dificuldades.

Agradeço a minha mãe Maria Assunção e meus irmãos Iran Carlos e Ivonete, minhas tias e primos, pelo incentivo e ombro amigo nas horas difíceis.

Agradeço a todos meus verdadeiros amigos, em especial a Juliana e Antônio Kledson, pela compreensão e paciência, nos momentos de alegria e desespero, e a todos meus colegas de turma que fizeram parte desta luta.

Agradeço a meu amigo e namorado Hildo Giuseppe que me ajudou a tornar esse trabalho real e sem sua força não seria possível.

Agradeço ao seu Geraldo, sua esposa Rosa e suas filhas Rayane, Raylane, Thaianne, Naiza e Estevam do sítio Arapepó pela força, amizade, incentivo e auxílio em campo.

Agradeço a todos os Professores que fizeram parte desta realização que contribuíram decisivamente para meu entendimento e formação, e ao Professor Adriano Marlisom que é meu orientador e amigo, que me deu contribuições importantes sem as quais seria impossível a execução.

LISTA DE ABREVIATURAS, VARIÁVEIS E SIGLAS.

AGRL – Agricultura;

ALPHA_BF – Constante de Recessão do Fluxo de Retorno;

ANA – Agência Nacional de Águas;

ArcGIS – Software de Sistema de Informação Geográfica;

ARS – Agricultural Research Service;

CLA – Latossolo Amarelo;

CMR – Coeficiente de Massa Residual;

CN – Curva Número;

COE – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;

DHN – Diretoria da Hidrografia e Navegação;

DV – Direção do Vento;

Dv– Desvio Padrão;

EM – Erro Médio;

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

ESCO – Coeficiente de Compensação da Evaporação do Solo;

Et – Evapotranspiração;

Etp – Evapotranspiração potencial;

FRST – Floresta;

GHz – Gigahertz;

GPS – Global Position System;

GLSOD – Global Assessment of Soil Degradation;

GLEY – Gleissolo;

GWQMN – Ferramenta Utilizada Quando se Deseja Determinar um Limiar Pré-Estabelecido para o Cálculo do Escoamento de Base;

GW_DELAY – Atraso no Momento em que a Água Sai do Perfil do Solo e Entra no Aquífero Raso;

GW_R – Escoamento subterrâneo;

GW_REVAP – Coeficiente que Controla a Taxa de Transferência de Água do aqr para a Zona de Raízes;

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ISRIC - International for Soil Reference Information Center
LAT_TIME – Atraso para o Escoamento Lateral;
LH – Latin Hypercube;
MHz – Megahertz;
MIKE – Modeling System for River and Channels;
MIKEBASIN – Programa de simulação desenvolvido pelo “Danish Hydraulic Institute”
– DHI;
MIKESHE - Sistema Hidrológico Europeu
mm – Milímetros;
MNT – Modelo Numérico do Terreno;
N – Norte;
O – Oeste;
OAT – One Factor at a Time;
PA – Pará;
PERC – Percolação;
PO – Ponto de Orvalho;
PRP – Precipitação;
Q – Vazão;
Q_obs – Vazão Observada;
Qsim – Vazão Simulada;
RCHRG_DP – Quantidade de Recarga que Será Encaminhada ao Aquífero Profundo;
revap – Fenômeno em que a Água que Alcançou o ars pode Retornar à Zona não Saturada;
REVAPMN – Limite que a Água não deve Ultrapassar no ars para que Ocorra o revap;
Rn – Saldo de Radiação;
RS – Radiação Solar;
SIG – Sistema de Informação Geográfica;
SLSUBBASIN – Comprimento de Rampa Médio para a Sub-bacia;
SOL_K – Condutividade Hidráulica;
SR – Sensoriamento Remoto;
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission;
S – Sul;
SURLAG – Coeficiente de Atraso do Escoamento Superficial;

SURQ – Escoamento Superficial;
SW – Quantidade de água no solo;
SWAT – Soil and Water Assessment Tool;
T – Temperatura do ar;
TMAX – Temperatura máxima;
TMIN – Temperatura mínima;
TOPOG – Topographical;
TOPMODEL – Topography Based Hydrological Model;
UTM - Universal Transversa de Mercator;
UFPA – Universidade Federal do Pará;
UFRA – Universidade Federal Rural do Pará;
UR – Umidade Relativa do Ar;
URH – Unidades de Respostas Hidrológicas;
USDA – United States Department of Agriculture;
V – Velocidade;
VV – Velocidade do Vento;
WATR – Água;
ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico;
WYLD – Quantidade de água que alcança o canal.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Área da Seção do Rio;
- °C – Unidade de Temperatura (Graus Celsius);
- cm – Unidade de Medida (Centímetros);
- d – Unidade de Tempo (Dia);
- dc - Declividade
- D – Grupo Hidrológico dos Solos deste Estudo;
- dS – Unidade de Condutividade Elétrica (Deci-siemen);
- g – Unidade de Massa (Gramas);
- GHz – Unidade de Frequência (Giga-hertz);
- h – Unidade de Tempo (Hora);
- ha – Hectares;
- Kg – Unidade de Massa (Quilogramas);
- Km – Unidade de Medida (Quilômetros);
- m – Unidade de Medida (Metros);
- MHz – Unidade de Frequência (Mega Hertz);
- MJ – Unidade de Trabalho (Mega Joules);
- mm – Unidade de Medida (Milímetros);
- mm/dia – Unidade de Medida (Milímetros por dia);
- m³/s – Unidade de vazão (Metros cúbico por segundo);
- nm – Unidade de Medida (Nanômetros);
- pH – É uma Grandeza Físico-Química Potencial Hidrogeniônico (Indica a Acidez, Neutralidade ou Alcalinidade de uma Solução Aquosa);
- s – Unidade de Tempo (Segundos);
- X, Y e Z – Coordenadas Cartesianas;
- ΔH – Diferença de Cotas.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Rio Arapepó, Salinópolis/PA. Fonte: Autor.

Figura 2: Modelo numérico de terreno (MNT) com as cotas altimétricas em metros.

Figura 3: Usos do solo da sub-bacia do rio Arapepó.

Figura 4: Tipos de solo da sub-bacia do rio Arapepó.

Figura 5: Molinete Fluviométrico, modelo MLN – 7.

Figura 6: Medição a vau.

Figura 7: Medição da velocidade do rio.

Figura 8: Ilustração do método da meia seção. Fonte: BACK (2006).

Figura 9: Processo de Funcionamento do Modelo SWAT (Fonte: adaptado de MACHADO, 2002).

Figura 10: Sub-bacia do rio Arapepó gerada automaticamente pelo SWAT.

Figura 11: Mapa de Declividade (%) da sub-bacia do rio Arapepó.

Figura 12: Vazão diária simulada pelo modelo SWAT com a precipitação para o período de janeiro de 2008 a abril de 2014.

Figura 13: Vazão mensal simulada para o modelo SWAT com a precipitação, para o período de janeiro de 2008 a abril de 2014.

Figura 14: Comparação entre as vazões diárias simuladas e observadas com a precipitação, para avaliação do modelo, para a sub-bacia 3 do rio Arapepó.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Representatividade do uso dos solos da sub-bacia do rio Arapepó.

Tabela 2: Representatividade dos tipos de solos da sub-bacia do rio Arapepó.

Tabela 3: Representatividade das sub-bacias geradas na bacia do rio Arapepó.

Tabela 4: Representatividade das classes de declividade da sub-bacia do rio Arapepó.

Tabela 5: Representatividade das URH geradas pelo SWAT.

Tabela 6: Rank e limites dos parâmetros obtidos com a análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Tabela 7: Avaliação da eficiência da validação do modelo.

Tabela 8: Componentes do ciclo hidrológico para a sub-bacia 3 no período de 2008 a 2014. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, PRP – precipitação mensal, SW – quantidade de água no solo, SURQ – escoamento superficial, WYLD – produção de água total da sub-bacia que alcança o canal, GW_Q – escoamento subterrâneo, PERC – percolação, Et – evapotranspiração, Etp – evapotranspiração potencial.

SUMÁRIO

RESUMO.....	16
ABSTRACT	17
1 - INTRODUÇÃO	18
1.1 – Caracterização do Problema	20
1.2 - Hipótese da pesquisa	20
1.3 – Objetivo	21
1.4 – Objetivos Específicos.....	21
2 – ELEMENTOS TEÓRICOS.....	22
2.1 – Bacia Hidrográfica	22
2.2 – Ciclo Hidrológico.....	24
2.3 – Degradação Ambiental.....	26
2.4 – Modelagem Hidrológica e Modelos Hidrológicos	28
2.5 – SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) – Ferramenta de Análise do Solo e Água.	30
2.6 – Geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica – SIG.....	32
3 - ÁREA DE ESTUDO	35
3.1 - Características Físicas.....	36
3.2 - Características Climáticas.....	40
4 –METODOLOGIA.....	42
4.1 - Cálculo de Vazão	42
4.2 - Modelo SWAT	46
4.2.1 - Estrutura do SWAT.....	47
4.2.2 – Sensibilidade dos parâmetros	57
4.2.3 – Avaliação de eficiência.	58
4.2.4 – Simulações hidrológicas.	60
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

5. 1 - Análise da Sub-bacia do rio Arapepó.	62
5.1.1 - Delimitação Automática das Sub-bacias.	62
5.1.2 - Classes de Declividades (Slope).	63
5.1.3 - Definição das URHs.	65
5.1.4 – Degradação Ambiental	65
5.1.5 - Modelagem Hidrológica.	66
5.1.5.1 - Experimento I: Calibração com Condições Iniciais.	67
5.1.5.2 - Experimento II - Avaliação do Modelo.	71
5.1.5.3 - Experimento III: Componentes do Ciclo Hidrológico.	74
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	77
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade do modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), para gerar os componentes do ciclo hidrológico com precisão suficiente na sub-bacia do rio Arapepó, localizado na vila de Cuiarana, no estado do Pará, no período de janeiro de 2008 a abril de 2014. Foram utilizados dados meteorológicos de uma estação micrometeorológica, localizada na vila de Cuiarana, além dos dados pluviométricos da Agência Nacional de Água (ANA) e dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como dados geocartográficos, que serviram para caracterização e delimitação da área da sub-bacia do rio Arapepó. O clima tem uma sazonalidade bem definida, com períodos chuvosos de janeiro a abril e secos de agosto a novembro. Os resultados do modelo SWAT foram satisfatórios quando comparados com outros estudos em bacia pelo Brasil e no Pará, vale ressaltar que este estudo é o segundo com modelo SWAT para uma bacia no estado do Pará. A validação do modelo SWAT resultou no valor de Coeficiente de Eficiência (COE) de 0,68, um Desvio Padrão (Dv) de 18,68, um Coeficiente de Massa Residual (CMR) de 0,2 e um Erro Médio (EM) de -0,1, para a sub-bacia 3, para o período de validação. Os componentes do ciclo hidrológico gerados pelo modelo mostraram que a quantidade de água no solo (SW) é de 557,22 mm, apresentando um escoamento superficial (SURQ) de 87,79 mm e parte da água da sub-bacia que alcançou o canal (WYLD) foi 142,79 mm com um escoamento subterrâneo (GW_Q) de 47,82 mm, e com percolação (PERC) de 620,15 mm e uma evapotranspiração (Et) 195,45mm. Pode-se concluir que o modelo pode ser utilizado em bacias de alimentação mista, sendo levadas em consideração as características pertinentes a cada bacia, e que ele pode gerar os componentes do ciclo hidrológico mais especificamente a vazão.

Palavras Chaves: Hidrologia, Ciclo Hidrológico, Modelagem hidrológica e Rio Arapepó – Sub-bacia.

ABSTRACT

The present study aimed to investigate the feasibility of the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to generate with sufficient accuracy the components of the Arapepó River subbasin hydrological cycle, in the Cuiarana village, located in the state of Pará, Northern Brazil, from January 2008 to April 2014. Rainfall data provided by the Brazilian National Water Agency (ANA), meteorological data obtained from the National Institute of Meteorology (INMET) and from a micrometeorological station located in the village of Cuiarana, as well as geocartographic data which are useful for the characterization and delineation of the Arapepó catchment area, have been used to perform this investigation. The local climate presents a clear seasonality, with a rainy period from January to April, and a dry period from August to November. The SWAT model performance in the present investigation was satisfactory when compared with the results provided by other studies regarding river basins in Brazil. It is noteworthy that this is the second study carried out with SWAT model for a river basin in the Brazilian state of Pará. The SWAT model has presented good assessment scores such as coefficient efficiency (COE) of 0.68, Standard Deviation (Dv) of 18.68, a Coefficient of Residual Mass (CMR) of 0.2 and an average error (ME) of -0.1, for the sub-basin study. The components of the hydrological cycle generated by the model showed that the amount of soil water (SW) is 557.22 mm, with a runoff (Surg) of 87.79 mm and most of the water sub-basin that reached the channel (WYLD) was 142.79 mm with a groundwater flow (GW_Q) of 47.82 mm, a percolation (PERC) of 620.15 mm and an evapotranspiration (Et) of 195,45 mm. Overall, as a matter of conclusion, the SWAT model can be used in mixed catchments, and one time the relevant characteristics of each basin are taken into account, it can properly simulate the components of the hydrological cycle, particularly its flow.

Keys words: Hydrology, Hydrologic Cycle, Hydrologic modeling and Arapepó River - Sub-basin.

1 - INTRODUÇÃO

Desde o início, a ocupação e o uso do solo para o desenvolvimento das atividades agrícolas, ocorreram, historicamente, de forma predatória, em relação aos recursos naturais, através do desmatamento indiscriminado das áreas, sem o planejamento correto e sem a utilização de práticas adequadas. Estes fatores têm trazido um conjunto de consequências tanto econômicas e sociais, quanto para o meio ambiente, como, por exemplo, redução da capacidade produtiva do solo, assoreamento de cursos d'água, enchentes, irregularidade no fluxo d'água, poluição física d'água e entre outros efeitos (INCAPER, 2013).

Diante desse atual quadro de degradação e da consciência de que os recursos naturais são escassos, é que se evidencia a urgência da busca por uma nova postura ambiental. Por essas questões, a tomada de decisão deve ser direcionada com vistas à recuperação dessas áreas. Dias & Griffith (1998) conceituam a recuperação das áreas degradadas como um conjunto de ações idealizadas e executadas por especialistas das mais diferentes áreas do conhecimento humano visando proporcionar o restabelecimento de condições de equilíbrio e sustentabilidade existente anteriormente em um sistema natural.

De acordo com a visão do projeto de avaliação mundial da degradação do solo Global Assessment of Soil Degradation (GLSOD) pertencente ao Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas e que foi implementado e executado pelo International for Soil Reference Information Center (ISRIC) na Holanda, os principais fatores de degradação do solo, são o desmatamento ou remoção da vegetação natural, superpastejo¹ da vegetação, atividades agrícolas com a utilização de práticas inapropriadas, entre outros (OLDERMAN, 1994).

A caracterização de um processo de degradação do solo é uma questão que em determinadas situações é de difícil definição, ao longo das bacias hidrográficas se tornam fatores de preocupação, uma vez que, a alteração da superfície da bacia pode provocar efeitos no comportamento das vazões. Tucci (2005) explica que as alterações sobre o uso e manejo do solo, na superfície da bacia, podem ser classificadas pelos tipos

¹Superpastejo: É o uso da taxa de lotação superior a capacidade de suporte da pastagem.

de mudanças, pelos tipos de uso ou a forma de alteração do solo e ainda o tipo de cobertura, na qual a floresta é substituída, bem como, o método utilizado para a prática do desmatamento.

Nesse sentido, a utilização desses modelos hidrológicos tem proporcionado um melhor entendimento dos processos que envolvem a água (ciclo hidrológico) e uma bacia hidrográfica e possibilitou a melhor prática de seu uso, gerenciamento, ocupação do solo para a permanência e manutenção dos ecossistemas presentes, garantindo também suas funções inerentes ao meio que estão inseridos, como por exemplo, garantir os processos envolvidos no ciclo hidrológico e a proteção do solo (TUCCI, 2005).

A modelagem hidrológica em conjunto com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) tem evoluído para o ponto em que as vantagens de cada sistema podem ser totalmente integradas dentro de uma poderosa ferramenta para a análise de bacias hidrográficas (MACHADO, 2002). Estes SIG's são empregados na criação do banco de dados, sendo destinados à aquisição e ao tratamento dos dados georreferenciados e funcionam como gerador de informações que irão servir como parâmetros de entrada no modelo, permitindo a manipulação dos dados espaciais. Essa flexibilidade do SIG integrado ao modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool – SWAT oferece novas perspectivas para o estabelecimento e implementação de políticas ambientais, com o objetivo de reduzir o impacto de atividades antrópicas sobre as bacias hidrográficas (OLIVEIRA, 1999).

O modelo SWAT foi escolhido para esta pesquisa por ser adequado à aplicação em bacias de pequeno porte, além dos aspectos quantitativos de escoamento e porque nele poderão ser incluídas variáveis adequadas aos seus cálculos. O SWAT pode fazer previsão de cenários futuros para diferentes ocupações de solos, e de fácil acessibilidade, possuindo uma grande disponibilidade de material e por sua comprovação de aplicabilidade em vários estudos pelo mundo. A teoria, o equacionamento e a aplicação do modelo SWAT estão bem descritos, sendo apresentados em diferentes níveis de detalhamento em Arnold et al. (1998).

Diante do exposto, esperamos que os resultados desta pesquisa, usando informações de estações automáticas e observações no local, combinados com o uso e tipo do solo para assimilação do modelo SWAT, possam prover um bom entendimento do regime hidrológico da sub-bacia do rio Arapepó, localizada no nordeste paraense, e assim, gerar os demais componentes do ciclo hidrológico na sub-bacia.

1.1 – Caracterização do Problema

O processo de intervenção do homem ao meio ambiente tem causado enormes perdas à biodiversidade, a retirada total ou parcial da cobertura florestal e o uso inadequado de áreas no entorno das sub-bacias, tem alterado os ecossistemas naturais, causando degradação dos solos, processos erosivos e assoreamento dos cursos d'águas, modificando assim, também, o ciclo hidrológico. Vários são os procedimentos para se reabilitar essas áreas, porém leva tempo e disponibilidade de altos recursos financeiros, muitos casos são até irreversíveis, tendo a perda total da área degradada.

Devido essa possível perda irreversível é que se pensou em mecanismos que se incentivem e promovam a proteção dos recursos naturais, buscando-se modelar e gerar possíveis cenários futuros e com isso verificar quais medidas de reabilitação seriam necessárias antes mesmo que o problema aconteça.

Nesse sentido, a modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita compreender os processos hidrológicos básicos e de simulação da capacidade das bacias hidrográficas, a partir da variabilidade climática e do uso do solo, sendo os modelos hidrológicos capazes de prognosticar os efeitos desses diferentes usos de solos sobre a qualidade e a quantidade de água em bacias hidrográficas.

Desta forma, precisamos responder a seguinte pergunta: “O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT), pode ser aplicado para a sub-bacia do rio Arapepó, para a obtenção da vazão?”.

1.2 - Hipótese da pesquisa

É possível estimar os componentes dos ciclos hidrológicos, especificamente a vazão de uma sub-bacia hidrográfica, com precisão suficiente, utilizando o modelo hidrológico SWAT.

1.3 – Objetivo

Avaliar o modelo SWAT para a sub-bacia do rio Arapepó, comparando a vazão simulada pelo modelo hidrológico com a vazão observada.

1.4 – Objetivos Específicos

- Simular a vazão para a sub-bacia em estudo, utilizando o modelo hidrológico SWAT;
- Avaliar a vazão simulada pelo modelo com a observada pelo método convencional;
- Aplicação do modelo hidrológico, para geração dos componentes do ciclo hidrológico;

2 – ELEMENTOS TEÓRICOS

Na literatura, alguns temas importantes têm sido observados para justificar a aplicação de modelos hidrológicos em sub-bacias. Neste tópico são discutidos alguns desses temas como as bacias hidrográficas, o ciclo hidrológico, a degradação ambiental, a modelagem hidrológica e os modelos hidrológicos, mais especificamente o SWAT em conjunto com o SIG. Todos esses aspectos ajudaram a compreender onde o presente trabalho está inserido e quais aplicações do modelo SWAT, no que se refere aos recursos hídricos.

2.1 – Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica, também chamada de bacia de captação, pode ser definida pelo processo de convergência da água da chuva pela superfície, pelo subsolo e pelo seu interior, ao longo das vertentes em direção aos canais fluviais situados em pontos mais baixos, isso ocorre em uma área territorial delimitada por diferenças topográficas (MOREIRA & SENE, 2005).

Como um sistema hidrológico, as bacias hidrográficas apresentam grande dinamismo e são bastante complexas em relação aos ciclos da natureza e na transformação da paisagem, pois integra um conjunto de aspectos relacionados à água, a qual atua como um agente influenciador do clima, relevo, uso do solo, tipo do solo, etc., pois, qualquer modificação que ocorra na bacia hidrográfica, pode causar grandes prejuízos ao meio ambiente e aos seres humanos (MOREIRA & SENE, 2005).

Tucci (1998) conceitua a bacia hidrográfica como uma área de captação natural de água da precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, seu exutório, e que considera perdas intermediárias, os volumes evaporados, transpirados e os infiltrados profundamente.

Gómez (2004), ao definir uma bacia hidrográfica como um espaço tridimensional, que integra as interações entre a cobertura do terreno, as profundidades do solo e o entorno das linhas divisórias das águas. No qual se encontram os recursos naturais e a infraestrutura criada pelo homem, onde se desenvolve suas atividades econômicas e sociais gerando diferentes efeitos favoráveis e desfavoráveis.

Nesse sentido, a bacia hidrográfica tem sido uma importante unidade de avaliação quando o critério engloba a observação e conhecimento do ciclo hidrológico, sendo de grande valor na gestão dos recursos hídricos, as quais possibilitam a realização de uma série de experimentos. Nestes ambientes podem-se monitorar os componentes do ciclo hidrológico e conseqüentemente, inferir sobre o comportamento de cada um (SILVA, 2009).

Em termo de unidade de estudo e operação, as bacias hidrográficas é a unidade espacial de planejamento mais apropriada, por permitir o controle mais objetivo dos recursos humanos e financeiros, favorecendo a integração de práticas de uso e manejo do solo e da água. Sendo uma maneira eficiente de gerar tecnologia regionalizada, conservando os recursos naturais e contribuindo para o desenvolvimento regional (MORO, 2005).

A subdivisão de uma bacia hidrográfica em sub-bacias permite caracterizar melhor os problemas difusos, tornando mais fácil a identificação de pontos de degradação de recursos naturais, a natureza dos processos de degradação e o grau de comprometimento da sustentabilidade do meio. É importante mencionar que os termos bacia e sub-bacias são relativos, pois, para uma determinada rede de drenagem, esses estão relacionados a ordens hierárquicas, em que cada bacia hidrográfica se interliga com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia (FERNANDES & SILVA, 1994).

O comportamento hidrológico de uma bacia depende das suas características climáticas, morfológicas (área, forma, topografia, rede de drenagem e etc.), das suas unidades pedológicas e do seu uso do solo (SILVA, 2009). As características morfológicas são consideradas de grande importância para o conhecimento do comportamento hidrológico, pois, são capazes de fornecer informações de valores hidrológicos em locais de difícil acesso, quando estabelecidas comparações entre elas e dados hidrológicos conhecidos (VILLELA & MATTOS, 1975). Além de serem informações fundamentais para a elaboração e instalação de projetos de infraestrutura (SILVA, 2009).

Viola et al. (2007) afirmam que a quantificação morfométrica da bacia hidrográfica constitui a base do processo de caracterização hidrológica, assim como de parametrização da bacia, visando à simulação hidrológica. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) constituem-se em uma ferramenta que possibilita a aquisição automatizada destas informações.

Moro (2005) confirma ainda que, com a utilização do SIG e recursos informatizados podem reduzir significativamente o tempo e o custo de tais atividades, além de fornecer resultados mais precisos e ainda permitir manipulações teóricas de paisagem, isto é, simulações de alteração de um ou mais fatores que compõem a paisagem que está sendo estudada, e prever o acontecimento ou não de algum tipo de impacto ambiental.

Os maiores problemas de estudos hidrológicos em uma bacia hidrográfica estão relacionados com a elevada variabilidade espacial e temporal de suas características. Assim, na delimitação de uma bacia é importante que o conceito adotado garanta que a área escolhida integre todos os processos envolvidos no objetivo da análise e que apresente certo grau de homogeneidade, de forma que estratégias, ações e conclusões gerais possam ser estabelecidas para toda a área delimitada (MACHADO, 2002).

2.2 – Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é um processo global de circulação da água, entre, a superfície terrestre e a atmosfera, sendo a energia solar a principal mantenedora deste processo. Machado & Pacheco (2010) conceituam o ciclo hidrológico como um mecanismo natural das funcionalidades da terra, a qual é o elemento constituidor da hidrosfera, distribuído em três reservatórios principais: oceanos, continentes e atmosfera.

A integração entre estes se dá por meio de uma circulação de água contínua que é responsável pela renovação da água no planeta denominado de ciclo hidrológico. Sendo assim, esse movimento contínuo e dinâmico que transporta água de um lugar para outro é mantido pela energia solar e pela gravidade, por meio de diversos processos, como evaporação, transpiração, sublimação, condensação, precipitação, infiltração, escoamento superficial e etc.

Dessa forma, da superfície terrestre, a água é transferida para a atmosfera (do estado líquido ao estado gasoso), pela evaporação direta, evapotranspiração, por sublimação (passagem do estado sólido para vapor). No decorrer da mudança no seu estado físico absorve calor, armazenando energia solar na molécula de vapor de água na proporção que sobe à atmosfera. Participando também desse ciclo da atmosfera, o vapor de água que formará nuvens, cuja movimentação está sob influência da rotação da Terra

e das correntes atmosféricas. Dependendo das condições climáticas essas nuvens posteriormente serão precipitadas em forma de chuva, neve ou granizo (MACHADO & PACHECO, 2010).

Nesse sentido, o ciclo hidrológico é responsável pela renovação da água no planeta, sendo de suma importância para a manutenção das florestas e respectivos ecossistemas, a fim de prosseguir com o equilíbrio dinâmico natural no planeta Terra. A evapotranspiração, a qual é um processo combinado pela evaporação da superfície do solo e transpiração dos solos vegetados é responsável por quase todo volume de água transferido dos continentes para a atmosfera, além de desempenhar um papel definitivo na liberação do calor latente (BASTIAANSEN et al, 1998).

Portanto, a evaporação é o processo físico em que a água no estado líquido, presente na superfície do solo, nas plantas, nos cursos de água, lagos, reservatórios e mares, passa para o estado gasoso. A evaporação depende, basicamente, de quatro fatores principais: suprimento de energia externa (radiação solar), grau de saturação do ar circundante, velocidade do vento e disponibilidade de água. Já a transpiração é a perda da água das células vivas dos tecidos vegetais através dos estômatos (poros de respiração das plantas). Mesmo sendo um processo físico, a transpiração é o único componente de evapotranspiração sob controle fisiológico da planta (GIACOMONI, 2005).

Outro componente do ciclo hidrológico de suma importância para o estudo é o escoamento superficial, o qual acontece quando a precipitação é intensa, superando as perdas por interceptação e evaporação, e ainda sendo superior a capacidade de infiltração do solo. Caracterizado pelo movimento do excesso de água precipitado dos pontos mais altos para os pontos mais baixos, pela ação da gravidade, sobre o solo, neste trajeto as partículas de água passam por redes efêmeras de drenagem até encontrar os canais principais, rios e lagos. Esses volumes de água geram aumento da vazão (MACHADO, 2005).

Por vazão entende-se o volume de água que passa numa determinada seção do rio por unidade de tempo, a qual é determinada pelas variáveis de profundidade, largura e velocidade do fluxo, e é expressa comumente no sistema internacional (SI) de medidas em m^3/s . A descarga (vazão) aumenta da montante (região mais alta do rio) para a jusante (áreas rio abaixo) até sua foz (CARVALHO, 2008).

Porém, quando a precipitação é inferior a capacidade de saturação do solo, a água infiltra pelos poros, esse processo é caracterizado pelo o escoamento subterrâneo, sendo

o principal responsável pela recarga dos aquíferos ou lençóis de água subterrânea. A quantidade de água e a velocidade com que ela circula, nas diferentes fases do ciclo hidrológico são influenciadas por diversos fatores como, por exemplo, a cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia.

Nesse sentido, o entendimento da inter-relação entre os complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico, com o objetivo de descrever a dinâmica da água na bacia hidrográfica, desde a precipitação até a ocorrência do escoamento superficial, permitiu ao homem simular o comportamento da água na bacia hidrográfica, possibilitando a previsão de diferentes cenários hidrológicos em decorrência de alterações climáticas e de uso do solo.

2.3 – Degradação Ambiental

Existem na literatura diferentes conceitos do termo degradação ambiental. Para Sánchez (2008) degradação ambiental é qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais, ou como uma alteração adversa da qualidade ambiental – degradação ambiental corresponde ao impacto ambiental negativo.

Sobre este mesmo assunto, Guerra (2001) explica que a degradação ambiental é causada pelo homem, que, na maioria das vezes, não respeita os limites impostos pela natureza e que a degradação ambiental é mais ampla que a degradação dos solos, pois envolve não só a erosão dos solos, mas também a extinção de espécies vegetais e animais, a poluição de nascentes, rios, lagos e baías, o assoreamento e outros impactos prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem.

Sánchez (2008) diz que os processos naturais não degradam ambientes, apenas causam mudanças, nesse sentido o agente causador da degradação é sempre o homem. De posse destes dois conceitos, pode-se definir a degradação ambiental como sendo qualquer mudança artificial ou perturbação provocada pelo homem ao meio ambiente.

Essa degradação causada ao meio ambiente geralmente é indicada através das ocupações inadequadas, desmatamentos, queimadas, poluições, alterações climáticas, assoreamento dos rios e lagos, podendo chegar até a extinção.

Sánchez (2008) afirma que a degradação pode ser percebida em diferentes graus de perturbação, onde existem graus, em que o meio ambiente se recupera espontaneamente, contudo, a partir de certo nível de degradação, a recuperação

espontânea pode ser impossível ou somente a um prazo muito longo, mesmo que, a fonte da causa da perturbação seja retirada ou reduzida, será necessária uma ação corretiva.

No que diz respeito às leis de degradação ambiental, ressalta-se que na lei de nº. 6.938 de 31/08/81, artigo 3º, inciso II da Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981), em que a degradação da qualidade ambiental constitui-se na alteração adversa a características do meio ambiente, encontrando-se subentendida na lei de nº. 6.938 o conceito de degradação ambiental, o qual é colocado como sinônimo de qualidade ambiental, porém a lei foi substituída pela lei de nº. 7.804 de 18/07/89, onde mantém a mesma definição.

Contudo, é perceptível que a degradação ambiental está relacionada a um impacto ambiental negativo, e que a própria lei evidencia que tal degradação é adversa, podendo se referir tanto a um aspecto positivo, quanto a um negativo. Porém, quando há inserção do homem ele se torna o agente modificador de processos da dinâmica natural, causando de qualquer forma danos ao meio ambiente.

Quando associadas a bacias hidrográficas, qualquer forma de degradação ocorrida pode ocasionar grandes prejuízos, como por exemplo, o desmatamento das matas ciliares, causando erosão e conseqüentemente o assoreamento dos cursos d'água. Todavia, essa degradação pode ocorrer em uma escala maior chegando a influenciar no ciclo hidrológico, uma vez que, as etapas principais deste ciclo se processam nas bacias hidrográficas, envolvendo todos os recursos naturais e/ou ambientais. Já que, os principais componentes que integram as bacias hidrográficas são: o solo, a água, a vegetação e a fauna, as quais coexistem dinamicamente, respondendo as interferências naturais e antrópicas.

Portanto, o Art. 94 do guia prático de fiscalização ambiental, diz que: causa degradação ambiental quem provoque erosão, deslizamento, desmoronamento ou modificações hidrográficas ou superficiais, quando constatado intervenções em corpo hídrico, como, por exemplo, desvio de curso d'água, construção de pontes, barragens, etc. e também utilizado nas intervenções humanas (exemplo cortes de taludes, grandes movimentações de terras, etc.) que tornam o solo suscetível a sofrer erosão (INEA, 2010).

2.4 – Modelagem Hidrológica e Modelos Hidrológicos

Para o entendimento e previsão dos recursos hídricos associados a diferentes condições de clima e solo, necessitou-se desenvolver modelos matemáticos que descreva a dinâmica da água nos ecossistemas naturais. Com o avanço nas áreas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, informações espacialmente distribuídas (mapas de cobertura e tipo de solo, modelo numérico de terreno, imagens de satélite e etc.), técnicas para análise e a crescente capacidade computacional disponível, levaram ao aperfeiçoamento da modelagem dos sistemas hidrológicos.

Tucci (1998) afirma que 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.

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das mudanças no uso do solo e prever alterações futuras nos ecossistemas (RENNÓ & SOARES, 2001).

A modelagem geralmente é aplicada em processos naturais de grande complexidade e / ou em grandes áreas de desenvolvimento e gestão de recursos hídricos e que requerem uma maior compreensão dos processos hidrológicos básicos e de simulação da capacidade das bacias hidrográficas (ARNOLD & FOHRER, 2005).

Na hidrologia esses modelos tem se desenvolvido com o intuito de entender melhor o comportamento dos fenômenos hidrológicos, que ocorrem principalmente nas bacias hidrográficas, facilitando dessa forma, na análise quantitativa e qualitativa dos processos do ciclo hidrológico, tais como, precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, produção de sedimento, escoamento superficial e subterrâneo (SANTOS, 2009).

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos, reunindo as superfícies que captam e despejam água sobre um ou mais canais de escoamento. A bacia pode constituir a unidade espacial para modelos agregados que consideram as propriedades médias para toda a bacia. Diversas abordagens podem ser

consideradas na subdivisão da bacia a fim de considerar suas características espacialmente distribuídas (RENNÓ & SOARES, 2001).

Para Minoti (2006), os modelos permitem avaliar e compreender o comportamento de processos que possam indicar o aparecimento de impactos negativos. Muitas vezes permitem visualizar o comportamento futuro do sistema com a criação de cenários ainda não explorados em experimentos reais, alertando o pesquisador para novas alternativas de pesquisas futuras ou para testes mais direcionados, reduzindo gastos e esforços.

Nesse sentido, quanto mais complexos os sistemas hidrológicos considerados, mais desafiadores e necessários são os modelos. Os processos que são tratados de forma simplificada e com poucos detalhes podem comprometer os resultados. Bacias com grande cobertura vegetal, onde os processos hidrológicos são muito mais verticais (interceptação e evapotranspiração) do que horizontais (escoamento) são tratadas de forma eficaz pela maioria dos modelos hidrológicos (TUCCI, 1998).

Tucci (1998) descreve ainda que, os modelos podem ser classificados como físico, matemático e analógico. O modelo físico nada mais é do que um protótipo ou uma maquete, em uma escala adequada, do sistema que se deseja representar. Os modelos matemáticos ou digitais expressam a natureza do sistema através de equações matemáticas, necessitando muitas vezes de ajustes de calibração para obtenção dos resultados. Os analógicos valem-se das analogias das equações na determinação de fenômenos complexos, comparando sistema mais conveniente e simples. Acrescenta ainda que em função da necessidade e profundidade do estudo, os modelos e sistemas podem ter outros tipos de classificação, podendo ser concentrados ou distribuídos, lineares ou não lineares, contínuos ou discretos, estáticos ou dinâmicos, estocásticos ou determinísticos e conceitual ou empírico.

Dentre os modelos podemos destacar: o CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) – 1980 (KNISEL, 1980); o ANSWERS (Area Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation) – 1981 (BEASLEY & HUGGINS, 1981); o CASC2D (Hydrologic Modelling) – 1989 (OGDEN, 1997) e o TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model) – (BEVEN et al., 1994).

Nesse estudo o modelo utilizado será o SWAT, devido este se tratar de um modelo matemático que permite a correlação de diversos processos físicos, químicos e biológicos que acontecem em uma bacia hidrográfica, sendo assim, uma ferramenta que

pode ser utilizada para analisar possíveis alterações no uso do solo e seu impacto sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade de água em bacias hidrográficas agrícolas (MACHADO, 2002).

2.5 – SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL) – Ferramenta de Análise do Solo e Água.

O modelo SWAT foi criado no início dos anos 90 por Jeff Arnold do Serviço de Pesquisa Agrícola (Agriculture Research Service – ARS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (United States Department of Agriculture - USDA) e foi constituído para ser uma ferramenta de análise do impacto das ações humanas nos processos hidrológicos e químicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. O SWAT incorpora vários componentes principais: hidrologia, clima, sedimento, temperatura do solo, crescimento da flora, nutriente e gestão de uso de solo agrícola, entre outros (MENDES, 2010).

O SWAT é um modelo de domínio público e de fonte aberta e integrada que permite ao usuário utilizar conforme a necessidade da pesquisa. O modelo é de base física e continua e operam em tempos diários, com o objetivo de predizer o efeito de diferentes cenários de manejo na qualidade da água, produção de sedimentos, bacias hidrográficas e etc.

Desenvolvido para simular processos que envolvem o uso e a classificação do solo, chuvas e vazão com elevado nível de detalhamento espacial, permitindo que a bacia hidrográfica seja dividida em sub-bacias que posteriormente serão divididas em função de diversas combinações entre características de uso da terra e solo, que serão então chamadas de unidade de resposta hidrológica (URH, na sigla inglesa HRU) (JIE et al., 2010).

A subdivisão da bacia permite que o modelo identifique diferenças de evapotranspiração para diferentes práticas de agricultura e solos. O escoamento é previsto separadamente para cada URH e posteriormente somado para obter o escoamento total da bacia. Isso aumenta a precisão e dá uma descrição física muito melhor do balanço hídrico para a bacia (NEITSCH et al., 2005).

Para melhor compreensão do funcionamento do modelo SWAT na simulação desses processos, Arnold et al. (1998) apresentam algumas características básicas:

- O modelo requer informações específicas sobre clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, ao movimento de sedimento, ao crescimento de culturas, a ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo modelo utilizando esses dados de entrada. Um aspecto positivo dessa característica do modelo é que foi desenvolvido para ser aplicado em bacias não monitoradas;
- É computacionalmente eficiente, podendo simular extensas bacias hidrográficas sem gastos excessivos de tempo;
- É um modelo contínuo capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo. Em alguns processos os resultados apenas são obtidos após década de simulação. O modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação;

Os dados de entrada no modelo consistem em: dados meteorológicos diários (temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa, evapotranspiração, precipitação e radiação solar), dados geocartográficos (modelo numérico de terreno - MNT, classificação de uso e ocupação do solo e tipo de solo) e para este estudo dados de vazão para a efetivação da validação do modelo.

De acordo com Gassman et al. (2007), o modelo SWAT vem sendo utilizado de forma corrente após o seu desenvolvimento. Muitas aplicações foram realizadas, por agências governamentais, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, para avaliar mudanças climáticas, efeitos do uso do solo sobre os recursos hídricos e avaliação da capacidade do modelo para futuras aplicações.

Em Portugal, Mendes (2010) aplicou o modelo SWAT a bacias hidrográficas do aquífero cársico² e obteve como resultado a contribuição para o aumento do número de dados a respeito das culturas da região, podendo servir de base para futuros estudos hidrológicos ou agrícolas desenvolvidos na região.

² Os aquíferos cársicos são os locais por onde a água circula em cavidades originadas por dissolução de calcários e dolomitos (e mais raramente de gesso e sal gema). A dissolução acontece por infiltração das águas pluviais ao longo de fendas ou outras aberturas, onde circulam, alargando-as constantemente, o que contribui para o aumento da circulação subterrânea e para a contínua intensificação deste processo.

No Brasil, Nunes (2013) que aplicou o modelo SWAT para investigar a sua viabilidade em gerar os componentes hidrológicos na bacia do Rio Capim, em que obteve como resultado satisfatório possibilitando espacializar os componentes do ciclo hidrológico e validar o modelo SWAT. Sousa (2010) utilizou o modelo SWAT para o estudo da estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação na modelagem hidrológica, obtendo como resultado bastante satisfatório a estimativa dos fluxos de calor à superfície e a evapotranspiração real diária condizente com o uso e cobertura do solo para assimilação em modelagem hidrológica.

Enquanto, Lelis (2011) fez um estudo sobre os impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: simulação e cenários, em que ela estimou a produção de sedimentos e de escoamento superficial utilizando o modelo SWAT, obtendo como resposta a simulação de altas taxas na perda do solo e no escoamento, devido ao aumento do volume precipitado, segundo as mudanças climáticas previstas a acontecer no período simulado de escolha, 10 anos.

2.6 – Geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica – SIG.

O mapeamento e localização das bacias hidrográficas, a identificação em meio cartográfico dos pontos das estações meteorológicas e fluviométricas, locais de reservatórios e exutórios, pontos de vulnerabilidade da interação água e atividades humanas, entre outros, são fundamentais na gerência eficiente dos corpos hídricos.

Com o advento da informática na automação de processos, surgiram várias ferramentas para a coleta, armazenamento, processamento e apresentação de informações espaciais georeferenciadas. A ligação técnica e conceitual destas ferramentas levou ao desenvolvimento da tecnologia de processamento de dados geográficos, denominada geoprocessamento (ROCHA, 2002).

O geoprocessamento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, planejamento urbano, modelagem hidrológica, entre outros (SILVA & ZAIDAN, 2010).

Mendes & Cirilo (2001), afirmaram que a utilização de técnicas de geoprocessamento constitui-se em um instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação de água e solo. Com isso, o SIG

se insere como uma ferramenta que tem a capacidade de manipular as funções que representam os processos ambientais em diversas regiões, de uma forma simples e eficiente, permitindo uma economia de recursos e de tempo. Estas manipulações permitem agregar dados de diferentes fontes (imagens de satélite, fotografias aéreas, mapas topográficos, mapas de solos, hidrografia, etc.) e em diferentes escalas.

Dentre as diversas técnicas que integram e formam o geoprocessamento, existem três principais (SILVA & ZAIDAN, 2010), as quais são:

- O SIG que é uma tecnologia computacional que possibilita através de computadores e software, a análise de grandes quantidades de informações dentro de um contexto geográfico, possibilitando localizar, identificar, reconhecer e avaliar impactos ocorridos no espaço.
- O Sensoriamento Remoto (SR) que é a utilização de sensores para obter informações ou fenômenos de objetos da superfície terrestre sem que haja contato direto entre eles, utilizando técnicas próprias de armazenamento e tratamento das informações obtidas.
- O Global Positioning System (GPS) que é um sistema que possui vários propósitos, o qual permite aos usuários determinar suas posições em relação ao centro da Terra, sendo expressa em latitude, longitude, UTM e altura geométrica ou elipsoidal em função das coordenadas cartesianas X, Y e Z.

Gassman et al. (2007) afirmam que o processo de configuração do SWAT para bacias hidrográficas foi muito facilitado pelo desenvolvimento de interfaces baseadas em SIG, que fornecem um meio simples de traduzir digitalmente dados de usos da terra, topografia e de solo para entradas exigidas pelo modelo. Eles são idealmente adequados para combinar informações topográficas, solos, uso da terra e informações meteorológicas para pequenas áreas dentro da bacia, onde é possível visualizar cenários passados, atuais e simular cenários futuros (GRIGG, 1996).

Nesse sentido, o SIG é importante para o modelo, pois ele é a interface que integrará a entrada dos parâmetros do modelo, a análise e visualização dos resultados da simulação. Os maiores benefícios do SIG em hidrologia de bacia incluem o aumento na precisão, menor duplicação, armazenamento de mapas, maior flexibilidade, eficiência e comodidade no compartilhamento de dados, além da promoção de rapidez de entrada, armazenamento e manipulação de informação geoespacial (OGDEN et al., 2001).

O sensoriamento remoto também é uma ferramenta importante para a modelagem hidrológica, pois participa de forma direta na captação e inserção de dados no modelo, através das representações topográficas da superfície (Modelo numérico de terreno – MNT), criado a partir de imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de resolução espacial de 90 metros, importante referência de declividade da superfície e direcionamento do escoamento (superficial e subterrâneo) da água nas bacias hidrográficas. A captação de informações sobre temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa, evapotranspiração, precipitação e radiação solar, são via sensoriamento remoto, através de sensores acoplados em estações meteorológicas, sem precisar de proximidade física entre essa superfície e o sensor.

Cowell (1997) conceitua o sensoriamento remoto como uma arte, ciência e tecnologia de obter informação confiável sobre objetos físicos e o ambiente por meio do processo de registro, medição, e interpretação de imagens e representações digitais dos padrões de energia derivados de sistemas sensores sem contato físico. Essa obtenção de dados requer o uso de energia para alimentar os sensores.

Libos (2002) relatou que o sensoriamento remoto e o SIG têm o potencial promissor de serem empregados com grande êxito, nos trabalhos de modelagem hidrológica. Através da classificação de imagem de satélites, é possível analisar as mudanças na cobertura vegetal de uma área, prever e localizar os impactos causados pela ação antrópica, permitindo um gerenciamento de bacias mais eficiente e eficaz. A combinação de modelos hidrológicos acoplados ao SIG, bem como o desenvolvimento de metodologias dentro desse ambiente constitui o elemento fundamental para o diagnóstico da situação ambiental e hídrica da bacia.

3 - ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi desenvolvido, para uma pequena sub-bacia hidrográfica do rio Arapepó, com área de aproximadamente 7,68 km², localizado na vila de Cuiarana, no município de Salinópolis, na região nordeste do Estado do Pará (Figura 1), a uma distância de 15 km da área central do município de Salinópolis e tem como via principal de acesso a PA-124.

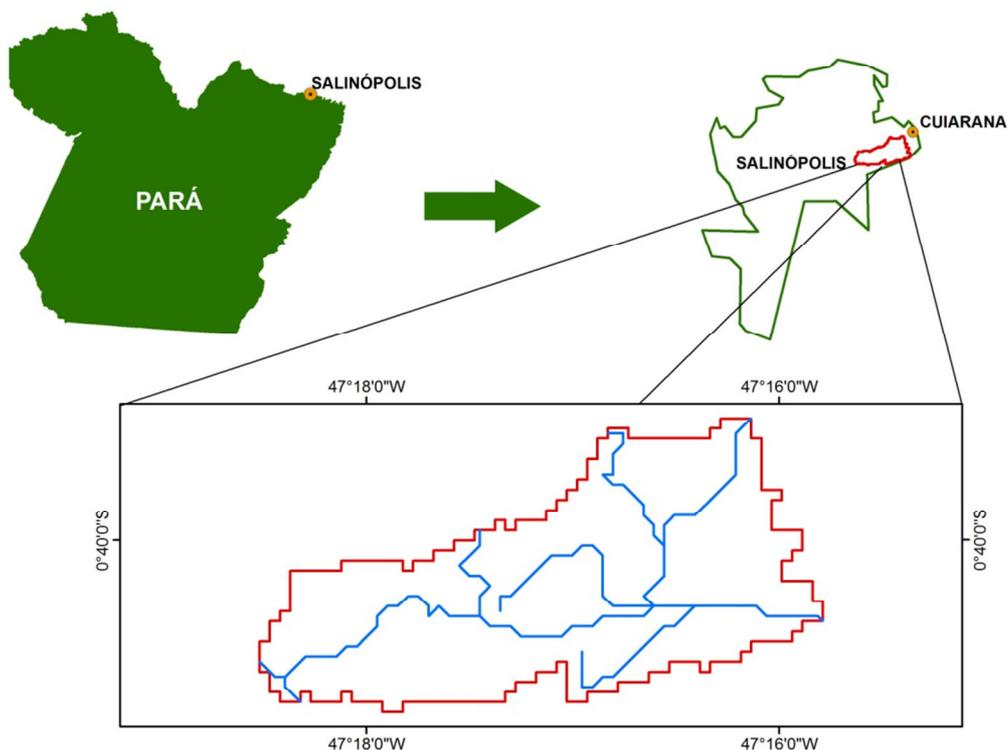


Figura 1: Rio Arapepó, Salinópolis/PA. Fonte: Autor.

A sub-bacia do rio Arapepó tem sua montante próxima a PA-124 e a jusante no rio Arapepó, considerada complexa, devido ao longo do seu curso d'água, parte da sub-bacia ser caracterizada por rios intermitentes (nível topográfico mais alto), ou seja, que seca nos períodos de pouca chuva, indicando que não ocorre distribuição do escoamento subterrâneo e nos períodos úmidos, a descarga nesses afluentes é consideravelmente maior. Enquanto a outra parte sofre efeito de maré (nível topográfico mais baixo), caracterizada por oscilações verticais da superfície, causados pela atração gravitacional da Lua e, em menor extensão, do Sol, sobre os diversos pontos da Terra. Essa complexidade ocorre, primeiramente, por ser uma sub-bacia que possui um regime de

alimentação mista (pluvial e fluvial) e conforme, os níveis topográficos do terreno, bem como o desvio da água para poços, tornam difícil permanência da água nos períodos de seca.

A sub-bacia está inserida no sítio experimental instalado em uma área de cultivo de mangueira (*Mangifera indica*), pertencente à Universidade Federal do Pará (UFPA) e da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Conforme o estudo de Rodrigues (2012), o pomar foi implantado para fins comerciais em 1993 e é constituído de mangas da espécie Tommy Atkins, utilizando o espaçamento de 10,0 x 10,0 m, representando uma densidade de 100 plantas ha⁻¹, em uma área total de 25 hectares.

Destes, uma parcela correspondente a um hectare foi demarcada para o estudo, no centro da qual foi instalada e instrumentada uma torre micrometeorológica, apresentando um “fetch” superior a razão 1:100, na direção predominante do vento (de nordeste), para evitar que os efeitos advectivos interfiram nas medidas realizadas no pomar conforme Rosenberg et al. (1983).

3.1 - Características Físicas

a) Modelo Numérico de Terreno – MNT.

O MNT da sub-bacia foi obtido gratuitamente do site da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a partir de imagens SRTM, com resolução espacial de 90 m. Posteriormente foi transformada em uma imagem raster, de resolução espacial de 5 m, na escala de 1: 25.000, esta resolução, por limitações funcionais do modelo SWAT, foi utilizada nas demais imagens. Portanto, é a mínima resolução aplicável a este estudo, e é adequada para bacias de pequena e média escala.

O MNT contém informações sobre declividade média, o qual mostra intervalos de classes que representam as altitudes, de acordo com as variações de cores, variando de 4 metros a 40 metros de altitude, em que as maiores altitudes aparecem nas extremidades da sub-bacia, enquanto as de baixa altitude estão por onde passam as redes de drenagem (Figura 2).

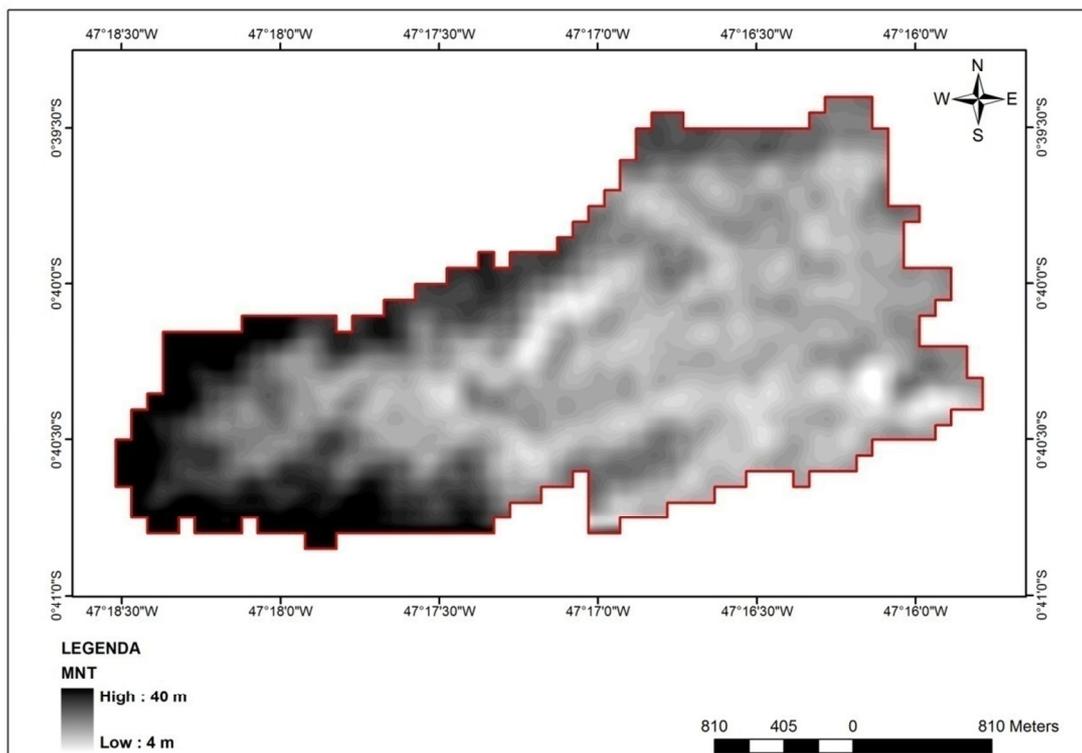


Figura 2: Modelo numérico de terreno (MNT) com as cotas altimétricas em metros.

b) Usos do solo

O plano de cobertura do solo foi obtido a partir de dados vetoriais, disponibilizados pelo Zoneamento Econômico Ecológico (ZEE – PA), em que foi transformado em imagem raster, de resolução espacial de 5 m, na escala de 1:25.000 (VENTURIERI et al., 2010).

Na sub-bacia têm-se a predominância de três classes de usos do solo: Áreas Antrópicas Agrícolas, Áreas Florestais e Água (Figura 3).

- **Áreas Antrópicas Agrícolas:** Compreendem as áreas que se encontram ocupadas com culturas agrícolas (temporárias ou permanentes) e silvicultura (reflorestamentos). Correspondem às extensões de terra utilizadas para a produção de carnes, leite, plantios e em processo de regeneração natural, como as áreas de vegetação secundária, devido a sua utilização pelos diversos sistemas produtivos da região.

- Áreas Florestais: Esta classe é representada tanto por todas as formações naturais da floresta, como áreas utilizadas para replantio de espécies florestais para os diversos usos.
- Água: Caracterizado por rios, lagos, açudes, afluentes e subafluentes.

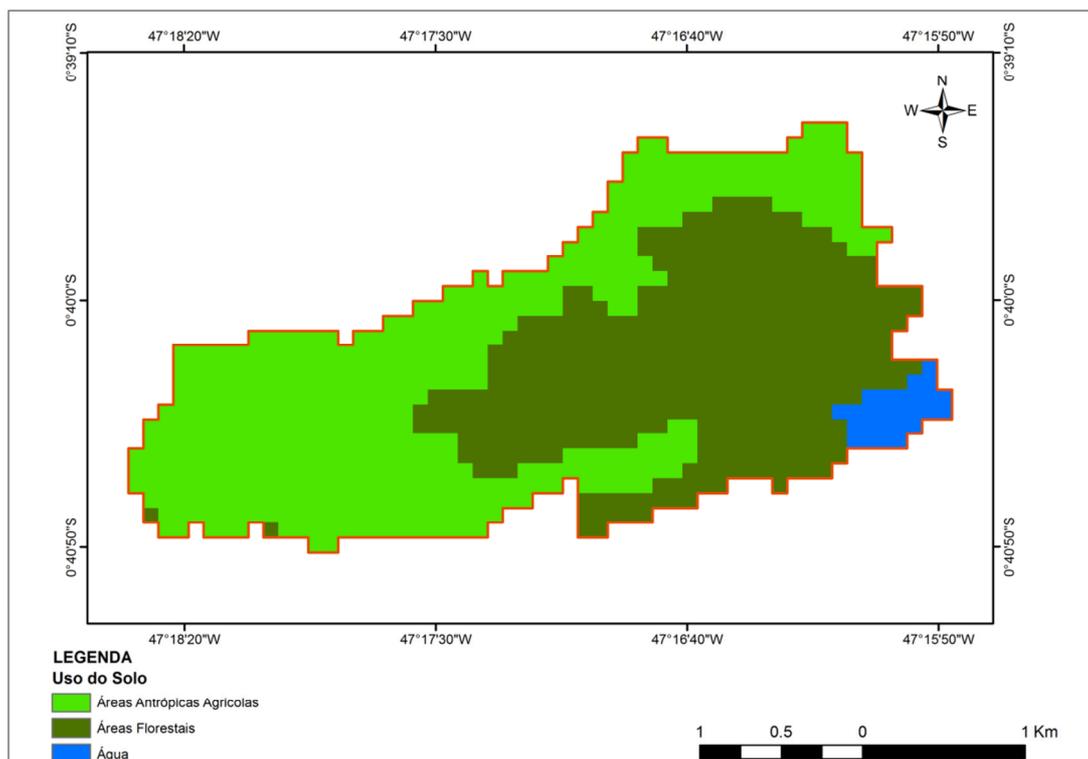


Figura 3: Usos do solo da sub-bacia do rio Arapepó.

A sub-bacia do rio Arapepó é dominada por áreas Antrópicas Agrícolas que correspondem a 52,32% de toda a sub-bacia, seguida da classe de Floresta (44,81%) e água, correspondendo 2,87% (tabela 1).

Tabela 1: Representatividade do uso dos solos da sub-bacia do rio Arapepó.

Código SWAT	Classificação ZEE-PA	Área (Km²)	Área (%)
AGRL	Áreas Antrópicas Agrícolas	4,02	52,32
FRST	Áreas Florestais	3,44	44,81
WATR	Água	0,22	2,87
Total		7,68	100

c) Tipo de solo

O tipo de solo foi obtido da mesma restituição descrita no item anterior (ZEE – PA), sendo adotadas três classes: Latossolo amarelo, Gleissolo e Água (VENTURIERI et al., 2010) (Figura 4).

- Latossolo amarelo: Solos profundos, de coloração amarelada, perfis muito homogêneos, com boa drenagem e baixa fertilidade natural em sua maioria. São solos profundos e muito profundos, bem drenados que apresentam como principal característica o horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico Bw, apresentam espessura mínima de 50 cm, textura franco arenosa ou mais fina e baixos teores de siltes, de maneira que a relação siltes/argila seja inferior a 0,7 nos solos de textura média e inferior a 0,6 nos de textura argilosa, na maioria dos sub horizontes do B até a profundidade de 200 cm.
- Gleissolo: São solos característicos de áreas alagadas ou sujeitas a alagamento (margens de rios, ilhas, grandes planícies, etc.). Apresentam cores acinzentadas, azuladas ou esverdeadas, dentro de 50 cm da superfície. Podem ser de alta ou baixa fertilidade natural e têm nas condições de má drenagem a sua maior limitação de uso. São solos minerais hidromórficos, mal drenados, desenvolvidos de sedimentos recentes, sob forte influência do lençol freático, com horizontes dispostos na sequência A e Cg, ou A, Bg e Cg. A textura é predominantemente argilo-siltosa, com valores altos de siltes e argila, devido à constante sedimentação de materiais finos que são conduzidos em suspensão pelos rios.
- Água: Caracterizado por rios, lagos, açudes, afluentes e subafluentes.

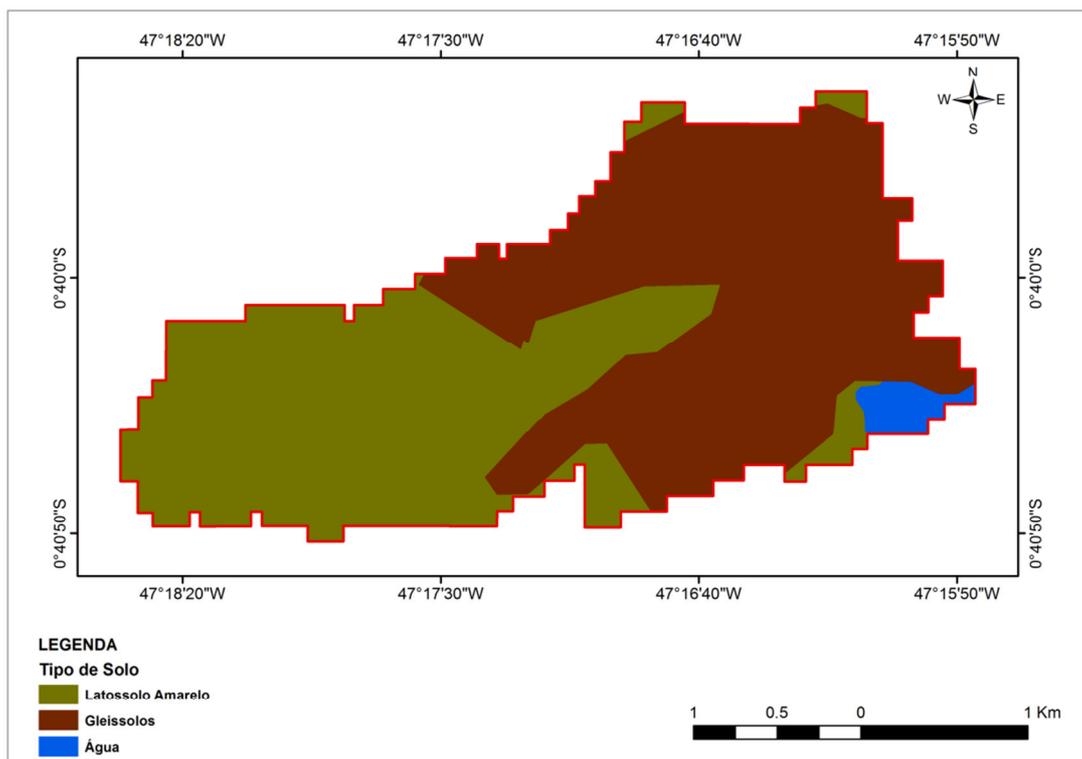


Figura 4: Tipos de solo da sub-bacia do rio Arapepó.

A sub-bacia é composta predominantemente por solos do tipo Gleissolos, com aproximadamente 50,44% de área de toda sub-bacia, seguida por solos do tipo Latossolo Amarelo com 47,68% e água (1,88 %) (tabela 2).

Tabela 2: Representatividade dos tipos de solos da sub-bacia do rio Arapepó.

Código SWAT	Classificação ZEE-PA	Área (Km²)	Área (%)
GLE Y	Gleissolo	3,87	50,44
CLA	Latossolo Amarelo	3,67	47,68
WATR	Água	0,14	1,88
Total		7,68	100

3.2 - Características Climáticas

Os dados climáticos utilizados pelo modelo são os dados diários de temperatura máxima e mínima (T_{máx} e T_{min}), velocidade e direção do vento (VV e DV), umidade relativa (UR), radiação solar (RS), ponto de orvalho (PO) e precipitação (PRP). Os

valores para esses parâmetros podem ser lidos a partir de registros de dados observados ou podem ser gerados pelo modelo (NEITSH et al., 2005).

Para suprir esta necessidade do modelo foram utilizadas três estações automáticas: a) Estação pluviométrica monitorada pela Agência Nacional de Água (ANA), localizada em Salinópolis/PA ($0^{\circ}37'07,25''$ S e $47^{\circ}21'03,99''$ O), que continham os dados do período de 2008 a 2014; b) Estação meteorológica monitorada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada em Salinópolis/PA ($0^{\circ}37'07,25''$ S e $47^{\circ}21'03,99''$ O), para o período de 2008 a 2014; e c) Através da estação micrometeorológica acoplada a torre metálica de 12 m de altura, localizada dentro da área experimental da UFRA, em Cuiarana/PA ($0^{\circ}39'49,72''$ S e $47^{\circ}17'03,41''$ O), para o período de 2010 a 2014.

4 –METODOLOGIA

4.1 - Cálculo de Vazão

A medição de vazão, neste trabalho, foi realizada através do processo numérico de cálculo de medição convencional de descarga líquida, com o uso do molinete, o qual pode ser calculado em tempo “real” (caderneta de campo), permitindo uma verificação dos resultados medidos in loco, este processo é adequado à medição de bacias de pequeno porte.

A escolha desta forma de estimar partiu pelo fato, da sub-bacia em estudo não possuir estação automática de medição de vazão, e também, por ser uma sub-bacia mista (parte dos afluentes são intermitentes (período de cheia e período de seca) e a outra parte, por sofrer efeito de maré), sendo necessário estimar a velocidade do fluxo de água, em um ponto que não ocorra o efeito de maré e que esteja no período chuvoso (período de cheia).

O método convencional utilizando o molinete hidrométrico é universalmente utilizado para determinação de vazão em cursos d'águas naturais e artificiais (canais), e consiste em determinar a área da seção e a velocidade média do fluxo de água que passa pela seção. O molinete hidrométrico é um aparelho que serve para medir a velocidade do escoamento.

Carvalho (2008) diz que o molinete hidrométrico ou correntômetro de hélice é um velocímetro em forma de torpedo e serve para medir de forma pontual a velocidade da corrente da água por unidade de tempo, normalmente é expressa por m/s (metros por segundo) (Figura 5).



Figura 5: Molinete Fluviométrico, modelo MLN – 7.

A medição em campo foi feita em um ponto de monitoramento, localizado na parte da sub-bacia que não ocorre efeito de maré, onde foi feitas medições durante cinco dias, pela manhã. Baseando-se no método de medição a vau (medição realizada por um observador que atravessa o curso de água a pé medindo profundidades e velocidades, indicados para rios de pequena largura e pouca profundidade) esticou-se uma corda para verificar qual o melhor ponto de medição e profundidade, e posteriormente com uma trena mediu-se entre o ponto inicial e o ponto final, dentro da sub-bacia do rio Arapepó, ficando três pontos de medições (0,6 m, 0,6 m e 0,7 m) com 2,10 metros de distância. (Figura 6).



Figura 6: Medição a vau.

Com o molinete atrelado a sua haste metálica graduada (a qual permite obter as profundidades), atravessou-se o curso d'água segurando o molinete e o contador digital

de rotação, foram feitas as medidas em três profundidades (40%, 60% e 80%) para o período de 60 segundos, o contador emite um sinal sonoro, e dentro do contador digital é fornecido o número total de rotações que a hélice realizou dentro período de tempo (60 s), para posteriormente ser inserido no cálculo do número de rotação (Figura 7).



Figura 7: Medição da velocidade do rio.

O cálculo do número de rotações por segundo ($N(\text{rps})$), pode ser realizado a partir da (Equação1):

$$N = \frac{n}{i} \quad (1)$$

Onde,

N = Número de rotação por segundo;

n = Número de rotações registradas durante intervalo de tempo;

i = Intervalo de tempo de medição da velocidade (s).

Os cálculos de conversão entre os números de rotações por segundo para os valores de velocidade foram feitas através da equação do molinete, a qual é fornecida pelo fabricante do aparelho, esta equação é calibrada para cada molinete de forma individual e somente pode ser usada para o aparelho calibrado (CARVALHO, 2008), geralmente da forma (Equação 2):

$$V = axN + b \quad (2)$$

Onde,

V = Velocidade;

a = Passo da hélice;

b = Inércia da hélice;

N = Número de rotação por segundo.

O cálculo da vazão foi realizado a partir do método da meia seção, o qual considera os setores retangulares definidos pelas profundidades médias entre duas verticais adjacentes, desprezando parte da área junto de cada margem, para diminuir ao máximo a distância entre a primeira e última vertical com as margens da sub-bacia (Figura 8).

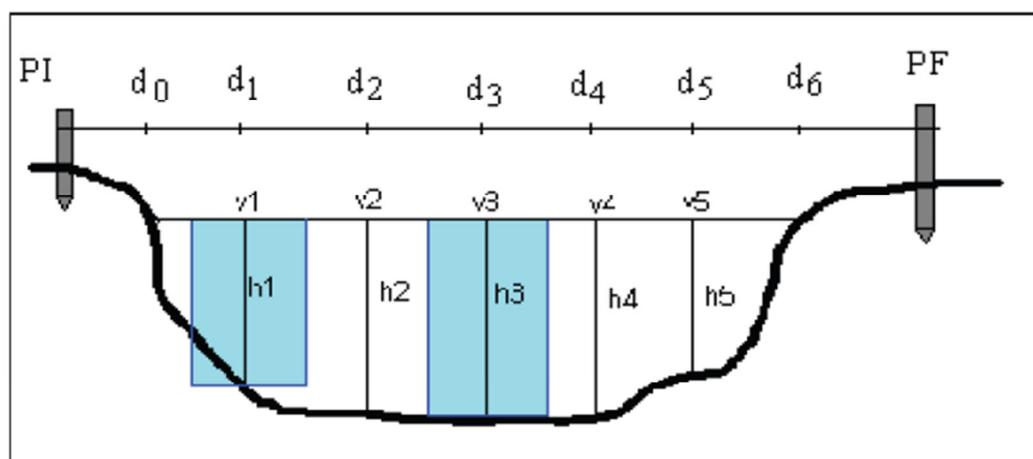


Figura 8: Ilustração do método da meia seção. Fonte: BACK (2006).

A equação da vazão parcial é (Equação 3):

$$q_i = v_i h_i \left(\frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2} \right) \quad (3)$$

Onde,

q_i = Vazão na seção i (m^3/s);

v_i = Velocidade média na vertical i (m/s);

h_i = Profundidade da vertical i (m);

d_{i+1} = Distância a partir do PI até a vertical posterior (m);

d_{i-1} = Distância a partir do PI até a vertical anterior (m).

E a vazão total (Equação 4):

$$Q = \sum_i^n q_i \quad (4)$$

4.2 - Modelo SWAT

O Funcionamento do modelo SWAT para as simulações de cenários ocorrem basicamente pelas entradas de dados, em que primeiramente é inserido o MNT, onde a partir deste é delimitado a bacia hidrográfica e posteriormente, são inserido dados climáticos e características do solo, como o tipo, uso e ocupação do solo. Esses dados são tratados e organizados, e em seguida com a utilização de um SIG são inseridos no modelo (Figura 9).

Depois de identificado os cursos d'água e os seus pontos de interseção, o modelo SWAT divide a área da bacia em várias sub-bacias, com intuito de detalhar a análise evitando um estudo superficial. Cada sub-bacia é organizada em diferentes categorias, como clima, tipo e uso do solo, alcance hidrológico, combinações de gestões, etc., ou seja, cada sub-bacia terá sua unidade de resposta particular ou URH's. As URH's são subdivisões de cada sub-bacia que possuem uma única combinação de uso do solo, tipo de solo e classe de rampa. São áreas onde os parâmetros são tratados de maneira concentrada, isto é, são utilizados valores médios (não há variação espacial na HRU).

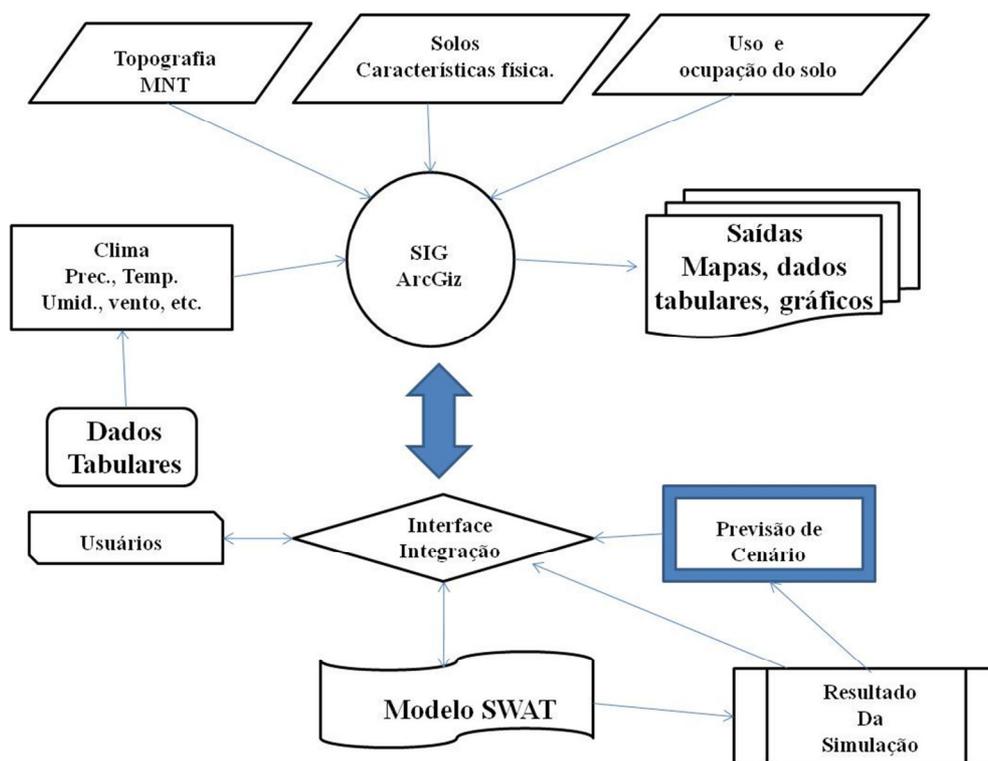


Figura 9: Processo de Funcionamento do Modelo SWAT (Fonte: adaptado de MACHADO, 2002).

As descrições a seguir constituem um resumo do corpo metodológico utilizado pelo SWAT e se fundamentam principalmente nos manuais elaborados por NEITSCH et al. (2005 b; 2005 c), e adaptado por NUNES (2013).

4.2.1 - Estrutura do SWAT.

O SWAT divide a simulação hidrológica em duas fases distintas:

- 1º Fase Terrestre: Nesta fase, o modelo processa os resultados em sete módulos: Clima, Hidrologia, Cobertura Vegetal/Crescimento de plantas, Erosão, Nutrientes, Pesticidas e Manejo. São descritos a seguir os módulos pertinentes ao escopo deste estudo.
- 2º Fase Canal: Nesta fase, o modelo abrange os fenômenos envolvidos na propagação do escoamento e comportamento dos sedimentos e nutrientes recebidos da fase terrestre, desde o percurso ao longo do curso d'água até a seção de controle.

Na 1ª fase, o ciclo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico (Equação 5):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - Et_i - P_i - QR_i) \quad (5)$$

Onde:

SW_t = É a quantidade final de água no solo (mm);

SW_0 = É a quantidade inicial de água no solo (mm);

t = É o tempo (dias);

R_i = É a precipitação (PRP) (mm);

Q_i = É o escoamento superficial (mm);

Et_i = É a evapotranspiração (mm);

P_i = É a percolação (mm); e,

QR_i = É o fluxo de retorno (é o escoamento de água no interfluxo, sobre a superfície do terreno, após emergir da superfície, ocorrida através da ascensão capilar) (mm).

a) Clima.

O SWAT requer dados diários de PRP, TMAX e TMM do ar, radiação solar (RS), VV e UR, que são fornecidos ao nível de sub-bacia. O SWAT possui um gerador climático³ capaz de estimar os valores diários a partir de médias mensais, tornando possível o preenchimento de possíveis falhas na série de dados. Um recurso disponível para o modelo e bastante útil em bacias de regiões montanhosas, envolve o conceito de bandas de elevação, ou seja, pode-se incorporar à simulação, a variação de T e PRP para até 10 faixas de altitude, e ele também permite manipular os dados de entrada para simular hipotéticas mudanças climáticas (NUNES, 2013).

b) Hidrologia.

³Algoritmos matemáticos que fazem cálculos para o modelo SWAT, gerando valores diários.

Os principais caminhos que a água simulada percorre no SWAT em cada HRU serão descritos, abaixo.

b.1) Escoamento Superficial.

O SWAT utiliza basicamente dois métodos para cálculo do escoamento superficial, o qual é efetuado para cada HRU: o primeiro constitui numa modificação do método “Curva Número” (metodologia utilizada para a determinação do escoamento superficial direto, que leva em consideração os diferentes tipos de ocupação do solo) (USDA (United States Department of Agriculture) - SCS (Soil Conservation Service), 1972) e o segundo é o método “Green & Ampt” (GREEN and AMPT, 1911). Por este método o escoamento superficial ocorrerá quando a taxa de aplicação de água no solo ultrapassar a taxa de infiltração. Para este estudo utilizar-se-á o método de Curva Número (CN), que é expresso pela seguinte (Equação 6):

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)} \quad (6)$$

Onde:

Q_s = É o escoamento acumulado ou excesso de chuva (mm);

R = É a precipitação diária (mm);

I_a = São as perdas iniciais, que incluem o armazenamento superficial, a interceptação e a infiltração (mm); e

S = É o parâmetro de retenção. O parâmetro de retenção é expresso pela (Equação 7):

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (7)$$

Onde:

CN = é a “curva número” para o dia, é dado em função da sub-bacia, permeabilidade, declividade, tipo e uso do solo e histórico de umidade do solo. A CN vai variar de forma não linear de 1 (para o murchamento) e 100 (para a saturação) (SOUSA, 2010).

O SWAT possui um recurso no qual se pode reduzir do escoamento superficial a perda por transmissão, caso que ocorre usualmente em bacias áridas ou semi-áridas nas quais existe a formação de canais efêmeros. Além do quê, nele há uma ferramenta chamada de “*SURLAG*”, que permite que se defina um coeficiente de atraso do escoamento superficial, usado para bacias que possuem um tempo de concentração maior que um dia (LUBITZ, 2009).

b.2) Evapotranspiração (Et).

A evaporação da água do solo e a transpiração das plantas estão relacionadas à Etp e ao índice de área foliar (IAF). O modelo SWAT oferece três métodos para o cálculo da Etp: Penman - Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley - Taylor (PRIESTLEY & TAYLOR, 1972) e Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1985).

Para o estudo utilizar-se-á o método de Penman-Monteith, pois requer um maior número de variáveis (RS, T, UR e VV), devendo ser ressaltado que o cálculo da Etp pelo método escolhido traz estimativas melhores quando são utilizados dados horários, pois médias diárias podem não refletir a real distribuição diurna da VV, UR e RS (LUBITZ, 2009). Este método foi adaptado por ALLEN et al. (1998) (no caso de estimativa diária, admitiu-se que a temperatura do solo (G) é variável até uma profundidade de 1 m, a velocidade do vento foi medida a 2 m de altura, sendo cerca de 75% da velocidade medida a 10 m de altura no posto meteorológico, a temperatura média foi obtida pela soma da temperatura máxima média com a temperatura mínima média dividido por 2, em °C, a umidade relativa foi obtida pela soma da umidade relativa máxima média com a umidade relativa mínima média dividida por 2, em %) (PEREIRA et al., 2002). Ele é expresso pela (Equação 8):

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot \left[\frac{(e_z^0 - e_z)}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (8)$$

Onde:

λE = É a densidade do fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$);

Δ = É a declividade da curva pressão-temperatura do vapor de saturação;

$\frac{de}{dT}$ = ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

H_{net} = É a radiação líquida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

ρ_{air} = É a densidade do ar (Kg m^{-3});

C_p = É o calor específico a pressão constante ($\text{MJ Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

e_z^0 = É a pressão do vapor de saturação do ar à altura Z ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

e_z = É a pressão do vapor do ar à altura Z (Kpa);

γ = É a constante psicrométrica ($0,062 \text{ Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

r_c = É a resistência do dossel vegetativo (s m^{-1}); e

r_a = É a resistência de difusão da camada de ar (s m^{-1}).

Para determinar a E_t real, primeiramente é removida toda água possível que está armazenada no dossel, e a partir daí, a demanda evaporativa remanescente é dividida entre a vegetação e o solo. Quando se tem demanda evaporativa para o solo, por “*default*”, o modelo faz distribuições entre as camadas⁴ de forma que 5% desta demanda sejam extraídas dos primeiros 10 mm do solo, e outros 95% do restante, sejam extraídas dos primeiros 100 mm do solo. Lubitz (2009) sugere que se utilize da ferramenta *ESCO* (é um coeficiente de compensação da evaporação do solo) do SWAT para casos em que se necessite extrair mais da demanda evaporativa de camadas mais profundas do solo. Portanto, neste estudo se utilizou esta ferramenta.

b.3) Infiltração.

Com o método de CN (que trabalha em tempo diário), usado para cálculo do escoamento superficial, não é possível modelar a infiltração de forma direta. Logo, com este método, assume-se que a água que infiltra é dada pela diferença entre a PRP e o escoamento superficial. Do total que infiltra, parte evapora ou é destinada ao metabolismo das plantas e a outra porção escoar lateralmente até alcançar o curso d

⁴Ao modelo SWAT pode ser aplicado até 10 camadas de solo, com uma profundidade máxima de até 3500 milímetros somando-se todas as camadas.

água. A água pode ainda percolar até uma camada mais profunda e recarregar o aquífero.

No SWAT o parâmetro que controla a quantidade de água disponível para as plantas é dado pela (Equação 9):

$$AWC = FC - WP \quad (9)$$

Onde:

AWC = É a capacidade de água disponível para as plantas (mm);

FC = É a quantidade de água relativa à capacidade de campo (para o SWAT é a quantidade de água encontrada quando o solo está totalmente úmido e persiste drenado por cerca de dois dias); e.

WP = É a quantidade de água no ponto de murchamento permanente.

Entenda-se como ponto de murchamento permanente, a quantidade de água encontrada quando as plantas murcham e não se recuperam mais. Isto é devido as suas folhas serem mantidas em umidades atmosféricas relativamente altas durante o período da noite, atingindo um murchamento irreversível, mesmo quando colocada em atmosfera saturada com vapor de água.

b.4) Percolação.

Quando se tem uma camada do solo em que a quantidade de água ultrapassa a capacidade de campo, ocorre a percolação. A percolação é estimada pela (Equação 10):

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right] \quad (10)$$

Onde:

$W_{perc,ly}$ = É a quantidade de água que percola para uma camada inferior em um determinado dia (mm);

$SW_{ly,excess}$ = É o volume drenável de água no solo em um determinado dia (mm);

Δt = É a extensão do passo de tempo (h); e,

TT_{perc} = É a duração da percolação (h).

b.5) Escoamento lateral.

Quando a água percola verticalmente e acha uma camada impermeável, ela se acumula, forma uma zona saturada, dando origem ao escoamento lateral. O modelo calcula isto através do armazenamento cinemático desenvolvido por SLOAN et al. (1983), através da seguinte (Equação 11):

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (11)$$

Onde:

Q_{lat} = É a descarga de água da rampa de saída (mm dia⁻¹);

$SW_{ly,excess}$ = É o volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área (mm);

K_{sat} = É a condutividade hidráulica saturada (mm h⁻¹);

slp = É a declividade da rampa (m m⁻¹);

ϕ_d = É a porosidade drenável da camada de solo (mm mm⁻¹); e,

L_{hill} = É o comprimento da rampa (m).

É possível promover um atraso para o escoamento lateral no caso de sub-bacias com tempos de concentração maiores que 1 dia. Para isso usa-se o parâmetro LAT_TTIME do SWAT, caso seja necessário.

b.6) Águas Subterrâneas.

Comumente se consideram águas subterrâneas, aquelas que estão em camadas saturadas, ou seja, camadas que estão sob uma pressão maior que a atmosférica. Para incorporá-las, o SWAT modela dois sistemas: o aquífero raso (*ars*) e o aquífero

profundo, sendo que o aquífero raso contribui com escoamento para o canal, e a água que chega até o aquífero profundo é eliminada do sistema. O *ars* é dado pela (Equação 12):

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchr,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (12)$$

Onde:

$aq_{sh,i}$ = É a quantidade de água armazenada no *ars* no dia *i* (mm);

$aq_{sh,i-1}$ = É a quantidade de água armazenada no *ars* no dia *i-1* (mm);

$w_{rchr,sh}$ = É a quantidade de recarga entrando no *ars* no dia *i* (mm);

Q_{gw} = É o escoamento de base ao canal no dia *i* (mm);

w_{revap} = É a quantidade de água indo para a zona não saturada do solo em resposta às deficiências de água no dia *i* (mm); e,

$w_{pump,sh}$ = É a quantidade de água retirada do *ars* por bombeamento no dia *i* (mm).

Caso se queira simular um atraso que possa ocorrer entre o momento em que a água sai do perfil do solo e entra no *ars* (devido às propriedades hidráulicas da formação geológica), a ferramenta recomendável para incorporar este parâmetro é o *GW_DELAY*. Mas ressalta-se que este parâmetro é apenas estimado, pois o modelo não o mede diretamente. Para se determinar a quantidade de recarga que será encaminhada ao aquífero profundo (e como foi dito anteriormente não retornar ao sistema) recomenda-se o *RCHRG_DP*.

O parâmetro “*GWQMN*” é utilizado quando se quer determinar um limiar pré-estabelecido para o cálculo do escoamento de base, pois só é permitido alcançar o canal se a água armazenada no aquífero raso exceder este limiar definido anteriormente. Cumprindo-se este passo, o escoamento de base é calculado pela (Equação 13):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t + w_{rchr,sh} \cdot (1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t))](13)$$

Onde:

$Q_{gw,i}$ = É o escoamento de base ao canal no dia i (mm);

$Q_{gw,i-1}$ = É o escoamento de base ao canal no dia $i-1$ (mm);

α_{gw} = É a constante de recessão do escoamento de base;

Δt = É o passo de tempo (1 dia); e,

$w_{rchr,sh}$ = É a quantidade de recarga entrando no ars no dia i (mm).

O SWAT identifica como $ALPHA_BF$, o parâmetro α_{gw} , podendo ser obtido de forma mais precisa através dos dados de vazão, (Equação 14):

$$\alpha_{gw} = \frac{2,3}{BFD} \quad (14)$$

Onde:

BFD = É o número de dias de escoamento de base para a bacia.

A água que alcançou o *ars* pode retornar à zona não saturada por capilaridade ou também através da ação de raízes profundas de algumas plantas. Este fenômeno recebe o nome de “*revap*” no SWAT. Desta forma deve-se definir o limite que a água não deve ultrapassar no *ars* para que ocorra este fenômeno, através da ferramenta “*REVAP_MN*”. Ocorrendo isto, o modelo remove esta parte do cálculo de água subterrânea, através da (Equação 15):

$$w_{revap, mx} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (15)$$

Onde:

$w_{revap, mx}$ = É a máxima quantidade de água que está sendo movida para a zona não saturada em resposta à deficiência hídrica (mm);

β_{rev} = É o coeficiente *revap* (GW_REVAP); e,

E_0 = É a E_{tp} para o dia (mm).

Na 2ª fase, as perdas podem ocorrer por evaporação, transmissão através do leito ou pela remoção de água para uso humano ou agrícola e as entradas são propiciadas através da PRP direta sobre o curso d'água e por descargas pontuais. Para este estudo consideraram-se desprezíveis as contribuições por descargas pontuais e as remoções para quaisquer usos.

O SWAT utiliza dois métodos para simular a propagação do escoamento. Um método que usa um coeficiente de armazenamento variável, desenvolvido por WILLIAMS (1969) e o método aqui utilizado que é o de “Muskingum”, desenvolvido por McCARTHY (1939), que modela o volume ao longo do canal através da combinação dos armazenamentos. O volume total é dado pela (Equação 16):

$$V_{stored} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out}) \quad (16)$$

Onde:

V_{stored} = É o volume de armazenamento (m^3);

q_{in} = É a taxa de entrada do escoamento ($m^3 s^{-1}$);

q_{out} = É a taxa de descarga ($m^3 s^{-1}$);

K = É a constante de armazenamento para o canal (s); e,

X = É o fator de ponderação, que pode variar entre 0 e 0,5, sendo comum o uso de 0,2 para rios.

O valor de K é calculado pela (Equação 17):

$$K = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{c_k} \quad (17)$$

L_{ch} = É o comprimento do canal (km); e,

c_k = É a celeridade ($m s^{-1}$), corresponde à velocidade que propaga minha vazão.

É definida pela (Equação 18):

$$c_k = \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \right) \quad (18)$$

Onde:

R_{ch} = É o raio hidráulico para uma determinada profundidade de escoamento (m);

slp_{ch} = A declividade ao longo do canal ($m\ m^{-1}$); e,

n = É o coeficiente de rugosidade de Manning (parâmetro que se utiliza de métodos estatísticos para definir a rugosidade de um rio) para o canal (TUCCI, 2005).

4.2.2 – Sensibilidade dos parâmetros

A análise de sensibilidade é o estudo de como um modelo responde, quantitativamente e qualitativamente, a diferentes variações nas informações que o alimenta, permitindo a validação da relação de dependência entre os resultados simulados. Possuindo como objetivo principal da análise investigar como o modelo responde a variação nos valores de seus parâmetros, permitindo identificar aqueles, ao qual o modelo não é tão sensível (SILVA, 2010).

Arnold et al. (1998) e Machado (2002) identificaram que o modelo SWAT é sensível a mais de 100 variáveis relacionadas à vegetação, manejo da terra, solos, clima, aquífero, canal e reservatório.

Em geral, as variáveis que apresentam maior sensibilidade estão descritas no manual do modelo SWAT com suas respectivas definições, como segue: o ALPHA_BF, o CANMX, o CN2, o ESCO, o GW_DELAY, o GWQMN, o GW_REVAP, o LAT_TIME, o RCHRG_DP, o REVAP_MN, o SLSUBBASIN, o SOL_K e o SURLAG, onde;

ALPHA_BF: Fator do fluxo de base, ou constante de recessão. Define-se como a taxa, na qual a água subterrânea retorna ao rio (dias);

CAN_MX: Máximo armazenamento do dossel (mm);

CN2: Curva número (os valores de CN são diferentes para cada classe de uso e ocupação do solo);

ESCO: Fator de compensação de evaporação do solo;

GW_DELAY: Tempo de atraso de águas subterrâneas (dias);

GWQMN: Profundidade de água subterrânea requerida para que o retorno do fluxo ocorra (mm);

GW_REVAP: Variável que controla a quantidade de água que se move do aquífero para a zona de raízes;

LAT_TIME: Tempo de retorno do fluxo lateral (dias);

RCHRG_DP: Fração de percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo;

REVAP_MN: Profundidade de água no aquífero para que ocorra percolação (mm);

SLSUBBASIN: Comprimento de rampa médio para a sub-bacia, adotado como sendo o mesmo valor utilizado para o comprimento de rampa do escoamento lateral (m);

SOL_K: Condutividade hidráulica saturada (mm/h);

SURLAG: Coeficiente de atraso do escoamento superficial.

O SWAT apresenta uma ferramenta de análise automática de sensibilidade dos parâmetros, combinando os métodos:

1) “*One-factor-At-a-Time*” (OAT) que promove a alteração de apenas um parâmetro a cada simulação. Desta forma as mudanças inseridas são pertinentes unicamente ao parâmetro alterado.

2) O método “*LatinHypercube*” (LH) que se baseia em simulação de Monte-Carlo (esta simulação tipicamente envolve a geração de observações com alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse), que elimina a necessidade de inúmeras simulações requeridas através de um método de amostragem estratificada e que permite uma estimativa robusta das estatísticas de saída. Tais análises de sensibilidade dos parâmetros são fundamentais para que se saiba onde focar os esforços para a coleta de dados.

4.2.3 – Avaliação de eficiência.

A fase de verificação do modelo SWAT é fundamental para a avaliação do desempenho da simulação, e conseqüentemente para o uso operacional na gestão dos recursos hídricos.

A avaliação foi efetuada comparando os valores de vazões simulados, com os valores de vazões observados, nos dias julianos 112, 113, 114, 115 e 116 (22, 23, 24, 25 e 26 de abril) de 2014.

O desempenho do modelo foi obtido a partir dos valores observados e simulados, calculados com base nos seguintes métodos estatísticos: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (Nash and Sutcliffe, 1970), o desvio padrão dos erros (Dv), o erro médio (EM) e o coeficiente de massa residual (CMR).

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe, 1970) – COE pode variar desde menos infinito até 1, sendo 1 o indicativo de simulação perfeita de evento simulado. Além disso, o COE representa a proporção da variância explicada entre os eventos observados e calculados (Equação 19).

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ab} - E_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{ab} - E_m)^2} \quad (19)$$

Onde:

COE = Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe,

Eob = Evento observado,

Ecal = Evento calculado,

Em = Média do evento observado no período e,

N = Número de eventos.

Para o desvio padrão do estudo analisado, quanto menor o seu valor, mais perfeito é o ajuste do evento simulado em relação ao observado. Quanto mais próximo de 0,00% o Dv, mais perfeita é a simulação. O desvio padrão, em percentagem, é dado pela (Equação 20):

$$Dv = \frac{E_{ab} - E_{cal}}{E_{ab}} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

Dv = Desvio padrão,

Eob = Evento observado para o período analisado e,

Ecal = Evento simulado para o mesmo período.

O erro médio do evento analisado é a diferença quantitativa entre o evento simulado e o observado e é calculado a partir da (Equação 21):

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{E_{cal} - E_{ob}}{n} \quad (21)$$

Onde:

EM = Erro médio,

Ecal = Evento simulado,

Eob = Evento observado para o período analisado e n é o número de eventos simulados.

O coeficiente de massa residual indica o quanto o modelo superestima (valores negativos) ou subestima (valores positivos) as saídas, e é dado pela (Equação 22):

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ob} - \sum_{i=1}^n E_{cal}}{\sum_{i=1}^n E_{ob}} \quad (22)$$

Onde:

CMR = Coeficiente de massa residual,

Eob = Evento observado para o período analisado,

Ecal = Evento simulado e n é o número de eventos.

4.2.4 – Simulações hidrológicas.

A simulação hidrológica foi iniciada em janeiro de 2008 e prosseguiu até abril de 2014, com o objetivo de verificar a melhor eficiência e aplicabilidade do modelo SWAT em assimilar dados extraídos de estações automáticas, a fim de quantificar a vazão na sub-bacia do rio Arapepó com melhor previsibilidade.

Ainda que conhecida às incertezas do modelo, a partir das simulações apresentadas, fez-se necessário a inserção de dados no modelo coletados diretamente da área de estudo (tipo e uso do solo, qualidade de água, textura, etc.), com a finalidade de guiá-lo de forma a aproximá-lo da situação real.

a) Experimento I – Calibração com condições iniciais.

O primeiro experimento foi aplicado a partir da utilização da opção de “default” do modelo, onde os parâmetros de sensibilidade não sofreram alterações em seus valores. Este experimento serviu de base para os demais, devido à sua simplicidade e eficácia em representar as condições iniciais da região de estudo. Em seguida, foi realizada a análise de sensibilidade automática implementada pelo SWAT, que utiliza uma combinação dos métodos One-factor-At-a-Time (OAT) e LatinHypercube (LH). Os limites de cada parâmetro foram mantidos (os de “default”) e a hierarquia dos parâmetros da sensibilidade foi apresentada posteriormente (SOUSA, 2010).

b) Experimento II – Avaliação do modelo.

O segundo experimento ocorreu após a análise de sensibilidade automática do modelo. A partir deste ponto, os parâmetros de ajuste do modelo não foram mais modificados, e assim sendo, foi procedido à assimilação dos dados de vazão estimada pelo processo numérico de cálculo de medição convencional in loco pelo equipamento molinete.

Após o segundo experimento, verificou-se o quanto o modelo foi capaz de reproduzir a vazão observada utilizando as ferramentas estatísticas descritas anteriormente. O principal índice de avaliação foi o coeficiente de eficiência (COE), que nesse estudo foi considerado como valor de boa eficiência (0,50), ou seja, o valor utilizado em outros estudos (LUBITZ, 2009; SOUSA, 2010 e NUNES, 2013).

c) Experimento III – Geração do balanço hidrológico da sub-bacia.

Após a comprovação da eficiência do modelo SWAT iniciou-se a determinação do ciclo hidrológico da sub-bacia. Serão apresentados os valores mensais de cada componente para auxiliar na gestão dos recursos hídricos na sub-bacia do rio Arapepó.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 - Análise da Sub-bacia do rio Arapepó.

5.1.1 - Delimitação Automática das Sub-bacias.

A delimitação automática (inserção dos shapefiles de MNT, Uso e Ocupação do solo e Tipos de Solos) do modelo gerou uma sub-bacia com área de 7,68 Km², valor igual ao gerado manualmente pelo SIG. Foram adicionados manualmente dois pontos de saída, um na sub-bacia 2 e o outro na sub-bacia 3, gerando desta forma três sub-bacias, para que coincidisse com os pontos de medição da velocidade da água. O ponto de saída na sub-bacia 3 foi utilizado para a comparação da vazão simulada pelo modelo, devido neste ponto a sub-bacia não sofrer efeito de maré (Figura 10).

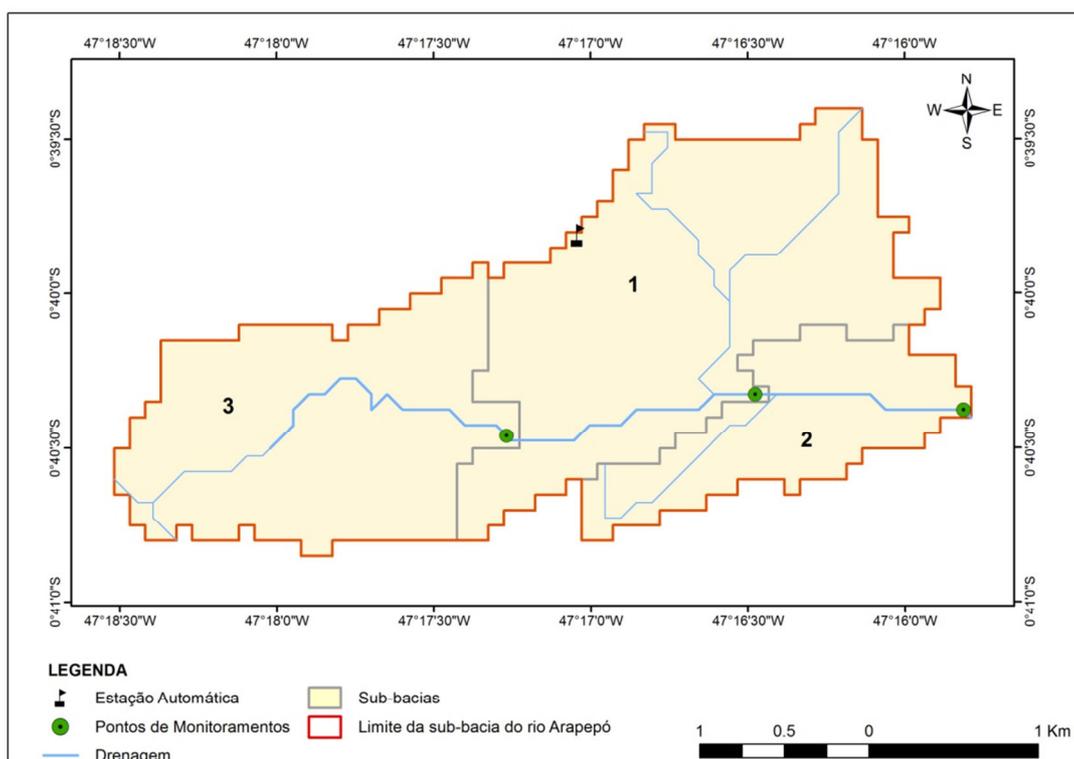


Figura 10: Sub-bacia do rio Arapepó gerada automaticamente pelo SWAT.

A sub-bacia 3 gerada pelo modelo SWAT e que foi utilizada para a comparação com a vazão medida, representa 32,89% do total da sub-bacia do rio Arapepó. Já a sub-

baía com maior área foi a de número 1, com 3,80 Km², representando aproximadamente 49,56% do total da sub-bacia do rio Arapepó e a menor sub-bacia gerada foi a de número 2, com 1,35 Km², representando apenas 17,55%. As sub-bacias 1 e 3 representam aproximadamente cerca de 83% do total da sub-bacia do rio Arapepó (Tabela 3).

Tabela 3: Representatividade das sub-bacias geradas na bacia do rio Arapepó.

Sub-bacia	Área (Km²)	Área (%)
1	3,80	49,56
2	1,35	17,55
3	2,53	32,89
Total	7,68	100

5.1.2 - Classes de Declividades (Slope).

O modelo SWAT permite usar até cinco classes de declividades. A utilização de um menor número de classes tem o propósito de acelerar os processos computacionais na bacia (LUBITZ, 2009), mas para este estudo utilizaram-se duas classes de declividades com a finalidade de verificar a variação de declividade na sub-bacia do rio Arapepó. Observou-se que o mapa de declividades está coerente quando comparado ao mapa de MNT, pois a bacia possui maiores declividades nas extremidades e na parte oeste da sub-bacia do rio Arapepó, enquanto que as de menores declividades estão localizadas na parte central e leste da sub-bacia (Figura 11).

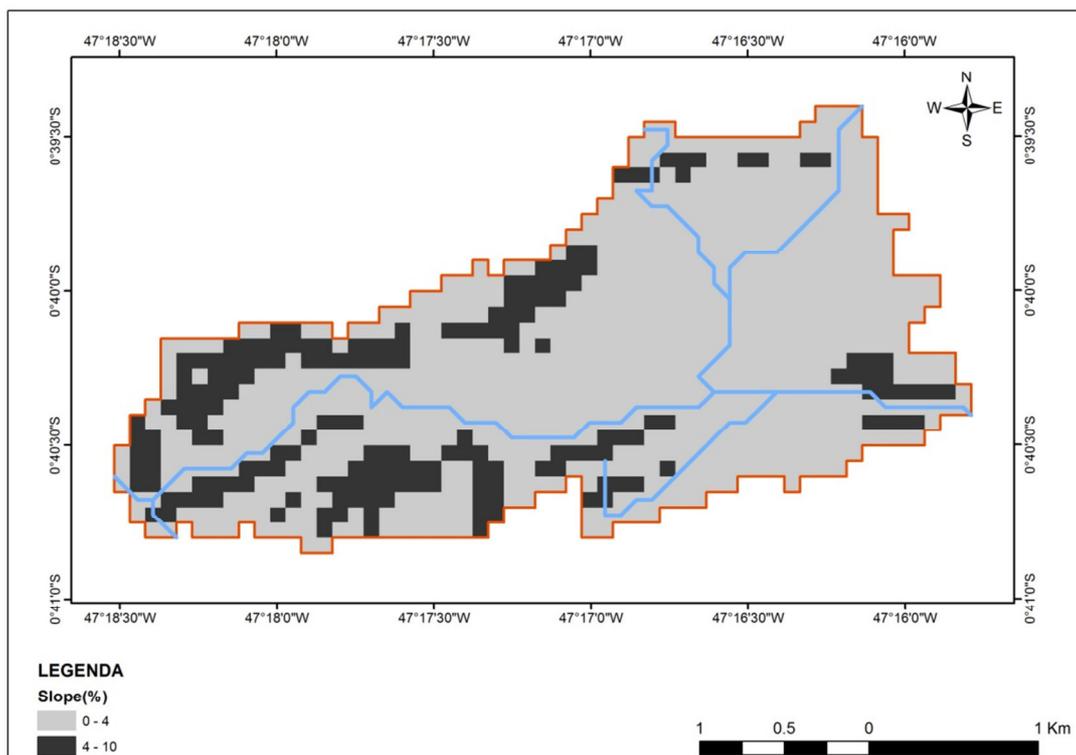


Figura 11: Mapa de Declividade (%) da sub-bacia do rio Arapepó.

A sub-bacia do rio Arapepó não possui grandes diferenças de níveis topográficos, com variações entre 0 e 10%.As áreas de menores declividades (0% – 4%) representam aproximadamente 79,8% do total, e as áreas de maiores declividades (4% - 10%), representam aproximadamente 20,2% de toda a sub-bacia do rio Arapepó (Tabela 4).

Tabela 4: Representatividade das classes de declividade da sub-bacia do rio Arapepó.

Declividade	Área (Km ²)	Área (%)
0 - 4	6,13	79,80
4 - 10	1,55	20.20
Total	7,68	100

5.1.3 - Definição das URHs.

Para a criação das unidades de respostas hidrológicas (URH), foram utilizadas as classes de dominância do modelo, já que o usuário pode ordenar um limiar para a criação das URHs em decorrência dos valores dominantes na sub-bacia. Desta forma, foram desconsideradas aquelas classes que apresentaram pouca representatividade na sub-bacia do rio Arapepó. As análises das URHs permitem determinar a posição dominante de cada categoria de uso, tipo de solo e classes de declividade dentro de cada sub-bacia, gerada pelo modelo dentro da sub-bacia de área total.

A subdivisão da sub-bacia em áreas com solos únicos e combinações de solos, permite que o modelo transmita as diferenças de evapotranspiração e de outras condições hidrológicas de terrenos para diferentes usos e tipos de solo. Isso aumenta a precisão das simulações do balanço de água na bacia, fornecendo uma melhor descrição física do balanço hídrico (SOUSA, 2010). Como resultados foram criados 3 URH's com usos de solo, tipos de solo e classes de declividades dominantes na sub-bacia do rio Arapepó. A URH utilizada neste estudo foi a de número 3, que é composta predominantemente por solo do tipo Latossolo Amarelo, utilizado na agricultura e apresenta uma declividade variando de 0 a 4 % (Tabela 5).

Tabela 5: Representatividade das URH geradas pelo SWAT.

URH	TIPO DE SOLO	USO DO SOLO	SLOPE
1	Gleissolo	Floresta	0 - 4
2	Gleissolo	Floresta	0 - 4
3	Latossolo Amarelo	Agricultura	0 - 4

5.1.4 – Degradação Ambiental

Na vila Cuiarana, onde está localizada a bacia hidrográfica em estudo, existem várias problemáticas de risco ambiental, a principal é o aumento do resíduo sólido. Provocados pelo crescimento populacional, a falta de conscientização dos moradores à

falta de coleta adequada, os resíduos são jogados em locais inapropriados, contaminando assim, o solo e os lençóis freáticos, que além do prejuízo ambiental, influência também no econômico e no social através dos danos a principal fonte de renda da vila, que são além do turismo, a pesca artesanal, a agricultura de subsistência como o arroz, o milho, o feijão, a mandioca e espécies frutíferas, bem como na saúde da população.

Estudos como o de Nunes (2012), que aborda a gestão de resíduos sólidos urbanos na Vila de Cuiarana no município de Salinópolis, explica os riscos socioambientais, causados pelo aumento da produção e falta de tratamento dos resíduos sólidos, implicando em impactos ambientais significativos, em que ele afirma que é necessária uma lei que trate da política dos resíduos sólidos, para que seja combatida a degradação que esse município vem sofrendo, nos diversos aspectos: flora, água e ar.

Outro impacto verificado ao longo do rio Arapepó é que em alguns pontos dos afluentes a água foi represada, transformando em piscinas naturais, provocando a modificação da morfologia do afluente e também alteração nas suas margens, ficando assoreadas, descaracterizando assim, a configuração natural do rio.

Salomão (2013) em seu estudo sobre efeitos antrópicos do represamento de um riacho do Cerrado, mostrou em seus resultados que o represamento de um afluente, rio, riacho, entre outros, podem ocasionar graves consequências ecológicas, bem como modificações nas variáveis ambientais, como temperatura, turbidez e velocidade da água, etc.

5.1.5 - Modelagem Hidrológica.

O modelo SWAT foi aplicado à sub-bacia do rio Arapepó, sendo utilizado apenas o módulo de propagação de água, pois o principal resultado foi à quantificação do balanço hídrico na sub-bacia e a avaliação do modelo. É apresentado e discutido, os resultados do experimento realizado para a sub-bacia 3 (ponto de monitoramento do estudo), obtida na sub-bacia do rio Arapepó, conforme a metodologia apresentada, realizando a comparação das vazões simuladas com aquelas medidas e por último a geração dos componentes do ciclo hidrológico.

5.1.5.1 - Experimento I: Calibração com Condições Iniciais.

Na simulação inicial, os dados de clima e as características físicas do solo que foram introduzidos no banco de dados do modelo serviram de condições iniciais para que o modelo se adequasse às características físicas da área de estudo. Os demais parâmetros usados, considerados de base do modelo, foram os de “*default*”. A primeira simulação das vazões diárias e mensais, corresponderam ao período de jan/2008 a Abril/2014, para a sub-bacia 3. Em geral, o modelo SWAT foi capaz de reproduzir a vazão simulada utilizando as condições de base impostas pelo modelo.

Sub-bacia 3.

Na sub-bacia 3 em estudo, pode-se perceber que o modelo SWAT se comportou de forma adequada as condições climáticas da região, ficando bastante perceptível que ocorreu vazão, apenas quando houve precipitação, os picos de vazões coincidem com os de precipitação, tanto em escala diária, quanto em escala mensal, pois no período seco o modelo simula a vazão com tendência a zero ou a valores próximos a zero.

- Escala Diária

Diariamente percebeu-se que o modelo adequou-se a sazonalidade do período chuvoso, pois no dia 14 de fevereiro de 2010, dia em que ocorreu uma forte chuva com 110,3 mm gerou uma vazão de $2,72 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mostrando que o modelo é totalmente dependente do mecanismo de regulação do ciclo hidrológico (a chuva). Em períodos em que a precipitação tem valores menores que 10 mm, a vazão tende a zero, como ocorre nos primeiros dias de cada ano, fato este verificado na sub-bacia do rio Arapepó (Figura 12).

E como era esperado o modelo se mostrou bem sazonalmente, ou seja, no período chuvoso apresentou altos valores de vazão simulada e no período seco a vazão simulada diminuiu, tendendo a zero. Alguns picos de vazão precisam ser ajustados em alguns anos (2011, 2012 e 2013), principalmente no período seco em que a vazão deveria apresentar baixo ou nenhum valor, fato este que pode está relacionado pelo modelo não armazenar a água da chuva, gerando altos valores para o período seco.

Desta forma o modelo precisa armazenar água, principalmente nos períodos secos, para ser liberada no período chuvoso (Figura 12).

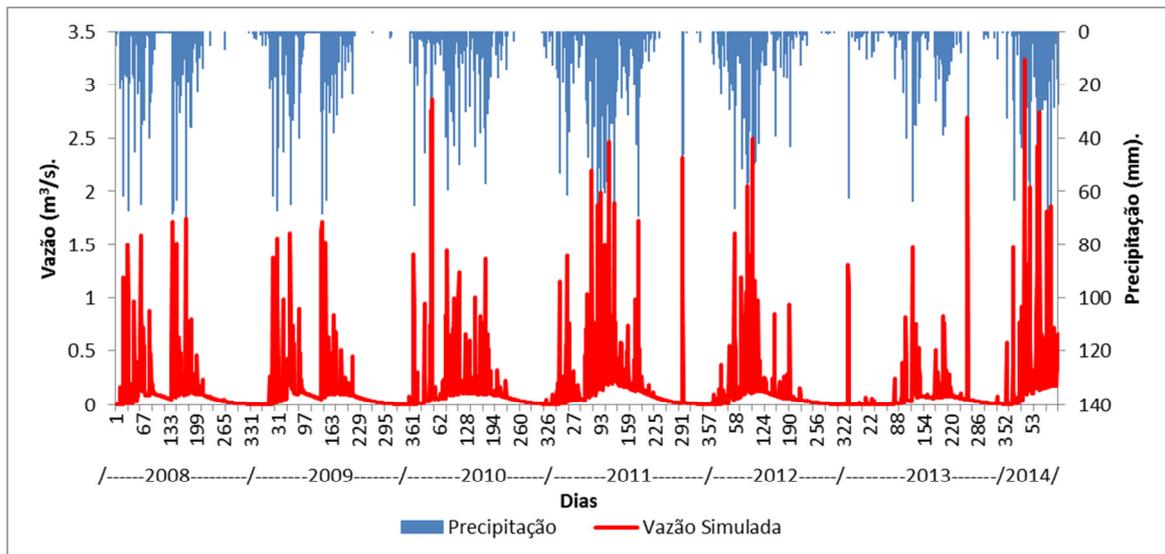


Figura 12: Vazão diária simulada pelo modelo SWAT com a precipitação para o período de janeiro de 2008 a abril de 2014.

- Escala Mensal

Não muito diferente da análise diária, já era esperado que o modelo identificasse bem a sazonalidade, tanto no início, quanto no fim de cada ano, a vazão chegando ao valor zero, isso ocorre devido à sub-bacia do rio Arapepó ser parte intermitente. É possível perceber que os picos de precipitação coincidem com os de vazão, ou seja, quanto maior a precipitação, maior será a vazão e vice-versa (Figura 13).

A avaliação dos dados em escala mensal percebeu-se que o mês em que ocorreu o maior pico de precipitação e vazão registrada pelo modelo SWAT foi no mês de abril de 2011, onde ocorreram 795 mm e $0,596 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Em períodos em que a precipitação tem valores menores que 10 mm, a vazão tende a zero (característico de rios intermitentes), pois a água que chega da precipitação esta é armazenada e utilizada em outros processos hidrológicos na bacia (Quantidade de água no solo (SW), Evapotranspiração (Et) e etc.), conforme é observado nos primeiros meses de cada ano. Assim como na vazão diária, é preciso ajustar alguns picos de vazão (2012 e 2013), para o período chuvoso, pois o modelo está liberando a água no período seco não armazenando no solo para libera - lá no período chuvoso destes anos (Figura 13).

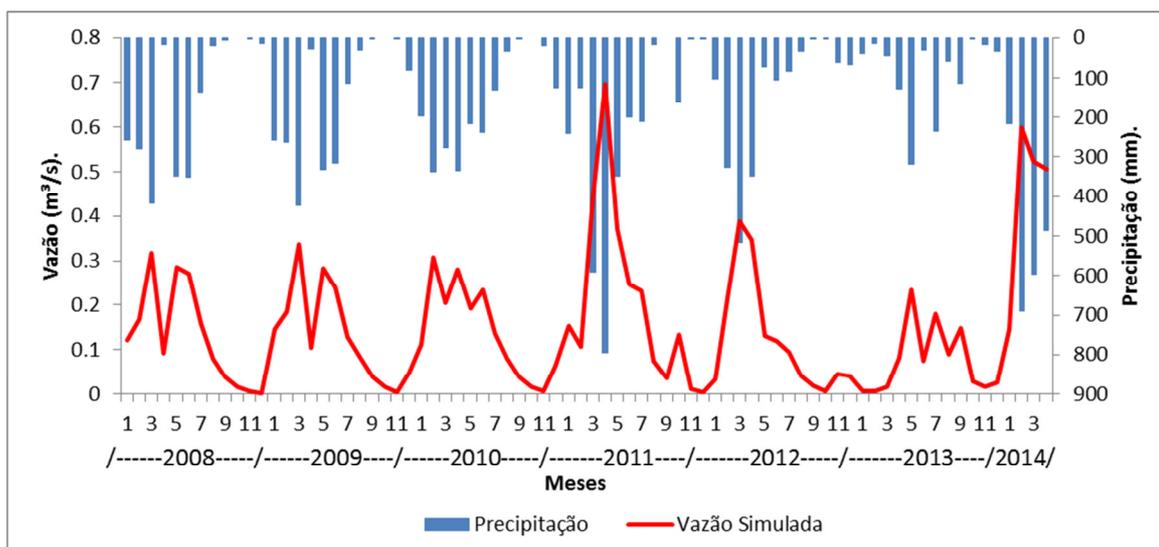


Figura 13: Vazão mensal simulada para o modelo SWAT com a precipitação, para o período de janeiro de 2008 a abril de 2014.

a) Análise de Sensibilidade.

Após a realização do primeiro experimento, foi elaborada a análise de sensibilidade automática incorporada ao SWAT, identificando-se os parâmetros que o modelo analisa como sendo mais sensíveis na sub-bacia do rio Arapepó, em relação à vazão. Dos 26 parâmetros identificados destacam-se:

- ALPHA_BF – Constante de recessão do fluxo de retorno (é sensível ao escoamento de base e recessão da curva);
- BIOMIX – A eficiência de mistura biológica;
- BLAI – Máximo índice de área foliar potencial;
- CANMX – Armazenamento máximo no dossel (mm);
- CH_K2 – Condutividade hidráulica efetiva em um canal principal em uma aluvião (depósito de sedimentos) (mm/hr);
- CH_N2 – Valor máximo de “n” para o principal canal desejado;
- CN2 – Curva número inicial para condição de mistura II é sensível ao escoamento superficial;
- EPCO – Fator de compensação de absorção pelas plantas;
- ESCO – Fator de compensação de evaporação do solo;
- GW_DELAY – Tempo de atraso de águas subterrâneas (dia);

- GW_REVAP – Coeficiente que controla a taxa de transferência de água do aquífero raso para a zona de raízes;
- GWQMN – Nível limite de água no aquífero raso para o fluxo de base (mm);
- REVAPMN – Profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer revap (mm) (é sensível a recessão da curva).

Esta análise de sensibilidades das variáveis do modelo SWAT determina quais parâmetros que mais influenciaram na simulação inicial e que podem ser utilizados como ponto de partida para a calibração do modelo, com o intuito de diminuir possíveis erros.

Os valores negativos significam que o parâmetro pode variar de x por cento a menos do valor inicial, para o parâmetro GWQMN, por exemplo, os limites estabelecidos indicam que o limite entre a profundidade de água no aquífero raso e a superfície pode oscilar em 1000 mm a mais ou a menos do valor atual (Tabela 6). De acordo com esses parâmetros foi possível identificar, em que tipo de uso, solo, declividade, HRU e sub-bacias, este parâmetro pode variar (Tabela 6).

Tabela 6: Rank e limites dos parâmetros obtidos com a análise de sensibilidade do modelo SWAT.

Rank	Parâmetros (Siglas)	Limite Inferior	Limite Superior
1	ALPHA_BF	0	1
2	BIOMIX	0	1
3	BLAI	0	1
4	CANMX	0	10
5	CH_K2	0	150
6	CH_N2	0	1
7	CN2	-25	25
8	EPCO	0	1
9	ESCO	0	1
10	GW_DELAY	-10	10
11	GW_REVAP	-0.036	0.036
12	GWQMN	-1000	1000
13	REVAPMN	0	500
14	SFTMP	0	5
15	SLOPE	-25%	25%
16	SLSUBBSN	-25	25
17	SMFMN	0	10
18	SMFMX	0	10
19	SMTMP	-25	25
20	SOL_ALB	-25	25
21	SOL_AWC	-25	25
22	SOL_K	-25	25
23	SOL_Z	-25%	25%
24	SURLAG	0	10
25	TIMP	0	1
26	TLAPS	0	50

5.1.5.2 - Experimento II - Avaliação do Modelo.

Neste experimento verificou-se o quanto o modelo SWAT foi capaz em assimilar as informações extraídas das imagens do uso do solo, dados climáticos de

estações de superfície para o prognóstico da vazão na sub-bacia do rio Arapepó. O melhor desempenho do modelo SWAT consistirá na obtenção do menor erro entre os valores simulados e os observados da vazão. Por fim, será efetuada a avaliação de eficiência deste experimento a fim de comparar o modelo para a sub-bacia do rio Arapepó.

No geral, o modelo respondeu quantitativamente os totais de vazão e qualitativamente a vazão observada na sub-bacia 3 do rio Arapepó. O modelo se comportou bem, pois acompanhou a sazonalidade da vazão, o pico e as recessões do período estudado. Ele subestimou o pico de vazão no dia 116 ($0,40 \text{ m}^3/\text{s}$) em relação ao observado ($0,60 \text{ m}^3/\text{s}$), mas pode-se observar que no dia 116 foi um dia de chuva intensa na região em que a sub-bacia está inserida, portanto, o modelo conseguiu acompanhar a sazonalidade deste evento. Assim como ocorreu nos dias 112 e 113. No dia 114 o evento foi simulado perfeitamente, cuja vazão tanto simulada, quanto a observada foi de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$. Para o dia 115 o modelo superestimou ($0,17 \text{ m}^3/\text{s}$), enquanto o que o valor observado foi de $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 14).

Nesse sentido, percebe-se que o modelo SWAT acompanhou a sazonalidade da vazão média nesta sub-bacia, mostrando também a eficiência em simular este evento. Em relação ao quantitativo o modelo respondeu a 81% do total observado, tendo uma subestimativa de 19% no total de vazão, em alguns dias (112, 113 e 116). Em comparação com a simulação inicial o modelo mostrou boa eficiência qualitativa e quantitativa (Figura 14).

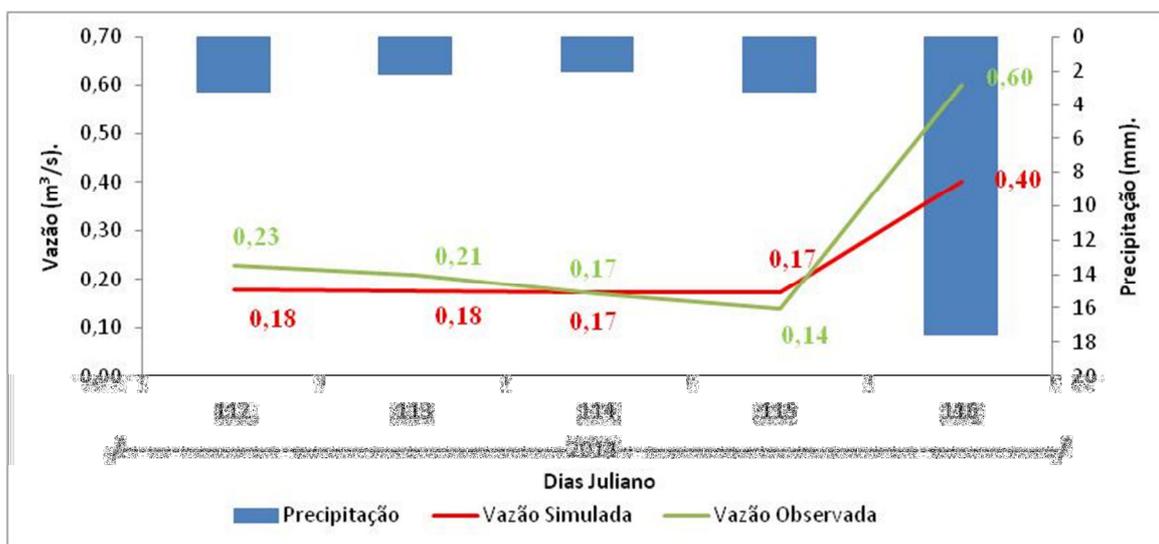


Figura 14: Comparação entre as vazões diárias simuladas e observadas com a precipitação, para avaliação do modelo, para a sub-bacia 3 do rio Arapepó.

a) Avaliação de Eficiência do Modelo.

A avaliação do modelo para os valores diários obteve bons resultados, um COE de 0,68, mostrando que o modelo teve uma boa eficiência na validação, indicando que ele está validado; um Dv entre 18,68 a 0%, destacando que o ajuste do evento simulado para a sub-bacia 3, foi aceitável, quando comparado com outros estudos (WHITE e INDRAJEET, 2005; SOUSA, 2010; NUNES, 2013). O CMR igual a 0,2 aponta que o modelo está subestimando a vazão observada e o EM, que foi de -0,1 m³/s, assinalam a subestimativa de alguns valores simulados, com valores quantitativos do total um pouco menores do que realmente são observados para a sub-bacia 3. Em geral pode-se comprovar a eficiência do modelo e dizer que o modelo está apto para ser utilizado na sub-bacia do rio Arapepó (tabela 7).

Tabela 7: Avaliação da eficiência do modelo.

Avaliação (Exp. II)	
Sub-bacia 3	
COE	0,68
Dv	18,68
CMR	0,2
EM	-0,1

Em síntese, os resultados obtidos comparados com outros descritos na literatura, são coerentes e aceitáveis, sendo este o segundo trabalho com o modelo SWAT aplicado em uma bacia no estado do Pará, em que o estudo pioneiro foi o de Nunes (2013) que aplicou o modelo SWAT na bacia do rio Capim no estado do Pará, neste trabalho mostrou um coeficiente de eficiência do modelo bem próxima deste estudo com valores de COE de 0,65 e 0,59.

O modelo SWAT já foi aplicado em várias partes do mundo, Nunes (2013) destaca em seu estudo: i) o trabalho de Van Liewet al. (2003), que aplicaram o modelo SWAT para uma bacia no sudoeste do estado de Oklahoma nos Estados Unidos em períodos distintos e evidenciaram valores também distintos para cada período (sendo

que para o período seco o COE ficou em 0,65 e no período chuvoso foi de 0,45); ii) Whitee Indrajeet (2005) validaram o modelo para o noroeste do estado norte-americano do Arkansas para os anos de 2001 e 2002. Seus resultados mensais mostraram um COE de 0,74 a 0,87 para uma bacia experimental, ou seja, bem monitorada por diversas estações automáticas e fluviométricas.

Sousa (2010) aplicou o modelo à sub-bacia do Rio Lajeado, no estado de Tocantins, e obteve os seguintes resultados na escala mensal, com COE de 0,69, e mostrou ainda que se utilizando a estimativa dos fluxos de calor à superfície a partir de imagens orbitais (através dos modelos SEBAL/METRIC) e aplicando-se estas estimativas, no modelo hidrológico SWAT, há melhoras nos resultados mensais, elevando-se seu COE para 0,77 na simulação mensal.

Portanto, é interessante comentar que os resultados obtidos estão próximos aos encontrados pelos autores citados anteriormente e que, embora as características gerais dos resultados obtidos neste trabalho sejam comuns a outros casos analisados na literatura, existem singularidades inerentes a cada caso.

5.1.5.3 - Experimento III: Componentes do Ciclo Hidrológico.

Depois que se verificou o quão hábil o modelo SWAT foi em assimilar as informações, serão apresentados os valores mensais dos componentes do ciclo hidrológico. Em geral o modelo simulou os componentes do ciclo hidrológicos para a sub-bacia 3, mostrando que ele conseguiu captar a sazonalidade da região e que algumas variáveis foram decisivas para eficiência do mesmo.

Para a sub-bacia 3, os componentes do ciclo hidrológico se mostram coerentes (Tabela 8).

- A PRP evidência o período chuvoso, que vai de janeiro a abril, e o período seco, que vai de agosto a novembro, como foi verificado nas análises da estação de Salinópolis/PA e Cuiarana/PA no início do estudo. O mês com maior PRP foi março, com 408,77 mm, e o mês mais seco foi novembro, com 17,25 mm. Possuindo um total acumulado mensal de 1976,43 mm (Tabela 8).

- O mês que teve maior Et para a sub-bacia, foi maio (21,05 mm), e o mês com o menor valor novembro (11,13 mm). A Et média mensal foi de 16,29 mm (representando 9,89 % da PRP) (Tabela 8).

- A quantidade de água no solo (SW) (557,71 mm em média, representando aproximadamente 30% da precipitação acumulada) esteve bem alta, ajudando na regulação da vazão média e na manutenção dos processos fisiológicos (Tabela 8).
- O escoamento superficial (SURQ) foi baixo principalmente no período seco (média de 14,26%), e por período chuvoso com média de 90%, em que teve o maior valor no mês de março com 233,49 mm e o menor valor no mês de agosto com 7,25 mm. Representando 4,45% da PRP acumulada (Tabela 8).
- A sub-bacia produz, em média, 142,79 mm de água total que alcança o canal (WYLD), sendo sua maior contribuição em março (318,70 mm) e sua menor contribuição em novembro (14,07 mm). A produção de água total da sub-bacia que alcança o canal representou 7,22% do total da PRP acumulada (Tabela 8).
- O escoamento subterrâneo (GW_Q) possui uma amplitude de aproximadamente 89,7 mm, escoando subterraneamente mais em abril (91,78 mm) e menos em dezembro (2,08 mm). Representando 2,42% da PRP acumulada (Tabela 8).
- A percolação (PERC) esteve alta de janeiro a abril (período chuvoso) e baixa de agosto a novembro (período seco) em virtude da sazonalidade da região (representando 31,37% da PRP mensal acumulada): possui uma média de 51,68mm, sendo março o mês em que houve maior percolação (135,40 mm) e outubro aquele em que a percolação foi menor (1,84 mm), ressaltando que o mês de novembro não houve percolação (0,00 mm) (Tabela 8).

Da quantidade de chuva acumulada (1976,43 mm), 28% ficam armazenadas no solo (SW), 4% escoam superficialmente (SURQ), 7% é a água que alcança o canal (WYLD), 3% escoam subterraneamente (GW_Q), 32% percolam (PERC), 10% sofrem evapotranspiração e 13% evapotranspiração potencial (Tabela 8). Vale ressaltar que o modelo gera outros parâmetros como o caso LAT_Q mm que é a contribuição do fluxo lateral da água no interior do perfil do solo, que somado aos parâmetros descritos anteriormente, completando o balanço hídrico.

A evapotranspiração gerada pelo modelo, foi a partir da equação de Penman-Monteith, e que segundo Sousa (2010) principalmente nos períodos secos se mostra deficiente, sugerindo a utilização de outros métodos para o cálculo da evapotranspiração, e o mesmo utilizou o modelo SEBAL/METRIC para assimilação no modelo SWAT, chegando a valores de eficiência (COE de 0,89) melhores com os valores novos assimilados.

Tabela 8: Componentes do ciclo hidrológico para a sub-bacia 3 no período de 2008 a 2014. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, PRP – precipitação mensal, SW – quantidade de água no solo, SURQ – escoamento superficial, WYLD – produção de água total da sub-bacia que alcança o canal, GW_Q – escoamento subterrâneo, PERC – percolação, Et – evapotranspiração, Etp – evapotranspiração potencial.

Mês	QSIM (m³/s)	PRP (mm)	SW (mm)	SURQ (mm)	WYLD (mm)	GW_Q (mm)	PERC (mm)	Et (mm)	Etp (mm)
JAN	0,10	187,31	565,47	90,59	102,56	6,00	41,23	16,24	18,43
FEV	0,23	290,99	566,12	167,85	206,26	26,28	96,04	13,39	14,12
MAR	0,32	408,77	566,22	233,49	318,70	67,63	135,40	20,30	20,56
ABR	0,30	305,26	562,94	177,91	284,22	91,78	99,66	16,88	16,94
MAI	0,25	272,07	565,64	148,73	249,99	89,72	85,80	21,05	21,51
JUN	0,20	206,57	566,01	94,49	191,10	85,26	80,89	19,01	21,45
JUL	0,15	151,80	565,23	62,55	154,66	83,10	62,12	19,49	22,52
AGO	0,07	32,73	557,92	7,65	74,29	64,17	12,09	18,39	25,18
SET	0,05	20,93	547,25	15,59	50,76	34,81	2,26	13,39	25,85
OUT	0,04	28,07	541,73	19,15	36,24	16,73	1,84	12,16	27,79
NOV	0,01	17,25	539,43	7,67	14,07	6,29	0,00	11,13	24,41
DEZ	0,03	54,68	548,57	27,79	30,65	2,08	2,82	14,02	22,27
Média			557,71	87,79	142,79	47,82			
Acum.	1,75	1976,43					620,15	195,45	261,03

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo SWAT utilizado neste estudo se demonstrou viável para geração dos componentes do ciclo hidrológico, mais especificamente, a vazão na sub-bacia do rio Arapepó. Os valores apresentados se demonstram aceitáveis e compatíveis com a realidade apresentada na sub-bacia. A sub-bacia do rio Arapepó apresenta como característica marcante, o acúmulo de água no solo, o que é prescindível para a manutenção dos processos fisiológicos na sub-bacia. A percolação (PERC) que traduz o movimento subterrâneo da água através do solo, especialmente nos solos saturados ou próximos da saturação, sendo influenciado pelo regime de chuva auxiliando no processo de armazenamento de água no solo, principalmente no período chuvoso.

A análise de sensibilidade identificou os parâmetros mais significativos e mais sensíveis para a modelagem na sub-bacia do rio Arapepó (ALPHA_BF, BIOMIX, BLAI, etc.).

A avaliação de eficiência do modelo obteve bons resultados (LUBITZ, 2009), com valores de: Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) de 0,68, Desvio padrão (Dv) de 18,68, Erro médio (EM) de -0,1 e um Coeficiente de massa residual (CMR) igual a 0,2, mostrando que houve um ajuste positivo do evento simulado. Esta avaliação do modelo SWAT demonstra que ele é capaz de simular a vazão na sub-bacia do rio Arapepó, de forma satisfatória.

A degradação ambiental é perceptível e presente na região, prejudicando, principalmente nos processos fisiológicos e na estrutura física da mesma.

Recomenda-se particularmente, no caso da sub-bacia do rio Arapepó:

- Um período maior de dados de vazão observadas.
- Realizar a calibração, para que ocorra um ajuste mais perfeito do evento simulado.
- Que sejam realizadas simulações com vários usos de solos, para se verificar os potenciais impactos na vazão.
- Fazer um levantamento mais detalhado das características físicas do solo na sub-bacia do rio Arapepó, a qual seria de grande importância para futuros estudos de modelagem nesta área, representando de forma melhor o escoamento e as taxas de infiltração permitindo assim, uma simulação confiável de cenários em função

de mudanças climáticas, visando à previsão de cenários futuros para a gestão dos recursos hídricos.

Finalmente, pode-se considerar que o modelo pode ser aplicado em rios de alimentação mista, se consideradas as limitações de dados e processos. O modelo conseguiu satisfazer os objetivos das simulações propostas, destacando que a modelagem é uma ferramenta adequada para a coleta de informações espaciais, e sua aplicação pode colaborar na melhoria da assimilação de dados do ciclo hidrológico.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA - Agência Nacional de Águas. Medição de Descargas Líquidas em Grandes Rios: manual técnico. Brasília: ANA; SGH, 2009.

ANA - Agência Nacional de Águas. Estações Pluviométricas Monitoradas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>,> Acesso em: 16 Mai. 2013.

ARNOLD, J. G; FOHRER, N. SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modeling. Hydrol. Process, EUA. v. 9, P. 563-572. 2005.

ARNOLD, J. G; SRINIVASAN, R; MUTTIAH, R. S. & WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and Assessment part I: model development. Journal of american Water Resources Association, Middleburg, Virginia, EUA. v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

BACK. Álvaro José. Hidráulica e Hidrometria Aplicada: (com programa hidrom para cálculo). Florianópolis: EPAGRI, 2006.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M.A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) I. Journal of Hydrology, United States. v. 212–213, p.198–212. 1998.

BEASLEY, D. B. HUGGINS, L. F. User's Manual. Chicago, United States Environmental protection agency, Region V, 1981.

BEVEN, K. J. QUINN, P., ROMANOWICZ, R., FREER, J., FISHER, J. E Lamb, R. Topmodel and Grid at b Distribution Programs – a user guide to the distribution version (94.01). CRES Technical Report TR110/94, Lancaster University, 1994.

BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/L6938.htm>>. Acesso em: 22 fev. 2013.

BRASIL. Lei n.º 7.804, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre alteração a Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, a Lei n.º 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, a Lei n.º 6.803, de 2 de julho de 1980, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/17804.htm>. Acesso em: 22 fev. 2013

CARVALHO, T. M. Técnicas de medição de vazão por meios convencionais e não convencionais. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 1, n. 1, p. 73-85, maio/ago. 2008.

COWELL, R. N. History and place of photographic interpretation. In: PHILIPSON, W. R. Manual of photographic interpretation. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland. 1997.

DIAS, Luiz Eduardo; GRIFFITH, James Jackson. Conceituação e caracterização de áreas de gradadas. In: Recuperação de Áreas Degradadas. Viçosa: UFV, Departamento de Solos: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998.

FERNANDES, M. R; SILVA, J. C. Programa Estadual de Manejo de Sub-Bacias Hidrográficas: fundamentos e estratégicas. Belo Horizonte: EMATER-MG, 1994.

GASSMAN, P. W; REYES, M. R; GREEN, C. H; ARNOLD, J. G. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, St. Joseph, EUA. v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GIACOMONI, M. H. Estimativa de Evapotranspiração Regional por Meio de Técnicas de Sensoriamento Remoto Integradas a Modelos de Balanço de Energia: aplicação no Estado do Rio Grande do Sul. 2005. 172 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. p. 149-209.

GÓMEZ. Carlos. Manual de Manejo de Cuencas. 2 ed. Visión Mundial El Salvador. San Salvador. p. 154.2004.

GRIGG, N. S. Water resources management: principles, regulations, and cases. New York: McGraw-Hill Book, p. 540, 1996.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture, n. 1, p. 96-99, 1985.

INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – INEA. Guia Prático de Fiscalização Ambiental. Rio de Janeiro: INEA, 2010.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL - INCAPER. Solos e Recursos Hídricos. Disponível em <<http://www.incaper.es.gov.br/pedeag/temas04.htm>> Acesso em: 04 Jul. 2013.

JIE, Z; GUANG-YONG, L; ZHEN-ZHONG, H. & GUO-XIA, M. Hidrological cycle simulation of the irrigation district based on a SWAT model. Mathematical and Computer Modelling. EUA. v. 51, p. 1312-1318, 2010.

KNISEL, W. G. CREAMS, A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. Washington: USDA Conservation, 1980.

LELIS, Thatiana A; CALIJURI, Maria L; FONSECA, Aníbal S. da; LIMA, Dario C. de. Impactos Causados pelas Mudanças Climáticas nos Processos Erosivos de uma

Bacia Hidrográfica: simulação e cenários. Revista Ambiente & Água – Na Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 6, n. 2, 2011.

LIBOS, M. I. P. C. Modelagem da poluição não pontual na Bacia do Rio Cuiabá baseada em geoprocessamento. 2002. 253 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2002.

LUBITZ, E. Avaliação da Aplicação do Modelo Hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras, SC. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil, 2009.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica, utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 166 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. 2002.

MACHADO, Fernando W. Modelagem Chuva-Vazão Mensal Utilizando Redes Neurais Artificiais. 2005. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais), Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

MACHADO, Ana Lúcia S. PACHECO, Jesuete Bezerra. Serviços Ecológicos e o Ciclo Hidrológico da Bacia Hidrográfica Amazônica – the biotic pump. Revista GEONORTE, Vol.01, N.01, Ano 01, p. 71-89, 2010.

MCCARTHY, G. T. The Unit Hydrograph and Flood Routing. 1st ed. Providence: U. S. CORPS OF ENGINEERS, 1939.

MENDES, C. A. B; CIRILO, J. A. Geoprocessamento em Recursos Hídricos: princípios, integração e aplicação. 1 ed. Porto Alegre: ABRH, p. 536, 2001.

MENDES, Daniel Louro. Cálculo da Recarga do Aquífero Querença-Silves: aplicabilidade do modelo swat a bacias hidrográficas sobre aquíferos cársicos. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Universidade Técnica de Lisboa. Portugal. 2010.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Download de imagens SRTM. Disponível em <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/index.htm>> Acesso em: 20 fev. 2013.

MINOTI, R. T. Abordagem Qualitativa e Quantitativa de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi- Superior, 2006. 247f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, SP, 2006.

MONTEITH, J. L. Evaporation and the Environment: The State and Movement of Water in Living Organisms. In: SYMPOSIA OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19, 1965, London, UK. Anais. London: [s. n.], p. 205-234, 1965

MOREIRA, J. C; SENE, Eustáquio. Geografia. São Paulo, Scipione, 2005.

MORO, Michele. A Utilização da Interface SWAT-SIG no Estudo da Produção de Sedimentos e do Volume de Escoamento Superficial com Simulação de Cenários Alternativos. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2005.

NASH, J. E; J. V. SUTCLIFFE. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A discussion of Principles. *Journal of Hydrology*. United States, v. 10, n. 3-4, p. 282-290. 1970.

NEITSCH, S. L; ARNOLD, J. G; KINIRY, J. R; WILLIAMS, J. R. Soil and water Assessment tool: theoretical documentation version 2005. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Texas. p. 460.2005.

NEITSCH, S. L. et. al. Soiland Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005 (b). Texas: Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, 2005(b), 400p.

NUNES, Jerônimo Cardoso. A Gestão dos Resíduos Sólidos e a Percepção sobre Riscos Ambientais em Área do Aterro Sanitário no Município de Salinópolis (PA). 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente Urbano), Universidade da Amazônia. Belém/PA. 2012.

NUNES, Hildo G. G. C. Modelagem Hidrológica na Bacia do Rio Capim – Estado do Pará. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém/PA. 2013.

OGDEN, Fred L. et al. GIS and distributed watershed models II: modules, interfaces and models. *Journal of Hydrologic Engineering / American Society of Civil Engineers*, EUA. v. 6, n. 6, p. 515-523, nov/dez. 2001.

OGDEN, F. J. CASC2D Reference Manual. Storrs: Department of Civil and Environmental Engineering/University of Connecticut, 1997.

OLDERMAN, L. R. The Global extent of soil degradation. In: *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. CabsInternational, Wallingford, UK. 1994.

OLIVEIRA, M. Q. C. Impacto de Mudança no Uso do Solo nas Características Hidrossedimentológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Joanes e sua repercussão na Zona Costeira. 1999. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal da Bahia/BA. 1999.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, P. 478 2002.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large -Scale Parameters. *Weather Magazine*, n. 100, p. 81-92, 1972.

RENNÓ, C. D; SOARES, J. V. Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Relatório Técnico Parcial Dezembro 2000. São Paulo: INPE, 2001.

- ROCHA, C. H. B. Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar. 2 ed. Juiz de Fora: Autor, p. 219, 2002.
- RODRIGUES, Juliana C. Balanço de Energia e Comportamento Fenológico em Pomares de Mangueira no Nordeste Paraense. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal Rural do Pará. Belém, PA. 2012.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. Microclimate: The biological environment. 2nd ed. New York: John Wiley, p. 495. 1983.
- SALOMÃO, Valéria P. Efeitos Antrópicos do Represamento de um Riacho do Cerrado na Decomposição Foliar. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia), Universidade de Brasília, Brasília/DF, 2013.
- SÁNCHEZ, Luiz Enrique. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- SANTOS, L. L. dos. Modelos Hidráulico-Hidrológicos: conceitos e aplicações. Revista Brasileira de geografia Física, Recife, v. 2, n. 03, p. 01-19, set/dez. 2009.
- SILVA, L. A. Regime de Escoamento e Recarga Subterrânea de Nascentes na Região do Alto Rio Grande/MG. 2009. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.
- SILVA, Jorge Xavier da; ZAIDAN, Ricardo Tavares (org.). Geoprocessamento & Análise Ambiental: Aplicações. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.
- SLOAN, P. G.; MORRE, G. B. C.; EIGEL, J. D. Modeling Surface and Subsurface Storm Flow on Steeply - Sloping Forested Watersheds. Water Resources Research, Columbia, NY, United States of America, v. 20, n. 12, p. 1815-1822, dec. 1983.
- SOUSA, A. M. L. Estimativa dos fluxos de calor a partir de imagens orbitais e aplicação na Modelagem Hidrológica. 2010. 128 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil, 2010.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, p. 669. 1998.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, p. 669. 2005.
- VAN LIEW; MICHAEL, W.; JURGEN, G. Hydrologic Simulation of the Little Washita River Experimental Watershed Using SWAT. Journal of the American Water Resources Association. United States, 2003. Water Resources, v. 39, n. 2, p. 413-426.
- VENTURIERI, Fernando et al. Zoneamento Ecológico Econômico da Zona Oeste do Estado do Pará. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2010.
- VILELLA, S.M; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. de; COELHO, G.; DURÃES, M. F.; ÁVILA, L. F. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Grande Utilizando Sistemas de Informações Geográficas. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA. 2007, Lavras. Anais Lavras: APGUFLA, 2007. 1 CD-ROM.

WILLIAMS, J. R. Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients Trans. ASAE. 12nd ed. [S. I.]: [s. n.], 1969.

WHITE, K., L. INDRAJEET, C. Sensitivity Analysis, Calibration, and Validations for a Multisite and Multivariable SWAT Model. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA). United States, 2005. Model, v. 41, n.5, p. 1077-1089.