



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

HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO CAPIM – ESTADO DO PARÁ.

BELÉM

2013



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

HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO CAPIM – ESTADO DO PARÁ.

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais: área de concentração em Manejo de Ecossistemas e Bacias Hidrográficas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa

BELÉM

2013

Nunes, Hildo Giuseppe Garcia Caldas

Modelagem hidrológica na bacia do rio capim – Estado do Pará./ Hildo Giuseppe Garcia Caldas Nunes. – Belém, 2013.

99f. ; il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, 2013.

1. Hidrologia. 2. Ciclo hidrológico. 3. Modelagem hidrológica. 4. Bacia do Rio Capim. I. Título.

CDD: 551.4807



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

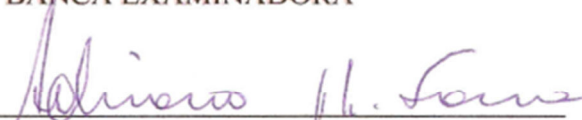
HILDO GIUSEPPE GARCIA CALDAS NUNES

MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIO CAPIM – ESTADO DO PARÁ.


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 Agosto de 2013.

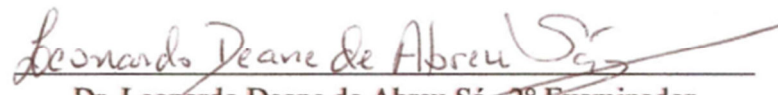
BANCA EXAMINADORA




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



Dr. Alessandro Carioca de Araujo – 1º Examinador
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA



Dr. Leonardo Deane de Abreu Sá – 2º Examinador
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha – 3º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

PENSAMENTO

“A força não provém da capacidade física e sim de uma vontade indomável.”

(Mahatma Gandhi)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, a minha irmã, meus amigos, minha namorada Joyse Tatiane e em memória a todos que de certa forma contribuíram e não poderão estar presentes (Etelvino, Maria Raimunda e Ivo Guedes).

APRESENTAÇÃO E AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural da Amazônia, sob a orientação do Prof. Dr. Adriano Marlisom Leão de Sousa.

Aqui expresso os meus sinceros agradecimentos pela grande ajuda recebida ao longo da realização do curso, primeiramente a DEUS, o criador, causa primária de tudo, e a todos que de certa forma contribuíram comigo.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo sem a qual seria impossível a realização deste trabalho;

Ao Dr^o. Adriano Sousa pela atenção, confiança e orientação que corroborou na conclusão do presente trabalho;

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFRA - ICA, pelo auxílio e informações fornecidas no decorrer do curso;

Aos amigos que conquistei durante minha vida, cujo apoio e incentivo moral ajudaram a superar diversos problemas;

Ao Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Pará pela disponibilidade dos dados e mapas pedológicos e de uso e ocupação de todo o estado;

A Agência Nacional de Águas (ANA) e ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e em especial ao 2^o DISME pela disponibilidade dos dados do município de Paragominas que são de grande importância para esta pesquisa;

A minha família pelo apoio moral e carinho os quais me mantiveram de cabeça erguida e com os pés no chão, em especial a Maria Alice Garcia Caldas Nunes (mãe), Ildo Amaral Nunes (Pai) e Anna Alice Garcia Caldas Nunes (irmã);

A minha namorada e amiga acima de tudo, Joyse Tatiane Souza dos Santos, pelo constante incentivo, paciência, carinho, confiança depositada em mim, pelo apoio, alegria de viver e pelo auxílio na confecção de mapas;

Aos colegas da Universidade de São Paulo – USP pelas valiosas dicas do modelo SWAT, muito obrigado pelos dias de atenção em São Carlos;

Ao colega, Vander Kaufmann, da AMBITEC pelas valiosas dicas do modelo SWAT e nos dados de entrada, muito obrigado pelos dias de atenção em Blumenau no Campus II da Fundação Universidade Regional de Blumenau – FURB;

Aos amigos, Magno, Ronaldo, Guilherme Neto, Alex, Danilo, Marcos, Olivar, Carmen, Renata, Lucineusa, Juliana, Yashmim, Paula pelos momentos juntos e apoio durante esta jornada e um agradecimento especial a Alessa pela ajuda na aquisição de dados junto a ANA;
e

Aos amigos de mestrado que conquistei e foram muito importantes, Nisangela, Márcia, Silvane, Etiane, Joyse, Jaqueline, Rondinele (em memória), Shibata, Rodrigo, Pedro, Alan Péricles, Marisol, Tatiana, Leonardo e Larissa pelos momentos juntos e apoio durante esta jornada e em especial ao Magno pela amizade e parceria em momentos difíceis.

LISTA DE ABREVIATURAS, VARIÁVEIS E SIGLAS

ABRACOS – Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study;

AEE – Agência Espacial Européia;

AGRC – Agropecuária;

AGRL – Agricultura;

ALPHA_BF – Constante de Recessão do Fluxo de Retorno;

ANA – Agência Nacional de Águas;

AnnAGNPS – Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution;

ArcGIS – Software de Sistema de Informação Geográfica;

ArcSWAT – Interface ArcGIS ligada ao SWAT;

ARME – Amazonian Research Micrometeorological Experiment;

ARS – Agricultural Research Service;

ars – Aquífero Raso;

ASAR – Advanced Synthetic Aperture Radar;

AVHRR – Advanced Very High Resolution Radiometer;

BFD – É o Número de Dias de Escoamento de Base para a Bacia;

Blai – Máximo Índice de Área Foliar Potencial;

CAA – Solo Argissolo Amarelo;

CAL. – Calibração;

CANMX – Armazenamento Máximo no Dossel;

Cb – Cumulonimbus;

CLA – Solo Latossolo Amarelo;

CLVA – Latossolo Vermelho Amarelo;

CMR – Coeficiente de Massa Residual;

CMORPH – MORPHing Technique;

CN – Curva Número;

CNF – Solo Neossolo Flúvico;

CN2 – Curva Número Inicial para a Condição de Mistura;

COE – Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe;

CONAMAZ – Conselho Nacional da Amazônia Legal;

CPC – Climate Prediction Center;

CRCCH – Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology;

CREAMS – Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems;
CSIRO – Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization;
DHI – Danish Hydraulic Institute;
DV – Direção do Vento;
Dv – Desvio Padrão;
EGAM – Agropecuária;
EM – Erro Médio;
Envisat – Environmental Satellite;
EPIC – Erosion-Productivity Impact Calculator;
ERS – European Remote Sensing;
ESCO – Coeficiente de Compensação da Evaporação do Solo;
Et – Evapotranspiração;
Etp – Evapotranspiração Potencial;
Etr – Evapotranspiração Real;
Eto – Evapotranspiração de Referência;
Exp. – Experimento;
FPEA – Agropecuária mais Extrativismo Vegetal;
FRSD – Área de Proteção Ambiental;
FRSE – Reflorestamento;
FRST – Floresta;
G – Temperatura no Solo;
GEMS – Goodyear Environmental Monitoring System;
GHz – GigaHertz;
GeoWEPP – Geo-Spatial Interface for WEPP;
GLEAMS – Ground water Loading Effects of Agricultural Management Systems;
GPS – Global Positioning System;
GTE/ABLE – Global Tropospheric Experiment/Amazon Boundary Layer Experiment;
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_REVAP – Coeficiente que Controla a Taxa de Transferência de Água do Aquífero Raso para a Zona de Raízes;
GW_Q – Escoamento Subterrâneo ou Contribuição para o Aquífero Raso;

HadCM3 – Hadley Centre Coupled Model, version 3;
HEC – Hydrologic Engineering Center;
HMS – Hydrologic Modeling System;
hpa – Hectopascal;
HRV – Haut Resolution Visible;
IAF – Índice de Área Foliar;
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
ID – Identificação;
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia;
IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas;
km – Quilômetros;
lag_time – Atraso no Tempo;
Landsat – Satélite que foi Desativado em 2010;
LAT – Latitude;
LAT_TIME – Atraso para o Escoamento Lateral;
LBA – Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia;
LH – Latin Hypercube;
LONG – Longitude;
MA – Maranhão;
METRIC – Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration;
MGB – Modelo de Grande Bacia;
MHz – MegaHertz;
MIKE – Modeling System for River and Channels;
mm – Milímetros;
MMA – Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal;
MNT – Modelo Numérico do Terreno;
NASA – National Aeronautics and Space Administration;
NCEP – National Centers for Environmental Prediction;
NOOA – National Oceanic and Atmospheric Administration;
OAT – One Factor at a Time;
P – Pressão Atmosférica do ar;
PA – Pará;
PAST – Pastagem;
PERC – Água que Percola e Deixa a Zona de Raízes (Percolação);

PIC – Plano de Informação Cartográfica;

PPBIO – Programa de Pesquisa em Biodiversidade;

PPG7 – Programa Piloto Internacional para Conservação das Florestas Tropicais Brasileiras;

PRP – Precipitação;

Q – Vazão Total;

$QOBS$ – Vazão Observada;

$QSIM$ – Vazão Simulada;

radar – Radio Detection and Ranging;

Radarsat – Radio Detection and Satellite;

RCHRG_DP – Quantidade de Recarga que Será Encaminhada ao Aquífero Profundo;

revap – Fenômeno em que a Água que Alcançou o Aquífero Raso pode Retornar à Zona não Saturada;

REVAPMN – Limite que a Água não deve Ultrapassar no Aquífero Raso para que ocorra o revap (Re-Vaporizar);

Rn – Saldo de Radiação;

RNGE – Áreas Campestres;

RS – Radiação Solar;

SCA – Secretaria de Coordenação da Amazônia;

SEBAL – Surface Energy Balance Algorithms for Land;

SHALLST – Profundidade inicial de água no aquífero raso;

SIG – Sistema de Informação Geográfica;

SLOPE (HRU_SLP) – Declividade Média Adotada para todas as URH's;

SLSUBBASIN – Comprimento de Rampa Médio para a Sub-bacia;

SNAM – Nome do Solo a ser Inserido no Banco de Dados do SWAT;

SOL_ALB – Albedo do Solo Úmido;

SOL_AWC – Capacidade de Água do Solo;

SOL_CBN – Conteúdo de Carbono Orgânico do Solo;

SOL_EC – Condutividade Elétrica do Solo;

SOL_K – Condutividade Hidráulica;

SOL_Z – Profundidade da Superfície do Solo até o Fundo da Camada;

SPAS – Pecuária mais Extrativismo Vegetal;

SPECTRON-SE 590 – Sensor Remoto;

SPOT – Satélite ainda em Funcionamento;

sr – Sensibilidade Relativa;

SR – Sensoriamento Remoto;

SURLAG – Coeficiente de Atraso do Escoamento Superficial;

SURQ – Escoamento Superficial que chega ao Canal;

SW – Quantidade de Água no Solo;

SWAT – Soil and Water Assessment Tool;

SWM – Stanford Watershed Model;

SWRRB – Simulator for Water Resources in Rural Basins;

T – Temperatura do ar;

THMB – Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry;

TM – Thematic Mapper;

TOPOG-SBM – Topographical – Simple Bucket Model;

UR – Umidade Relativa do Ar;

URBN – Áreas Urbanas;

URH – Unidades de Respostas Hidrológicas;

USDA – United States Department of Agriculture;

USLE_K – Fração de Erodibilidade do Solo;

var. – Parâmetro variável;

VV – Velocidade do Vento;

WATR – Água;

WBN – Watershed Bounded Network;

WEPP – Water Erosion Prediction Project;

WYLD – Produção de Água Total da Sub-Bacia que Alcança o Canal;

ZCIT – Zona de Convergência Inter Tropical;

ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico;

LISTA DE SÍMBOLOS

- °C – Unidade de Temperatura (Graus Celsius);
- cm – Unidade de Medida (Centímetros);
- d – Unidade de Tempo (Dia);
- D – Grupo Hidrológico dos Solos deste Estudo;
- dS – Unidade de Condutividade Elétrica (Deci-siemen);
- g – Unidade de Massa (Gramas);
- h – Unidade de Tempo (Hora);
- Kg – Unidade de Massa (Quilogramas);
- Kpa – Unidade de Pressão Atmosférica (Quilopascals);
- m – Unidade de Medida (Metros);
- MJ – Unidade de Trabalho (MegaJoules);
- mm/dia – Unidade de Medida (Milímetros por dia);
- nm – Unidade de Medida (Nanômetros);
- s – Unidade de Tempo (Segundos);

SUMÁRIO

RESUMO	16
ABSTRACT	17
1-INTRODUÇÃO	18
1.1- Caracterizações do Problema	21
1.2- Hipótese da Pesquisa	22
1.3- Objetivo Geral	23
1.4- Principais Etapas da Pesquisa (Objetivos Específicos)	23
2-ELEMENTOS TEÓRICOS	23
2.1- Ciclo Hidrológico	24
2.2- Modelo Hidrológico e a Integração ao Sistema de Informação Geográfica (SIG)	29
2.3- Sensoriamento Remoto (SR)	33
3-ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA	36
3.1- Área de Estudo	36
3.2- Características Físicas	43
3.3- Características Climáticas	43
3.4- Metodologia	45
3.4.1 Descrição do Modelo SWAT	47
3.4.1.1 <i>Estrutura do SWAT</i>	47
3.4.2 Sensibilidade dos Parâmetros	55
3.4.2.1 <i>Calibração e Validação</i>	56
3.4.2.2 <i>Avaliação da Eficiência</i>	57
3.4.3 Simulações Hidrológicas	58
3.4.3.1 <i>Experimento 1 – Calibração com Condições Iniciais</i>	59
3.4.3.2 <i>Experimento 2 – Calibração Manual do Modelo</i>	60
3.4.3.3 <i>Experimento 3 – Validação do Modelo</i>	60
3.4.3.4 <i>Experimento 4 – Geração do Balanço Hidrológico da bacia</i>	60
4-RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1- Análises da bacia do Rio Capim	61
4.2- Modelagem Hidrológica	65
4.2.1 Experimento 1: Calibração com Condições Iniciais	65

<i>4.2.1.1 Análise de Sensibilidade</i>	69
<i>4.2.1.2 Avaliação de Eficiência da Simulação Inicial</i>	71
4.2.2 Experimento 2: Calibração Manual do Modelo	72
<i>4.2.2.1 Avaliação de Eficiência da Calibração Manual</i>	76
4.2.3 Experimento 3: Validação do Modelo	77
<i>4.2.3.1 Avaliação de Eficiência da Validação do Modelo</i>	80
4.2.4 Experimento 4: Componentes do Ciclo Hidrológico da bacia	81
5-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	85
6-REFERÊNCIAS CITADAS.....	87
APÊNDICES	97

RESUMO

Este estudo visa à estimativa dos componentes do ciclo hidrológico, com o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para a bacia do Rio Capim, localizada nos estados do Pará e oeste do Maranhão, no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010. Foram utilizados dados meteorológicos de uma estação automática de Paragominas, além dos dados pluviométricos e fluviométricos (Agência Nacional de Águas – ANA). O clima na área de estudo tem sazonalidade bem definida, com períodos chuvosos de janeiro a maio e secos de junho a dezembro. De maneira geral, os resultados do modelo SWAT foram satisfatórios quando comparados com outros estudos realizados em bacias pelo Brasil, vale ressaltar que este estudo é pioneiro com o modelo SWAT para uma bacia no estado Pará. Dada a relevância dos recursos hídricos que essa bacia possui, ele pode certamente poderá contribuir para uma melhor gestão e planejamento dos recursos ambientais oferecidos pela bacia do Rio Capim. Dados médios mensais de vazão do Rio Capim foram utilizados para a validação do modelo SWAT, o que resultou em valores de Coeficiente de Eficiência (COE) que se situaram entre 0,59 a 0,65 (para as sub-bacias 3 e 5) e 0,87 para todo o período investigado (de 2000 - 2010). Observou-se ainda que, em termos percentuais, a vazão mensal simulada pelo modelo SWAT, na bacia do Rio Capim, após os ajustes, apresentou uma redução no seu erro de estimativa, que partiu de uma superestimativa de 210,75 % até chegar a uma subestimativa de 26 % (na sub-bacia 3), e de 219,18 % para 18 % (na sub-bacia 5), respectivamente. Em síntese, foi possível espacializar os componentes do ciclo hidrológico e validar o modelo SWAT, o que poderá ser útil em estudos posteriores da bacia do Rio Capim.

Palavras-Chave: Hidrologia, Ciclo Hidrológico, Modelagem hidrológica e Bacia do Rio Capim.

ABSTRACT

The model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is used in order to estimate the hydrological cycle components of the Capim River basin, which is located in Brazilian states of Pará and Maranhão, from January 2000 up to December 2010. Data from an automatic meteorological station located at Paragominas city have been used, in addition to rainfall and stream flow data provided by the National Water Agency (ANA). The climate in the study area has well defined seasonality with rainy periods from January to May and dry periods from June to December. In general, the results of the SWAT model were satisfactory when compared with other studies ones regarding Brazilian river basins. Interestingly, this study is a pioneer in the application of the SWAT model for research of watersheds in Pará state. Given the importance of this basin's water resources, this work can certainly contribute to a better management and planning of the environmental resources provided by the Capim River basin. Monthly flow data of the Capim River were used to validate the model SWAT, which has resulted in values of the coefficient of efficiency (COE) which ranged between 0.59 to 0.65 (for the sub-basins 3 and 5) and 0.87 for the whole investigated period (2000-2010). It was also observed that, in percentage terms, the Capim River monthly runoff simulated by the SWAT model, after some adjustments, presented a reduction in its estimation error, which started from an overestimation of 210.75% until to reach an underestimation of 26% (in the sub-basin 3), and 219.18% to 18% (in the sub-basin 5), respectively. Overall, it was possible to spatialize the components of the Capim River basin hydrological cycle and to validate the model, what may be useful in further studies concerning this hydrological basin.

Keywords: Hydrology, Hydrological Cycle, Hydrologic Modeling and Capim River basin.

1-INTRODUÇÃO

Em todas as regiões do globo, a população pode sofrer influência dos extremos climáticos, meteorológicos e hidrológicos, que atualmente são alvos principais de vários estudos científicos, como por exemplo, o projeto Cenário (BRASIL, 2009), que visa entender quais os efeitos das mudanças climáticas em uma floresta de terra firme na Amazônia. Nas últimas décadas, a Amazônia tem sido foco de atenção mundial, devido à sua riqueza mineral e hidrológica, à sua grande biodiversidade de espécies florestais e animais, e também aos efeitos que o desmatamento em grande escala pode provocar no clima local, regional e global e nos ciclos biogeoquímicos (SOUSA, 2005; SOUZA & OYAMA, 2011).

Desde a década de 80, têm-se realizado estudos hidrometeorológicos nas bacias da região tropical para se tentar compreender, quantitativamente e qualitativamente, os processos envolvidos no ciclo hidrológico das bacias. Mais recentemente, os projetos ARME (Amazonian Research Micrometeorological Experiment) (SHUTTLEWORTH, 1988), GTE/ABLE (Global Tropospheric Experiment/Amazon Boundary Layer Experiment) (GARSTANG et al., 1990), ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study) (SHUTTLEWORTH et al., 1991 e GASH et al., 1996) e o LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) têm investido em pesquisas e experimentos de campo que visam responder questões relacionadas a esta temática (NOBRE, 1999).

Os componentes do ciclo hidrológico (vazão, precipitação, quantidade de água no solo, escoamento superficial, produção de água total que alcança o canal, escoamento subterrâneo, percolação, evapotranspiração e evapotranspiração potencial.) atingem diversos aspectos da vida humana, desde a produtividade agrícola, geração de energia, controle de cheias, produção de água para a indústria e população, manejo da flora e da fauna, dentre outros. Os mesmos são suscetíveis às modificações oriundas tanto de causas naturais (variabilidade climática) como aquelas resultantes das atividades antrópicas (TUCCI, 2005; SOUSA, 2010).

Os processos radiativos em superfície são importantes para a redistribuição de calor no solo e na atmosfera e juntamente com o ciclo hidrológico, são essenciais para modelagem climática e hidrológica, sendo que a magnitude desses componentes e suas variações, em períodos menores do que um dia, são importantes na parametrização e calibração de modelos de circulação global. Em intervalos maiores, essas grandezas também são utilizadas em

modelos de impactos climáticos globais, resultantes de alterações fisiográficas da superfície (SELLERS et al., 1989; SOUZA e OYAMA, 2011).

A literatura mostra que as hipóteses de retroalimentação, entre a umidade do solo e a precipitação pluviométrica são elementos fundamentais para o estabelecimento do comportamento do ciclo hidrológico. ELTAHIR (1998) afirma que o ponto central desse processo está na interface do balanço de energia a superfície.

Além disso, estimativas da variação espaço-temporal dos fluxos de calor da superfície e umidade do solo viabilizariam o entendimento dos processos evaporativos, aspecto fundamental em muitas aplicações que enfocam recursos hídricos e modelagem climática (MOHAMED et al., 2004). No entanto, devido à escassez de dados meteorológicos, muitas vezes os modelos atmosféricos e hidrológicos são alimentados com dados regionais com resolução inadequada para representar as situações atmosféricas, as quais se desejam modelar (ABBASPOUR. et al., 2007)

Em geral, algumas medições meteorológicas, relevantes no monitoramento dos recursos hídricos, são realizadas apenas durante experimentos que ocorrem em um curto período de tempo e com alvos pontuais. Acrescente-se que, quando da existência de medições diretas, ou informações que possibilitem a estimativa das componentes do balanço hidrológico, de energia e de massa, estes são representativos para as condições locais e para um determinado período do ano. Na perspectiva de minimizar os problemas oriundos da baixa disponibilidade de informações espaciais de campo, o sensoriamento remoto tem-se apresentado como uma ferramenta adequada para avaliações, tanto no aspecto hidrológico como no meteorológico. (FARAMARZI et al., 2009).

O sensoriamento remoto associado a modelos, como por exemplo, o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) (ALLEN et al., 2002) e METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration) (ALLEN et al., 2007) demonstrou ter um grande potencial para atender as necessidades relativas à quantificação do balanço hídrico em escala regional, ou em bacias hidrográficas. Essa ferramenta é adequada para a coleta de informações espaciais e sua aplicação implica em uma considerável melhoria na assimilação de modelagem hidrológica, assim como também, na modelagem de clima, a fim de gerar cenários regionais futuros e possíveis impactos no clima e hidrologia. Em virtude disso, modelos que representem o ciclo hidrológico podem efetivamente contribuir para o planejamento e gestão dos recursos hídricos (FARAMARZI et al., 2009; SOUSA, 2010).

A utilização de modelos hidrológicos¹ tem proporcionado um melhor entendimento dos processos que envolvem a água (ciclo hidrológico) na bacia hidrográfica e possibilitou 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 e a proteção do solo (TUCCI, 2005).

O modelo SWAT foi escolhido para esta pesquisa por ser adequado à aplicação em bacias de médio porte ($\pm 30.000 \text{ km}^2$), 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, é de fácil acessibilidade, possui uma grande disponibilidade de material e por sua comprovação da 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 por/em ARNOLD et al. (1996); ABBASPOUR et al. (2007) e FARAMAZI et al. (2009).

Espero que os resultados desta pesquisa, usando informações de estações automáticas, possam prover os fluxos de vazão da bacia em estudo, consistente e condizente com o uso e cobertura do solo para assimilação em modelos hidrológicos e assim, gerar os demais componentes do ciclo hidrológico na bacia do Rio Capim, localizada na região nordeste do estado do Pará e oeste do Maranhão.

O rio Capim, um subafluente do rio Guamá, é navegável desde sua foz, situada junto à cidade de São Domingos do Capim, até o município de Paragominas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, (BRASIL, 1937)). Assim como em todo o território estadual e na região Amazônica, vem-se operando um longo e intenso processo de incorporação econômica e de reestruturação territorial, na qual transformações geográficas (abertura de estradas, construção de cidades e outras) ocasionaram profundos reflexos nas relações sociais e culturais ali existentes. Este processo de transformação econômica vem ocorrendo com maior contundência desde o final da década de 1960, com a intensificação de ações governamentais de incentivo e fomento às atividades produtivas e à indução de povoamento e colonização (LIMA, 2005).

Trata-se de uma região em que convivem de modo desigual, diversas atividades que combinadas à produção industrial (ex: mineração do caulim e da bauxita), as grandes

¹ É uma representação simplificada da realidade, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas (TUCCI, 2005).

unidades agropecuárias, a pequena produção mercantil e ao extrativismo (principalmente da madeira) provocam grandes modificações na ocupação do território. Sendo assim, coexistem na região interesses econômicos diferenciados e condições sociais extremamente polarizadas que fomentam a ocorrência de conflitos sociais e articulações político-econômicas. O Subprograma de Política de Recursos Naturais da Secretaria de Coordenação da Amazônia (SCA) criou o Programa Piloto Internacional para Conservação das Florestas Tropicais Brasileiras (PPG7) em resposta à preocupação internacional com a destruição das florestas tropicais. O projeto analisou este processo, ressaltando as intensas mudanças das formas tradicionais de exploração econômica, induzidas principalmente por uma agressiva política de transportes, reforçada pela política de incentivos fiscais (BRASIL, 1998).

Sendo uma região de intenso fluxo de mercadorias e produtos, tanto pelos eixos rodoviários como hidroviários, sua dinâmica é progressiva e desordenada, principalmente ao longo destas vias, pela ação intensa do desmatamento, contaminação de cursos d'água superficiais e obstrução de nascentes. Este intenso processo de implantação é acompanhado pela expansão da agropecuária e da exploração madeireira, consolidando de um lado, expressivas transformações sócio-econômicas e espaciais e de outro, um modelo de exploração dos recursos natural altamente comprometedor da sustentabilidade ambiental e social do estado (LIMA, 2005).

A maioria dos centros formados resulta de assentamentos urbanos em lugares inadequados à habitação, localizados na periferia ou ainda no próprio centro urbano, no caso das cidades, e com acesso difícil, no caso do interior. Deste fato, resulta um processo de exclusão social pela expansão não planejada, não integrada à cidade inicial e não respeitosa do meio ambiente.

1.1- Caracterizações do Problema.

A gestão dos recursos hídricos e conseqüentemente a tomada de decisão depende principalmente das variáveis hidroclimáticas. Os componentes do ciclo hidrológico desde sua entrada à superfície e sua manutenção precisam ser bem compreendidos e monitorados, para que se obtenham fundamentos suficientes para as tomadas de decisão nos processos de gestão hídricas e públicas (ABBASPOUR et al., 2007).

Devido às dificuldades para a disponibilização de medidas de campo destes componentes, em escala regional, torna-se relevante o desenvolvimento, com calibrações e

validações, de metodologias alternativas, que permitam a identificação, com base em amostras de dados espaciais, que por sua vez, afetam o mesmo (FARAMARZI et al., 2009; SOUSA, 2010).

Um modelo hidrológico pode ser uma forma de melhor espacializar a carência dos dados que são importantes para uma bacia hidrográfica. Logo, a disponibilização de metodologias alternativas que demandem uma menor quantidade de informações de campo contribuirá de forma positiva para uma melhoria do monitoramento dos recursos hídricos disponíveis em uma bacia hidrográfica (ABBASPOUR et al., 2007).

Existem diversos modelos hidrológicos sendo aplicados a bacias no Brasil, como por exemplo, os do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRG (IPH I, II, III e IV) e os modelos MGB (Modelo de Grande Bacia), sendo todos modelos distribuídos e contínuos² com aplicações em diversas bacias pelo mundo (COLLISCHONN, 2001).

Assim, como o modelo hidrológico SWAT, que foi utilizado nesta pesquisa, pois a principal vantagem dele reside no fato de o seu código numérico³ ser aberto ao usuário e também no fato de já existir uma versão do modelo com interface a um SIG denominado ArcSWAT, disponibilizada gratuitamente no site do modelo com suporte ao usuário. O modelo SWAT organiza os dados de entrada em plano de informação cartográfica (PIC) e dados tabulares para as sub-bacias, e já foi testado e aplicado a diversas bacias no Brasil (LUBITZ, 2009).

Desta forma, precisamos responder a seguinte pergunta: “O modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD et al., 1996; SWAT, 2009) pode ser aplicado para a bacia do Rio Capim?”

1.2- Hipótese da Pesquisa.

Seria possível estimar os componentes do ciclo hidrológico, especificamente a vazão de uma bacia hidrográfica, com precisão e acurácia suficiente para uso na gestão e planejamento dos recursos hídricos, baseando-se apenas em sensoriamento remoto (SR), na modelagem hidrológica e/ou dados hidrológicos e fluviométricos. Logo o modelo hidrológico

² Um sistema é contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo e um modelo é distribuído (*distributed*) quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo.

³ São as informações referentes ao banco de dados, que o modelo utiliza, o usuário pode modificar e/ou incluir novas informações neste banco de dados.

SWAT poderia ser aplicado à bacia do Rio Capim gerando-se também espacialmente os componentes do ciclo hidrológico.

1.3- Objetivo Geral.

Averiguar, a partir da utilização do modelo hidrológico SWAT, a sua viabilidade para gerar os componentes do ciclo hidrológico com precisão suficiente na bacia do Rio Capim.

1.4- Principais Etapas da Pesquisa (Objetivos Específicos).

1. Calibrar e validar o modelo hidrológico SWAT para a bacia de Rio Capim;
2. Estimar os componentes do ciclo hidrológico;
3. Avaliar a concordância entre os valores estimados e observados da vazão mensal na bacia do Rio Capim;
4. Colaborar para a gestão e planejamento dos recursos hídricos no estado do Pará e em especial na bacia do Rio Capim.

2- ELEMENTOS TEÓRICOS

Esta pesquisa está centrada na utilização de um modelo hidrológico com o objetivo de gerar fluxos de vazão e componentes do ciclo hidrológico, através do uso de dados de sensoriamento remoto e de estações hidrológicas e fluviométricas, associado a um modelo hidrológico (SWAT). Este item contempla os aspectos conceituais do ciclo hidrológico, bem como as metodologias tradicionais para as suas medições e estimativas. Além disso, também são abordados, os modelos hidrológicos conceituais, explicitando-se as principais vantagens, desvantagens e limitações de suas aplicações e por fim o sensoriamento remoto como ferramenta para aquisição de dados em áreas de difícil acesso.

2.1- Ciclo Hidrológico.

O ciclo hidrológico está ligado ao movimento e à troca de água, nos seus diferentes estados físicos, que ocorre na hidrosfera, entre os oceanos, as calotas de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera, sendo que, este movimento permanente se deve ao sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação) (Figura 1). A gravidade faz com que a água condensada retorne para a superfície (precipitação). Esta água circula e se reúne em rios até atingir os oceanos (escoamento superficial) ou se infiltra nos solos e nas rochas através dos seus poros, fissuras e fraturas (escoamento subterrâneo) (CARVALHO & SILVA, 2006) (Figura 1). A principal entrada no ciclo hidrológico é a precipitação, que pode ocorrer sob forma de chuva, neve, granizo ou orvalho, mas nem toda a água precipitada alcança a superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, pode ser interceptada pela vegetação e volta a evaporar-se.

A água que se infiltra no solo é submetida à evaporação direta para a atmosfera e parte é absorvida pela vegetação, que através da transpiração, retorna-a para a atmosfera. Esses processos são conhecidos por evapotranspiração, e ocorrem no topo da zona não saturada, ou seja, na zona onde os espaços entre as partículas de solo contêm tanto ar como água (SHUTTLEWORTH, 2008). A água que continua a infiltrar-se e atinge a zona saturada, entra na circulação subterrânea e contribui para um aumento da água armazenada (recarga dos aquíferos). O topo da zona saturada corresponde ao nível freático. No entanto, a água subterrânea pode ressurgir à superfície (nascentes) e alimentar as linhas de água ou ser descarregada diretamente no oceano (SOUZA et al. 2012).

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 (CARVALHO & SILVA, 2006). O ciclo hidrológico é um meio conveniente de apresentar os fenômenos hidrológicos, servindo também para dar ênfase às quatro fases básicas, que são: precipitação; evaporação e transpiração; escoamento superficial; escoamento subterrâneo (Figura 1).

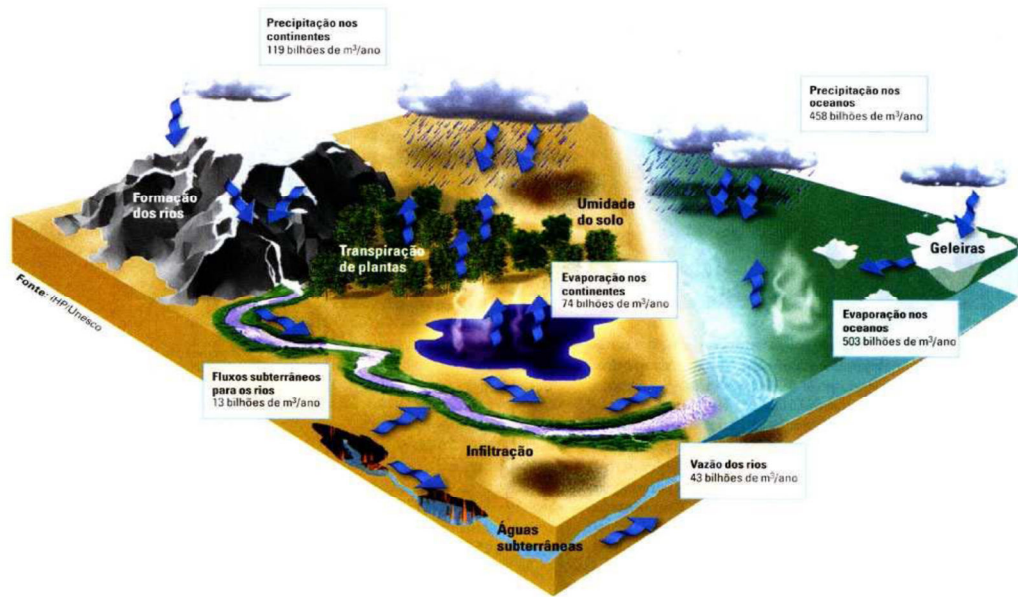


Figura 1. Ciclo Hidrológico. Fonte: UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION – UNESCO/ IHP.

Embora possa parecer um mecanismo contínuo, com a água se movendo de uma forma permanente e com uma taxa constante, é na realidade bastante diferente, pois o movimento da água em cada uma das fases do ciclo é feito de um modo bastante aleatório, com variação espaço-temporal. Os estudos para a geração de escoamento superficial a partir de um excedente de infiltração foram desenvolvidos inicialmente por HORTON (1933), mostra que o escoamento superficial é gerado em toda a superfície, quando a capacidade de infiltração se torna menor que a precipitação, e o solo acaba atuando como um plano de “separação hidrológica” entre os volumes que geram escoamento rápido (superficial) e lento (subsuperficial) (MEDIONDO & TUCCI, 1997). Estes escoamentos (superficial e subsuperficial) influenciam na propagação de vazões, gerando-se o escoamento da água na rede de drenagem, provocando eventos de cheia, influenciando em planícies de inundações e na magnitude da rede hidrográfica (LIMA, 2011).

A variação de vazão que existe no escoamento subterrâneo é, em de ordem de grandeza, muito menor que a do escoamento superficial (WILKEN, 1978). Isso torna evidente que as águas superficiais, pela sua maior velocidade de escoamento, preponderam na formação das enchentes, enquanto que a contribuição subterrânea pouco se altera, em consequência de grandes precipitações (PINTO et al., 1976). Assim, fica claro que as duas grandezas estão sujeitas a leis diferentes, havendo a necessidade de separá-las, de modo que, seja possível analisar independentemente o hidrograma de escoamento superficial (SARTORI, 2004).

Após o efeito provocado pelo escoamento superficial nas vazões de um rio, estas grandezas são mantidas pela contribuição subterrânea. Com o passar dos dias, sem que ocorra precipitação suficiente para a recarga do lençol subterrâneo, o escoamento básico vai diminuindo, segundo uma lei típica (curva de depleção). Essa variação logo após as chuvas ou durante estiagens prolongadas recebe o nome de curva de depleção⁴ (VILLELA e MATTOS, 1975), a qual a partir de sua lei típica pode ser ajustada para certo número de dados fluviométricos (SARTORI, 2004).

Desta forma, o regime de escoamento pode ser (LIMA, 2011):

- Permanente, caso a velocidade em um mesmo ponto permaneça invariável ao longo do tempo. Neste caso, profundidade, área molhada e vazão terão valores constantes em um mesmo ponto; e
- Não permanente, caso mude ao longo do tempo, alterando-se também as outras variáveis.

Em termos do espaço, os escoamentos podem ser uniformes, caso as velocidades locais sejam paralelas entre si, guardando trajetórias retilíneas (PORTO, 2006); e variados, se os elementos característicos do escoamento variarem, de uma seção para outra no canal, em um mesmo instante de tempo.

Os métodos de propagação de vazões permitem calcular a vazão em um ponto a jusante com base nas vazões da área de drenagem a montante, sendo também usados para construir os hidrogramas das bacias (LINSLEY et al., 1975) com o objetivo de previsão dos eventos (seca ou cheia de rios, como por exemplo.). Em seu estudo LIMA (2011) concluiu que o modelo hidrológico (THMB - Terrestrial Hydrologic Model with Biogeochemistry), que foi utilizado em sua investigação, para o Rio Madeira, obteve boa concordância (ressaltando algumas restrições) quando consideradas as vazões anuais e uma relativa concordância na simulação das vazões mensais, podendo este modelo auxiliar ainda na prevenção e/ou previsão de áreas alagadas na bacia hidrográfica.

A maioria dos estudos no país tem se concentrado nos impactos sobre os recursos hídricos superficiais, com ênfase em assuntos ligados à hidroeletricidade e à agricultura. A título de exemplo, destaquem-se estudos que sintetizam, em grande parte, os estudos existentes em termos de impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, como o nordeste e o centro-oeste-sudeste do Brasil, que são altamente vulneráveis, pela dependência da energia elétrica (VALVERDE e MARENGO, 2010).

⁴ A lei típica de ajuste da curva de depleção pode ser deduzida, considerando-se a seguinte hipótese: “a variação com o tempo da vazão do lençol subterrâneo é proporcional à própria vazão do escoamento básico” (VILLELA e MATTOS, 1975).

Nessas regiões, mudanças climáticas (especialmente na forma de aumento de temperatura do ar) podem acrescentar o risco de inóculos, pela crescente população, urbanização, industrialização, e mudanças no uso da terra associadas à agricultura e à pecuária. Na Amazônia, entretanto, os problemas são associados à possível perda de biodiversidade e aos impactos no ciclo hidrológico (VALVERDE e MARENGO, 2010).

As possibilidades de ocorrerem períodos de intensa seca na região da Amazônia podem aumentar dos atuais 5 % (uma forte estiagem a cada 20 anos) para 50 % em 2030 e até 90 % em 2100 (COX et al. 2008).

Em um estudo mais detalhado, porém, com abrangência regional, TOMASELLA et al. (2009) apresentaram uma análise de impacto das mudanças climáticas para a bacia do rio Tocantins e suas principais sub-bacias, para o cenário A1B do painel de mudanças climáticas, usando o modelo ETA (BLACK, 1994) (resolução 40 km) com condições de contorno do modelo global HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3). O estudo concluiu que, em termos de médias mensais, a redução para o cenário 2080-2090 é da ordem de 30 %, mas que essas reduções poderão alcançar até 60 % na estação seca. De modo geral, esse estudo mostrou um deslocamento da curva de permanência para os mínimos, o que indica que há uma tendência à redução de vazões para quase todas as faixas de probabilidade. Ainda, os impactos são maiores no caso da bacia do rio Araguaia, cuja área de drenagem está localizada em terrenos cristalinos.

Um aspecto importante desse estudo é o de indicar, que a ocorrência de deficiências hídricas não é uniforme durante o ano inteiro e que o impacto pode variar dependendo das características das bacias hidrográficas.

Estudos mostraram que cerca de 70% da quantidade de água precipitada sobre a superfície terrestre retorna à atmosfera pelos efeitos da evaporação e transpiração (ALLEN et al., 1998). Devido a isso, a mensuração desses dois fenômenos é fundamental para o conhecimento dos processos em escala de bacia e na elaboração de projetos, visto que eles afetam diretamente o ciclo hidrológico das bacias hidrográficas, na determinação da capacidade de reservatórios, projetos de irrigação e na disponibilidade para o abastecimento público, entre outros (SOUSA, 2010).

Em solos com cobertura vegetal é quase impossível separar o vapor d'água proveniente da evaporação da água no solo daquele originado da transpiração. Neste caso, a análise do aumento da umidade atmosférica é feita de forma conjunta, interligando-se os dois fenômenos em um processo único (evapotranspiração). A evapotranspiração define a perda total de água do sistema solo-planta-atmosfera.

Para a avaliação do balanço hídrico de uma região é necessário considerar os diferentes conceitos de evapotranspiração (Et), mencionadas a seguir:

Evapotranspiração potencial (Etp): é o processo de perda de água para a atmosfera, através de uma superfície natural gramada, padrão, sem restrição hídrica para atender às necessidades da evaporação do solo e da transpiração;
 Evapotranspiração real (Etr): constitui a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal;
 Evapotranspiração de referência (Et0): é aquela de uma extensa superfície, coberta totalmente por grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo e sem deficiência hídrica (CAMARGO e CAMARGO, 2000).

Diversas pesquisas sobre Et estão sendo conduzidas na Amazônia pela importância que está variável tem no ciclo hidrológico e dentre estes experimentos, alguns pesquisadores observaram valores médios de Et de 3,9 mm/dia no leste da Amazônia, e de 3,7 mm/dia na porção central e sul da Amazônia (ROCHA et al., 1996). VON RANDOW et al. (2004) obtiveram valores de 3,6 mm/dia e 3,8 mm/dia para as estações úmidas e secas, respectivamente, em uma floresta no sudoeste da Amazônia. ROCHA et al. (2004) obtiveram um valor médio anual de 3,5 mm/dia na região de Santarém, no estado do Pará, uma das regiões mais secas da Amazônia. Estes estudos de Et estão dentro do intervalo médio espacial de toda a bacia amazônica. Mais recentemente, NEGRÓN JUÁREZ et al. (2007) mostraram de forma espacial os principais resultados da Et sazonal para diferentes épocas e locais, especificamente na parte central (320 mm), leste (515 mm) e sul da Amazônia legal (215 mm), indicando que a Et sazonal para o período menos chuvoso decresce da região leste para o centro-sul da Amazônia.

BORMA et al. (2009) analisaram para os anos de 2003 a 2006 a variabilidade sazonal e interanual da evapotranspiração em área de várzea no leste da Amazônia, localizada em uma zona de transição entre floresta e savana. Os resultados mostram que a Et média no período inundado foi de 4,1 mm/dia, sendo maior do que no período não inundado de 3,7 mm/dia. A Et do período inundado foi principalmente influenciada pela evaporação da lâmina de água presente na época. Os autores dizem que a diminuição da Et no período não inundado foi decorrente do aumento da radiação solar e do déficit do vapor de água na atmosfera, considerando um comportamento incomum aos processos físicos relacionados à Et obtidos em regiões de cerrado e pastagem na Amazônia.

No estudo de BETTS e SILVA DIAS (2010), para as áreas estudadas, pelo programa LBA na Amazônia, observaram que em locais com uma precipitação anual acima de 1.900 milímetros e um comprimento estação seca menos de quatro meses, as taxas de evaporação aumentaram na estação seca, coincidindo com o aumento da radiação. Em contraste,

ecossistemas com precipitação inferiores a 1700 mm e uma estação seca mais longa, mostraram evidências claras de redução evaporação na estação seca, proveniente de estresse hídrico.

Portanto, pode-se considerar que a evapotranspiração média da bacia amazônica não deve ser inferior a 3,5 mm/dia nem superior a 4,5 mm/dia (SOUSA, 2010).

O conhecimento da Et é de fundamental importância para a gestão política dos recursos hídricos e conforme os estudos acima descritos, tem-se basicamente, em sua maioria, medidas pontuais, e por isso, tem-se a necessidade de estudos em áreas maiores com o objetivo de comprovar-se estes resultados.

2.2- Modelos Hidrológicos e a Integração ao Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Um modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas, e ainda, pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade (RENNÓ & SOARES, 2000). Em estudos ambientais, o uso de modelos tem-se mostrado uma importante ferramenta para verificar o comportamento dos sistemas naturais e prever os impactos resultantes de alterações que esses sistemas possam vir a apresentar (LUBITZ, 2009).

Os modelos podem ser físicos, analógicos ou matemáticos (TUCCI, 2005):

- Modelos físicos, geralmente, são representações de um sistema numa escala menor, através da utilização de um algoritmo;
- Modelos analógicos são aqueles que buscam explicar processos de um sistema através de equações de outro tipo de sistema; e
- Modelos matemáticos se utilizam de equações matemáticas para representar todos os processos envolvidos.

No âmbito dos recursos hídricos, alguns tipos de modelos têm sido desenvolvidos, diferenciados de acordo com os processos físicos que procuram representar. Merecem destaque: modelos hidrodinâmicos, que são focados na determinação de vazões e efeitos de escoamento; modelos de qualidade de água, usados para simular o impacto do despejo de efluentes sobre corpos d'água; e, modelos hidrológicos, que buscam representar todos os fenômenos do ciclo hidrológico, sendo aplicados em simulações do comportamento de bacia hidrográficas (LUBITZ, 2009). O primeiro modelo que procurou integrar todas as etapas do

ciclo hidrológico foi, provavelmente, o modelo conceitual concentrado⁵ Stanford (Stanford Watershed Model – SWM) (TUCCI, 2005).

Existe um grande número de modelos hidrológicos, como o HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) que é amplamente utilizado pelo setor privado nos Estados Unidos em projetos de sistemas de drenagem e quantificação dos efeitos decorrentes de alterações no uso do solo, o WBN (Watershed Bounded Network) que é comumente empregado para a previsão de vazões, projetos de drenagem e avaliação dos efeitos de uso do solo e o GLEAMS (Ground Water Loading Effects of Agricultural Management Systems), que tem por finalidade principal simular as mudanças de distintos cenários de uso e ocupação do solo (TUCCI, 2005).

O modelo SWAT, que foi criado no início dos anos 90, para uso do Departamento de Agricultura norte-americano (USDA – United States Department of Agriculture) e do Agricultural Research Service (ARS), é um derivado direto do modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins), e recebeu contribuições do CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), GLEAMS e EPIC (Erosion-productivity Impact Calculator) (LUBITZ, 2009).

A incorporação de modelos hidrológicos à plataforma SIG constitui um grande avanço que proporciona um aumento na funcionalidade e praticidade na execução das rotinas, com destaque para o modelo TOPOG-SBM (Topographical – Simple Bucket Model que é um modelo de base física, determinístico e com parâmetros distribuídos (KOBAYAMA et al., 2009)) é o resultado de uma parceria entre os centros de estudo australianos da CSIRO *Land and Water* (Common Wealth Scientific and Industrial Research Organization) e o CRCCH (Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology).

O SWAT e os da série MIKE por Danish Hydraulic Institute (DHI, 2005) que possuem softwares de engenharia com ferramentas para simulações hidrológicas, hidráulicas, qualidade de água e transporte de sedimentos em estuários, rios e sistemas de irrigação e entre outros usos da água e da terra (VERTESSY e ELSENBEER, 1999).

A grande quantidade de variáveis utilizadas pelo SWAT pode ser vista inicialmente como uma desvantagem para a utilização deste modelo, mas para o caso de bacias com pouco monitoramento e, conseqüentemente, dificuldades na calibração dos modelos, quanto melhor o detalhamento dos fenômenos envolvidos, maior será a garantia da obtenção de bons resultados no processo de modelagem (LUBITZ, 2009).

⁵ Um modelo é concentrado (*lumped*) quando não leva em conta a variabilidade espacial. Em geral, os modelos concentrados utilizam somente o tempo como variável independente.

Por ser um modelo físico-distribuído integrado ao software SIG do ArcGis, que opera sobre um passo de tempo diário, a discretização da bacia hidrográfica pode ser realizada por sub-bacias, divididas ainda em unidades de respostas hidrológicas (URH), com características únicas e de acordo com a drenagem principal e/ou por módulos-grid (SOUSA, 2010).

Com o uso de um SIG, é possível agregar dados como mapas digitais de uso do solo, vegetação, clima, pedologia, dentre outros (cada parte gráfica incorporada ao conjunto é, geralmente, chamada de PIC). Estes PIC que devem alimentar o modelo correspondem aos mapas de uso do solo, mapas pedológicos, hidrografia e o modelo numérico do terreno (MNT). Para cada sub-bacia, os dados de entrada são divididos em: Clima (temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar), URH's e características locais (Figura 2).

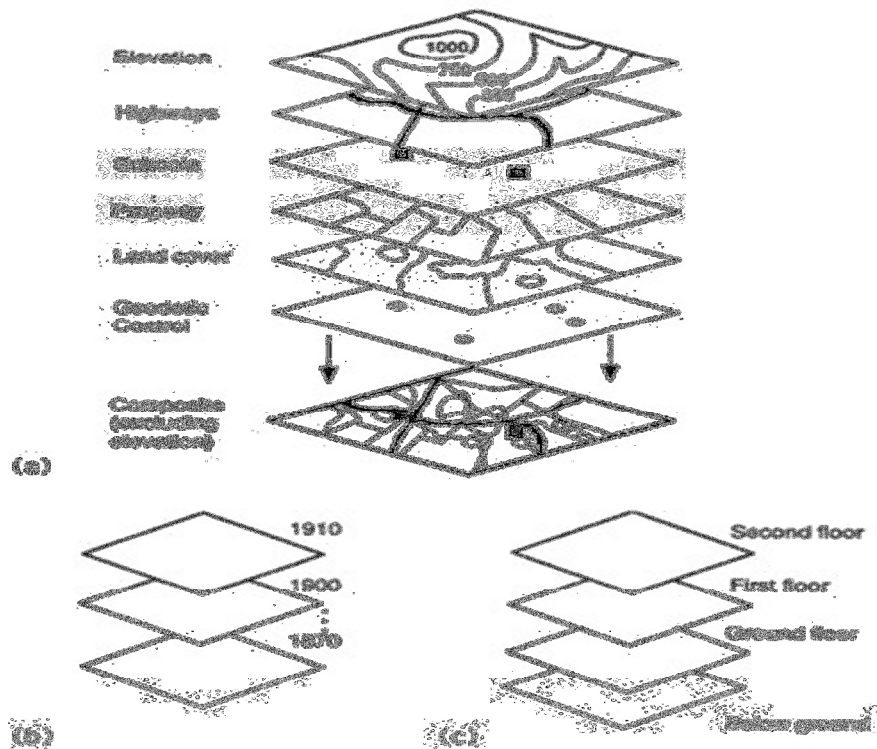


Figura 2: Estrutura em camadas representando: (a) uma porção do mundo real típica do SIG, (b) dados ao longo do tempo e (c) pavimentos de um prédio. Adaptado de LAURINI e THOMPSON (1994).

Até pouco tempo, o uso de modelos hidrológicos conceituais com parâmetros distribuídos estava restrito a pequenas bacias por causa das limitações impostas pela grande quantidade de dados a serem manipulados. O advento do SIG e a crescente melhora no processamento computacional possibilitaram o desenvolvimento de modelos mais robustos, mas ao mesmo tempo mais fáceis de serem manipulados (LUBITZ, 2009).

MACHADO (2002) afirma que a interface entre SIG e os modelos pode ocorrer de três formas:

- União: Nesta forma SIG e modelo são desenvolvidos separadamente, e o modelo apenas extrai os dados obtidos pelo SIG através de uma simples transferência de arquivos;
- Combinação: Aqui o modelo é configurado com as ferramentas do SIG e a troca de dados é feita automaticamente; e
- Integração: Nesta forma modelo e SIG são incorporado um ao outro, o que requer um grande esforço de programação, por isso, tal interface é mais usual nos modelos.

NEITSCH et al. (2005 a) afirmam que o SWAT foi desenvolvido com a finalidade de prever o impacto de práticas de manejo do solo com produtos químicos agrícolas sobre a água, os sedimentos e os nutrientes, por longos períodos de tempo, em grandes bacias. O SWAT já foi aplicado no mundo todo, tendo seu desempenho sido testado em diversos tipos de solo e vegetação (LUBITZ, 2009), por exemplo, GROSSI (2003), que avaliou as perdas de solo na bacia do rio Pardo no estado de São Paulo e MEDEIROS et al. (2004) que utilizaram o modelo para determinar a disponibilidade hídrica em uma bacia do semi-árido na Bahia com o intuito de montar um sistema de apoio à tomada de decisões em questões relacionadas ao gerenciamento dos recursos hídricos da região.

BALDISSERA (2005) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT a uma bacia do Rio Cuiabá no estado de Mato Grosso, apresentando resultados satisfatórios, mas com algumas restrições associadas à limitação de seus dados pedológicos.

MINOTI (2006) quantificou a produção de sedimentos em parte da bacia do rio Mogi-Guaçu no centro do estado de São Paulo e para isso comparou quatro modelos, o WEPP (Water Erosion Prediction Project), o GeoWEPP (Geo-Spatial interface for WEPP), o AnnAGNPS (Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution) e o SWAT que conseguem simular processos erosivos. Ficou clara a opção dele pelo SWAT, pois o mesmo apresentou um número maior de componentes simulados, uma interface mais amigável e grande disponibilidade de informações para soluções de problemas decorrentes dos processos erosivos na bacia em estudo. NEVES et al. (2006) aplicaram o modelo SWAT à região de Descalvado no estado de São Paulo, avaliando como a atividade avícola influencia o acúmulo da quantidade de nitrogênio e fósforo nos mananciais da bacia e chegaram à seguinte conclusão:

- Que uma bacia com grande potencial erosivo apresenta uma maior problemática no subsídio de dejetos de animais em corpos d'água, bem como em outras variáveis, como a vazão, por exemplo, em que houve uma diminuição ao longo da bacia.

LUBITZ (2009) aplicou o SWAT à bacia do Ribeirão Concórdia no município de Lontras, no estado de Santa Catarina, objetivando avaliar sua aplicação numa bacia agrícola. Identificou os parâmetros mais importantes através da análise de sensibilidade, simulando o escoamento, a produção de sedimentos, assim como projetando cenários futuros quanto ao uso e ocupação do solo, verificando os aspectos qualitativos e quantitativos pertinentes aos recursos hídricos. Apresentou resultados satisfatórios principalmente no que se refere aos dados de saída de vazão, referentes aos dados mensais e fazendo apenas restrições aos dados de saída diários, principalmente pelas limitações de seus dados de entrada (séries curtas, registros inconsistentes).

2.3-Sensoriamento Remoto (SR).

Felizmente, também é possível coletar informações sobre um objeto ou área geográfica, a partir de um ponto distante privilegiado, com o uso de instrumentos de sensoriamento remoto (JENSEN, 2009). A estimativa dos diversos tipos de dados presentes no sistema Terra-Atmosfera tem sido um dos principais objetivos dos satélites meteorológicos e ambientais, desde o lançamento do Explorer VII em 1959 (DIAK et al. 2004).

Os sensores a bordo desse satélite foram desenvolvidos para realizar diversas medições, as quais eram pouco precisas em comparação às obtidas atualmente, mas forneceram aos cientistas os primeiros dados referentes a diversas características do planeta como a vegetação, a água e o solo, dentre outros. Essas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (LIU, 2007). Devido às diferentes energias refletidas pelos objetos, pode-se representá-las por curvas e, em decorrência destas variações, é possível distinguir os objetos da superfície terrestre nas imagens de sensores remotos. A representação dos objetos nessas imagens vai variar do branco (quando refletem muita energia) ao preto (quando refletem pouca energia) (Figura 3) (FLORENZANO, 2007).

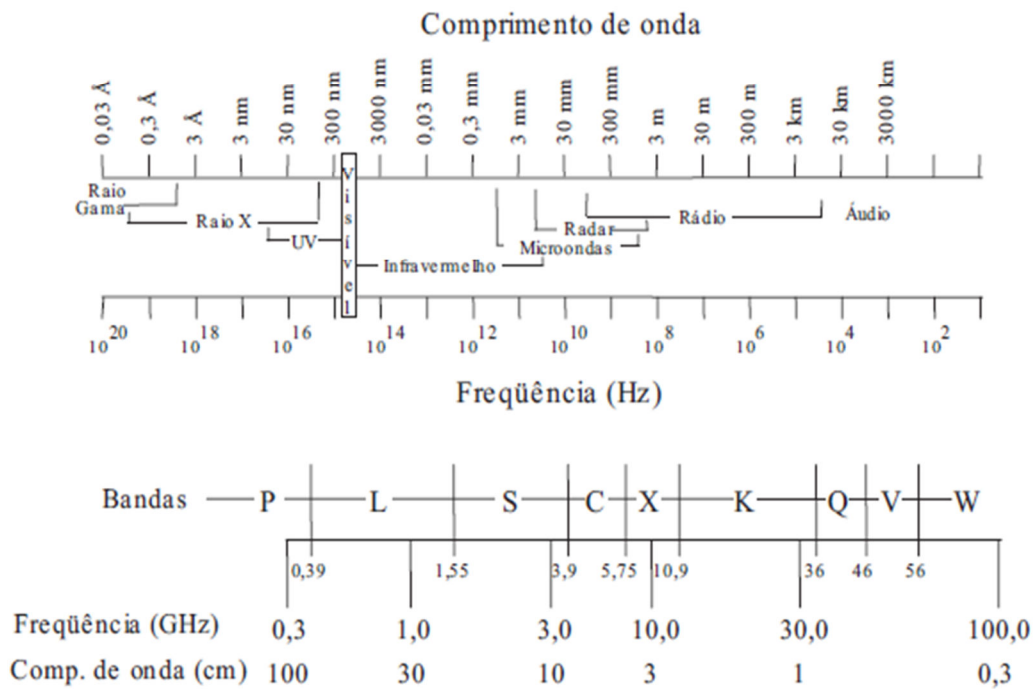


Figura 3. O espectro eletromagnético. Fonte: Adaptado de FREITAS et al. (2007).

Desta forma, sensoriamento remoto é definido, como:

Um sistema por meio do qual se obtém informações a respeito dos recursos naturais renováveis e não renováveis do planeta Terra, pela utilização de sensores colocados em aviões, satélites ou mesmo na superfície (MOREIRA, 2003).

Essa radiação, ao entrar em contato com os alvos, tem parte dela refletida, atingindo o detector de um sistema sensor que, eventualmente, esteja sobre a área irradiada (neste caso é dito inativo). Nesta categoria de sensores têm-se o SPECTRON-SE 590, o TM (Thematic Mapper) do Landsat, o HRV (Haut Resolution Visible) do SPOT. Por outro lado, se o sistema sensor possui uma fonte de radiação, isto é, não depende de uma fonte externa para irradiar o alvo, ele é dito ativo. Neste caso, o sensor emite um fluxo de radiação em determinada faixa espectral que interage com os alvos na superfície da Terra e a parte que é refletida é, então, captada pelo sensor (como exemplo de sistema ativo tem-se o radar (radio detection and ranging) (MOREIRA, 2003)). O termo radar significa:

Deteção de alvos e avaliação de distâncias por ondas de rádio. Eles operam em comprimentos de onda bem maiores do que aqueles da região espectral do visível e infravermelho, operando na região de microondas (Figura 3), entre as bandas K-alfa (10 cm ou 40 GHz) e P (1 m ou 300 MHz) (FLORENZANO, 2007).

Os satélites em que atuam os sensores meteorológicos, como por exemplo, o NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) que tem o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) (KIDWELL, 1995), o CMORPH (MORPHing Technique) do

CPC (Climate Prediction Center), o laser, radiômetros de microondas e câmaras fotográficas quando utilizam como fonte de radiação o “flash”, também são exemplos de sensores remotos JENSEN, 2009 (Figura 4).

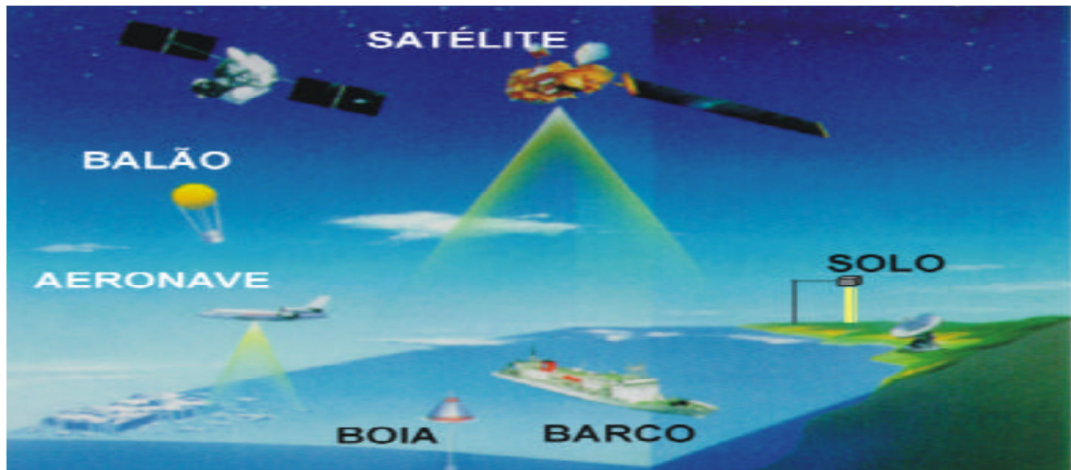


Figura 4. Sensores Remotos e suas localizações. Fonte: Adaptado de MOREIRA (2003).

O território brasileiro foi imageado, na escala original de 1:400.000, pelo sistema de radar da GEMS (Goodyear Environmental Monitoring System), transportado a bordo de um avião a cerca de 11.000 m de altura. Este processo foi executado em dois períodos: 1971/72 e 1975/76 (FLORENZANO, 2007).

No período de 1971/72 foram cobertas a Amazônia Legal, a parte leste da Bahia e Minas Gerais e o norte do Espírito Santo. No segundo de 1975/76 foi coberto o restante do Brasil. Após as análises destas imagens foi elaborado um mapeamento dos recursos naturais de todo o Brasil pelo projeto Radam Brasil, no período de 1971 a 1986 (ESCOBAR et al., 2005). Esse mapeamento encontra-se publicado na escala de 1:1.000.000.

No nível orbital, ou seja, a bordo de satélites artificiais, as missões civis com radar se iniciaram em 1978 com o programa Seasat, desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), merecendo também destaque o ERS (European Remote Sensing), da Agência Espacial Européia (AEE), e o Radarsat, desenvolvido pelo Canadá, em parceria com a NASA e NOAA (FLORENZANO, 2007).

A AEE já lançou três satélites de observação da terra, o ERS-1 (European Remote Sensing), o ERS-2 e o sucessor do da linha ERS o Envisat (Environmental Satellite) que foi lançado em 2002 (é o maior satélite de observação da terra, com dez sensores a bordo), com o intuito de monitorar o uso e a cobertura da terra, os oceanos, o gelo polar e a atmosfera. Um destes sensores é o ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), um sistema avançado de radar. Durante as últimas décadas, os cientistas têm demonstrado interesse crescente no uso de

dados de satélites e de radares para a obtenção de informações sobre parâmetros ambientais importantes e para um maior entendimento das condições da superfície terrestre em diferentes aplicações, tais como, hidrologia, meteorologia e agronomia (SOUSA, 2010).

3-ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA

Este item contempla os aspectos físicos da área em estudo, bem como a metodologia empregada para a inserção de dados no SWAT, e desta forma, mostrar uma resposta para a questão anteriormente apresentada.

3.1-Área de Estudo.

Esta pesquisa foi desenvolvida para a bacia do Rio Capim, localizada a nordeste do estado do Pará e oeste do Maranhão, possui uma área de 37.199,22 km² e abrangendo os municípios de: São Domingos do Capim, Aurora do Pará, Ipixuna do Pará, Paragominas, Goianésia do Pará, Dom Eliseu, Ulionópolis, Rondon do Pará, Açailândia (MA), Cidelândia (MA) e Vila Nova dos Martírios (MA) (Figura 5).

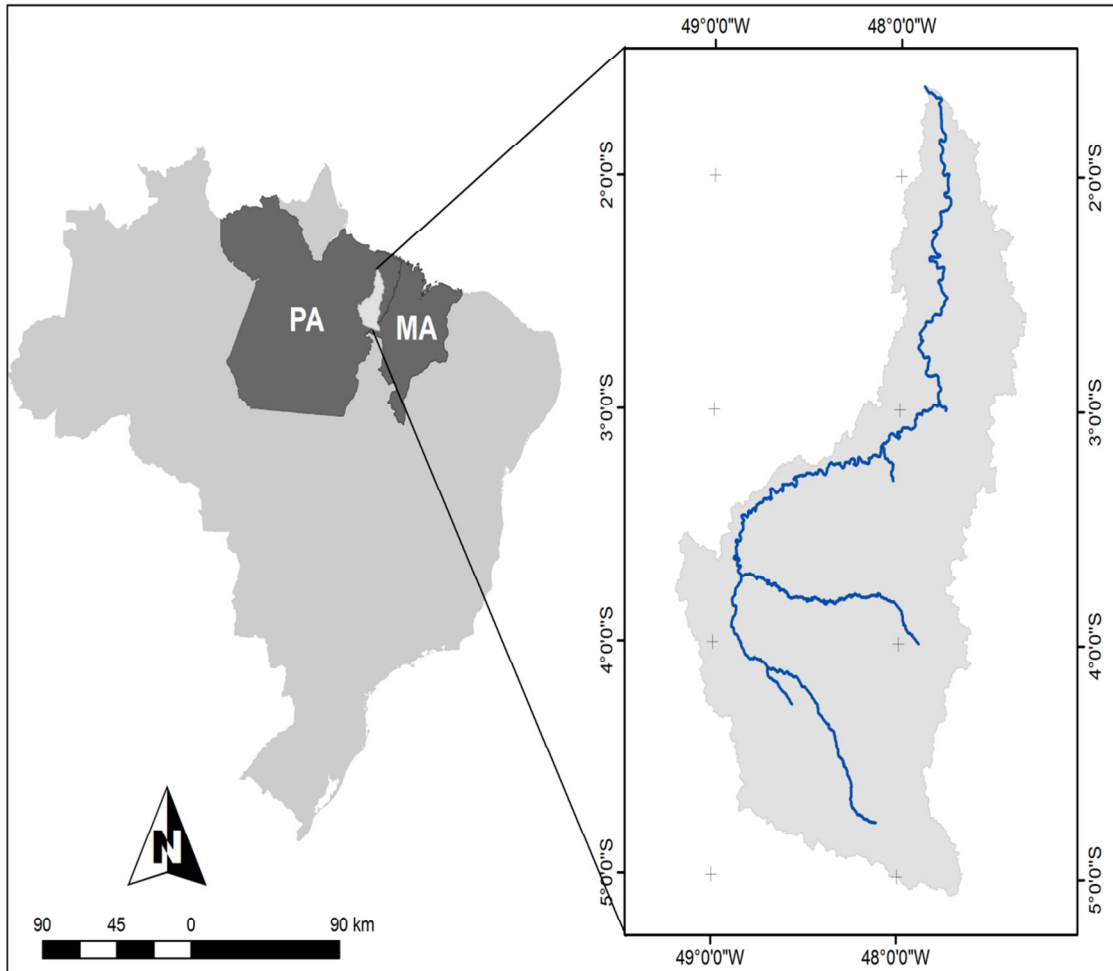


Figura 5. Área de Estudo. Fonte: Adaptado de BRASIL, 1937.

3.2- Características Físicas.

a) Modelo Numérico do Terreno.

O Modelo Numérico do Terreno foi disponibilizado em uma carta altimétrica (de uma imagem SRTM) com resolução de 90 m. Posteriormente, foi transformada em imagem *raster* de resolução de 60 m e escala de 1:300.000, assim como todas as cartas envolvidas neste estudo, pois elas devem possuir a mesma resolução espacial e mesma escala para serem adicionadas ao modelo. A bacia do Rio Capim tem altitudes variando de 2 m na parte norte da bacia, até 411 m na parte sul, com uma elevação média de aproximadamente 114 m no meio da bacia (Figura 6). Grande parte da bacia hidrográfica do Rio Capim é levemente regular na depressão do médio Capim, com o relevo menos acentuado na região norte do interflúvio

Guamá – Capim, nos municípios de São Domingos do Capim e São Miguel do Guamá (LIMA, 2005).

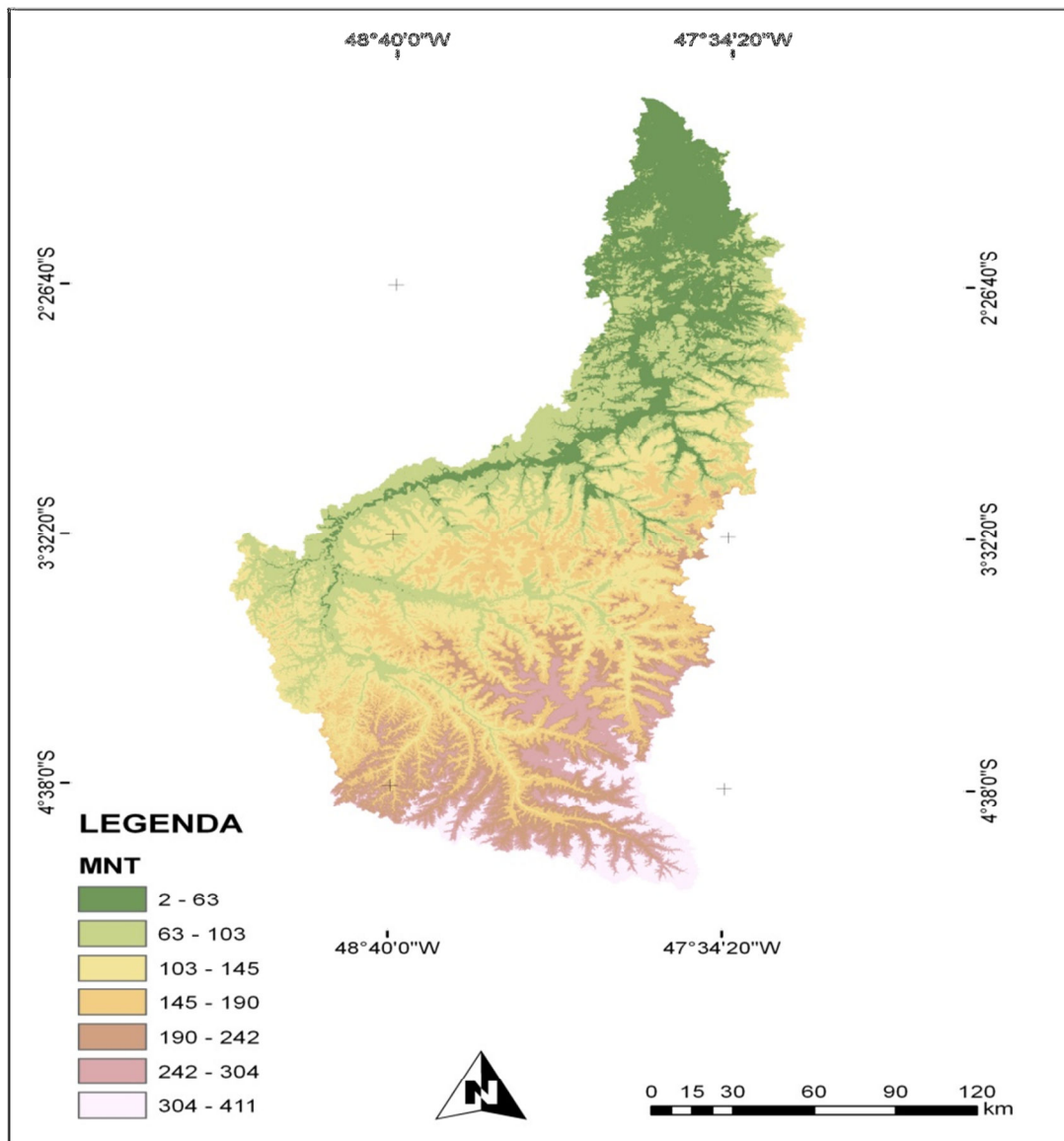


Figura 6: Modelo Numérico do Terreno (em m) da bacia do Rio Capim.

b) Tipos de Solos.

Os tipos de solos predominantes na bacia são: o Argissolo Amarelo, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e o Neossolo Flúvico (BRASIL, 1937) (Figura 7). A bacia é aproximadamente composta por 76% de solos do tipo Latossolo Amarelo (28.405,79 km²) e os solos com menor representatividade na bacia foram do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo (296,53 km²) com 0,8% (Tabela 1). Os solos do tipo Argissolo Amarelo (7.965,42 km², representam aproximadamente 21% da bacia) e somados aos solos do tipo Latossolo

Amarelo representam aproximadamente 98% da composição total da bacia do Rio Capim (Tabela 1).

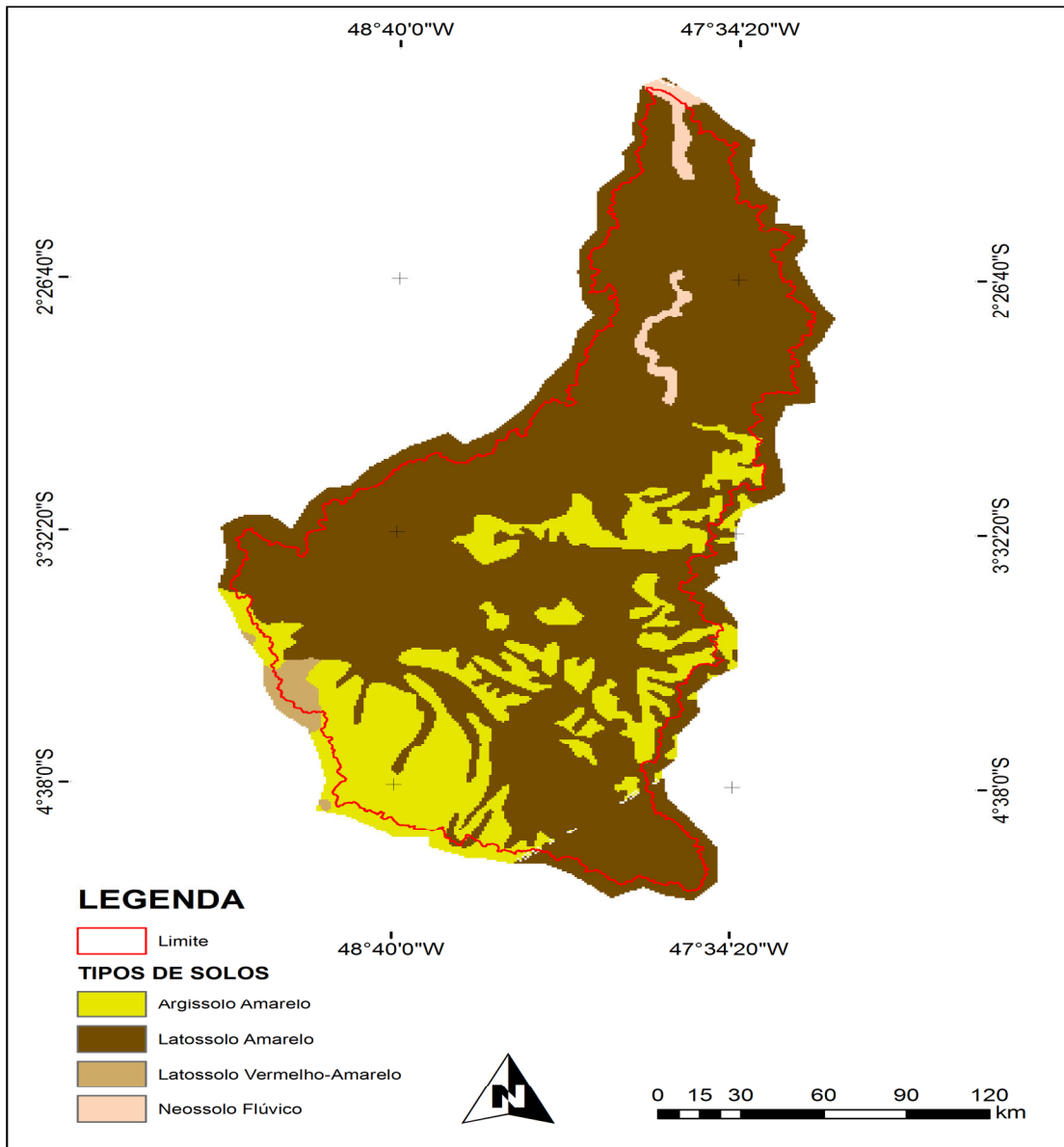


Figura 7: Mapa Pedológico da bacia do Rio Capim.

Tabela 1: Representatividade dos solos da bacia do Rio Capim.

CÓDIGO SWAT	SOLO	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
CAA	ARGISSOLO AMARELO	7.965,42	21,41
CLA	LATOSSOLO AMARELO	28.405,79	76,36
CLVA	LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	296,53	0,8
CNF	NEOSSOLO FLÚVICO	531,49	1,43
TOTAL		37.199,23	100

Os solos do tipo Argissolo Amarelo ocorrem em áreas de relevo plano, suavemente ondulados, ondulados ou até fortemente ondulados (BRASIL, 1937). Todas as informações referentes às características físicas de cada tipo de solo foram coletadas e cedidas pelo manual pedológico do BRASIL (1937), sendo apresentadas a seguir:

- **Argissolos Amarelo (CAA):** São grupamentos de solos minerais, bem drenados, tendo como principal característica um acentuado aumento do conteúdo de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B, evidenciando o horizonte diagnóstico B textural, podendo ou não apresentar cerosidade. Comumente apresentam adensamento de partículas na profundidade de 30 a 70 cm da superfície do solo, o que é verificado pela resistência à penetração da faca pedológica, o que pode dificultar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas cultivadas. Quimicamente apresentam baixo ou alto nível de fertilidade natural com saturações por bases trocáveis inferiores ou superiores a 50% respectivamente. Os solos com saturação por bases iguais ou maiores que 50% são considerados eutróficos e inferiores a 50% são distróficos (BRASIL, 1937).

- **Latossolos Amarelo (CLA) e Latossolos Vermelho-Amarelo (CLVA):** São solos minerais 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 franca arenosa ou mais fina e baixos teores de sedimentos (silte), de maneira que a relação silte/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. De um modo geral, os Latossolos apresentam baixa fertilidade natural, pH fortemente ácido, elevados teores de alumínio trocável, elevada saturação com alumínio, baixa saturação de bases trocáveis (distróficos), baixa capacidade de troca de cátions e baixíssimos teores de fósforo assimilável. Esses solos normalmente ocorrem em áreas de relevo plano e suavemente ondulado (BRASIL, 1937).

- **Neossolos Flúvico (CNF):** São solos minerais, profundos, hidromórficos ou não hidromórficos, que apresentam classe de textura arenosa, essencialmente quartzosos, com sequência de horizonte A e C. Apresentam fortes limitações físico-químicas que, praticamente, inviabilizam qualquer tipo de utilização agropecuária. Ocorrem em áreas de relevo ondulado, que apresentam horizonte A com menos de 40 cm de espessura, diretamente assentados sobre a rocha ou sobre material com 90 %, ou mais, de sua massa constituída de fragmentos de rocha (BRASIL, 1937).

Para o banco de dados de solo SWAT, é necessário adicionar as características físicas dos solos da bacia do Rio Capim exigidas pelo modelo (APÊNDICE B) (foram usados dados

do IBGE (BRASIL, 1937)). São elas: classificação ou nome do solo a ser inserido (SNAM), número de camadas (até 10 camadas em mm), grupo hidrológico do solo (usou-se o mesmo grupo hidrológico (D) para todos os solos), fração de porosidade do solo (diferenciada para cada tipo de solo), profundidade da superfície do solo até o fundo da camada (SOL_Z (0,5 m; 1 m; 2 m até o máximo de 3,5 m), textura de cada solo (AREIA, SEDIMENTO e ARGILA são as texturas apresentadas em todos os solos adicionados), argila contida no solo (CLAY em %), sedimento contido no solo (SILT em %), areia contida no solo (SAND em %), teor de pedra, pedregulho e rocha contida no solo (ROCK em %), densidade de massa úmida do solo (SOL_BD em g/cm³), capacidade de água do solo (SOL_AWC em mm/mm), condutividade hidráulica (SOL_K em mm/h), conteúdo de carbono orgânico do solo ((SOL_CBN em %), albedo do solo úmido (SOL_ALB em fração (fraction), condutividade elétrica do solo (SOL_EC em dS/m) e a fração de erodibilidade do solo (USLE_K).

O grupo hidrológico D pertence ao grupo de solos argilosos (30 - 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade ou solos arenosos como o grupo hidrológico B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados (LOMBARDI NETO et al., 1988).

c) Uso e Ocupação do Solo.

Quanto ao uso e ocupação do solo na bacia do Rio Capim, têm-se áreas de Florestas, Agricultura, Extrativismo Vegetal, Agropecuária, Áreas Urbanas, Pecuárias, Áreas Reflorestadas, Áreas de proteção ambiental e Áreas Campestres (ZEE-PA, 2010). Tais classes de uso e ocupação do solo foram identificadas e quantificadas (Figura 8). Inicialmente, o mapa de uso do solo possuía 15 classes de ocupação do solo e para facilitar o processo de modelagem no SWAT foi elaborada uma nova classificação pelo modelo, levando-se em conta a redefinição automática do contorno da bacia e pretendendo-se reduzir as classes de uso do solo (Tabela 2).

Como no manual do ZEE-PA, as áreas de Extrativismo Vegetal são áreas que apresentam extração de madeira e/ou exploração de sementes florestais, para o SWAT estas áreas foram consideradas como Florestas (18.669,62 km²), representando 50,21% do total da bacia. As áreas não classificadas (porção do Maranhão) foram consideradas como sendo de Pecuária e também por sua proximidade em relação a esta classificação (Figura 8). Estas áreas representam 28,46% da bacia, com uma extensão de 10.588,04 km². A bacia é composta por aproximadamente 96% de florestas, pecuária, agricultura e áreas de proteção ambiental. A

menor ocupação de solo se dá por áreas urbanas (26,64 km²), que representa 0,07% do total da bacia (Tabela 2).

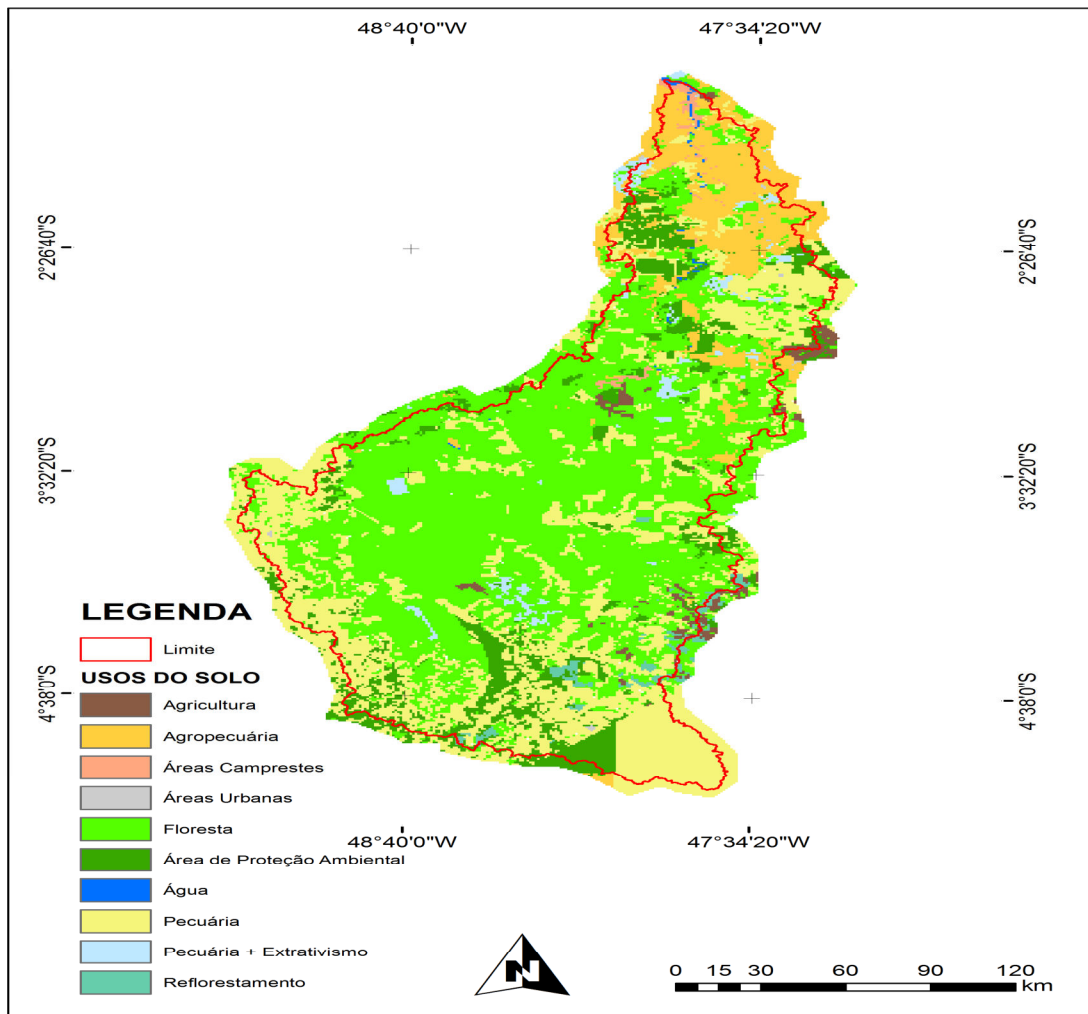


Figura 8: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da bacia do Rio Capim.

Tabela 2: Representatividade do uso e ocupação do solo da bacia do Rio Capim.

CÓDIGO SWAT	CLASSIFICAÇÃO ZEE-PA	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
FRST	EXTRATIVISMO VEGETAL	18.669,62	50,21
PAST	PECUÁRIA	10.588,04	28,46
AGRL	AGRICULTURA	3.073,29	8,26
FRSD	ÁREAS DE PROTEÇÃO AMBIENTAL	3.397,14	9,13
SPAS	PECUÁRIA + EXTRATIVISMO	590,55	1,59
FRSE	REFLORESTAMENTO	275,29	0,74
URBN	ÁREA URBANA	26,64	0,07
EGAM	ÁREAS CAMPRESTRES	182,34	0,49
WATR	ÁGUA	80,69	0,2
AGRC	AGROPECUÁRIA	315,63	0,85
TOTAL		37.199,23	100

3.3-Características Climáticas.

A bacia do Rio Capim possui uma estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) equipada com os seguintes sensores, um HMP45A responsável pela medição da Temperatura do ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR), um anemômetro com sensor combinado WN301/302 da *Vaisala* que mede a Velocidade do Vento (VV) e Direção do Vento (DV), um barômetro PTB330 da *Vaisala* que mede a Pressão Atmosférica do ar (P), um piranômetro CMP11 da Kipp & Zonen que mede a Radiação Solar (RS) e um pluviômetro QMR101 da Vaisala que mede e registra a Precipitação (PRP) (Figura 9). Esses são sensores de baixa frequência e estão conectados a um Datalogger modelo WT521 da *Vaisala* e fazem parte desta estação instalada no município de Paragominas (ID-A212), com coordenadas geográficas (LONG. 47, 3431° W; LAT. 3, 01028° S e 101 metros de altitude). Estes dados são coletados e registrados a cada 10 minutos, sendo tratados nos centros regionais e encaminhados para o Distrito de Meteorologia central em Brasília (INMET, 2011). Neste estudo, serão utilizados dados desta estação, de Setembro de 2007 a Dezembro de 2010, para se ter um melhor entendimento das características climáticas locais (APÊNDICE A).

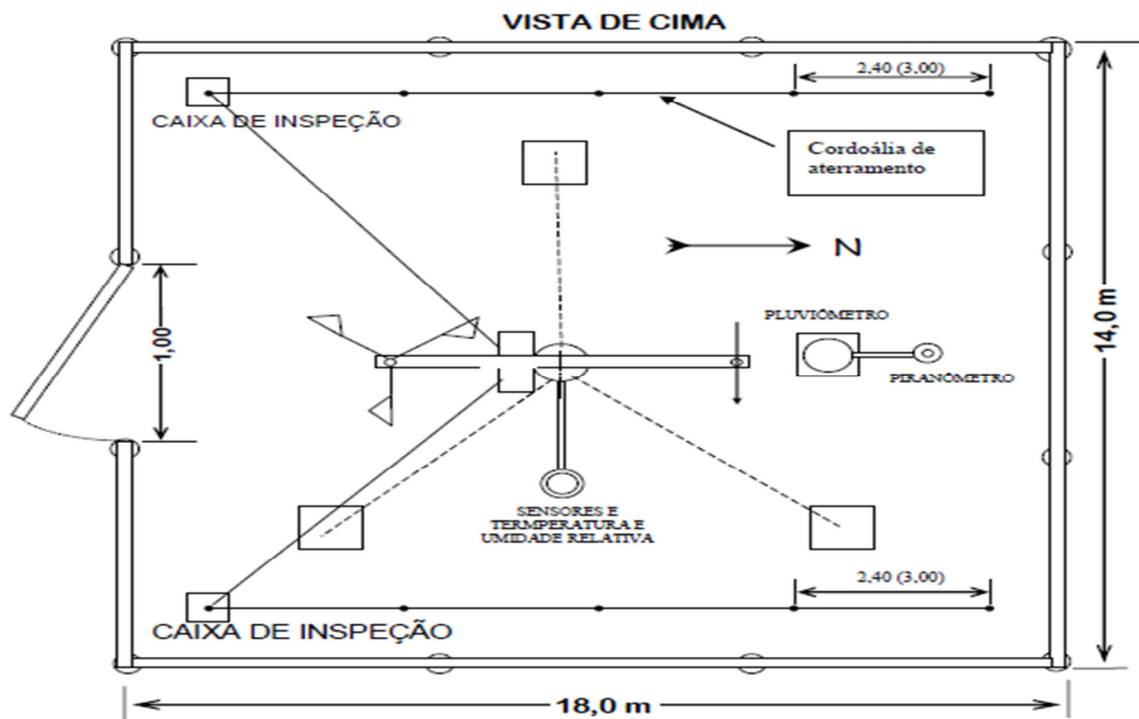


Figura 9: Croqui do cercado, de uma estação meteorológica automática, operada pelo INMET, localizada no município de Paragominas com o posicionamento dos sensores meteorológicos. Fonte: Adaptado de INMET, 2011.

A UR tem grande influência no fator térmico⁶, como foi observado por BETTS (2004), que sugeriu no seu estudo sobre o entendimento hidrometeorológico utilizando modelos globais para diversas bacias no mundo, que a umidade relativa do ar, base da nuvem e cobertura de nuvens, precisam ser medidos, juntamente com as radiações de ondas longas e curtas, e como parte dos sistemas de medições já utilizados nas estações automáticas (que tradicionalmente tem temperatura, precipitação e radiação solar apenas). Além disso, a importância de tantos processos acoplados à superfície do terreno apresenta grande desafio de validação para os modelos que usam diferentes módulos para os processos físicos.

A UR mostra uma variação média interanual oscilando entre 68,84 e 86,13%, ou seja, tem-se uma elevada UR durante o ano todo, em torno de 78,32% ocasionando uma sensação de mais calor nos dias quentes. A temperatura varia de 25,73 a 27,87 °C, com uma média anual de 26,46 °C, apresentando uma Temperatura Máxima (TMAX) média de 27,09 °C e Temperatura Mínima (TMM) média de 25,87 °C (APÊNDICE A).

A P apresenta uma oscilação de 999,28 a 1002,76 hpa, com uma média anual de 1001,02 hpa. A nebulosidade é bastante elevada, com variação de 5.3 a 8.1 décimos, principalmente pela influência de um fenômeno atmosférico de escala global chamado de Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), apresentando-se como uma faixa de nuvens com grande desenvolvimento vertical (Cb - Cumulonimbus), de 3 a 5 graus de largura, frequentemente associadas a tempestades, que circunda o globo próximo ao equador, e dependendo da sazonalidade somada a outros fenômenos, como a La Niña, o efeito de brisas formando mais nuvens na região (COHEN, 1989).

Outro aspecto importante na determinação das condições climáticas locais é a VV e DV, apresentando uma frequência média de sudeste e nordeste, com uma velocidade média em torno 1,33 m/s (APÊNDICE A).

A PRP na região equatorial é o elemento meteorológico que mais define o clima, já que a T e P, não possuem variações marcantes para mostrar mudanças sazonais. Desta forma, através da PRP, tem-se um “período chuvoso” que vai de Dezembro a Maio e um “período seco ou menos chuvoso” que vai de Junho a Novembro. O mês de maior PRP é Março, com 341,13 mm, em média, e o de menor PRP é Novembro, com 8,13 mm, em média. Para o período estudado, o total médio anual ficou em torno de 1.593,32 mm (Figura 10).

⁶ Características climáticas relevantes à superfície do terreno e que devem ser cuidadosamente avaliadas porque a cada processo estes módulos são alterados, é conhecido como feedback básico por BETTS (2004).

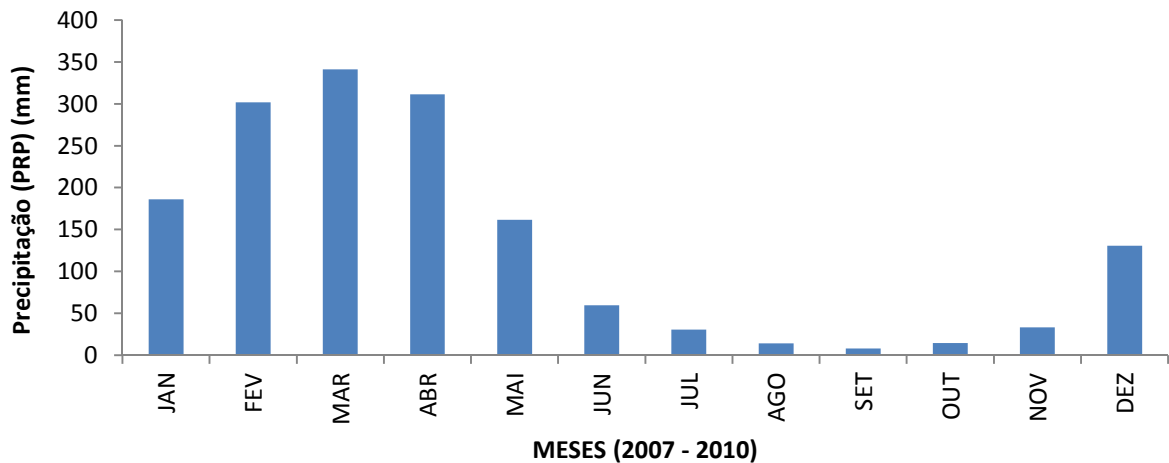


Figura 10. Histograma mensal do total da Precipitação (PRP) média, para o período de setembro de 2007 a dezembro de 2010, na bacia do Rio Capim.

3.4 Metodologia.

O passo inicial para o funcionamento do modelo SWAT se dá através de inserção dos PI's, que constitui a entrada dos dados em pontos de grade (mesma coordenada), e dos PI's necessários para o modelo SWAT, o que é realizada por meio do ArcGis 9.3 (Figura 11). Os parâmetros requeridos pelo modelo SWAT compreendem parâmetros climáticos (estações automáticas do INMET), uso e tipo de solo (dados do ZEE-PA e IBGE) e hidrológicos (dados da ANA).

A delimitação da bacia hidrográfica normalmente é feita com base nos pontos de coleta de dados ou pontos de interseção de cursos d'água e pode ser definida através de análise topográfica ou utilizando-se o formato em grade do MNT (forma utilizada no estudo). Na segunda opção, os caminhos naturais da água não são preservados, mas isso é contornado com a incorporação da rede hidrográfica do MNT e a utilização de um algoritmo simples. Já as unidades de respostas hidrológicas (URH's), são subdivisões de cada sub-bacia, que possuem uma única combinação de uso do solo, tipo do solo e classe de rampa (declividade), e nestas áreas os parâmetros são tratados de maneira concentrada, ou seja, são utilizados valores médios (não ocorre variação espacial).

Desta forma as URH's não interagem entre si, ou seja, os resultados de cada URH (escoamento, sedimentos e nutrientes) são calculados separadamente e então somados para se obter a carga total da sub-bacia. Logo, para que se possa obter um melhor nível de

detalhamento na discretização, é melhor se ter mais sub-bacias e menos URH's em cada uma, do que o contrário. A cada sub-bacia deve estar associado um canal de escoamento e podem ser associados até dois corpos d'água (lago, pântano) e um reservatório. Para o SWAT, lagos e pântanos são definidos como corpos d'água que não recebem água de outra sub-bacia. Já os reservatórios são aqueles localizados ao longo dos canais de escoamento e que, conseqüentemente, podem receber contribuição de outras sub-bacias. É permitido pelo SWAT que se acrescentem sub-bacias a partir de pontos de saída (*outlets*) definidos pelo usuário (LUBITZ, 2009). Embora uma análise da sensibilidade espacial do modelo SWAT fosse recomendada para possibilitar a verificação das respostas nos diversos níveis de discretização, neste estudo foi adotado o limiar sugerido pelo SWAT para a criação das sub-bacias, sendo incluídos *outlets* coincidentes com a localização das estações fluviométricas.

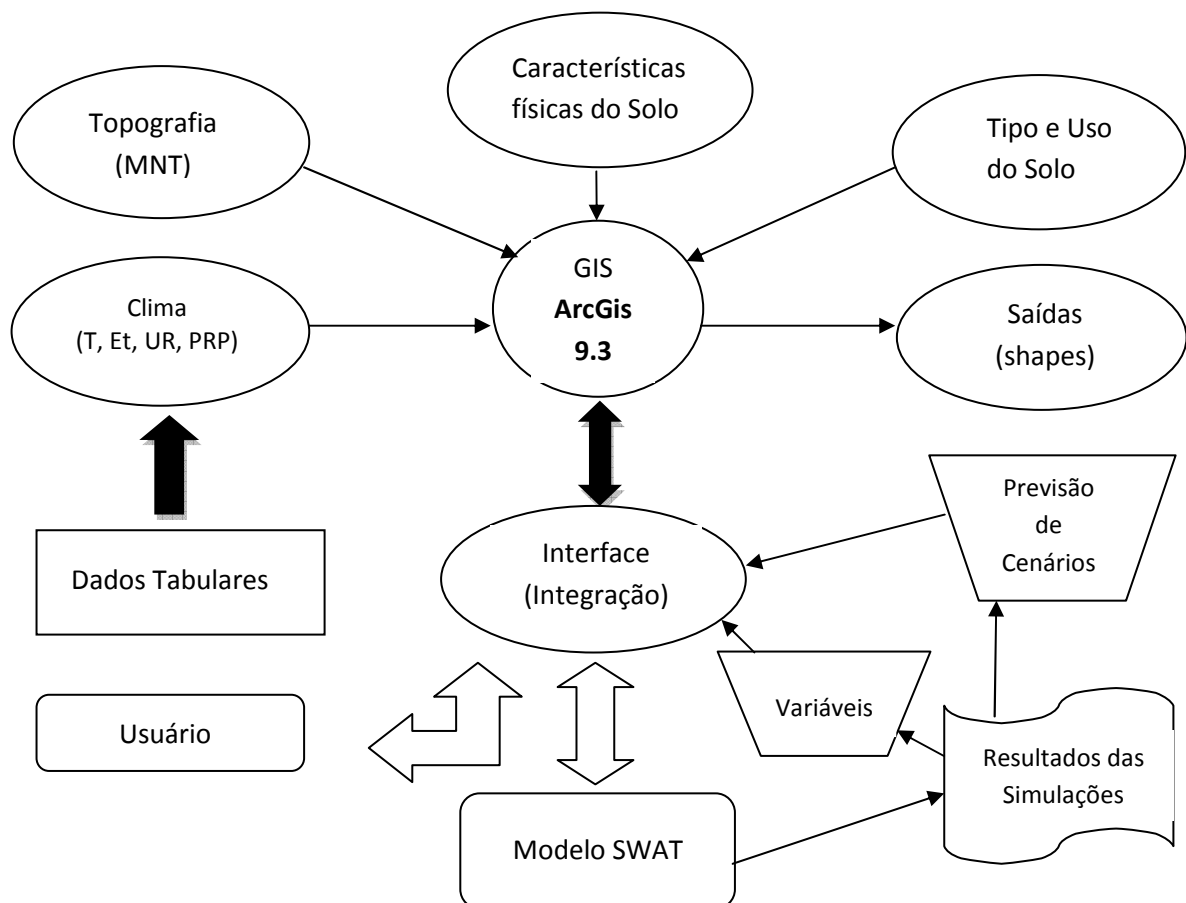


Figura 11. Processo de funcionamento do modelo SWAT na interface SIG do ArcGis 9.3. Fonte: Adaptado de SOUSA, 2010.

3.4.1 Descrição do Modelo SWAT.

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).

3.4.1.1 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 1º fase, o ciclo hidrológico é baseado na equação do balanço hídrico (1):

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

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 climático⁷ 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.

b) Hidrologia.

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 (2):

$$Q_s = \frac{(R - I_a)^2}{(R - I_a + S)}, \text{ onde:} \quad (2)$$

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

R = é a precipitação diária (mm);

⁷ Algoritmos matemáticos que fazem cálculos para o modelo SWAT, gerando valores diários.

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 por (3):

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

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 (E_t).

A evaporação da água do solo e a transpiração das plantas estão relacionadas à E_{tp} e ao índice de área foliar (IAF). O modelo SWAT oferece três métodos para o cálculo da E_{tp}: Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) e Hargreaves (HARGREAVES e 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 E_{tp} 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. (1989) (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 (4):

$$\lambda E = \frac{\Delta \cdot (H_{net} - G) + \rho_{air} \cdot C_p \cdot \left[\frac{(e_z^0 - e_z)}{r_a} \right]}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}, \text{ onde:} \quad (4)$$

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 camadas⁸ 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

⁸ Ao modelo SWAT pode ser aplicado até 10 camadas de solo, com uma profundidade máxima de até 3500 milímetros somando-se todas as camadas.

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 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 por (5):

$$AWC = FC - WP, \text{ onde:} \quad (5)$$

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 (6):

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right) \right], \text{ onde:} \quad (6)$$

$W_{perc,ly}$ = 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 (7):

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right), \text{ onde:} \quad (7)$$

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 (8):

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchr,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh}, \text{ onde:} \quad (8)$$

$aq_{sh,i}$ = 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 por (9):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t + w_{rchr,sh} \cdot (1 - \exp(-\alpha_{gw} \cdot \Delta t))], \text{ onde: (9)}$$

$Q_{gw,i}$ = 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, através de (10):

$$\alpha_{gw} = \frac{2,3}{BFD}, \text{ onde: (10)}$$

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 (11):

$$w_{revap, mx} = \beta_{rev} \cdot E_0, \text{ onde:} \quad (11)$$

$w_{revap, mx}$ = 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 Etp para o dia (mm).

Na 2º 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 por (12):

$$V_{stored} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out}), \text{ onde:} \quad (12)$$

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 por (13):

$$K = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{c_k}, \text{ onde:} \quad (13)$$

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 por (14):

$$c_k = \frac{5}{3} \cdot \left(\frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \right), \text{ onde:} \quad (14)$$

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

slp_{ch} = é 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).

3.4.2 Sensibilidade dos Parâmetros.

A análise de sensibilidade dos parâmetros consistiu em medir em que magnitude uma alteração prefixada em determinado parâmetro, enquanto os outros parâmetros são mantidos constantes, altera o resultado final do modelo. Dessa forma, os parâmetros mais importantes no modelo podem ser identificados. Vários métodos têm sido propostos para a análise de sensibilidade dos parâmetros em modelagem hidrológica. Os métodos mais satisfatórios são os que fazem variar os valores de determinado parâmetro de acordo com a amplitude apropriada para este mesmo parâmetro (KANNAN et al. 2007).

MACHADO (2002), afirma que o modelo SWAT é sensível a mais de 100 variáveis relacionadas à vegetação, manejo da terra, solos, clima, aquífero, canal e reservatório. Isto é fundamental, para que se possam responder questões tais como: onde focar os esforços de coleta de dados, qual o grau de cuidado a se tomar na estimativa dos parâmetros e qual a importância relativa de diversos parâmetros?

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 “*Latin Hypercube*” (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.

3.4.2.1 *Calibração e Validação.*

É possível executar a calibração e validação para as simulações do ciclo hidrológico e escoamento. A calibração e a validação são etapas essenciais para a eficiência do modelo e como o modelo foi desenvolvido para aplicação em bacias não monitoradas, procurando representar matematicamente a quase totalidade dos processos físicos em uma bacia, é possível executar o SWAT sem estas etapas, mas tendo como consequência o fato de erros e incertezas sobre as respostas da modelagem serem maiores.

Para calibrar e validar o modelo são necessários duas séries temporais de dados reais da bacia em estudo. Na primeira etapa (calibração), os parâmetros do modelo são ajustados até que as respostas se aproximem dos valores observados. Para a validação, os resultados obtidos para as duas séries temporais são comparados utilizando-se métodos gráficos, como hidrogramas e retas de regressão, ou de análise estatística, como o Teste T de Student e o coeficiente de eficiência (COE) (LUBITZ, 2009).

A calibração foi efetuada comparando-se os valores de vazões simulados com os valores de vazões observados para o período de 7 anos, de janeiro de 2000 a dezembro de 2006. A validação deste trabalho foi efetuada de janeiro de 2007 a dezembro de 2010.

3.4.2.2 Avaliação de Eficiência.

Para verificar se os valores medidos e os simulados pelo SWAT estão com ajustes bons, serão utilizados quatros métodos:

- Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE) (NASH AND SUTCLIFFE, 1970): Representa a variância ponderada dos eventos observados e calculados pelo modelo. Tem uma variação de $-\infty$ a 1 e quanto mais próximo de um 1, tem-se que o evento simulado está mais próximo do perfeito e quando tem-se o valor de 1, o evento foi simulado perfeitamente. O COE é expresso pela equação (15):

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ob} - E_{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{ob} - E_m)^2}, \text{ onde:} \quad (15)$$

n = é o número de eventos;

E_{ob} = é o evento observado;

E_{cal} = é o evento calculado; e

E_m = é a média do evento observado no período.

- Desvio Padrão (Dv) (SOUSA, 2010): Aqui o ajuste do evento simulado em análise em relação ao observado, é considerado mais perfeito, quanto menor for o Dv. Logo, quanto mais próximo de 0 % o Dv, mais perfeita é a simulação. O Dv é dado pela equação (16):

$$Dv = \frac{E_{ob} - E_{cal}}{E_{ob}} \cdot 100, \text{ onde:} \quad (16)$$

Dv = é o desvio padrão em %;

E_{ob} = é o evento observado para o período analisado; e

E_{cal} = é o evento simulado para o mesmo período.

- Coeficiente de Massa Residual (CMR) (LUBITZ, 2009): Este parâmetro indica quando o modelo subestima (positivo) ou superestima (negativo) os valores de saída e é dado pela equação (17):

$$CMR = \frac{\sum_{i=1}^n E_{ob} - \sum_{i=1}^n E_{cal}}{\sum_{i=1}^n E_{ob}}, \text{ onde:} \quad (17)$$

CMR = é o coeficiente de massa residual; e

n = é o número de eventos.

- Erro Médio (EM) (SOUSA, 2010): Neste parâmetro o evento analisado é obtido pela diferença quantitativa entre o evento simulado e o observado e é expresso por (18).

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{E_{cal} - E_{ob}}{n}, \text{ onde:} \quad (18)$$

n = é o número de eventos simulados; e

EM = é o erro médio.

3.4.3 Simulações Hidrológicas.

A simulação hidrológica foi iniciada em janeiro de 2000 e prosseguiu até dezembro de 2010, com o objetivo de verificar a melhor eficiência e aplicabilidade do modelo SWAT em assimilar dados extraídos de instrumentos meteorológicos, com o objetivo de quantificar a vazão na bacia do Rio Capim com melhor previsibilidade.

Inicialmente, foi necessário fornecer condições de contorno para que o modelo pudesse conhecer as características físicas da região de estudo. Tais condições de contorno dependeram das seguintes informações:

- Observações diárias de precipitação de 4 postos (São Domingos do Capim, Maringá, Paragominas e Capim 2.) no período de 2000 a 2010 (ANA) (Figura 12); observações médias diárias de variáveis meteorológicas (precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento horizontal), de setembro de 2007 a dezembro de 2010, oriundos da estação de Paragominas (Figura 12);
- Mapas de tipo de solo (IBGE), uso e ocupação do solo (ZEE-PA), hidrografia e topografia (MNT); e

- Ademais, a seleção da calibração para o balanço de água na bacia e sua verificação utilizando-se de ferramentas estatísticas que predizem a sua eficiência para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010, assim como as simulações de vazões na escala mensal.

Para a etapa de validação, foi comparada a vazão simulada com dados observados dos postos do Rio Capim e Maringá (ANA) no período de 2007 a 2010.

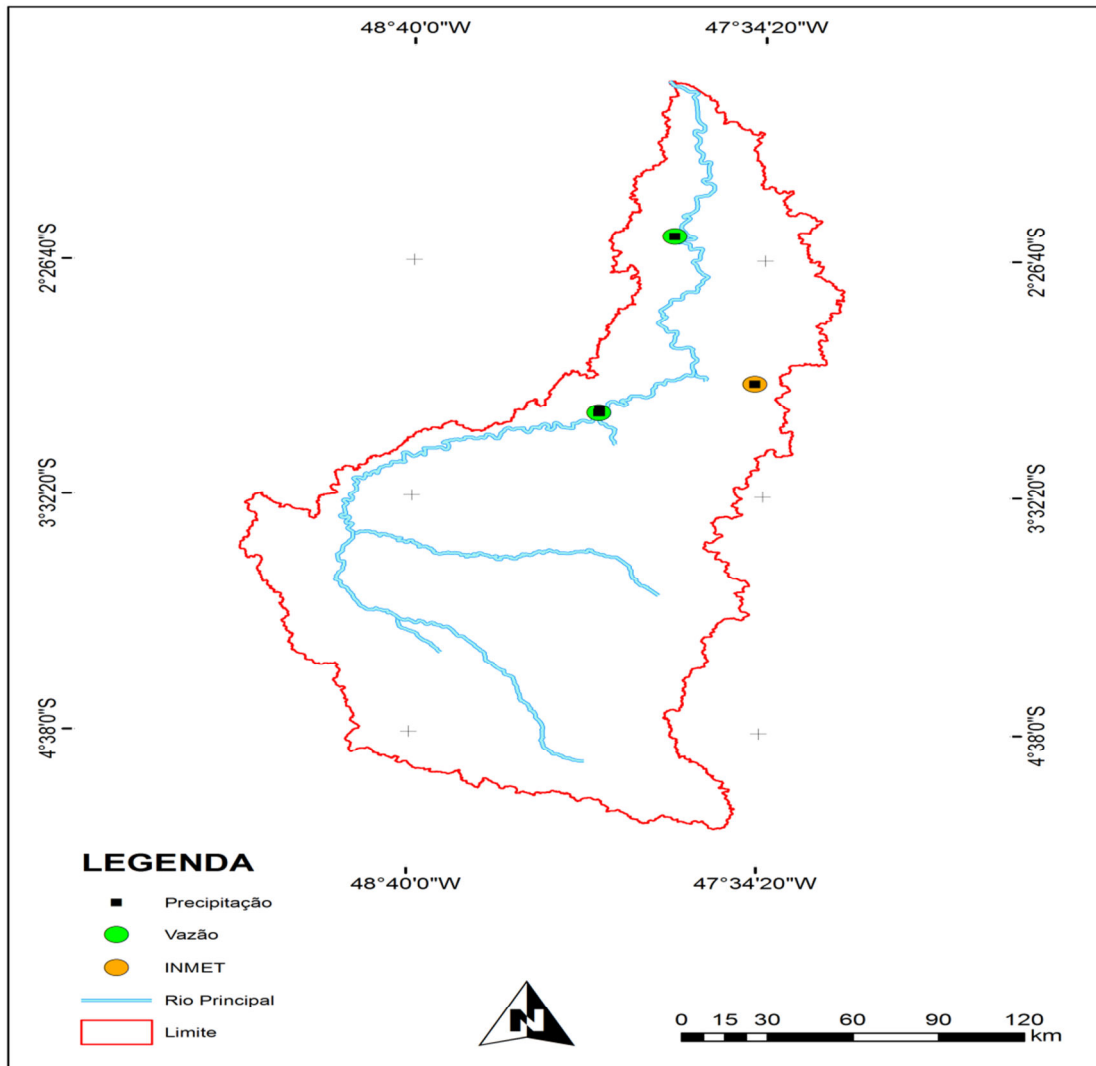


Figura 12. Postos de coleta de dados de Vazão e PRP que foram utilizados na modelagem hidrológica.

Os experimentos numéricos consistirão em quatro etapas, descritas abaixo:

3.4.3.1 Experimento 1 - Calibração com Condições Iniciais.

No primeiro experimento foi utilizada a opção de “automático” (de *default*) do modelo, em que 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 praticada pelo SWAT. Os limites de cada parâmetro foram mantidos (os automáticos), sendo que a hierarquia dos parâmetros da sensibilidade será apresentada posteriormente. Após o primeiro experimento, verificou-se o quanto o modelo foi capaz de reproduzir a vazão observada utilizando as ferramentas estatísticas descritas anteriormente.

3.4.3.2 Experimento 2 - Calibração Manual do Modelo.

No segundo experimento, foi efetuada uma calibração manual de alguns parâmetros do modelo que se julgou pertinente, a partir da análise de sensibilidade, tais como: reduzir o volume de escoamento, aumentar a evapotranspiração, aumentar o escoamento de base e a curva de recessão. Procedeu-se a três tentativas de ajuste dos parâmetros na calibração manual, que objetivou a melhoria do comportamento mensal, da vazão. Adotou-se como ponto de parada destas tentativas, o momento em que o coeficiente de eficiência de Nash – Sutcliffe atingiu valores iguais ou maiores que 0,50 da proporção da variância explicada, que indica a eficiência da simulação do evento observado.

3.4.3.3 Experimento 3 – Validação do Modelo.

Após as tentativas na calibração manual terem atingido uma eficiência de (COE) 0,50, partiu-se para o terceiro experimento numérico. A partir deste ponto, os parâmetros de ajuste do modelo não foram mais modificados. Neste experimento verificou-se o quão hábil o modelo SWAT foi capaz de assimilar as informações extraídas das imagens do uso e mudança no solo para o prognóstico da vazão na bacia hidrográfica. O melhor desempenho do modelo SWAT será obtido a partir do menor erro entre os valores previstos e observados da vazão. Por fim, esse erro será analisado estatisticamente.

3.4.3.4 Experimento 4 – Geração do Balanço Hidrológico da Bacia.

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

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta pesquisa se modelaram os componentes do ciclo hidrológico utilizando-se dados de estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas para assimilação na modelagem hidrológica. Este capítulo aborda os principais resultados gerado na bacia do Rio Capim. Inicialmente, são apresentados os resultados relacionados à área de estudo e por fim, são apresentados os resultados referentes à modelagem hidrológica através dos experimentos numéricos realizados.

4.1- Análises da bacia do Rio Capim.

a) Delimitação Automática da Bacia e das Sub-Bacias.

A delimitação automática (inserção dos shapes de MNT, Uso e Ocupação do solo e Tipos de solos.) do modelo gerou uma bacia com área de 37.199, 23 km² (Figura 13) valor próximo ao gerado manualmente pelo SIG que foi de 37.179,08 km². Para a definição do número de sub-bacias utilizou-se o valor de área crítica de origem sugerida pelo modelo, gerando-se 11 sub-bacias. Foram adicionados manualmente dois pontos de saídas, um na sub-bacia 3 (4.198,38 km²) e outro na sub-bacia 5 (844,73 km²) (Tabela 4), para que coincidisse com os pontos das estações fluviométricas (Figura 13). A sub-bacia com maior área foi a de número 8, com 8.370, 65 km², representando aproximadamente 23% do total da bacia e a menor sub-bacia gerada foi a de número 2, representando apenas 1,23% da bacia (457,61 km²), a área média das sub-bacias sendo de 3.381,75 km². Os pontos de saídas nas sub-bacias 3 e 5 foram utilizadas para a comparação das vazões; estas sub-bacias representam 11,29% e 2,27% da bacia, respectivamente (Tabela 4).

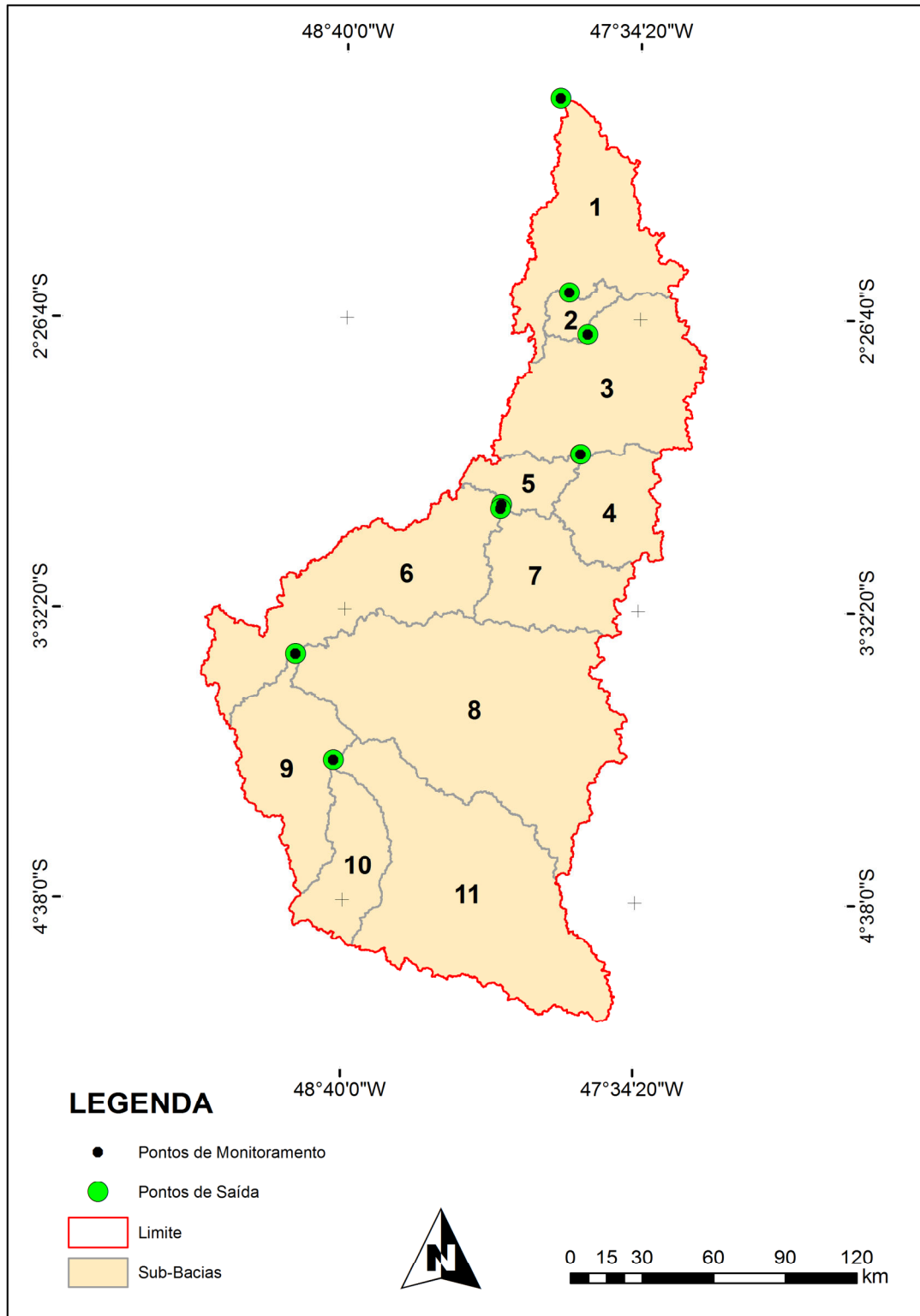


Figura 13: Bacia do Rio Capim gerada automaticamente pelo SWAT.

Tabela 4: Representatividade das sub-bacias geradas na bacia do Rio Capim.

SUB-BACIAS	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
1	3.357,29	9,03
2	457,61	1,23
3	4.198,38	11,29
4	1.742,90	4,69
5	844,73	2,27
6	4.720,83	12,69
7	2.311,63	6,21
8	8.370,65	22,50
9	2.674,28	7,19
10	1.654,02	4,45
11	6.866,91	18,46
TOTAL	37.199,23	100

b) Classes de Declividades (Slope).

O modelo SWAT permite usar 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 as cinco classes de declividades com a finalidade de verificar se existia grande variação de declividade na bacia do Rio Capim. Observou-se que o mapa de declividades está coerente quando comparado ao mapa de MNT, pois a bacia possui maiores declividades na parte sul e em parte do interflúvio central e menores declividades na parte oeste e norte da bacia (Figura 14).

A bacia do Rio Capim, em sua maioria, se encontra em regiões de áreas planas e regulares (declividade de 0% – 5%), representando aproximadamente 61% do total e poucas áreas (4% da área da bacia) com uma declividade média (declividade de 15% – 30%). Sendo assim, a bacia apresenta pouca variação de declividade, com alterações em sua maioria de 0% a 15% (aproximadamente 96% do total) (Tabela 5).

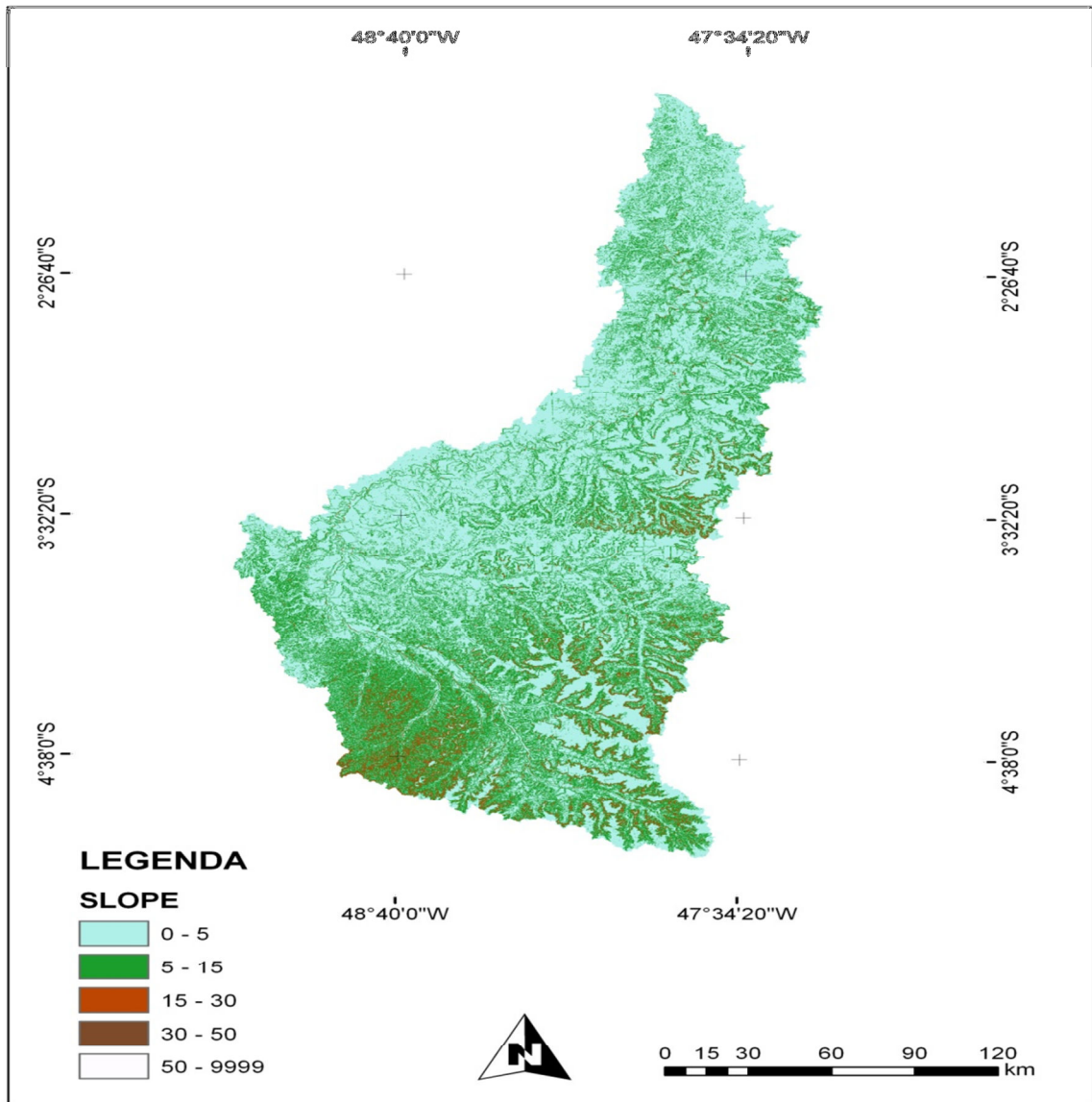


Figura 14: Mapa de Declividade (em %) da bacia do Rio Capim.

Tabela 5: Representatividade das classes de declividade da bacia do Rio Capim.

DECLIVIDADE	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
0 - 5	22.619,85	60,81
5 - 15	13.046,84	35,07
15 - 30	1.486,39	4
30 - 50	46,12	0,12
50 - 9999	0,03	0
TOTAL	37.199,23	100

c) Definição das URH's.

Para a criação das unidades de respostas hidrológicas, foram utilizados os limites mínimos de sensibilidade do modelo já que o usuário pode ordenar um valor para criação das URH's em decorrência dos valores dominantes na bacia. Desta forma, foram desconsideradas aquelas classes que apresentaram pouca representatividade na bacia. As análises das URH's permitem determinar a posição dominante de cada categoria de uso e ocupação do solo, tipos de solos e classes declividade dentro de cada sub-bacia.

A subdivisão da sub-bacia em áreas com solos únicos e combinações de solo permite que o modelo transmita as diferenças de evapotranspiração e de outras condições hidrológicas de terrenos para diferentes usos e ocupações do solo e tipo 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 criadas 11 URH's com usos e ocupações do solo, tipos de solos e classes de declividades dominantes na bacia do Rio Capim.

4.2- Modelagem Hidrológica.

O modelo SWAT foi aplicado à bacia do Rio Capim, sendo utilizado apenas o módulo de propagação de água, pois o principal resultado foi a quantificação do balanço hídrico na bacia. Serão apresentados e discutidos os resultados dos experimentos realizados para as duas sub-bacias obtidas no Rio Capim (3 e 5), conforme a metodologia apresentada, realizando-se a comparação das vazões simuladas com aquelas observadas e por último a geração dos componentes do ciclo hidrológico.

4.2.1 Experimento 1: 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 região de estudo. Os demais parâmetros usados, considerados de base do modelo, foram os de “*default*”. Após ter sido calibrado o modelo com os dados de precipitação do período de 2000 a 2010, a primeira simulação das vazões mensais correspondeu ao período de jan/2000 a dez/2010, para as sub-bacias 3 e 5.

Em geral, o modelo SWAT simulou bem a sazonalidade em ambas as sub-bacias, tanto qualitativamente (análises de eficiência), quanto quantitativamente (superestimou em ambas as sub-bacias o total de vazão) sendo que o modelo se comportou de maneira muito pouco eficiente (Figuras 15 e 16). Muitos autores têm destacado a dificuldade do SWAT em modelar o escoamento de base (SOUSA, 2010 e LUBITZ, 2009). O mesmo foi observado nesta simulação inicial. Usando-se as condições iniciais, chegou-se a resultados bem diferentes dos observados.

a) Sub-Bacia 3.

O modelo SWAT superestimou em média as vazões de pico para a sub-bacia 3 no período chuvoso e para o período seco os valores ficaram muito abaixo dos observados (quantitativamente o modelo superestimou em 210,75 % nesta sub-bacia, o total de vazão), devido ao modelo gerar muito escoamento de base e escoamento superficial (já que a quantidade de água produzida na bacia que escoava ao canal principal na simulação foi muito maior) indicando que o modelo gerou pouca evapotranspiração e que a quantidade de água no solo é, na realidade, maior, e/ou ainda, que o modelo não simulou possíveis perdas para o aquífero profundo (Figura 15).

Foi verificado também um adiantamento em algumas respostas do modelo na subida e na curva de recessão da vazão. Isto ocorreu, provavelmente, pelo fato de que as chuvas na região foram verificadas no período de dezembro a maio. Como a sub-bacia 3 do Rio Capim apresenta um tempo de concentração baixo, desta forma, a precipitação média ocorrida em um dado mês pode ter gerado vazões médias maiores no mês seguinte e portanto adiantou estes picos, deslocando também a sua curva de recessão para o mês anterior ao período de seca na bacia (Figura 15).

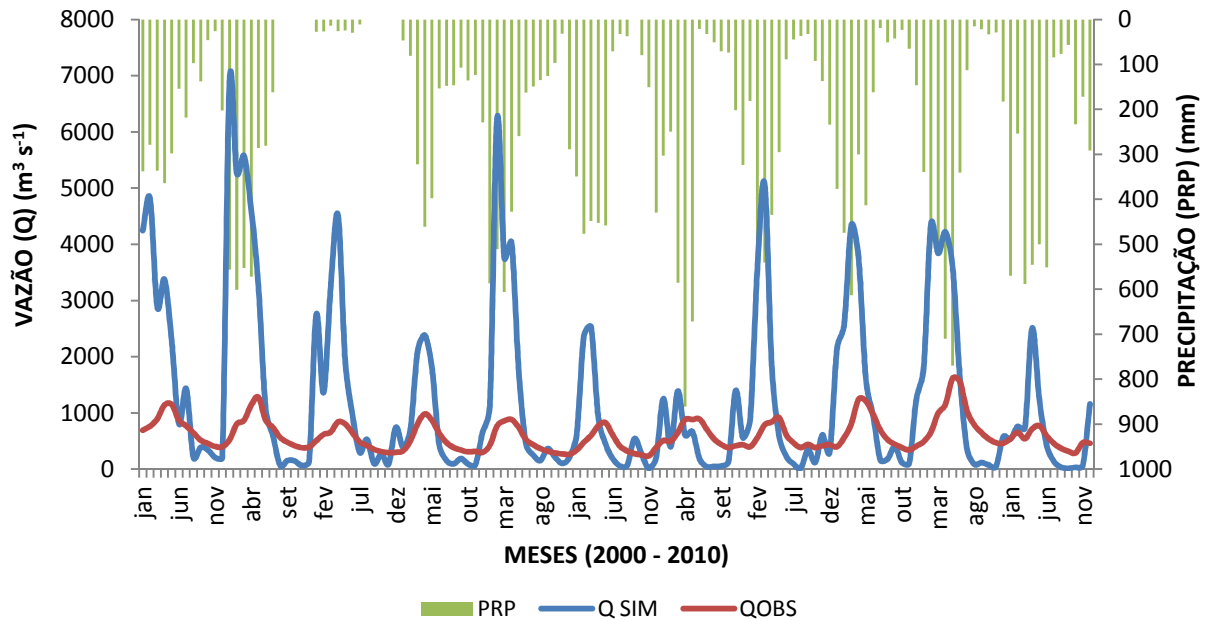


Figura 15: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a modelagem com condições iniciais, para a sub-bacia 3 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

Após analisar o desempenho do modelo na simulação inicial da sub-bacia 3 (Figura 15), podem-se destacar alguns aspectos não exitosos, identificados inicialmente, que deveriam sofrer alguns ajustes posteriormente para a melhoria da simulação, dos quais podem-se destacar:

- Redução do volume total de escoamento, devido à superestimativa da vazão nos principalmente nos períodos chuvosos;
- Aumento do escoamento de base e ajuste da curva de recessão, devido à subida no início do período chuvoso e à descida no fim do mesmo período;
- Atraso (*lag*) no tempo do escoamento, para ajuste do adiantamento de algumas respostas nos máximos da vazão;
- Aumento da perda para o aquífero profundo, devido à superestimativa da vazão e pela subestimativa da perda para o aquífero raso;
- Aumento da evapotranspiração, para ajustar a vazão diminuindo a superestimativa principalmente nos períodos de cheia;
- Redução do escoamento superficial, para o ajuste da vazão de pico.

b) Sub-Bacia 5.

Assim como na sub-bacia 3, o modelo SWAT superestimou as vazões de pico, para a sub-bacia 5, e subestimou a recessão (quantitativamente o modelo superestimou em 219, 18%, o total de vazão), devido ao modelo gerar muito escoamento de base e escoamento superficial (já que a quantidade de água produzida na bacia que escoava ao canal principal na simulação foi também maior) indicando que o modelo gerou pouca evapotranspiração e que a quantidade de água no solo é, na realidade maior. E ainda, que o modelo SWAT, subestimou possíveis perdas para o aquífero profundo, influenciando também na recessão da curva nos períodos secos, mas, em comparação a sub-bacia 3, o modelo subestimou menos, os valores de recessão na sub-bacia 5 (Figura 16).

Verificaram-se também alguns adiantamentos em algumas respostas do modelo na subida. Isto ocorreu, provavelmente, pelo fato da área da sub-bacia 5 ser menor e como ela apresenta um tempo de concentração baixo, a precipitação média verificada em um mês pode ter gerado vazão média maior no mês seguinte acelerando alguns picos. Mas, com relação a sua curva de recessão, o modelo conseguiu captar a sua sazonalidade, tendo alguns pequenos picos nestes períodos, em decorrência do tempo de concentração na sub-bacia ser baixo, como explicado anteriormente (Figura 16).

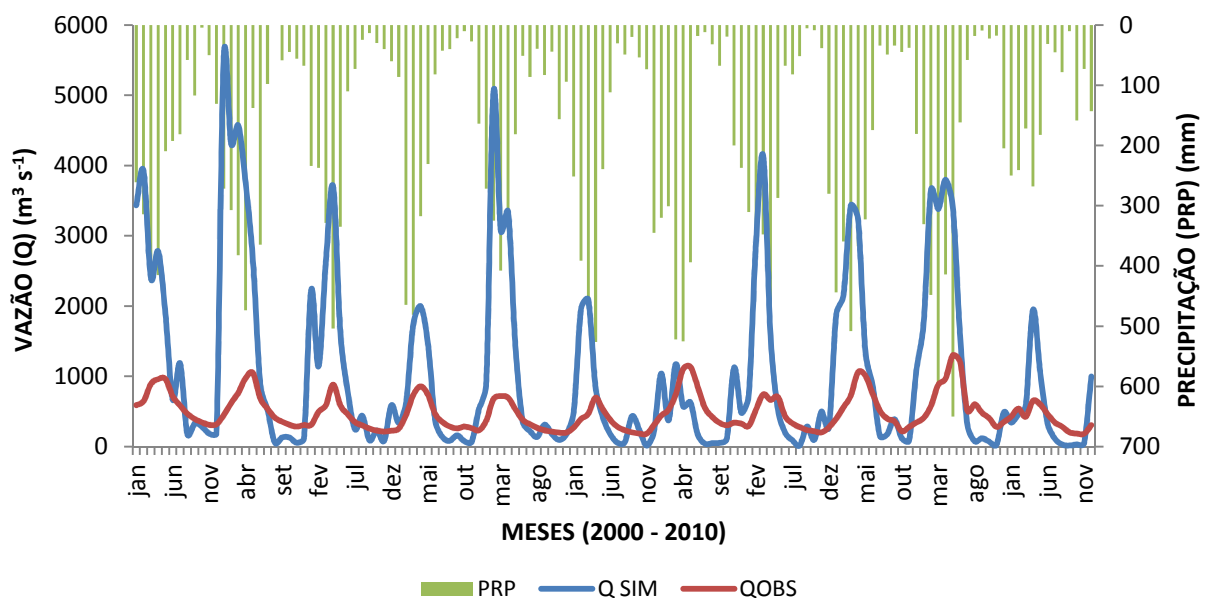


Figura 16: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a modelagem com condições iniciais, para a sub-bacia 5 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

Após analisar o desempenho do modelo na simulação inicial da sub-bacia 5 (Figura 16), podem-se destacar alguns aspectos que deveriam sofrer ajustes posteriores para a melhoria da simulação, tais como:

- Diminuição do volume total de escoamento, devido à superestimativa da vazão nos picos;
- Aumento do escoamento de base e ajuste da curva de recessão, devido ao ajuste à subida no início do período chuvoso e à descida no fim do mesmo período;
- Atraso (*lag*) no tempo do escoamento, para ajuste dos máximos e mínimos da vazão;
- Redução da perda para o aquífero profundo, devido à subestimativa da vazão no período de seca da bacia;
- Aumento da evapotranspiração, para ajustar a vazão principalmente nos períodos de cheias;
- Redução do escoamento superficial, para diminuir a água que escoava para o rio principal diminuindo a vazão no período chuvoso.

4.2.1.1 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 bacia do Rio Capim (Figura 17). Destes, se destacam:

- *GWQMN* – profundidade limite de água no aquífero raso requerida para o escoamento de retorno ocorrer (mm);
- *GW_DELAY* – tempo de atraso de águas subterrâneas (dia).
- *ALPHA_BF* – constante de recessão do fluxo de retorno (é sensível ao escoamento de base e recessão da curva);
- *REVAPMN* – profundidade limite de água no aquífero raso para ocorrer *revap* (mm) (é sensível a recessão da curva);
- *SOL_AWC* – capacidade de água disponível na camada de solo (mm);
- *GW_REVAP* – coeficiente que controla a taxa de transferência de água do aquífero raso para a zona de raízes;
- *SHALLST* – profundidade inicial de água no aquífero raso (mm);
- *SOL_Z* – profundidade das camadas de solo (mm);

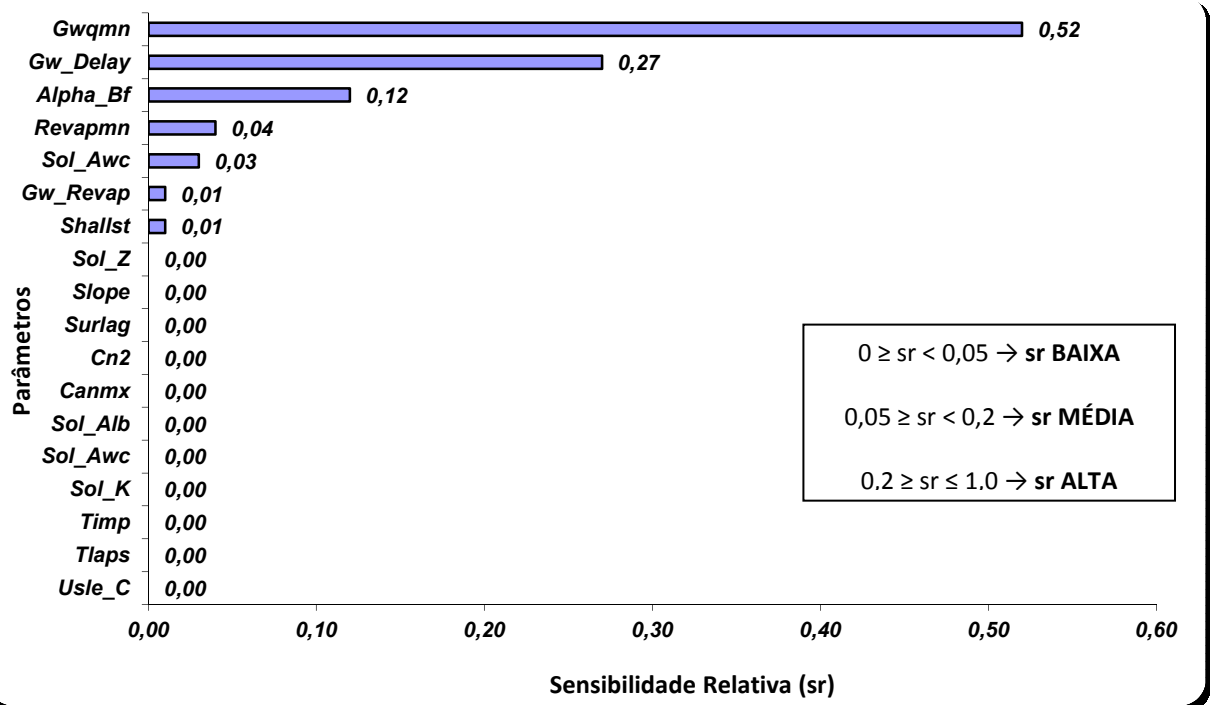


Figura 17: Análise de sensibilidade automática do experimento 1.

Identificados os parâmetros mais sensíveis e os pontos a serem tomados para a melhoria e calibração da simulação hidrológica, procedeu-se à escolha dos parâmetros que melhor se enquadraram na busca da resolução dos problemas encontrados anteriormente. Alguns parâmetros foram ajustados para a sub-bacia 3, assim como, alguns destes foram modificados também para a sub-bacia 5 (Tabela 6), já que em ambas as sub-bacias, os ajustes necessários são praticamente parecidos (ou seja, objetivando especificamente a redução do volume de escoamento total nas sub-bacias). LUBITZ, 2009 testou manualmente a sensibilidade de alguns parâmetros, são eles:

- *ESCO* – fator de compensação de evaporação do solo;
- *CN2* – curva número inicial para a condição de mistura II é sensível ao escoamento superficial;
- *LAT_TIME* – tempo do escoamento lateral (dias) (é sensível ao escoamento);
- *RCHRG_DP* – fração de percolação da zona de raízes que recarrega o aquífero profundo (é sensível ao escoamento de base);
- *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) (este parâmetro é sensível ao escoamento total e ao escoamento de base);
- *SOL_K* – condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1});

- *CANMX* – armazenamento máximo no dossel (mm);
- *Blai* – máximo índice de área foliar potencial;
- *SLOPE (HRU_SLP)* – rampa média adotada para todas as URH's em uma sub-bacia (m/m);
- *SURLAG* – coeficiente de atraso do escoamento superficial (este parâmetro é sensível ao escoamento).

Tabela 6: Listagem dos parâmetros a alterar para cada ajuste necessário e suas relações causais com os respectivos ajustes para as sub-bacias 3 e 5.

Redução do volume de escoamento Total	Aumento do escoamento de base e recessão da curva	Atraso do escoamento
CANMX (+), CN2 (-), ESCO (-), SLOPE (-), SOL_AWC (+), SLSUBBASIN (+), SOL K(-)	ALPHA_BF (+), GWQMN (-), GW_REVAP (+), RCHRG_DP (-), REVAPMN (+)	LAT_TIME (+), SURLAG (-)

4.2.1.2 Avaliação de Eficiência da Simulação Inicial.

A avaliação da comparação dos dados mensais resultou em um coeficiente de eficiência (COE) de -33,22, mostrando que o modelo mostrou-se deficiente, com um desvio padrão (Dv) entre 110 a 60%, sendo necessário um melhor ajuste do evento simulado para a sub-bacia 3. Os valores simulados ficaram 4,55 vezes superiores aos medidos (coeficiente de massa residual (CMR) iguais a -1,11), e o erro médio (EM) foi de 669,18 m³/s, indicando a superestimativa de alguns valores simulados e uns valores quantitativos bem maiores que o realmente são observados para a sub-bacia 3 (Tabela 7).

Na sub-bacia 5 os resultados foram um pouco melhores, pois, o COE foi de -25,43, indicando uma melhor eficiência nesta sub-bacia, quando comparada com a anterior, demonstrando também que o modelo simula bem melhor sub-bacias e/ou bacias menores, como é o caso da sub-bacia 5. O Dv entre 119,18 e 48,75% indica que nesta sub-bacia tem-se a necessidade de ajustes nos eventos simulados, também. O CMR de -1,19 e o EM de 579,09 m³/s indicam também, a superestimativa de alguns valores simulados e que são quantitativamente maiores que os observados para a sub-bacia 5 (Tabela 7).

Tabela 7: Avaliação da eficiência da simulação inicial.

SIM. INICIAL (Exp. 1)		
	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5
COE	-33,22	-25,43
Dv	110,75	119,18
CMR	-1,11	-1,19
EM	669,18	579,09

Em geral, os resultados simulados em ambas as sub-bacias precisam ser melhorados mostrando que as eficiências do modelo SWAT em simular a vazão e a estimativa dos componentes do balanço hídrico devem ser bem analisadas antes de serem utilizadas e que o modelo só pode ser utilizado após sua calibração e validação. Vale ressaltar que pesquisas com o uso do SWAT para prognóstico da vazão no estado do Pará, ainda são bastante incipientes na literatura e isto requer um pouco mais de dedicação por parte das pessoas que trabalham com este modelo.

4.2.2 Experimento 2: Calibração Manual do Modelo.

Após a identificação dos parâmetros a serem modificados e a avaliação da eficiência do primeiro experimento, procedeu-se à calibração manual dos pontos evidenciados anteriormente. Estes parâmetros foram aumentados e/ou diminuídos até o COE atingir valores iguais ou maiores do que 0,50. Posteriormente, partiu-se para a validação do modelo (Experimento 3).

As tentativas de ajustes dos parâmetros na calibração manual, com o objetivo da melhoria dos resultados iniciais, partiram da seleção de três parâmetros mais sensíveis, relacionados diretamente com a redução do volume de escoamento, com o aumento do escoamento de base e com o ajuste da curva de recessão. São eles (LUBITZ, 2009 e SOUSA, 2010): *ALPHA_BF* (parâmetro de recessão do fluxo de base), *CANMX* (aumento da evapotranspiração) e *SLOPE* (aumento da evapotranspiração, da percolação e do escoamento de base), que foram alterados em conjunto com parâmetros referentes aos solos. São eles: *GWQMN*, *GW_DELAY*, *SOL_AWC*, *SHALLST* (todos estes foram utilizados para a redução do volume de vazão).

Numa primeira tentativa, foram utilizados os valores intermediários da análise de sensibilidade manual efetuada por LUBITZ, 2009. Apesar de não terem sido usados dados

subdiários de precipitação neste estudo, procedeu-se à tentativa de um melhor ajuste: alterou-se o parâmetro de atraso no escoamento superficial (*SURLAG*), que revelou pouca sensibilidade na análise automática, mas foi um dos que causou maior efeito na redução das vazões de pico na análise manual. A partir daí, os parâmetros foram alterados gradualmente, em conjunto, até que o melhor ajuste foi encontrado (CAL. 3 da Tabela 8).

Este melhor ajuste foi encontrado diminuindo-se *SURLAG* de 4 para o valor mínimo (1), aumentando-se *ALPHA_BF* de 0,2 para 1,2, diminuindo-se o *GWQMN* de 2500 para 1000 e aumentando-se o *GW_DELAY* de 100 para 220 (Tabela 8). Os parâmetros que demonstraram maior sensibilidade manual neste estudo foram os referentes ao solo, em particular o *GWQMN*, que apresentou alta sensibilidade relativa, tanto na análise automática do modelo, quanto na análise manual (Tabela 8).

Tabela 8: Parâmetros modificados na Calibração Manual e seus respectivos valores iniciais no Experimento 1.

PARÂMETROS MODIFICADOS	SIMULAÇÃO INICIAL	CALIBRAÇÃO MANUAL		
	EXP. 1	CAL.1	CAL. 2	CAL. 3
GWQMN (mm)	2500	10	200	1000
GW_DELAY (dia)	100	500	400	220
REVAPMN (mm)	1	500		50
ALPHA_BF	0,2	0,4	0,8	1,2
SOL_AWC (mm)	0,1	0,4		0,32
GW_REVAP	0,4	0,05	0,2	
SHALLST (mm)	0,5	500		
DEEPST	1000			1500
SURLAG	4			1
RCHRG_DP	0,3	1		0,2
SLOPE (m/m)	var.	0,5 x var.	0,25 x var.	
SLSUBSIN	var.	2 x var.		
ESCO	2	1		0,237
CANMX (mm)	0 a 5	0 a 10		

Após ter calibrado manualmente o modelo, com os ajustes descritos anteriormente (Tabela 8), as vazões mensais foram verificadas para o período de janeiro de 2000 a dezembro de 2006, para as sub-bacias 3 e 5. No geral, após a calibração manual, o modelo melhorou quantitativamente os totais de vazão. Embora se observe uma subestimativa de 6% no total da vazão para as sub-bacias, pode-se notar que houve uma redução de aproximadamente $5.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na vazão de pico e de $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na recessão da curva, sendo que em outros componentes do ciclo hidrológico houve uma melhora positiva com relação à simulação inicial.

Com estes ajustes, os resultados da análise de eficiência (COE, Dv, CMR e EM) mostraram uma melhora expressiva para ambas sub-bacias.

a) Sub-Bacia 3.

O modelo SWAT acompanhou a sazonalidade da vazão após o ano de 2001, mostrando sua eficiência em simular este evento: os anos em que ele não acompanha a sazonalidade podem estar sendo influenciados pelo efeito de borda (em que o modelo leva um período para começar a modelar a sazonalidade), que para este estudo é de um ano. O modelo superestimou os picos de vazões nos anos de 2001, 2002 e 2004 e subestimou os picos nos anos de 2000, 2003, 2005 e 2006. O modelo foi bem na simulação da recessão na sub-bacia; com relação ao quantitativo, o modelo respondeu a 92% do observado, tendo uma subestimativa de 8% no total de vazão. Em comparação com a simulação inicial, os ajustes reduziram o volume médio mensal em $5000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nos picos e ajustaram o período de recessão em $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mostrando grandes melhoras na eficiência quantitativa do modelo (Figura 18).

A vazão média produzida pelo modelo foi de $533,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a observada para o período foi de $577,57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Foi verificado também, um adiantamento no ano de 2004, o que foi fundamental para a limitação da eficiência da simulação de vazões mensais. Outro fator que pode ter prejudicado as respostas do modelo foi o uso de séries de estações pluviométricas com algumas falhas (efetivamente a relação da chuva para a geração da vazão provocou grande influência; desta forma tanto a variabilidade espacial quanto ao volumes mensais e totais foram comprometidos com a falha destes dados, fato este que pode explicar a falha na simulação no período de 2006, período em que os dados apresentaram grandes falhas) (Figura 18).

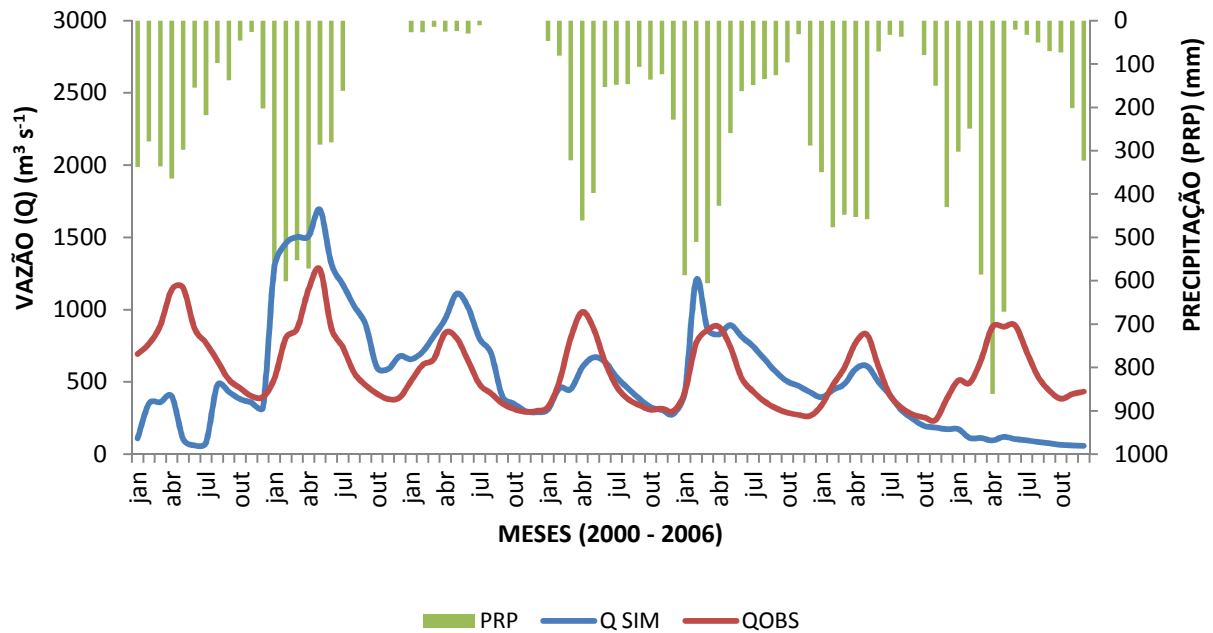


Figura 18: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a calibração do modelo, para a sub-bacia 3 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

b) Sub-Bacia 5.

Nesta sub-bacia o modelo se comportou bem melhor quando comparado com a sub-bacia 3. Levou menos tempo para começar a acompanhar a sazonalidade da vazão média. O modelo superestimou os picos de vazões nos anos de 2001 e 2004 e subestimou os picos nos anos de 2000, 2003 e 2006 e acompanhou a vazão observada no ano de 2005. O modelo foi bem com relação ao quantitativo, respondendo a 93% do total observado, tendo uma subestimativa de 7% no total de vazão. Em comparação com a simulação inicial, os ajustes reduziram o volume médio mensal em $3000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ nos picos e houve um ajuste do período de recessão em $246 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mostrando e justificando grandes melhoras na eficiência quantitativa do modelo (Figura 19).

A vazão média foi de $445,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a observada para o período foi de $476,66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tendo sido verificados alguns retardamentos nos anos de 2002 e 2003 na vazão de pico, o que foi fundamental para a limitação da eficiência da simulação de vazões mensais, assim como a péssima simulação do ano de 2006 (Figura 19).

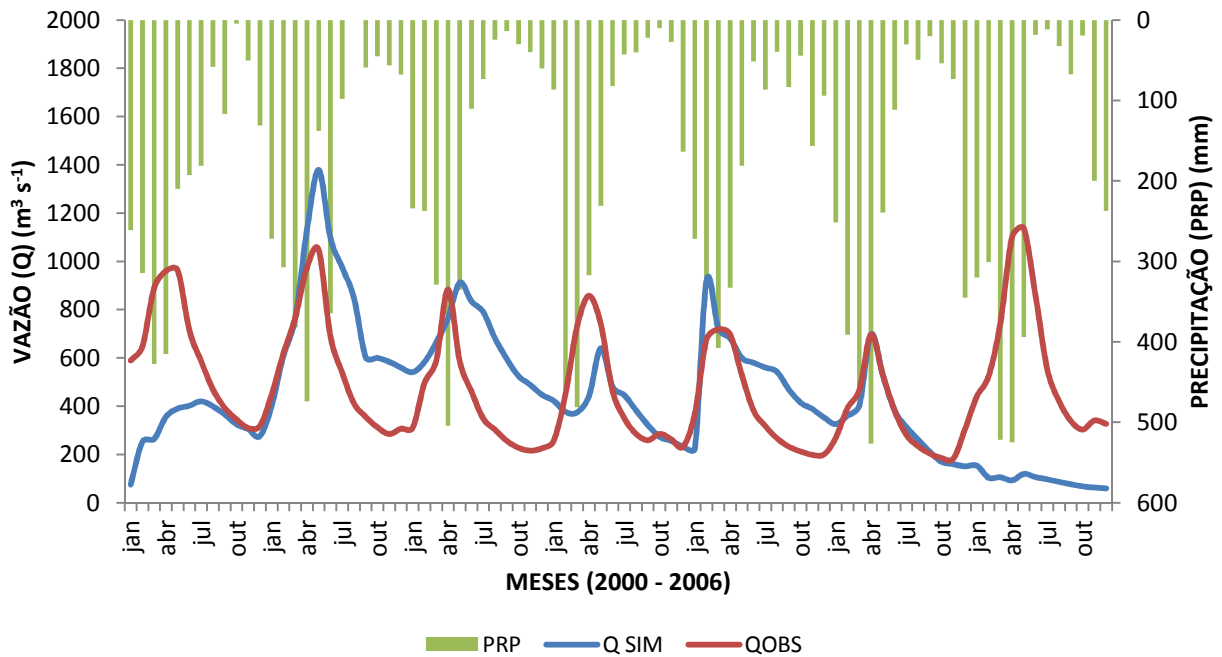


Figura 19: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a calibração do modelo, para a sub-bacia 5 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

4.2.2.1 Avaliação de Eficiência da Calibração Manual.

A calibração manual do modelo para valores mensais de vazão obteve bons resultados, tendo sido alcançados valores muito melhores que os obtidos inicialmente. Daí resultou um COE de 0,50, mostrando que o modelo teve uma boa eficiência na calibração manual, que antes era de -33,22 (um Dv entre 7,69 a 0%) mostrando que o ajuste do evento simulado para a sub-bacia 3 é satisfatório. O CMR igual a 0,08 indica que o modelo está subestimando a vazão de saída e o EM de -44,42 m³/s indica a subestimativa de alguns valores simulados e com valores quantitativos um pouco menores do que realmente são observados para a sub-bacia 3 (Tabela 9).

Para a sub-bacia 5 os resultados foram um pouco melhores, pois, o COE foi de 0,53, indicando uma melhor eficiência nesta sub-bacia, quando comparada com a anterior. O Dv entre 6,57 e 0% indica que nesta sub-bacia o ajuste do evento simulado foi melhor. O CMR de 0,07 e o EM de -30,94 m³/s indicam também a subestimativa de alguns valores simulados e que estes são quantitativamente menores que os observados para a sub-bacia 5 (Tabela 9). Em geral, pode-se comprovar a eficiência (melhora de mais de 100 % do COE) dos ajustes realizados e que pode ser realizada a validação do modelo.

Tabela 9: Avaliação da eficiência da calibração manual.

CALIBRAÇÃO MANUAL (Exp. 2)		
	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5
COE	0,5	0,53
Dv	7,69	6,57
CMR	0,08	0,07
EM	-44,42	-30,94

4.2.3 Experimento 3: Validação do Modelo.

A partir deste ponto, os parâmetros de ajuste do modelo não foram mais modificados, e assim sendo, neste experimento verificou-se o quão hábil o modelo SWAT ficou em assimilar as informações extraídas das imagens do uso e mudança no solo, dados climáticos de estações de superfície para o prognóstico da vazão na bacia hidrográfica. O melhor desempenho do modelo SWAT consistirá na obtenção do menor erro entre os valores previstos e observados da vazão. Por fim, será efetuada a avaliação de eficiência deste experimento a fim de validar o modelo para a bacia do Rio Capim.

No geral, o modelo melhorou quantitativamente os totais de vazão e qualitativamente a vazão média na bacia do Rio Capim. Com estes resultados pode-se dizer que o modelo está validado para a bacia, conforme mostraram os resultados abaixo.

a) Sub-Bacia 3.

Nesta sub-bacia o modelo se comportou muito bem, acompanhando a sazonalidade da vazão média, dos picos e das recessões do período avaliado, ou seja, qualitativamente o modelo se comportou muito bem neste experimento. Ele subestimou os picos de vazões, com relação ao quantitativo, respondeu a 74% do total observado, tendo uma subestimativa de 26% no total de vazão, ou seja, com relação ao quantitativo o modelo piorou um pouco em relação à calibração manual, mas melhorou bastante com relação às condições iniciais (Figura 20).

A vazão média gerada foi de $481,66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a observada para o período foi de $650,87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. O período que o modelo leva para começar a captar bem a sazonalidade (esquenta do

modelo) foi fundamental para a limitação da eficiência da simulação de vazões mensais, assim como a péssima simulação do ano de 2007 (Figura 20).

Em geral, para esta sub-bacia, pode-se dizer que o modelo está validado com algumas restrições:

- Subestimativa da vazão média em 26% para o ano 2007 e 2010.
- Picos de vazão um pouco menores do que os observados realmente.
- Qualitativamente o modelo está muito bom para esta sub-bacia, mas quantitativamente exige melhorias.

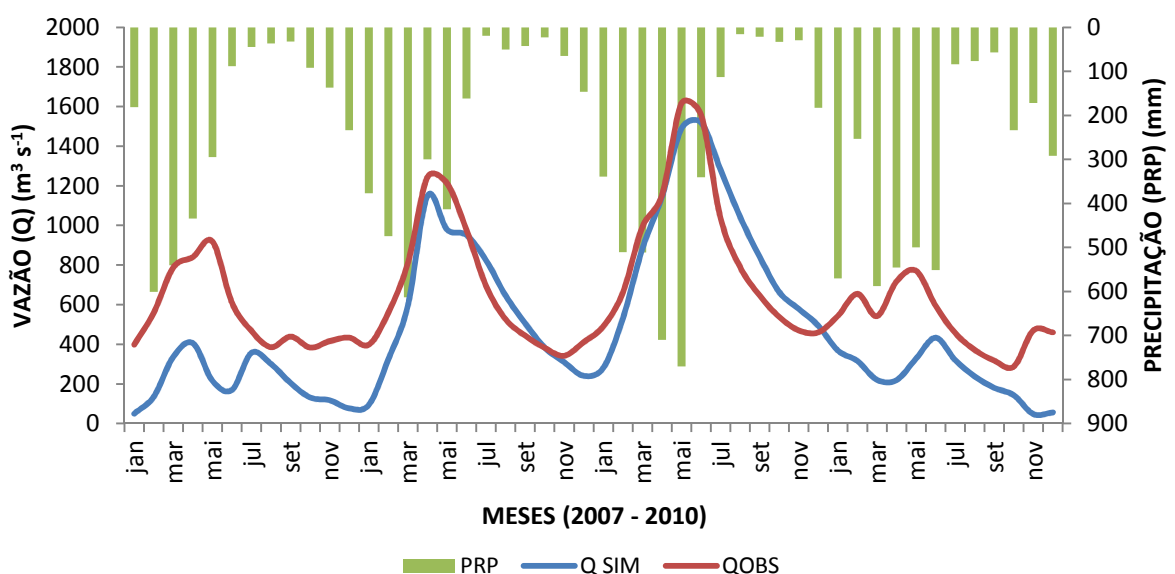


Figura 20: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a validação do modelo, para a sub-bacia 3 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

b) Sub-Bacia 5.

O modelo SWAT acompanhou bem a sazonalidade da vazão média nesta sub-bacia também mostrando sua eficiência em simular este evento. Ressalta-se que o ocorrido com o ano de 2010, em que ele não acompanha tão bem a sazonalidade, pode estar sendo influenciado pelo efeito que ocorreu neste ano, com uma queda na vazão média em pleno no período chuvoso. O modelo superestimou o pico de vazão no ano de 2009 e subestimou os picos nos demais anos. O modelo foi bem eficiente na simulação da recessão na sub-bacia; com relação ao quantitativo, o modelo respondeu a 82% do total observado, tendo uma subestimativa de 18% no total de vazão. Em comparação com a simulação inicial, os ajustes

foram ótimos, mostrando grandes melhoras na eficiência quantitativa e qualitativa do modelo (Figura 21).

A vazão média produzida pelo modelo foi de $428,09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a observada para o período foi de $523,88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Não foi verificado mais nenhum adiantamento nos picos nem nas recessões, o que foi fundamental para a eficiência da simulação de vazões mensais (Figura 21).

Em geral, para esta sub-bacia pode-se dizer que o modelo está validado com algumas restrições, também:

- Subestimativa da vazão média em 18% para o ano 2007, 2008 e 2010.
- Picos de vazão um pouco menores do que o observado realmente.
- Pico de vazão um pouco maior no ano de 2009.
- Qualitativamente o modelo está muito bom para esta sub-bacia, mas quantitativamente exige melhorias, principalmente nos períodos de recessão.

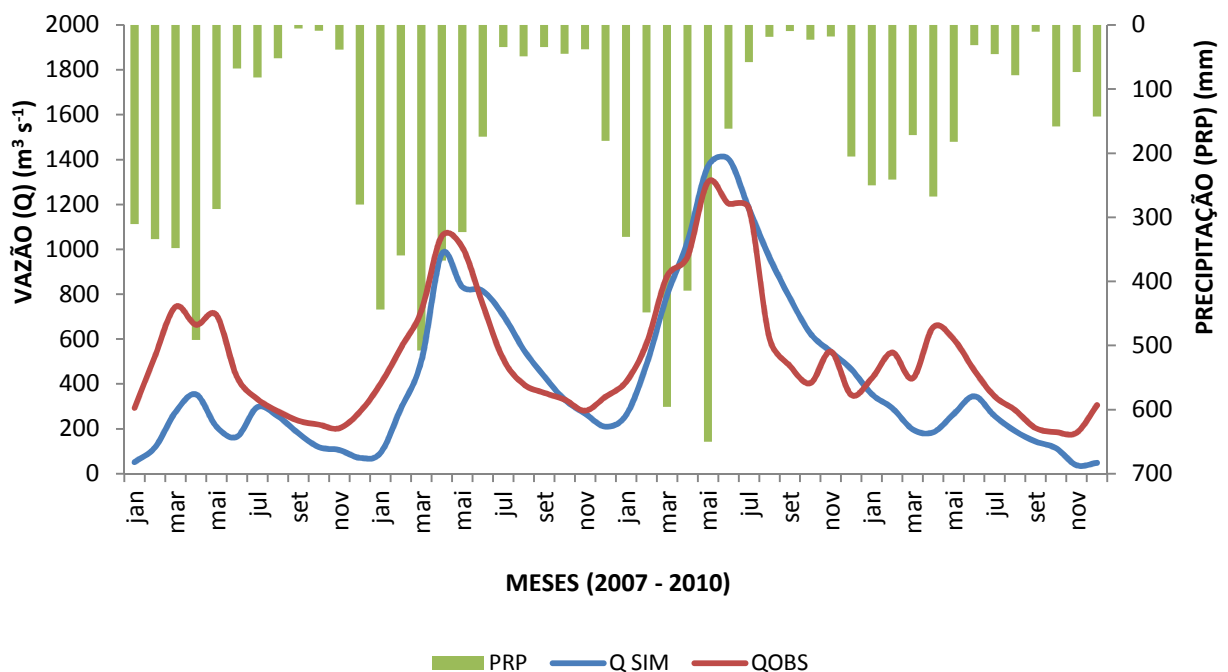


Figura 21: Comparação entre as vazões médias mensais simuladas e observadas com a precipitação, para a validação do modelo, para a sub-bacia 5 do Rio Capim. Sendo QSIM – vazão mensal simulada, QOBS – vazão mensal observada.

4.2.3.1 Avaliação de Eficiência da Validação do Modelo.

A validação do modelo para os valores mensais de vazão obteve bons resultados, com em valores muito, melhores que os obtidos inicialmente e na calibração do modelo (APÊNDICE C). Resultou em um COE de 0,59, mostrando que o modelo teve uma boa eficiência na validação, indicando que ele está validado; um Dv entre 25,99 a 0%, destacando que o ajuste do evento simulado para a sub-bacia 3 foi aceitável. O CMR igual a 0,26 aponta que o modelo está subestimando a vazão de saída e o EM, foi de -169,12 m³/s, assinala a subestimativa de alguns valores simulados, com valores quantitativos do total um pouco menores do que realmente são observados para a sub-bacia 3 (Tabela 10).

Para a sub-bacia 5 os resultados foram bem melhores, pois o COE foi de 0,65 (modelo validado para esta sub-bacia também), indicando uma melhor eficiência nesta sub-bacia, quando comparada com a anterior. O Dv, entre 18,28 e 0%, mostrou que nesta sub-bacia o ajuste do evento simulado foi melhor. O CMR de 0,18 assinala que o modelo está subestimando alguns valores de saída e o EM de -95,78 m³/s aponta também a subestimativa de alguns valores simulados e que estes são quantitativamente menores que os observados para a sub-bacia 5 (Tabela 10). Para todo o período de estudo (2000 a 2010) o COE foi de 0,87, mostrando a eficiência do modelo para simulação da vazão e dos componentes do ciclo hidrológico.

Tabela 10: Avaliação da eficiência da validação do modelo.

VALIDAÇÃO		
(Exp. 3)		
	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5
COE	0,59	0,65
Dv	25,99	18,28
CMR	0,26	0,18
EM	-169,12	-95,78

Em síntese, os resultados obtidos comparados com outros descritos na literatura, são coerentes e aceitáveis, sendo que até agora nenhum outro trabalho com o modelo SWAT havia sido aplicado para uma bacia no estado do Pará. Portanto, este estudo é pioneiro na região. O modelo SWAT já foi aplicado em várias partes do mundo, como VAN LIEW et 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).

WHITE E 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.

Para aplicações do modelo no Brasil, destacam-se diversos trabalhos que mostram a eficiência do modelo em bacias brasileiras (SOUSA, 2010). Destacam-se: i) o trabalho de MACHADO et al. (2003), em que os autores aplicaram o modelo SWAT à bacia do Ribeirão dos Marins no estado de São Paulo, para os anos de 1999 e 2000, tendo obtido resultados de COE de 0,92 para a escala mensal da vazão.

ii) mais recentemente, LUBITZ (2009), que aplicou o modelo à bacia do Ribeirão Concórdia, em Lontras, no estado de Santa Catarina, tendo obtido resultados satisfatórios na escala mensal da vazão, com COE de 0,88, sendo que na escala diária este resultado não foi tão expressivo (COE de 0,32).

iii) SOUSA (2010) aplicou o modelo à sub-bacia do Rio Lajeado, no estado de Tocantins, e obteve resultados satisfatórios na escala mensal, com COE de 0,69, e mostrou ainda que utilizando-se 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 de acordo com os 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.

4.2.4 Experimento 4: Componentes do Ciclo Hidrológico da bacia.

Depois que se verificou o quão hábil o modelo SWAT foi em assimilar as informações extraídas das imagens do uso e mudança no solo e dados climáticos de estações de superfície para o prognóstico da vazão na bacia hidrográfica, serão apresentados agora os componentes do ciclo hidrológico para as sub-bacias. O seu melhor desempenho foi na etapa de validação.

Então, serão apresentados os valores dos componentes do ciclo hidrológico para este experimento.

Em geral o modelo simulou bem, também, os componentes do ciclo hidrológico para ambas sub-bacias (3 e 5), mostrando que ele conseguiu captar a sazonalidade da região e que algumas variáveis foram decisivas para eficiência do mesmo. E que a bacia armazena água no solo, principalmente no período chuvoso, para manter a vazão alta no período seco.

a) Sub-Bacia 3.

Para a sub-bacia 3, os componentes do ciclo hidrológico se mostram coerentes (Tabela 11):

- A PRP evidencia o período chuvoso, que vai de dezembro a maio, e o período seco, que vai de junho a novembro, como foi verificado nas análises da estação de Paragominas no início do estudo. O mês com maior PRP foi março, com 388,20 mm, e o mês mais seco foi Agosto, com 10,75 mm.
- A Et se manteve alta no período chuvoso (representando em média 45 % da PRP) e foi maior que a PRP no período seco (sendo em média 75 % da PRP). O mês que teve maior Et para a sub-bacia, foi março (108,14 mm), e o mês de com o menor valor setembro (48,46 mm). A Et média foi de 74,05 mm (54 % da PRP).
- A quantidade de água no solo (SW) (880,72 mm em média) esteve bem alta, ajudando na regulação da vazão média principalmente no período seco.
- O escoamento superficial (SURQ) foi baixo principalmente no período seco, mostrando porque, qualitativamente, o resultado da simulação da vazão não foi tão bom para este período, existindo um período que o modelo simula mal esta variável (setembro a dezembro), apresentando um valor médio de 2,21 mm e um alto valor no mês de março (10,12 mm).
- A sub-bacia produz, em média, 24,61 mm de água total que alcança o canal (WYLD), sendo sua maior contribuição em abril (41,03 mm) e sua menor contribuição em janeiro (5,21 mm).
- O escoamento subterrâneo (GW_Q) possui uma amplitude de aproximadamente 33 mm, escoando subterraneamente mais em julho (38,09 mm) e menos em janeiro (4,96 mm).

- A percolação (PERC) esteve alta de janeiro a junho (período chuvoso) e baixa de julho a dezembro (período seco) em virtude da sazonalidade da região: possui uma média de 60,27 mm, sendo fevereiro o mês em que houve maior percolação (199,83 mm) e agosto aquele em que a percolação foi menor (0,08 mm).

Tabela 11: Componentes do ciclo hidrológico para a sub-bacia 3 no período de 2007 a 2010. 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 (m ³ /s)	PRP (mm)	SW (mm)	SURQ (mm)	WYLD (mm)	GW_Q (mm)	PERC (mm)	Et (mm)	Etp (mm)
JAN	198,30	173,28	931,53	0,01	5,21	4,96	36,33	84,64	103,06
FEV	326,60	332,93	964,67	2,94	13,58	10,13	199,83	89,26	96,38
MAR	509,18	388,20	947,52	10,12	31,11	20,02	192,48	108,14	110,85
ABR	729,40	267,45	942,33	10,05	41,03	29,76	165,24	103,13	103,13
MAI	753,13	129,70	923,76	1,09	38,71	36,39	61,53	105,17	105,41
JUN	768,30	53,13	904,30	2,03	38,51	35,43	65,87	70,80	100,83
JUL	695,55	23,05	870,03	0,23	39,19	38,09	1,93	55,36	109,27
AGO	556,63	10,75	828,53	0,03	30,46	29,80	0,08	52,17	110,84
SET	433,03	25,00	805,05	0,00	21,64	21,17	0,00	48,46	110,04
OUT	330,20	23,95	778,13	0,00	15,64	15,29	0,00	50,86	123,46
NOV	263,39	76,10	798,44	0,00	11,44	11,17	0,00	55,73	110,02
DEZ	216,75	140,90	874,32	0,00	8,87	8,65	0,00	64,90	105,94
Média	481,70	137,04	880,72	2,21	24,61	21,74	60,27	74,05	107,44

b) Sub-Bacia 5.

Os componentes do ciclo hidrológico desta sub-bacia se mostraram diferentes dos obtidos na sub-bacia 3 (Tabela 12):

- A PRP evidenciou um período chuvoso, que vai de dezembro a junho, e o período seco, que vai de julho a novembro, sendo março o mês com maior PRP, com 405,53 mm, e setembro o mês mais seco, com 14,93 mm (a PRP média foi de 196,88 mm).
- A Et esteve alta no período chuvoso (93,51 mm em média, representando 40 % da PRP) e foi maior (60,75 mm em média, representando 70 % da PRP) que a PRP no período seco, sendo março o mês que teve maior Et para a sub-bacia 5, representando 27 % da PRP (109,54 mm), e setembro o mês de com o menor valor (56,89 mm) (a Et média foi de 79,86 mm representando aproximadamente em média 41 % da PRP).

- O SW esteve também bastante alto nesta sub-bacia, ajudando na regulação da vazão média, principalmente no período seco e apresentando um valor médio de 909,10 mm.
- O SURQ esteve relativamente baixo, principalmente no período seco, apresentando menos meses nulos (outubro, novembro e dezembro). Quando comparado com a sub-bacia 3, apresentou um valor médio de 4,30 mm, sendo maio o mês com maior valor de SURQ (10,12 mm) e setembro o menor (0,03 mm).
- A sub-bacia 5 produz, em média 79,60 mm de água total que alcança o canal, tendo sua maior contribuição em maio (126,60 mm) e sua menor contribuição em dezembro (40,70 mm), tendo contribuído bem mais do que a sub-bacia 3.
- O GW_Q possui uma média de 74,24 mm, escoando subterraneamente mais em junho (106,81 mm) e menos em dezembro (40,33 mm).
- A PERC esteve alta de janeiro a junho (período chuvoso) e baixa de julho a dezembro (período seco) em virtude principalmente da sazonalidade da região, tendo apresentado uma média de 110,57 mm, e o mês que mais percolou foi o de maio (255,35 mm) e o que menos percolou foi o de agosto (0,42 mm). Em comparação com a sub-bacia anterior, esta sub-bacia apresentou menos meses nulos para a PERC (setembro), ou seja, nesta sub-bacia houve maior percolação.

Tabela 12: Componentes do ciclo hidrológico para a sub-bacia 5 no período de 2007 a 2010. 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 (m ³ /s)	PRP (mm)	SW (mm)	SURQ (mm)	WYLD (mm)	GW_Q (mm)	PERC (mm)	Et (mm)	Etp (mm)
JAN	189,47	333,88	961,59	1,68	55,77	53,43	195,42	92,87	102,95
FEV	296,38	345,70	957,47	4,98	69,47	63,49	247,23	89,75	96,27
MAR	441,83	405,93	959,29	5,15	86,66	80,17	202,56	109,54	110,74
ABR	637,68	385,23	980,96	8,50	97,31	87,34	237,57	103,03	103,03
MAI	669,70	360,65	958,22	18,31	126,60	106,46	255,35	105,30	105,30
JUN	681,88	108,93	913,24	11,23	119,77	106,81	157,18	76,12	100,72
JUL	610,58	54,95	894,64	1,50	102,72	99,76	12,26	61,17	109,15
AGO	490,65	49,45	880,08	0,22	85,24	83,93	0,42	63,56	110,72
SET	385,28	14,93	838,12	0,03	67,61	66,80	0,00	56,89	109,92
OUT	296,65	58,78	830,74	0,00	56,93	56,32	1,02	65,07	123,33
NOV	238,78	41,88	813,21	0,00	46,46	46,01	2,29	57,08	109,90
DEZ	198,64	202,30	921,67	0,00	40,70	40,33	15,56	77,99	105,83
Média	428,12	196,88	909,10	4,30	79,60	74,24	110,57	79,86	107,32

5-CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, os componentes do ciclo hidrológico (QSIM, SW, PRP, Et, PERC, GW_Q, SURQ, WYLD e Etp) da bacia do Rio Capim, no nordeste do estado do Pará e oeste do estado do Maranhão, foram estimados espacialmente pelo modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para utilização na gestão dos recursos hídricos e melhoramento da rede de monitoramento fluviométrico nesta bacia. Para isso foram utilizados os dados de uma estação automática de superfície do município de Paragominas, dados de vazão dos postos do Rio Capim e Maringá (para a validação do modelo), e dados de precipitação dos postos de São Domingos do Capim, Maringá, Paragominas e Capim 2.

A bacia hidrográfica do Rio Capim é levemente regular em sua maior parte, com altitude média de 114 metros, declividade baixa (0 a 5%), composta por solos do tipo Argissolo Amarelo (CAA) e Latossolo Amarelo (CLA), usados na agricultura (AGRL), florestas (FRST) para a extração de madeira e sementes, pastagem (PAST) e áreas de proteção ambiental (FRSD). O clima tem sazonalidade bem definida, com período chuvoso entre dezembro e maio, e período seco entre junho e novembro, com precipitação (PRP) média anual de 1539,32 mm, altos valores de umidade relativa do ar (UR) e temperatura do ar (T).

O modelo hidrológico SWAT, largamente utilizado em diversos estudos, demonstrou resultados satisfatórios neste estudo, dadas as limitações localizadas, realizando a simulação de série mensal contínua de vazão (sub-bacias 3 e 5) e quantificação dos componentes do ciclo hidrológico. Verificou-se que é possível estimar os componentes do ciclo hidrológico através da calibração do modelo SWAT, em especial a vazão, com precisão satisfatória e assim melhor espacializar os dados em bacias não monitoradas.

Pode-se compreender que, para se obter melhores resultados, é necessário utilizar técnicas adequadas de calibração. No entanto, o uso das ferramentas automáticas disponibilizado pelo modelo hidrológico SWAT para a análise de sensibilidade e calibração, traz menos esforço humano e consegue atingir bons resultados. Os dados de PRP de algumas estações utilizadas possuíam limitações (grandes falhas, alguns valores inconsistentes) podendo ter prejudicado os resultados quantitativos. Outro problema foi a falta de mais estações meteorológicas na bacia, podendo ter contribuído para a diminuição da precisão da modelagem.

Os valores do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), utilizado como principal índice de avaliação da eficiência do modelo, passaram de -33,22 para 0,59 na sub-

bacia 3 e de -25,43 para 0,65 na sub-bacia 5, na comparação dos dados mensais de escoamento, indicando um bom ajuste e apresentando ótimas melhoras nestes COE. Em termos percentuais, a modelagem, após os ajustes dos parâmetros, passou de um erro menor de 210,75% (superestimativa) para 26% (subestimativa) na vazão mensal da sub-bacia 3 e de 219,18% (superestimativa) para 18% (subestimativa) na vazão mensal da sub-bacia 5. Para todo o período estudado (2000 a 2010) o COE foi de 0,87, indicando qualitativa e quantitativamente que o modelo melhorou bastante também.

Recomenda-se particularmente, no caso da bacia do Rio Capim:

- O uso de dados de estações que disponham de mais informações meteorológicas e hidrológicas.
- Que sejam utilizados tanto para a implementação, como para validação das estimativas do modelo SWAT, testar os dados espaciais de PRP do CMORPH (MORPHing Technique) disponibilizados pelo NCEP (National Centers for Environmental Prediction).
- O uso de métodos matemáticos, como as redes neurais, para aperfeiçoar a calibração do modelo auxiliando na resolução dos problemas da etapa de calibração, através da inteligência artificial, ou seja, aprendendo e fazendo descobertas com o uso de técnicas computacionais.
- Que sejam realizadas simulações com vários usos e ocupações do solo, para se verificar os potenciais impactos na vazão, fazer um levantamento detalhado das características físicas dos solos na bacia 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 mais confiável de cenários em função de mudanças nos usos e ocupações do solo, gerar cenários com base no painel de mudanças climáticas, visando à previsão de cenários futuros para a gestão dos recursos hídricos.

Finalmente, espera-se que o presente estudo contribua nos esforços científicos e tecnológicos da modelagem hidrológica de bacias hidrográficas que visam integração entre modelos hidrológicos, atmosféricos e sensoriamento remoto. Essa ferramenta é adequada para a coleta de informações espaciais e sua aplicação pode colaborar com uma considerável melhoria na assimilação de dados do ciclo hidrológico.

6-REFERÊNCIAS CITADAS

ABBASPOUR, K.C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modeling Hydrology and Water Quality in the pre-alpine/alpine Thru Watershed Using SWAT. **Journal of Hydrology**. United States, feb. 2007. Hydrology, v. 333, n. 2-4, p. 413-430.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. **Agronomy Journal**, United States, jul. 1989. Agronomy, v. 81, n.4, p. 650-662.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Rome: FAO. Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998.14p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL**: Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advanced Training and Users Manual. 1st ed. Idaho: ED. IDAHO IMPLEMENTATION, 2002. 98p.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite - Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. Roma, July – August, 2007. ASCE, p. 380-394.

ARNOLD, J.; WILLIAMS, G. J. R.; SRINIVASAN, R.; KING, K.W. **SWAT: Soil and Water Assessment Tool**. 1st ed. Texas: SOIL AND WATER RESEARCH LABORATORY, 1996.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil, 2005.

BETTS, A. K. Understanding hydrometeorology using global models. **Bulletin of American Meteorological Society - BAMS**, Washington, v. 85, n. 4, p. 1673-1688, nov. 2004.

BETTS, A. K. and SILVA DIAS, M. A. F. Progress in Understanding Land-Surface-Atmosphere Coupling from LBA. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems - JAMES**. [S. I.], June, 2010. Modeling, v. 2, n. 6, 20p. doi:10.3894/JAMES.2010.2.6,2010.

BLACK, T. L. The New Mesoscale ETA Model: Description and Forecast Examples. **Weather Forecasting**, [S. I.], [s. n.], v. 9, p. 265-278. 1994.

BORMA, L. S.; ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M.; VON RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P. J.; FREITAS, H.; TANNUS, R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C.D.; ARTAXO, P. Atmosphere and Hydrological Controls of the Evapotranspiration over a Floodplain Forest in the Bananal Island Region Amazonic. **Journal of Geophysics**. 2009. Atmosphere, N°114, G01003, doi:10.1029/2007JG000641.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio)**. Manaus, 2009. Disponível em: <<http://ppbio.inpa.gov.br>>. Acesso em: 06 jun. 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA) e Conselho Nacional da Amazônia Legal (CONAMAZ). **Síntese das Ações para a Implementação da Política Nacional Integrada para a Amazônia Legal**. Período de 1995 a 1997. Brasília, 1998. 95p.

BRASIL. Ministério de Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**: Banco de Dados por Estados, Região Norte, Pará. Brasília, 1937. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial**. 2. ed. Campinas: BRAGANTINA, 2000. p. 125-137.

CARVALHO, D. F. de & SILVA, L. D. B. da. Ciclo Hidrológico. In: SILVA, L. D. B. da. (Org.). **Hidrologia**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2006. cap. 2. Disponível em: <<http://www.ufrj.br>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

COHEN, J. C. P. **Um Estudo Observacional de Linhas de Instabilidade na Amazônia**. 1989. 153 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.

COX, P.; HARRIS, P.; HUNTINGFORD, C.; BETTS, R.; COLLINS, M.; JONES, C.; JUPP, T.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. Increase Risk of Amazonian Drought Due to Decreasing Aerosol Pollution. **Nature**. London, n.453, p. 212-216. 2008.

DANISH HYDRAULIC INSTITUTE (DHI). **MIKE 11 – A Modeling System for River and Channels**. Horsholm, 2005, 454p.

DIK, G. R.; MECIKALSKI, J. R.; ANDERSON, M. C. Estimating Land Surface Energy Budgets from Space: Review and Current Efforts at the University of Wisconsin – Madison and USDA – ARS. **Bulletin of American Meteorological Society - BAMS**, Washington, v. 85, n. 1, p. 65-78, jan. 2004.

ELTAHIR, E. A. B. A Soil Moisture - Rainfall Feedback Mechanism. In: WATER Resources Research . (Org.). **Water Resources Research**. Columbia: [s. n.], 1998. 2. ed., cap. 4, p. 765-776.

ESCOBAR, I. P.; OLIVEIRA, S. A. M.; LIMA, S. P. S.; PRADO, R. L.; FERREIRA, A. T. A. Reprocessamento Digital das Imagens SLAR Geradas pelos Projetos RADAM e RADAMBRASIL – Projeto RADAM-D. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, GO, Brasil. **Anais**. Goiânia: INPE, 2005. p. 4395-4397.

FARAMARZI, M.; ABBASPOUR, K.A.; YANG, H.; SCHULIN, R. Modeling Blue and Green Water Availability in Iran. **Hydrological Processes**. [S. I.], v. 23, n. 3, p. 486-501, jan. 2009.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto: Imagens de Satélites para Estudos Ambientais**. 2. ed. São Paulo: OFICINA DE TEXTOS, 2007.

FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; RENNÓ, C. D.; CORREIA, A. H. **Utilização de Imagens de Radar de Abertura Sintética na Classificação do Uso e Ocupação do solo**. São José dos Campos: INPE, 2007. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros.php>>. Acesso em: mar. de 2013.

GARSTANG, M. S.; ULANSKI, S.; GRECO, J.; SCALA, R.; SWAP, D.; FITZJARRALD, D.; MARTIN, E.; BROWELL, M.; SHIPHAM, R.; HARRIS, R.; TABOLT AND CONNORS, V. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE 2B). A Meteorological Perspective. **Bulletin of American Meteorological Society**. Washington, v. 71, n. 1, p. 19-32, jan. 1990.

GASH, J. H.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M AND VICTORIA, R. L. Amazonian Deforestation and Climate. **Institute of Hydrology**. England, v. 247, p. 322-325, jan. 1996.

GRENN, W. H.; AMPT, G. A. The Flow of Air and Water Through Soils. **Journal of Agricultural Sciences**. United States, 1911. Studies on Soil Physics, v. 4, p. 11-24. 1911.

GROSSI, C. H. **Sistema de Informação Geográfica – Basins 3.0 na Modelagem Hidrológica da Bacia Experimental do Rio Pardo, SP em Botucatu**. 2003. 101 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo, SP, Brasil, 2003.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *APPLIED ENGINEERING IN AGRICULTURE*. [S. I.]: [s. n.], 1st ed., 1985, p. 96-99.

HORTON, R. E. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. Transactions. [S. I.]: American Geophysical Union, 1933, p. 446-460.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **NT 001: Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET**. Brasília: [s. n.], 2011. 11p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de José Carlos N. Epiphânio. 2. ed. São Paulo: PARÊNTESE, 2009. 602p.

KANNAN, N. et al. Sensitivity Analysis and Identification of the Best Evapotranspiration and Runoff Options for Hydrological Modeling in SWAT - 2000. **Journal of Hydrology**. United States, jan. 2007. Hydrology, v. 332, n. 3-4, p. 456-466.

KIDWELL, K. B. **NOAA Polar Orbiter Data Users Guide**. 1st. ed. Washington: UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE, 1995. 255p.

KOBIYAMA, M.; SANTOS, I. dos; MARANGON, F. H. S. Aplicação do TOPOG na Bacia Experimental do Rio Saci. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande, MS, Brasil. **Anais**. Campo Grande: [s. n.], 2009. 14p.

LAURINI, R. and THOMPSON, D. **Fundamentals of Spatial Information Systems**. 2nd ed. Londres: ACADEMIC PRESS LIMITED, 1994, 680p.

LIMA, A. M. M. de. Sistema de Informação de Recursos Hídricos como Subsídio a Elaboração do Plano Diretor da Bacia do Rio Capim – Pa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, GO, Brasil. **Anais**. Goiânia: INPE, 2005. p. 3789-3796.

LIMA, L. S. de. **Implementação de um Modelo Hidrológico Distribuído na Plataforma de Modelagem Dinâmica - EGO**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem

de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2011.

LINSLEY, R. K.; KOHLER, M. A.; PAULHUS, J. L. H. **Hydrology for Engineers**. 1st ed. New York: MCGRAW - HILL, 1975, 482p.

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2. ed. Campo Grande: UNIDERP, 2007, 908p.

LOMBARDI NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. Nova Abordagem para Cálculo de Espaçamento entre Terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA, 1., 1988, Campinas, SP, Brasil. **Anais**. Campinas: Fundação Cargill, p. 99-124.

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. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, Brasil, 2002.

MACHADO, R. E. VETTORAZZI, C. A. CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, Brasil, v. 8, n.1, p. 147-155, 2003.

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

MEDEIROS, Y. D. P. et al. Projeto de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Semi-Árido do Estado da Bahia. **Departamento de Engenharia Ambiental, Grupo de Recursos Hídricos – GRH**. Bahia, BA, Brasil, v. 2, cap. 6, 145p. 2004.

MEDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas Hidrológicas II: Diversidade de Processos na Bacia Vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS, Brasil, v. 2, n. 1, p. 59-122, 1997.

MINOTI, R. T. **Abordagens Qualitativas e Quantitativas de Micro-bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi - Superior/SP**. 2006. 231 F.

Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo / Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, 2006.

MOHAMED, Y. A.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H. H. G. Spatial Variability of Evaporation and Moisture Storage in the Swamps of the Upper Nile Studied by Remote Sensing Techniques. **Journal of Hydrology**. 2004. Hydrology, v. 289, p. 145 - 164.

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, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 1. ed. São José dos Campos: [s. n.], 2003, 208p.

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

NEGRÓN JUÁREZ, R. I.; HODNETT, M. G.; FU, R.; GOULDEN, M. L.; VON RANDOW, C. Control of Dry Season Evapotranspiration over the Amazonian Forest as Inferred from Observations at a Southern Amazon Forest Site. **Journal of Climate**. United States, jun. 2007. Climatology, v. 20, p. 2827 – 2839. DOI: 10.1175/JCLI4184.12007.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2005 (a)**. 2nd ed. Texas: Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, 2005 (a), 460p.

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

NEITSCH, S. L. et. al. **Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation: Version 2005 (c)**. Texas: Agricultural Research Service / Texas Agricultural Experiment Station, 2005 (c). 460p.

NEVES, F. F.; SILVA, F. das G. B. da; CRESTANA, S. Uso do Modelo AVSWAT na Avaliação do Aporte de Nitrogênio (N) e Fósforo (P) aos Mananciais de uma Microbacia Hidrográfica Contendo Atividade Avícola. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, v. 11, n. 4, p. 311-317, out./dez. 2006.

NOBRE, C. A. Status of the LBA Experiment. **GEWEX NEWS / WRCP**, [S. I.], v. 9, p. 3-4, 1999.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas**. 2. ed. Guaíba: LIVRARIA E EDITORA AGROPECUÁRIA, 2002, 478p.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. 1. ed. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 1976, 278p.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006, 519p.

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

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas**. [S. I.]: MCT/INPE, 2000. Relatório Técnico Parcial.

ROCHA, E. J. P. da; DIAS, P. L. da S.; NOBRE, C. A. Estimativa da Evapotranspiração na Amazônia durante o Experimento FLUAMAZON. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, SP, Brasil, v. 11, n. 2 sup., p. 621-625, biênio, 1996.

ROCHA, H. R. da; GOULDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D. V. O.; FREITAS, H. C. de; FIGUEIRA, A. M. e S. Seasonality of Water and Heat Fluxes over a Tropical Forest in Eastern Amazonian. **Ecological Applications**. United States, v. 14, supplement: LBA Experiment, p. 22-32, aug. 2004.

SARTORI, A. **Avaliação da Classificação Hidrológica do Solo para a Determinação do Excesso de Chuva do Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, Brasil, 2004.

SELLERS, P.J.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DORMAN, J.L.; DALCHER, A.; ROBERTS, J.M. Calibrating the Simple Biosphere Model for Amazonian Tropical Forest Using Field and Remote Sensing Data. **Journal Applications Meteorology and Climatology**. United States, aug. 1989. *Climatology*, v. 28, n. 8, p. 727-759.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian Rainforest. **The Royal Society B**. London, GB, v. 233, p. 321-346, apr. 1988.

SHUTTLEWORTH, W. J.; GASH, J. H. C.; ROBERTS, J. M.; NOBRE, C. A.; MOLION, L. C. B.; RIBEIRO, M. G. Post-Deforestation Amazonian Climate: Anglo-Brazilian Research to Improve Predictions. **Journal of Hydrology**. United States, dec. 1991. Hydrology, v. 129, n. 1-4, p. 71-85.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evapotranspiration measurement methods. **Southwest Hydrology**. Arizona, jan./feb. 2008. Evapotranspiration, v. 7, n. 1, p. 22-23. Disponível em: <<http://www.swhydro.arizona.edu/archive/V7N1/>>. Acesso em: Mar. 2013.

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. de. **Estudo Observacional de Jatos de Baixos Níveis no Litoral Norte e Nordeste do Pará durante o Período Chuvoso e Seco**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pelotas / Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil, 2005.

SOUSA, A. M. L. de. **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.

SOUZA, D. C.; OYAMA, M. D. Climatic consequences of gradual desertification in the semi-arid area of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. Vienna, v. 103, p. 345-357. 2011.

SOUZA, A. P. de; LIMA, M. E. de; CARVALHO, D. F. de. Evapotranspiração e Coeficientes de Cultura do Milho em Monocultivo e em Consórcio com a Mucuna - Cinza, usando Lisímetros de Pesagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, PE, Brasil, v.7, n. 1, p. 142-149, jan./mar. 2012. DOI: 10.5039/agraria.v7i1a802.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool): User's Guide. Texas: USDA, 2009. 460 p. Disponível em: <<http://www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html>>. Acesso em: Jan. 2012.

TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; FERREIRA, M.; FERREIRA, J. C.; MARENGO, J. Estudo de Impacto das Mudanças Climáticas sobre os Recursos Hídricos Superficiais e sobre os Níveis dos Aquíferos na Bacia do Rio Tocantins. **Convênio de Cooperação Técnico-Científica INPE-VALE**. [S. l.]: [s. n.], 2009. 70p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. rev. e aum. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2005, 678p.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **International Hydrological Programme (IHP)**. [S. I.], 2012. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/ihp/about-ihp/>>. Acesso em: 03 mar. 2012.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Agriculture. **Soil Conservation Service (SCS)**: National Engineering Handbook, section 4: Hydrology, chap. 4-10, 1972.

VALVERDE, M. A.; MARENGO, J. A. Mudanças na Circulação Atmosférica sobre a América do Sul para Cenários Futuros de Clima Projetados pelos Modelos Globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**. São Paulo, SP, Brasil, v.25, n.1, p. 125-145, 2010.

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.

VERTESSY, R. A.; ELSENBEEER, H. Distributed Modeling of Storm Flow Generation in an Amazonian Rain Forest Catchment: Effects of Model Parameterization. **Water Resources Research**, Columbia, NY, United States of America, v. 35, p. 2173-2187, 1999.

VILLELA, S. M; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. 1. ed. São Paulo: MCGRAW-HILL DO BRASIL, 1975, 245p.

VON RANDOW, C. et al. Comparative Measurements and Seasonal Variations in Energy and Carbon Exchange over Forest and Pasture in Southwest Amazonian. **Theoretical Applied Climatology**, Austria, v. 78, n. 1-3, p. 5-26, apr. 2004. DOI: 10.1007/s00704-004-0041-z

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.

WILKEN, P. S. **Engenharia de Drenagem Superficial**. 1. ed. São Paulo: CETESB, 1978, 478 p.

WILLIAMS, J. R. **Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients** Trans. ASAE. 12nd ed. [S. I.]: [s. n.], 1969, p. 100-103.

ZEE-PA - Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Leste e Calha Norte do Estado do Pará. **Diagnóstico do Meio Físico-Biótico**. 1. ed. Belém: PARÁ RURAL, 2010, 326 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Valores médios das variáveis meteorológicas para a bacia do Rio Capim, para o período de setembro de 2007 a dezembro de 2010.

MESES	T (°C)			UR (%)	Tpo (°C)			P (hpa)	VV (m/s)	DV (°)	RS (Kj/m ²)	PRP (mm)
	Média	Máx.	Min.	Média	Média	Máx.	Min.					
JANEIRO	25,99	26,55	25,46	81,78	22,37	22,85	21,94	1.000,54	1,34	116,32	767,56	186,07
FEVEREIRO	25,96	26,5	25,44	83,45	22,72	23,2	22,29	1.000,49	1,32	120,57	796,5	301,87
MARÇO	25,95	26,48	25,43	84,36	22,89	23,35	22,45	1.000,73	1,11	140,89	799,49	341,13
ABRIL	25,73	26,26	25,25	86,13	23,08	23,53	22,68	1.000,94	0,96	151,22	755,11	311,13
MAIO	25,94	26,49	25,42	85,28	23,07	23,52	22,64	1.001,50	0,83	147,25	733,5	161,6
JUNHO	25,83	26,44	25,25	81,29	22,01	22,51	21,56	1.002,64	1	136,11	770,2	59,67
JULHO	25,9	26,59	25,22	77,34	21,07	21,58	20,59	1.002,76	1,33	122,4	835,56	30,73
AGOSTO	26,38	27,12	25,66	75,1	21,02	21,52	20,54	1.001,91	1,45	109,62	833,17	14,33
SETEMBRO	27,32	28,06	26,63	71,35	21,1	21,52	20,67	1.001,56	1,7	85,83	876,14	8,13
OUTUBRO	27,74	28,49	27,04	68,84	20,84	21,29	20,41	1.000,38	1,73	98,76	874,6	14,6
NOVEMBRO	27,87	28,58	27,22	69,37	21,17	21,6	20,75	999,28	1,72	97,46	832,53	33,2
DEZEMBRO	26,96	27,57	26,39	75,56	21,82	22,28	21,4	999,53	1,42	113,91	767,9	130,85
TOTAL/MÉDIA	26,46	27,09	25,87	78,32	21,93	22,4	21,49	1.001,02	1,33	120,03	803,52	1.593,32

APÊNDICE B - Parâmetros das camadas de solo da bacia do Rio Capim.

SNAM	CAMADAS	SOL_Z (mm)	SOL_BD (g/cm ²)	SOL_AWC (mm/mm)	SOL_K (mm/h)	SOL_CBN (%)	SOL_ALB (fraction)	CLAY (%)	SILT (%)	SAND (%)	ROCK (%)	USLE_K	SOL_EC (dS/m)
CAA	1	500	1,3	0,27	260	16,8	0,21	12	10	78	0	0,11	0
	2	1000	1,25	0,26	250	5,8	0,01	22	7,6	70,4	0	0,12	0
	3	2000	1,2	0,25	240	3,4	0,12	34	7,4	58,6	0	0,1	0
CLA	1	500	1,22	0,2	201	15,7	0,2	14	7	79	0	0,15	0
	2	1000	1,2	0,2	100	7,5	0,02	16	4,6	79,4	0	0,19	0
	3	2000	1,5	0,12	230	8,2	0,16	22	6	72	0	0,2	0
CLVA	1	500	1,2	0,23	200	3,3	0,01	6	2,8	91,2	0	0,25	0
	2	1000	1,3	0,19	120	4,1	0,07	10	2	88	0	0,25	0
	3	2000	1,6	0,3	270	4,1	0,15	12	6,8	81,2	0	0,2	0
CNF	1	500	0,9	0,3	150	11,69	0,23	10,3	56,7	33	0	0,12	0
	2	1000	0,91	0,25	260	9,69	0,26	26	52,5	21,5	0	0,12	0
	3	2000	0,9	0,15	140	5,13	0,01	60	39,8	0,2	0	0,1	0

APÊNDICE C - Análises de eficiências dos três primeiros experimentos realizados neste estudo.

	SIMULAÇÃO INICIAL (Exp. 1)		CALIBRAÇÃO MANUAL (Exp. 2)		VALIDAÇÃO (Exp. 3)	
	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5	SUB-BACIA 3	SUB-BACIA 5
COE	-33,22	-25,43	0,5	0,53	0,59	0,65
Dv	110,75	119,18	7,69	6,57	25,99	18,28
CMR	-1,11	-1,19	0,08	0,07	0,26	0,18
EM	669,18	579,09	-44,42	-30,94	-169,12	-95,78