



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO  
HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
ITACAIÚNAS-PA**

**EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO**

**Campina Grande-PB  
2018**

**EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO**

**APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO  
HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
ITACAIÚNAS-PA**

Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Meteorologia de Meso e Grande Escalas

**Sub-área:** Modelagem Hidrológica

**Orientadores:** Prof. Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa

Prof. Dr. Madson Tavares Silva

Campina Grande-PB  
2018

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

S487a Serrão, Edivaldo Afonso de Oliveira.  
Aplicação do modelo Swat na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Itacaiúnas-PA / Edivaldo Afonso de Oliveira Serrão. – Campina Grande, 2018.  
93 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018.  
"Orientação: Prof. Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa, Prof. Dr. Madson Tavares Silva".  
Referências.

1. Mesoescala (Meteorologia). 2. Modelagem Hidrológica. 3. Modelo Swat. I. Sousa, Francisco Assis Salviano de. II. Silva, Madson Tavares. III. Título.

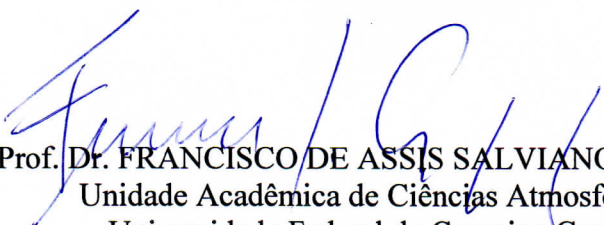
CDU 551.515.6(043)

EDIVALDO AFONSO DE OLIVEIRA SERRÃO

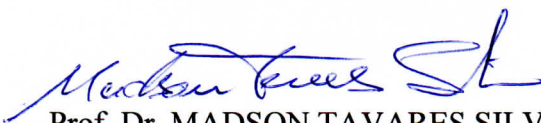
APLICAÇÃO DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO ITACAIÚNAS-PA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/02/2018

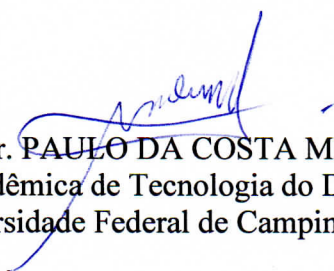
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANO DE SOUSA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. PAULO DA COSTA MEDEIROS  
Unidade Acadêmica de Tecnologia do Desenvolvimento  
Universidade Federal de Campina Grande

*A minha querida avó,  
a maestrina de minha vida.*

*Eu dedico!*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar saúde e força para alcançar meus objetivos e por me guiar neste caminho que tenho enorme satisfação em seguir.

A minha avó (Francisca Serrão) por me criar, me instruir, me dar amor e carinho e sempre me guiar para os melhores caminhos da vida.

A minha mãe (Edilsa Serrão) por me dar todo apoio do mundo para alcançar meus objetivos, por me orgulhar e fazer de sua vida um lindo exemplo a ser seguido.

Aos meus familiares que apoiaram-me em todos os momentos e se fizerem presentes sempre. Em especial, minhas tias e tios (Elisa Serrão, Edilea Serrão, Elivaldo Serrão e Edinaldo Serrão), irmãos (Debora Serrão e Rodrigo Serrão), primos (Bruno Serrão, Andrey Serrão, Junior Serrão, Diomério Serrão).

A minha noiva e meu filho (Lorena Ataíde e Cesar Serrão) por fazerem da minha vida algo mais que especial, algo que vale a pena lutar e acreditar sempre. Vocês são dentre muitos, a razão dos meus esforços e conquistas. O amor de minha vida.

Ao professor Dr. Francisco Assis Salviano de Sousa por ser meu orientador no Mestrado e sempre estar à disposição para tudo, além da grande amizade.

Ao professor Dr. Madson Tavares Silva por me Coorientar na Dissertação e sempre repassar seus conhecimentos na modelagem com SWAT, o que foi de suma importância na realização desse trabalho. Um grande amigo.

Ao professor Dr. Paulo da Costa Medeiros por fazer parte da minha banca de defesa de qualificação e de Mestrado, além dos conhecimentos repassados no intuito de melhorar o trabalho. Obrigado.

Os professores e funcionários em geral do PPGMET-UFCG que de alguma forma me ajudaram a adquirir conhecimento necessário e experiência no Mestrado em meteorológica

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos durante todo o curso.

A professora Dra. Aline Meiguins da UFPA por sempre está disposta a ajudar mesmo que de longe, assim me ajudando a crescer cientificamente e profissionalmente. Minha orientadora (mãe), conselheira e amiga. Obrigado por todos os ensinamentos.

Ao professor Dr. Edson Rocha por ser o primeiro a inserir-me no meio científico, sempre presente e ajudando no que lhe é possível. Obrigado pela amizade.

Aos meus amigos do CEFET (Luiz Trindade<sup>†</sup>, Wanderson Costa, Eric Baia, Eric Peuriclepes, Adalbert Santos, Felipe Trindade, Jaime Pinto, Luciane Lopes, José Corre e Francisco Plínio). Por me apoiarem, torcerem e acreditarem em mim. Com vocês vivi momentos inesquecíveis. Obrigado pela Amizade.

Aos meus amigos da UFPA (Cleber Assis, Romero Wanzeler, Layrson Gonçalves, Prof. João Athayde, Prof. Hernani Brasão, Prof. Galdino Mota, Prof. Francisco Oliveira, Prof. Julia Cohen, Prof. Paulo Kuhn, Prof. Danilo Filho e Prof. Paulo Sousa). Por me proporcionarem momentos felizes nessa trajetória. Obrigado pela amizade.

Aos meus amigos da UFCG de forma geral e em especial, Thomás Ferreira, Leydson Galvêncio, Pamela Ávila, Nikolai Espinoza, Jessica Rodrigues, Victória Amorim, Prof. Vicente Silva, Prof. Bernardo Barbosa e Prof. Carlos Santos. Obrigado pela amizade e momentos felizes.

Aos meus amigos de Campina Grande, Raoni Oliveira, João neto e todos da Bruce Barber, obrigado pela camaradagem e momentos de descontração.

E a todos que de alguma forma influenciaram para que eu chegasse até aqui. Obrigado!

*“However bad life may seem, there is always  
something you can do and succeed.  
While there is life, there is hope”.*

*Stephen William Hawking.*



## RESUMO

A bacia amazônica representa a maior extensão de florestas tropicais da Terra, exercendo significativa influência no clima local e global devido aos fluxos de energia e água na atmosfera. Exerce um papel importante no sequestro de carbono, bem como na emissão de água para a atmosfera que é fundamental na manutenção da própria floresta. Vários modelos hidrológicos têm sido aplicados para os biomas do Brasil, desde bases conceituais até a inserção dos SIG's desenvolvendo os modelos distribuídos de base física. Dentre estes, o *Soil and Water Assessment Tool* – SWAT é um modelo hidrológico para grandes bacias e foi desenvolvido para simular processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica. O objetivo desse trabalho foi utilizar o modelo SWAT para simular a vazão fluvial, alguns processos hidrológicos e risco de erosão da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, sudeste do Estado do Pará, bem como sua calibração e validação do modelo para a bacia de estudo. Para isto foram necessários dados de uso e ocupação do solo, tipos de solo, declividade. Bem como dados climáticos e fluviométricos de precipitação, temperatura, vento, umidade relativa, radiação solar e vazão fluvial. Os resultados demonstraram que para a análise do risco de erosão para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas foi constatado que as áreas de maior risco para erosão, foram as regiões de maior altitude com solos de fácil degradação e com uma dinâmica de uso de solo elevada, sendo estas na jusante da bacia e na porção sul do município de Marabá. Na validação da vazão obtida através do modelo SWAT, foi observado que todos os índices estatísticos aplicados mostraram que a vazão simulada teve um bom desempenho, em relação a vazão observada na estação fluviométrica da ANA. Foi validado ainda a evapotranspiração potencial simulada pelo SWAT, a partir de outros dois métodos, Linacre e Turc e observou-se que todos os índices estatísticos aplicados a evapotranspiração simulada com SWAT teve um bom desempenho em relação aos outros dois métodos de estimar evapotranspiração. Já na comparação dos métodos de Linacre teve um menor desempenho, em relação ao método de Turc, haja visto que na estimativa feita por Turc é levado em consideração radiação solar, o que torna o método mais robusto em relação a Linacre. Logo o modelo SWAT teve um bom desempenho em simular a vazão, evapotranspiração e outros processos hidrológicos para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas e pode ser uma fundamental ferramenta no monitoramento hidrológico dessa bacia, além de auxiliar os tomadores de decisões em uma boa gestão dos seus recursos.

**Palavras-Chave:** Modelagem Hidrológica, SWAT, Amazônia.

## ABSTRACT

The Amazon basin represents the largest expanse of tropical rainforests on Earth, exerting significant influence on the local and global climate due to the energy and water fluxes in the atmosphere. It plays an important role in carbon sequestration as well as in the emission of water into the atmosphere that is essential in maintaining the forest itself. Several hydrological models have been applied to the biomes of Brazil, from conceptual bases to the insertion of the GIS, developing the distributed models of physical base. Among these, the Soil and Water Assessment Tool - SWAT is a hydrological model for large basins and was developed to simulate processes that occur in a watershed. The objective of this work was to use the SWAT model to simulate river flow, some hydrological processes and risk of erosion of the Itacaiúnas river basin, southeast of the State of Pará, as well as its calibration and validation of the model for the study basin. For this, data on land use and occupation, soil types and slope were required. As well as climatic and fluvimetric data of precipitation, temperature, wind, relative humidity, solar radiation and river flow. The results showed that for the analysis of the erosion risk for the Itacaiúnas river basin, it was found that the areas with the highest risk for erosion were the highest altitude areas with easily degraded soils and a high soil use dynamics, being these downstream of the basin and in the southern portion of the municipality of Marabá. In the validation of the flow obtained through the SWAT model, it was observed that all the applied statistical indices showed that the simulated flow had a good performance, in relation to the flow observed in the fluvimetric station of the ANA. It was also validated the potential evapotranspiration simulated by SWAT, from two other methods, Linacre and Turc, and it was observed that all the statistical indices applied to simulated evapotranspiration with SWAT performed well in relation to the other two methods of estimating evapotranspiration. In the comparison of the methods of Linacre had a lower performance, in relation to the method of Turc, since in the estimation made by Turc is taken into consideration solar radiation, which makes the method more robust in relation to Linacre. The SWAT model performed well in simulating flow, evapotranspiration and other hydrological processes for the Itacaiúnas river basin and can be a fundamental tool in the hydrological monitoring of this basin, besides helping decision-makers in a good way. management of its resources.

**Keywords:** Hydrological Modeling, SWAT, Amazon.

## Sumário

LISTA DE SIGLAS .....	1
LISTA DE FIGURAS .....	2
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. OBJETIVOS .....	7
2.1. Objetivos Gerais .....	7
2.2. Objetivos Específicos .....	7
3. REVISÃO LITERÁRIA .....	8
3.1. Ciclo Hidrológico.....	8
Figura 1. Esquema do Ciclo Hidrológico idealizado. ....	8
3.2. Modelos Hidrológicos .....	10
3.3. Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) .....	12
3.4. Sistemas Acoplados Oceano-Atmosfera atuantes na Amazônia .....	15
3.4.1. Influência da Teleconexões .....	15
3.4.2. Distribuição da Precipitação no Estado do Pará.....	17
3.4.3. Gestão de Recursos Hídricos e Ambiental a partir da Modelagem.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1. Materiais.....	22
4.1.1. Área de Estudo .....	22
4.1.2. Dados.....	24
4.2. Metodologia .....	26
4.2.1. Etapas da Modelagem do SWAT .....	26
4.3. Análise da Susceptibilidade a Erosão (Solo, Declive e Uso e Ocupação do Solo) .....	27
4.4. Descrição das equações do SWAT.....	29
4.5. Processo de funcionamento do SWAT.....	33
4.6. Formação das Unidades de Resposta Hidrológicas.....	34
4.7. Entrada de Dados Climáticos e de Solo. ....	35
4.8. Calibração e Validação Estatística do Modelo SWAT .....	38
5. RESULTADOS.....	42
5.1. Delimitação da bacia e Análise do MDE .....	42

5.2. Unidades de Resposta Hidrológica .....	44
5.3. Análise de Risco de Erosão.....	48
5.4. Análise Hidrológica do rio Itacaiúnas .....	49
5.5. Análise da Simulação Hidrológica do SWAT.....	53
5.6. Análise da Simulação por Uso do solo e Sub-Bacia .....	56
5.7. Calibração e Validação da simulação.....	60
5.7.1. Calibração .....	60
5.7.2. Validação da vazão.....	62
5.7.3. Validação da Evapotranspiração .....	65
6. CONCLUSÕES.....	69
7. PROPÓSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
8. BIBLIOGRAFIA.....	71

## LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de águas  
ATN - Atlântico Tropical Norte  
ATS – Atlântico Tropical Sul  
ATSM – Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar  
CN – Curve Number (Curva Número)  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EN – El Niño  
ENOS – El Niño-Oscilação Sul  
ET - Evapotranspiração  
GCOS - Sistema de Observação Global do Clima  
HRU – Unidades de Resposta Hidrológica  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPCC – Painel Internacional de Mudanças Climáticas  
IOS - Índice Oceânico do Niño  
LI–Linhas de Instabilidade  
LN – La Niña  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
NASA – National Aeronautics and Space Administration  
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration  
OL – Ondas de Leste  
SIG – Sistema de Informação Geográfica  
SRTM – Shuttle Radar Topographic Mission  
SWAT - Soil and Water Assessment Tool  
SCM – Sistemas Convectivos de Mesoescala  
TSM – Temperatura da Superfície do Mar  
VCMN – Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis  
ZCAS – Zona de Convergência da América do Sul  
ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo Hidrológico idealizado.....	07
Figura 2. Etapas do Ciclo hidrológico em pequena escala.....	08
Figura 3. Padrão do regime pluviométrico em anos de ocorrência de EN e Dipolo do Atlântico positivo para o Verão (8A) e Outono (8B) austral. (Fonte: Reboita e Santos, 2014) adaptado.....	16
Figura 4. Padrão do regime pluviométrico mensal no Pará.....	17
Figura 5. Normal climatológica de precipitação para o Estado do Pará. ....	17
Figura 6. Distribuição do abastecimento de urbano de águas Estado do Pará. (ANA, 2015. Adaptado) .....	19
Figura 7. Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas. (A) De acordo com a Agência Nacional de Águas; (b) Sub-Bacia do rio Sororó não monitorado pela ANA.....	22
Figura 8. Fluxograma esquemática das etapas realizadas pelo SWAT.....	25
Figura 9. Fluxograma das equações existentes no SWAT para cada HRU (Fonte: Adaptado de King et al., 1996). ....	29
Figura 10. Descrição das etapas de execução do SWAT. Fonte: (Adaptado de Taveira, 2012) .....	33
Figura 11. Delimitação da bacia e sub-bacia a partir do MDE pelo SWAT.....	42
Figura 12. Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	43
Figura 13. Tipos de uso e ocupação do solo dentro da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	44
Figura 14. Tipos de solo presentes na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	45
Figura 15. Declividade do terreno na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	46
Figura 16. Susceptibilidade a erosão para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas .....	48
Figura 17. Vazão média anual para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	49

Figura 18. Precipitação média mensal para a estação de Marabá na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	50
Figura 19. Vazão média mensal para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	51
Figura 20. Relação chuva – vazão para o exutório da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	51
Figura 21. Curva chave para o exutório da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	52
Figura 22. Balanço hídrico simulado pelo SWAT para 41 anos .....	53
Figura 23. Variáveis hidrológicas de saída do SWAT para a bacia do rio Itacaiúnas.....	54
Figura 24. Produção de água gerada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	54
Figura 25. Evapotranspiração simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	55
Figura 26. Uso e ocupação do solo e sua relação com as variáveis do balanço hídrico por sub-bacia. ....	56
Figura 27. Relação entre as variáveis do regime hídrico simuladas pelo SWAT para os principais usos de solo na bacia do rio Itacaiúnas no período de 41 anos.....	57
Figura 28. Distribuição Espacial da Precipitação e Escoamento Superficial por sub-bacia. ...	58
Figura 29. Calibração manual do modelo SWAT.....	59
Figura 29. Calibração manual do modelo SWAT.....	60
Figura 30. Relação vazão observada e simulada e validação.....	62
Figura 31. Vazão média anual observada e simulada. ....	63
Figura 32. Correlação entre as Evapotranspirações estimadas pelo SWAT e Linacre. ....	65
Figura 33. Correlação entre as Evapotranspirações estimadas pelo SWAT e Turc.....	66
Figura 34. Evapotranspirações mensais estimadas (SWAT - Linacre – Turc). ....	67

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vulnerabilidade para o uso e cobertura do solo. ....	28
Tabela 2. Vulnerabilidade para os tipos de solo da bacia. ....	29
Tabela 3. Vulnerabilidade para a declividade do terreno. ....	30

Tabela 4. Parâmetros climáticos da estação de Marabá para entrada no SWAT.....	38
Tabela 5. Variáveis físicas dos solos da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.....	39
Tabela 6. Tipos de uso e ocupação do solo reclassificado pelo SWAT. ....	47
Tabela 7. Tipos de solo inseridos no banco de dados do SWAT. ....	48
Tabela 8. Declividade do terreno na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas gerada pelo SWAT...49	



## 1. INTRODUÇÃO

A discussão dos reflexos das variações associadas ao comportamento da precipitação pluviométrica e recursos hídricos na bacia Amazônica tem se ampliado a partir das pesquisas sobre mudanças climáticas bem como a contribuição do uso e ocupação do solo para ocorrência destas (Nepstad et al. 2004; Li et al., 2008; Zeng et al., 2008; Phillips et al., 2009; Davidson et al., 2012).

Neste âmbito a Amazônia, que abrange nove estados brasileiros e mais 8 países da América do Sul, está no auge das preocupações com o clima global. A partir disto, estudar suas sub bacias torna-se primordial tanto no monitoramento, quanto na prevenção de desastres naturais. A precipitação média é de aproximadamente 2300 mm/ano, embora tenham regiões (na fronteira entre Brasil, Peru, Colômbia e encosta dos andes) em que o total anual atinge de 3500 mm a 4000 mm (Val et al., 2010). Para Marengo et al. (2009) uma das características mais importantes de regiões tropicais-equatoriais, como a Amazônia, são as variações das precipitações em escalas interanuais e interdecadais.

Estas estão diretamente correlacionadas com os sistemas hidrológicos da região, uma vez que em época de estiagens severas os canais fluviais tendem a diminuir sua cota e vazão fluviométrica. Outrossim, o oposto se aplica em momentos de ápices pluviométricos. Logo conhecer a distribuição espacial da precipitação pluvial é de suma importância, pois possibilita avaliar o comportamento desta variável aplicado a modelagem hidrológica de bacias hidrográficas (Li et al., 2010), transporte de poluentes (Moruzzi et al., 2012), dinâmica de rios e estimativa de perdas de solo (Cuartas et al., 2012), disponibilidade hídrica para cultivos (Santi et al., 2012) e eventos extremos como enchentes e estiagem (Keenan et al., 2014). Além de ser fundamental para a gestão dos recursos hídricos, desenvolvimento e planejamento ambiental (Castro filho et al., 2013).

Para isso é necessário entender os sistemas atmosféricos que atuam e organizam a precipitação na região, dentre as razões que explicam o regime pluvial na Amazônia, destacam-se (Fisch et al., 1998; Marengo, 2009; Alcântara, 2011): o deslocamento meridional (norte-sul) da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); processos de convecção organizada associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); brisa fluvial; a circulação geral da alta troposfera, principalmente por aqueles que causam a convecção e precipitação associada; aquecimento ou resfriamento anômalo da temperatura da superfície do mar no Pacífico tropical, fenômenos conhecidos respectivamente como El Niño e La Niña; bem como os eventos de

Linhas de Instabilidade (LI), e nos últimos 12 anos a configuração do Dipolo do Atlântico vem afetando a distribuição de chuvas na bacia Amazônica.

Yoon e Zeng (2010) constataram que apenas uma fração da variabilidade da precipitação na Amazônia pode ser explicada pelo ENOS, e que esta relação é mais atuante somente durante a estação chuvosa. É sugerido também que a influência do Atlântico Tropical Norte na variabilidade climática na região Amazônica pode se comparar às teleconexões com o ENOS do oceano Pacífico. Liebmann e Marengo (2001) e Marengo et al. (2008) mostraram que as variações de precipitação da Amazônia também estão relacionadas às TSM no Atlântico Tropical. A exemplo tivemos as estiagens de 2005 e 2010 onde a partir de perspectivas meteorológicas e hidrológicas, grandes extensões do sudoeste da Amazônia e toda a porção sul ocidental e oriental da Amazônia sofreram as secas mais intensas dos últimos 112 anos (Serrão et al., 2015). Esta não afetou da mesma forma o leste da Amazônia, padrão diferente daqueles relacionados somente ao fenômeno El Niño, como em 1998 (Zeng et al., 2008).

O monitoramento hidrológico deveria ser uma forma de antecipar tais eventos, porém dada as dimensões da bacia Amazônica e os custos de logística para a manutenção continuada das estações, a atual rede não consegue atender e aferir de forma homogênea espacialmente as demandas da bacia. A consequência direta está na dificuldade de gerar alertas preventivos para as comunidades e cidades que possam ser afetadas tanto pelos eventos mais chuvosos quanto pelos de escassez hídrica (Seyler et al., 2009).

Visto isso, entender os processos envolvidos no ciclo hidrológico na Amazônia tem grande relevância. Neste quesito entende-se a dificuldade em mensurar e avaliar cada processo do ciclo hidrológico, uma vez que cada parte do ciclo tem suas peculiaridades. Assim os modelos hidrológicos vêm para suprir e auxiliar na avaliação dos processos físicos envolvidos no ciclo hidrológico, sendo então uma ferramenta de grande aporte nas pesquisas hídricas na Amazônia.

Com a aplicação de modelos hidrológicos, é possível estimar cenários futuros de uso e ocupação de solo e analisar a demanda de recursos hídricos da bacia em estudo (Pagliero, 2014). Com isso auxiliar-se na tomada de decisões no âmbito do gerenciamento dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica de grandes cidades ou aquelas que passam por estiagens severas. A utilização do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) em uma bacia hidrográfica na Amazônia poderá nos ajudar a ter um entendimento melhor do escoamento superficial, transporte de sedimentos e outros aspectos do ciclo hidrológico pouco estudados na região por meio da modelagem.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos Gerais**

Esse estudo tem como ênfase analisar a variabilidade da vazão fluviométrica e outras variáveis do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, Sudeste do Estado do Pará, através do modelo hidrológico SWAT, e avaliar o desempenho do modelo em uma bacia amazônica utilizando de ferramentas e índices estatísticos.

### **2.2. Objetivos Específicos**

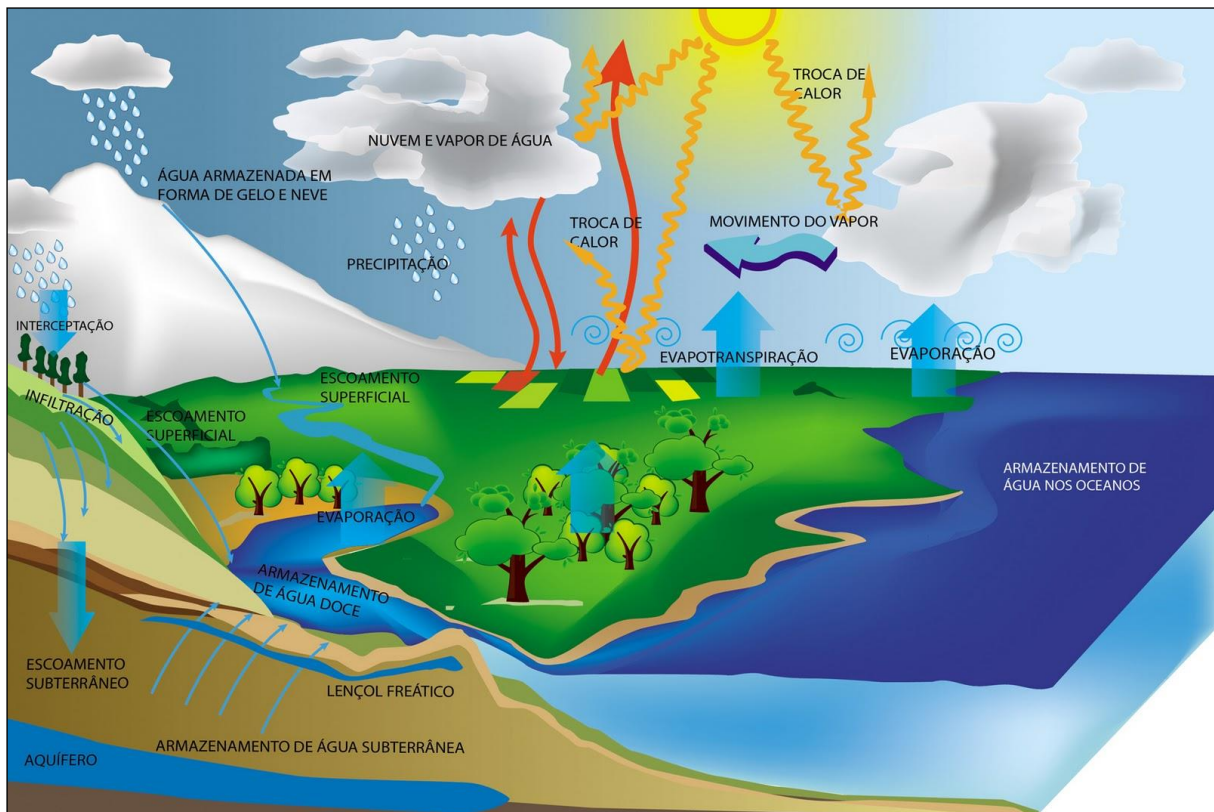
- Realizar a análise do risco de erosão da bacia;
- Analisar a série histórica de vazão fluvial do rio Itacaiúnas;
- Analisar a vazão fluvial do rio Itacaiúnas por meio do modelo SWAT;
- Analisar outros aspectos do ciclo hidrológico como evapotranspiração, escoamento superficial, lateral produção de água e o aporte de sedimentos a partir do resultado do modelo SWAT;
- Utilizar de equações físicas para validar a evapotranspiração do modelo;
- Calibrar o modelo SWAT;
- Validar o modelo utilizando índices estatísticos;
- Por fim, observar se o modelo obteve um resultado satisfatório e se é aplicável a região de estudo.

### 3. REVISÃO LITERÁRIA

#### 3.1. Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre (Tucci, 2009).

O conceito de ciclo hidrológico (Figura 1) 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. Este movimento permanente deve-se ao Sol, que fornece a energia para elevar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação), e à gravidade, que faz com que a água condensada se caia (precipitação) e que, uma vez na superfície, circule através de linhas de água que se reúnem em rios até atingir os oceanos (escoamento superficial) ou se infiltre nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fraturas (escoamento subterrâneo).

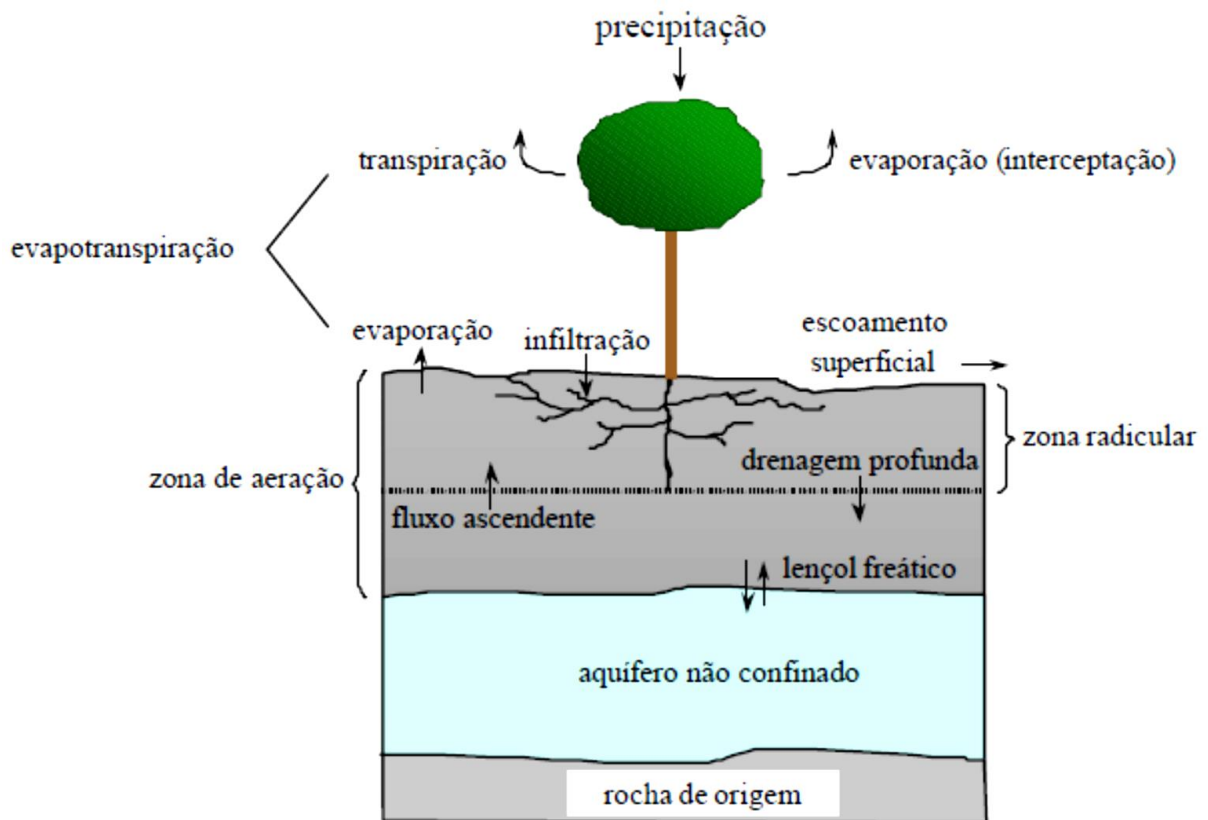


**Figura 1.** Esquema do Ciclo Hidrológico idealizado.

Sabe-se que é um processo dinâmico onde representa os diferentes caminhos que a água percorre e se transforma ao longo do tempo. Ele integra três partes do sistema que compõem a Terra: a atmosfera, onde é encontrada principalmente água no estado gasoso; a hidrosfera, representando a água na fase líquida ou sólida na superfície do planeta; e a litosfera, abrangendo todos os tipos de águas subterrâneas (Chow, 1964).

A água é transformada em vapor pela energia solar que atinge a superfície terrestre, e pela transpiração dos organismos vivos, sobe para a atmosfera onde esfria progressivamente dando origem às nuvens, tais massas de água retornam para a Terra sob a ação da gravidade, e em forma de precipitação, configurando um movimento permanente da água no planeta (Setti et al., 2001).

O ciclo hidrológico pode ser estudado de diversas maneiras e em várias escalas. Desde uma microbacia ou uma grande bacia hidrológica até o nível global. Observando outros componentes com a percolação ou a porção interceptada por árvores e prédios, entende-se o quão complexo pode ser este processo. Na Figura 2 é observado em menor escala partes das etapas do ciclo hidrológico.



**Figura 2.** Etapas do Ciclo hidrológico em pequena escala. Fonte: Divisão de Processamento de Imagens DPI/INPE, 2016 (Adaptado).

Apesar do sol ser denominado como o *carro chefe* de todos os processos físicos correlacionados com o ciclo hidrológico e outros processos naturais que dele dependem, as ações antrópicas, principalmente as ações sem um estudo prévio, podem alterar drasticamente fases desse importante balanço. O que normalmente ocorre, e por sua vez alteram o tempo o clima e até a forma de como vivemos.

### **3.2. Modelos Hidrológicos**

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que ali estão envolvidos, de maneira geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros (Rennó e Soares, 2000).

Tucci (2005) define modelo como sendo 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. Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo ou subsolo (Maidment, 1993).

Um modelo de simulação, de um modo geral, pode ser definido como a representação de um sistema através de equações matemáticas, ou seja, consiste em representar matematicamente o que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base nos dados de observação do sistema real (Baldissera, 2005). O objetivo desta modelagem é, então, compreender melhor o sistema e prever situações futuras, algumas vezes também reproduzir o passado, para direcionar as tomadas de decisão (Machado et al., 2003).

Os processos físicos correlacionados com meio ambiente são geralmente bastante complexos e são tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. Visto essa complexidade tais processos podem incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Assim um entendimento qualitativo de um processo particular é melhor expressado do que o entendimento quantitativo.

A dificuldade de se modelar uma bacia devido a heterogeneidade dos processos envolvidos tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (Tucci, 1998).

Logo é necessário ter conhecimento prévio de quais variáveis e quais aspectos pretende-se utilizar na modelagem, para assim atribuir um tipo certo de modelo ao estudo a ser abordado. Lima (2010) ressalta que deve-se observar em primeira análise qual o objetivo de seu uso, o que se deseja do modelo, em seguida devem ser considerados a quantidade e disponibilidade dos dados, a precisão requerida, a existência de corpo técnico capacitado para utilizar e interpretar as saídas do modelo, o tempo gasto com a modelagem e a existência de equipamentos com capacidade para o processamento.

Diversos estudos referentes a modelagem têm sido feitos nas últimas décadas com diferentes tipos de modelos como Singh (1995), Viessman e Lewes (1996) e Tucci (1998) bem como a classificação de cada modelo Maidment (1993), Tucci (1998) e Gomes e Varriale (2001) e Rodrigues et al (2015). Assim os modelos se classificam:

- Empíricos: ajustam os valores calculados aos observados sem considerar os processos físicos envolvidos;
- Físicos: incluem tecnologias análogas e princípios de semelhança aplicados a modelos de pequena escala;
- Matemáticos: representam o sistema com base em proposições matemáticas;
- Dinâmicos: envolvem mudanças e interações ao longo do tempo;
- Estáticos: examinam os processos sem considerar o fator temporal;
- Conceituais: consideram os processos físicos em suas funções;
- Estocásticos: inserem o conceito de probabilidade em suas formulações;
- Determinísticos: seguem uma lei definida, oposta a das probabilidades, um mesmo dado de entrada irá gerar a mesma saída;
- Contínuos: os fenômenos representados são contínuos no tempo;
- Discretos: as mudanças de estado se dão em intervalos discretos;
- Concentrado: não considera a variabilidade espacial;
- Distribuídos: suas variáveis e parâmetros dependem das características de temporalidade e espacialidade.

Nesses aspectos os estudos com a modelagem hidrológica são crescentes, Maldonado et al. (2001) realizou a calibração e validação do modelo SWRRB em uma bacia na Guatemala. Chowdary et al. (2001), Grunwald e Norton (2000), Kinnell (2000) e Lenzi e Di Luzio (1997), aplicaram o modelo AGNPS (*Agricultural Non-Point Source Model*) em bacias hidrográficas com diferentes áreas para investigação de vários problemas de qualidade da água. Modelo

desenvolvido no Brasil temos o LASH (*Lavras Simulation of Hydrology*). Este modelo foi desenvolvido por Beskow (2009) na Universidade Federal de Lavras. Os principais componentes simulados do modelo são o escoamento superficial direto, escoamento subsuperficial, escoamento base, ascensão capilar, evapotranspiração, interceptação e disponibilidade de água no solo para processos diários. (Beskow, 2009).

### **3.3. Modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool)**

O SWAT foi desenvolvido em 1996, nos EUA, pelo Agricultural Research Service no Texas A&M University. O SWAT incorpora grande parte dos avanços dos contidos nos modelos citados anteriormente e objetiva prever o impacto do uso e manejo do solo sobre o ciclo hidrológico, transporte de sedimentos e qualidade da água em bacias hidrográficas. Desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold e sua equipe no *Agricultural Research Service (ARS)* no *Grassland, Soil and Water Research Laboratory*, em Tempe, Texas, USA, tendo suporte técnico do *US Department of Agriculture (USDA)*.

Desde sua criação o modelo vem sofrendo contínuas revisões e expansões de suas capacidades. É um modelo de base física, computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações contínuas por longos períodos de tempo (Neitsch et al., 2005a; Gassman et al., 2007). O modelo SWAT foi desenvolvido com capacidade para desenvolver simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede de drenagem, análises em reservatórios, ciclo hidrossedimentológico, aspectos climáticos, temperatura do solo, crescimento vegetal, nutrientes, pesticidas e bactérias, práticas agrícolas e aspectos de qualidade da água (Neitsch et al., 2005b; Dhar, 2009).

Neitsch et al. (2005) relata ainda que se trata de um modelo contínuo, capaz de simular os efeitos das mudanças no uso e manejo do solo em longos períodos de tempo, porém o modelo não foi desenvolvido para simular eventos isolados de precipitação.

De acordo com seus atributos, o SWAT está cada vez mais difundido na comunidade científica e vem crescendo os estudos em diversas áreas e aplicações (Conan et al., 2003; Gassman et al., 2003; Pikounis et al., 2003; Bekiaris et al., 2005; Govender e Everson, 2005; Bracmort et al., 2006; Dabele et al., 2006; Hu et al., 2007; Santhi et al., 2006; Setegn et al., 2008; Redcliffe et al., 2009; Betrie et al., 2011).

Não sendo diferente no Brasil, o SWAT vem sendo largamente empregado como observado nos trabalhos de Neves et al. (2006), Strauch et al. (2012), Adriolo et al. (2008),



Mercuri et al. (2009), Paim e Menezes (2009), Uzeika (2012), Bonumá et al. (2010), Marchioro et al. (2011), Carvalho Neto et al. (2011), Fernandes et al. (2012) e Malutta (2012).

Para melhor visualização no Quadro 1 observa-se alguns trabalhos científicos, Dissertações e Teses que abordaram o modelo SWAT nos últimos anos no Brasil.

<b>Autor</b>	<b>Trabalho</b>	<b>Ano</b>
Machado	Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento	2002
Machado et al.	Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento	2003
Baldissera	Aplicabilidade do modelo de simulação Hidrológica SWAT (SoilandWateAssessment tool), para a bacia Hidrográfica do rio Cuiabá/MT.	2005
Baltokoski	Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiros-Pato Branco-PR	2008
Lopes	Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT	2008
Lopes et al.	Análise da produção de água e de sedimento em uma microbacia experimental com a aplicação do modelo SWAT	2008
Lino et al.	Análise da vazão da bacia hidrográfica do Rio Preto com o modelo SWAT	2009
Lubitz	Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à bacia do ribeirão Concórdia-Lontras-SC	2009
Maluta et al.	Aplicação do modelo SWAT no gerenciamento de bacias hidrográficas: Baciasescola na região norte catarinense	2009
Souza et al.	O modelo SWAT como ferramenta para a gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro	2009
Blainski	Aplicação do modelo hidrológico SWAT (SoilandWaterAssessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada	2010
Lelis & Calijuri	Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT	2010
Blainski et al.	Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no Ambiente	2011
Uzeika et al.	Use of the Swat Model for Hydro-Sedimentologic Simulation in a Small Rural Watershed	2012
Lelis et al.	Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil	2012
Andrade et al.	Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG	2013
Castro	Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada.	2013

Silva	Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio são Francisco	2014
Silva	Impacto da Expansão da Palma de Óleo Sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos nas Sub-Bacias Hidrográficas não Monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental.	2016
Blainski et al	Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense	2017

**Quadro 1.** Estudos utilizando o modelo SWAT no Brasil. Fonte: Castro, 2013. (Adaptado).

Diante de suas aplicabilidades, certamente o SWAT pode auxiliar na tomada de decisões nos âmbitos ambientais e gerenciar os recursos hídricos de uma região. Estudos promissores com a utilização do modelo SWAT em diversos locais do mundo, tornam-se um suporte para resultados e fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (Uzeika, 2012).

Toda essa acessibilidade do modelo se dá principalmente por sua interface, uma vez que o mesmo tem sua integração com softwares de SIG'S (*Sistema de Informações Geográficas*) que permite uma interação dinâmica e em tempo real do usuário com os processos que estão sendo realizados. Com a utilização do Sensoriamento Remoto acoplado ao Sistema de Informações Geográficas tem-se o Geoprocessamento, este aplicado a hidrologia, hidrometeorologia, hidrogeologia estes já bem difundidos no Brasil e no mundo.

A integração do geoprocessamento com os modelos que auxiliam uma melhor compreensão de fenômenos edafoclimáticos e a gestão de recursos hídricos é o que se procura cada vez mais (Baldissera, 2005). Com a utilização do Sensoriamento Remoto através dos MDE'S (*Modelos Digitais de Elevação*) pode-se obter via geoprocessamento a delimitação de uma bacia hidrográfica, bem como o a direção e o fluxo acumulado de água que essa bacia comporta, e isto é de suma importância na modelagem hidrológica.

Visto isso, o SWAT tem uma interface em ambiente Windows para atuar como ferramenta do software ArcGis pertencente a (*Environmental Systems Research Institute - ESRI, 1998*). Ao utilizar a interface com o ArcGis o modelo recebe o nome de ArcSWAT, e assim diferentes versões do ArcSWAT são disponibilizadas gratuitamente compatibilizando-as com as versões do ArcGis adotadas pelo usuário.

Utilizando a classificação proposta pelos autores no capítulo anterior o SWAT é um modelo de simulação matemática contínuo, semidistribuído, determinístico e semiconceitual.

### **3.4. Sistemas Acoplados Oceano-Atmosfera atuantes na Amazônia**

A Região norte do Brasil que apresenta um dos máximos pluviométricos do Brasil e do Mundo tem seu regime pluviométrico distribuindo em duas etapas, onde a primeira é o período mais chuvoso (dezembro a maio) e segundo sendo o período menos chuvoso (junho a novembro). A característica intrínseca do clima da Amazônia é a presença de um amplo espectro de variações no tempo e espaço da atividade convectiva tropical e da precipitação, as quais se tornam as variáveis climáticas mais importantes da região (Salio et al, 2007).

Visto que a maior parte da precipitação anual ocorre entre as estações de verão e outono austral (Marengo et al., 2001; De Souza e Ambrizzi, 2003), tipicamente de dezembro a maio, em associação aos padrões de circulação atmosférica quase-estacionários de grande escala associados à ZCAS e a ZCIT (De Souza et al., 2004, De Souza e Rocha, 2006). Além da ZCIT, outro processo importante para a precipitação é o aquecimento radiativo da superfície. A atividade convectiva pode também contribuir para o desenvolvimento de CCM's (*Complexos Convectivos de Mesoescala*) tropicais, que causam intensa precipitação (Reboita et al, 2010). Na zona litorânea tem a atuação de brisa marítima que transporta umidade para o interior da região contribuindo para a precipitação. A convecção induzida pela brisa marítima e a interação dos alísios com a circulação de brisa geram linhas de instabilidade tropical que adentram o continente (Kousky, 1980; Cavalcanti, 1982; Silva Dias, 1987). Segundo Cohen et al. (1989) as linhas de instabilidade contribuem com 45% da precipitação durante o período chuvoso no leste do Pará.

No contexto da relação dinâmica atuante na região, sabe-se que sistemas acoplados oceano-atmosfera que modulam o clima global atuam diretamente ou por teleconexões sobre a Amazônia e tem grande influência nos sistemas precipitantes da região, e certamente podem ser causadores de eventos extremos na podendo afetar diversas escalas da problemática ambiental e social.

#### **3.4.1. Influência da Teleconexões**

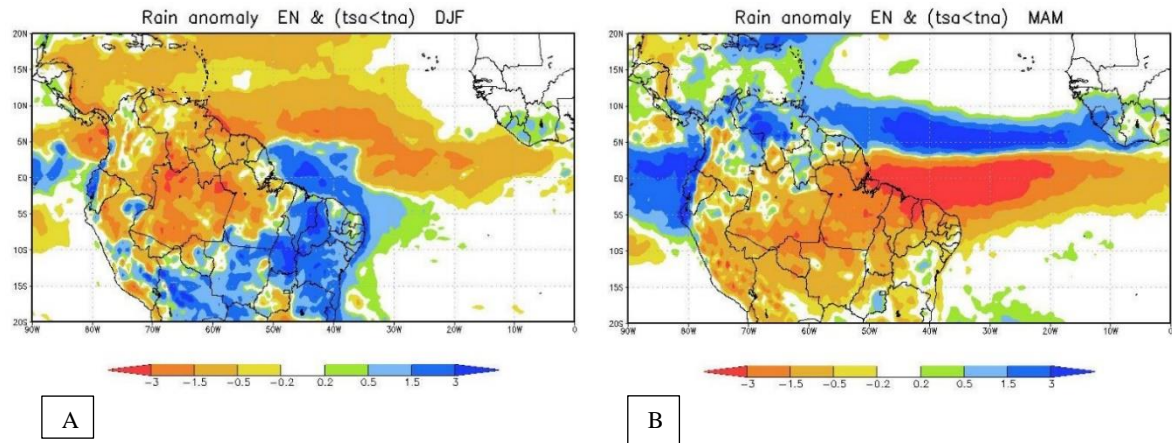
O termo teleconexão se refere à ligação entre anomalias climáticas locais e forçantes localizadas normalmente a grandes distâncias. Para Liu e Alexander (2007), as teleconexões são causadas pela propagação de ondas e transporte de energia na atmosfera e nos oceanos. As teleconexões permitem à atmosfera atuar como uma ponte entre as diferentes partes do oceano, enquanto o oceano atua como um túnel ligando as diferentes regiões atmosféricas (Pezzi;

Cavalcante, 2001; Chang; Li, 1997; Klein et al., 1999). O primeiro uso reconhecido do termo teleconexão foi por Angström (1935) referência ao dipolo de pressão atmosférica entre a Islândia e os Açores, hoje conhecido por Oscilação do Atlântico Norte (em inglês, North Atlantic Oscillation). No entanto, o uso do termo teleconexão começou a se disseminar no fim dos anos de 1960, sobre os impactos de grande escala do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (Bjerknes, 1969; Reibota; Santos, 2014).

Horel e Wallace (1981), afirmam a interação sobre os padrões de teleconexão com a variabilidade da temperatura da superfície nos oceanos tropicais. Bem como sua associação com a teoria da dispersão de ondas de Rossby (Hoskins; Karoly, 1981). Nas décadas de 1980 e 1990, estudos indicaram que a convecção tropical no oceano Pacífico dispara um trem de ondas em direção a América do Sul o chamado Modo do Pacífico – América do Sul (Pacific-South American Mode), de acordo com Mo e Higgins (1998).

Existem vários outros padrões de teleconexão, além do ENOS e dos padrões PSA, e entre eles se encontram o Modo Anular Sul (MAS), (Thompson; Wallace, 2000; Reboita et al., 2009), a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), (Mantua et al., 1997), o dipolo de temperatura da superfície do mar no oceano Índico (Saji et al., 1999) e o dipolo de temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Tropical (Moura; Shukla, 1981).

Neste sentido Reboita e Santos (2014) avaliaram os padrões de teleconexões associados as anomalias de TSM no Atlântico e Pacífico Tropical e sua influência na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil a partir de um conjunto de dados referente a 1971 até 2011, e foi observado que mesmo em anos de LN pode haver déficit de precipitação nas regiões estudadas se o ATS e ATN estiverem desfavoráveis. Assim como, em anos de EN concomitante ao sinal positivo de TSM no ATN e negativo no ATS intensificam a subsidência na Amazônia e Nordeste do Brasil principalmente nas estações do verão e outono austral (Figura 8 A e B).

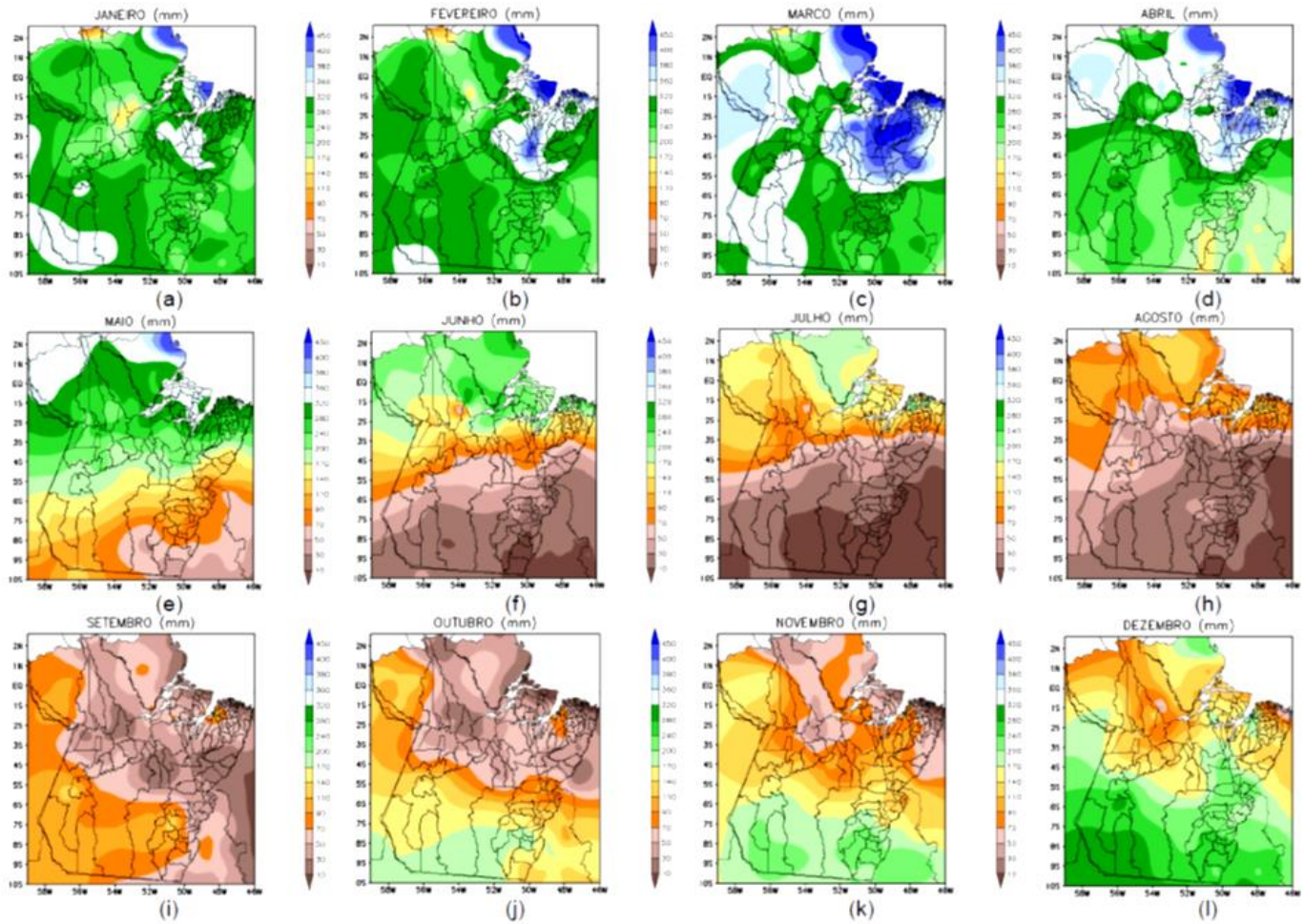


**Figura 3.** Padrão do regime pluviométrico em anos de ocorrência de EN e Dipolo do Atlântico positivo para o Verão (8A) e Outono (8B) austral. (Fonte: Reboita e Santos, 2014) adaptado.

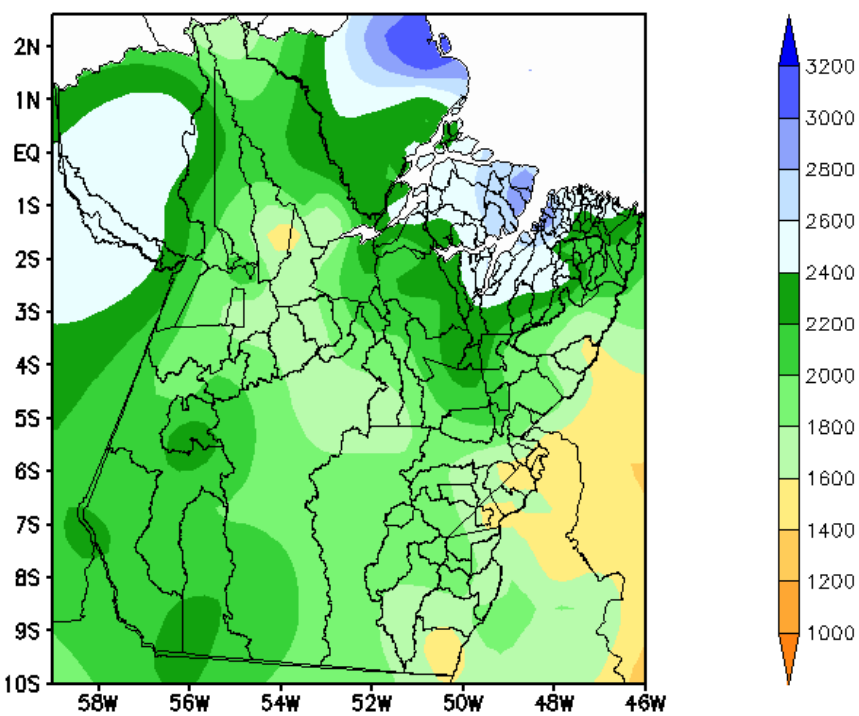
Na configuração EN e  $ATS < ATN$  (Figura. 8a) evidencia anomalias positivas de precipitação cobrindo todo o Nordeste do Brasil e anomalias negativas de precipitação na Amazônia no verão. Já a Figura 8b, é possível observar anomalias negativas de precipitação na Amazônia e Nordeste brasileiro. Ainda é possível, associar a faixa de anomalias positivas de precipitação entre ( $5^{\circ}$  e  $15^{\circ}$  N) com a posição da ZCIT, referente a estação do outono austral. Corroborando com estado descrito nos estudos aqui citados, sobre o deslocamento meridional da ZCIT em anos de EN e Dipolo do Atlântico.

### 3.4.2. Distribuição da Precipitação no Estado do Pará

Como descrito nos tópicos anteriores, diversos sistemas e mecanismos atmosféricos atuam e modulam a precipitação na Amazônia e com isso no Pará. Na figura 9 é observado a distribuição mensal da precipitação em todo o estado do Pará. Sendo que a porção norte do Estado é dominante a ZCIT modulando a precipitação nas estações do verão e outono. A partir de Junho a Setembro ocorrem as menores precipitações no Estado, principalmente na porção sul do Pará, nesse período os Sistemas Frontais que atingem o sul do Pará são os responsáveis pela chuva na estação do inverno e início da primavera, além de eventos de Mesoescala. Entre Outubro a Novembro as chuvas no estado mudam de configuração, com a porção norte com menor precipitação e a porção sul com um acréscimo. Em Dezembro a um acréscimo na precipitação em todo o estado com a chegada do verão. Na Figura 10 é observado a distribuição climatológica das chuvas, onde a porção norte é onde mais precipita, enquanto a porção sul varia entre 1.600 mm a 2.200 mm de precipitação.



**Figura 4.** Padrão do regime pluviométrico mensal no Pará.



**Figura 5.** Normal climatológica de precipitação para o Estado do Pará.

### 3.4.3. Gestão de Recursos Hídricos e Ambiental a partir da Modelagem

A crise ambiental, um dos maiores desafios do Planeta, é resultado do modelo de desenvolvimento que se tomou como paradigma, onde o recurso natural vem diminuindo e comprometendo qualidade de vida e os sistemas econômicos.

A sustentabilidade e a segurança hídricas são condicionantes ao desenvolvimento econômico e social do País. Enfrentar os sérios problemas de acesso à água, que atingem mais severamente a população de baixa renda dos pequenos municípios e das periferias dos grandes centros urbanos, é fundamental para que se continue avançando no caminho do crescimento ambientalmente responsável (ANA, 2010). A sucessão de eventos críticos dos últimos anos, no Brasil e no mundo, realça a gravidade desses problemas.

É necessário entender que os meios físicos e socioeconômicos são fontes de recursos que dão suporte as atividades humanas e ao mesmo tempo são por elas impactados (Leal, 1998). Portanto a água, é um bem finito e cada vez mais escasso, não é somente um elemento imprescindível a vida, mas também fator condicionante do desenvolvimento econômico e do bem-estar social (Veiga da Cunha, 1982).

Assim, em 08 de janeiro de 1997 foi publicada a “lei das águas”, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei n.º 9.433/97, e criou no Brasil, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tendo como preceitos básicos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, a consideração dos múltiplos usos da água, o reconhecimento da água como um bem finito, vulnerável e dotado de valor econômico e a necessidade da consideração da gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

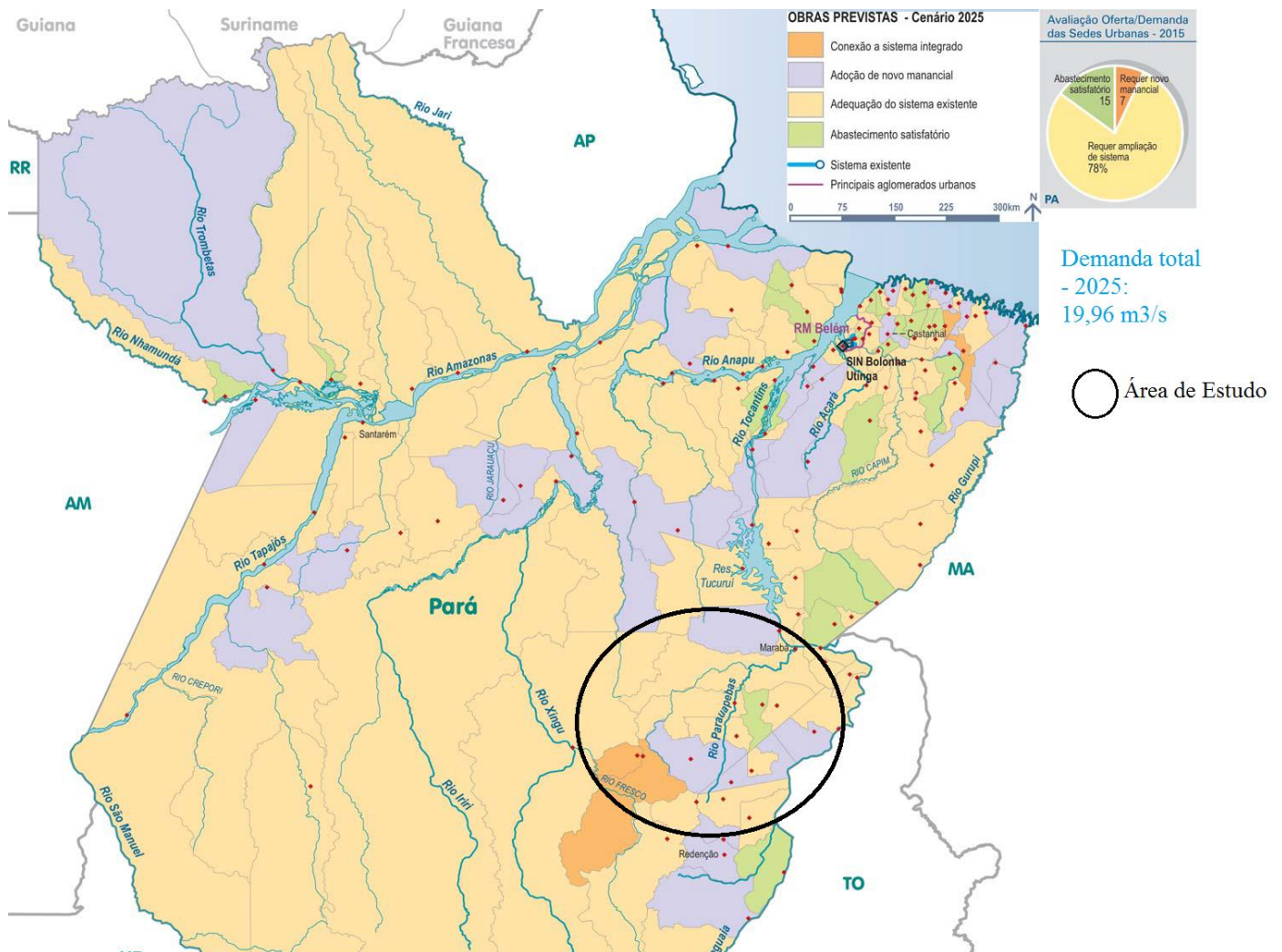
Logo uma abordagem sobre a análise dos recursos hídricos e seus sistemas ambientais é de suma importância na modelagem hidrológica, uma vez que os processos hidrológicos, nas suas fases terrestre e fluvial estão intimamente relacionados com os componentes do meio ambiente, como cobertura vegetal, declividade e características geológicas. Associa-se ainda a influência das ações antrópicas sobre o meio físico para afetar o comportamento qualitativo e quantitativo envolvendo o ciclo hidrológico. Ou seja, na modelagem com SWAT é possível averiguar os condicionantes ambientais e antrópicos sobre o ciclo hidrológico.

A modelagem hidrológica como suporte a gestão de recursos hídricos já vem sendo feita por alguns autores como (Christofolletti, 1999.; Tucci, 2005.; Arnold e Fohrer, 2005) e foi observado que a modelagem é uma boa ferramenta para essa gestão, possibilitando averiguar quais áreas estão mais susceptíveis a riscos hídricos, como escassez e inundações.



De acordo com a ANA (2015), no Estado do Pará, a disponibilidade hídrica superficial em todo o Estado é elevada, sendo maior na sub-bacia do rio Tapajós. Quanto à disponibilidade de água subterrânea, o sistema aquífero Alter do Chão, cuja ocorrência se dá na região centro-norte do Pará, se sobressai. O sistema aquífero Barreiras, que ocorre na maior parte da região litorânea (desconsiderando a Ilha de Marajó), também é relevante, pois juntamente com a formação Pirabas (rochas calcárias) é intensamente explorado na região metropolitana de Belém. A maioria dos municípios do Estado é abastecida por mananciais subterrâneos, o que ocorre em 76% das sedes municipais.

Neste sentido é possível, que alterações antrópicas em superfície possam acarretar em uma alteração no ciclo hidrológico no Pará, especialmente na região sudeste, que apresenta uma elevada dinâmica de uso e cobertura do solo. Na Figura 6 é apresentado a distribuição dos Municípios e seus sistemas de abastecimento.



**Figura 6.** Distribuição do abastecimento de urbano de águas Estado do Pará. (ANA, 2015.

Adaptado).



A expressão “recursos hídricos” trata da adoção da água (em quantidade e qualidade) como um bem de valor econômico, ou seja, passa a ser considerada como um recurso que pode ser utilizado em determinado momento, por uma determinada população. Porém, A maior parte dos problemas relacionados aos recursos hídricos tem como causas principais a sua má utilização e, destacadamente, a falta de planejamento e gestão (Machado, 1998). É observado na Figura 6, que a maioria dos municípios do Pará, tem um abastecimento a ser adequado a população, ou seja, não há um planejamento dos recursos hídricos a serem utilizados.

Dentro da área de estudo, apenas um município, Curionópolis, tem um abastecimento urbano de água satisfatório, Todos os outros municípios têm que se adequar a realidade populacional. Neste sentido a modelagem com SWAT, poderia servir de viés a partir dos resultados encontrados para um manejo sustentável dos recursos hídricos da bacia do Itacaiúnas. Uma vez que, com a modelagem é possível identificar áreas de maior ou menor precipitação, escoamento superficial, aquíferos rasos e profundos entre outros aspectos do ciclo hidrológico, e com isso áreas de susceptibilidade a déficits e excedentes hídricos.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

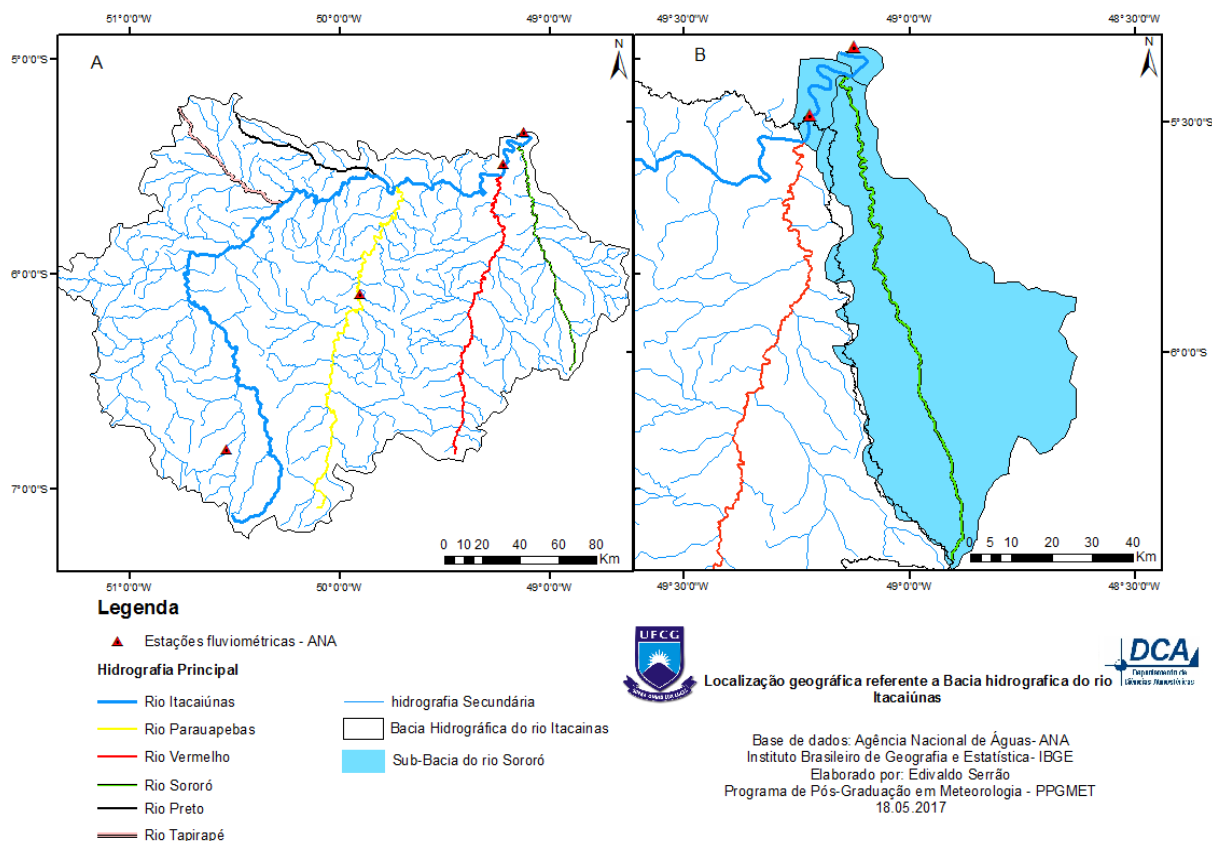
### **4.1. Materiais**

#### **4.1.1. Área de Estudo**

A sistemática empregada adotou o conceito de Garcez e Alvarez (1988) que afirmam que bacia hidrográfica é uma área definida e fechada topograficamente num ponto do curso de água, de forma que toda a vazão afluente possa ser medida ou descarregada através desse ponto. Logo a área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas na região sudeste do estado do Pará e apresenta atualmente nível de desmatamento bastante elevado.

A soma das áreas dos municípios dentro e no entorno da bacia sendo estes: Itupiranga, Nova Ipixuna, Água Azul do Norte, Canaã dos Carajás, Parauapebas, Marabá, Curionópolis, Eldorado dos Carajás, Xinguara, Sapucaia, Piçarra e São Geraldo do Araguaia. Atinge 59.438 km<sup>2</sup>, dos quais 62% se já encontravam desmatados em 2011, de acordo com Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) INPE, (2012).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA) a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (Figura 10) é classificada segundo o sistema Otto Pfafstetter, adotando as sub bacias definidas como de “Ordem 3” (Resolução CNRH n. 30/2002), e detém uma área de 42.000km<sup>2</sup>. Nasce na serra da Seringa no município de Água Azul do Norte, e é formado principalmente pela junção dos rios, D’Água Preta e rio Azul. Tem sua foz a margem esquerda do rio Tocantins, na área urbana da cidade de Marabá. Como afluentes principais os rios: Parauapebas, Vermelho, Tapirapé, Sororó e Preto.



**Figura 7.** Bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas. (A) De acordo com a Agência Nacional de Águas; (b) Sub-Bacia do rio Sororó não monitorado pela ANA.

Apesar da delimitação utilizada pela ANA que inclui a Sub-Bacia do rio Sororó, que tem sua contribuição em drenagem e transporte de sedimentos para o rio Itacaiúnas, não tem monitoramento fluviométrico ao se encontrar com rio Itacaiúnas no município de Marabá, bem como não existe uma estação fluvial no decorrer do rio Itacaiúnas após a jusante do rio Sororó. A estação mais próxima a foz do rio Itacaiúnas está localizada na região urbana de Marabá as margens do rio Tocantins, o que não nos permite um monitoramento completo de todas as variáveis fluviométricas referente ao rio Itacaiúnas e seus afluentes a partir do rio Sororó. Outrossim, existe uma estação fluviométrica nas margens do Itacaiúnas a pós o encontro com o rio Vermelho e essa abrange 90% dos fluxos hidrológicos que aqui serão estudados.

Porém a delimitação utilizada pela ANA (Otto Pfafstetter), não se ajusta adequadamente à bacia e sub-bacias de pequeno porte de aproximadamente 10.000km<sup>2</sup>, tendo algumas incompatibilidades com o relevo que realmente a delimita. Visto isso a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas terá uma nova delimitação que será melhor explorado no decorrer desse estudo.

#### 4.1.2. Dados

##### *Relevo*

Para a elaboração da cartografia referente a bacia do Itacaiúnas foi utilizado os dados de: Modelo Digital de Elevação (MDE) através de sensoriamento remoto, resultado da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), realizada em 2000 a bordo da nave Endeavour, disponibilizado através do United States Geological Survey (USGS). Ainda que a missão SRTM tenha sido um sucesso, ainda existiram erros provenientes da inclinação dos sensores e do próprio relevo do planeta, uma vez que a terra é um geóide imperfeito (Falorni et al.2005; Kääb,2005), além de corpos d'água e em superfícies com inclinação acima de 20°, devido ao sombreamento ocasionado no radar (Luedeling et al., 2007). Visto isso foi feito diversas correções utilizando dados de superfície de relevo e cartas cartográficas e foi lançado um novo produto (Alves Sobrinho et al., 2010). Estes dados estão em uma resolução de 30 x 30 metros e Sistema de Coordenadas Geográfica Datum WGS-84, para o estudo foram utilizados as cartas da zona 22 sendo estes os recorte: s04\_w061; s05\_w049; s05\_w050; s05\_w051; s05\_w052; s06\_w049; s06\_w050; s06\_w051, s06\_w052; s07\_w049; s07\_w050; s07\_w051, s07\_w052; s08\_w049; s08\_w050; s08\_w051; s08\_w052.

##### *Uso e Ocupação do Solo*

Os dados de uso e ocupação do solo são referentes ao projeto TerraClass, este sendo resultado de uma parceria entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Centro Regional da Amazônia (INPE/CRA), Embrapa Amazônia Oriental (CPATU) e a Embrapa Informática Agropecuária (CNPTIA). Como objetivo produzir mapas sistêmicos de uso e cobertura das terras desflorestadas da Amazônia Legal Brasileira, foi feito o mapeamento de cinco em cinco anos, assim é possível entender a dinâmica de uso e cobertura da Amazônia Legal Brasileira na evolução dos anos de: 2004, 2008, 2010, 2012 e 2014.

Estes dados são oriundos do satélite Landsat 5 e 8 (sensor TM e OLI), e estão no Sistema de Projeção Lat/Long e Sistema Geodésico de Referência SAD 69. Para o estudo em questão foi utilizado o produto TerraClass 2014.

##### *Solo*

Os dados da classificação dos solos da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas foram obtidos através da Embrapa Informática Agropecuária, contendo todo o domínio do território Brasileiro

na escala de 1:250.000 onde identifica e cartografa as diferentes classes de solos do país. Estruturado e retirado do projeto AMBDATA existentes no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Os dados do solo são ainda um esforço dos mapeamentos feitos em campanhas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) permitindo uma espacialização dos solos no Brasil, e estão disponibilizados com Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000.

### *Hidroclimatologia.*

Para os dados de vazão fluvial foram dados da estação fluviométrica Fazenda Alegria com código (291000000) na porção rural (Lat:  $-5^{\circ},48'$ ; Lon:  $-49^{\circ},22'$ ) no município de Marabá, pertencente a rede de monitoramento da ANA. Estando no período de 1970 a 2016. Para fins de entender a variação da vazão no rio Itacaiúnas, bem como para validar o resultado do SWAT no produto final.

Os dados das variáveis climáticas de precipitação, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa foram extraídos do banco de dados do Climate Forecast System Reanalises (CFSR) no período de (1979 a 2014), disponibilizados através do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Estes dados de reanálise já foram alvo de diversos estudos no mundo (Saha et al., 2010; Fuka et al., 2013; Dile e Srinivasan, 2014; Sierra et al., 2016;) e são utilizados pelo próprio SWAT como banco de dados para “*alimentar*” o modelo. Além da reanálise foi utilizado ainda uma estação em superfície pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no período de (1973 a 2013), para ser a estação climática de referência, para que o modelo “*entenda*” como realmente é o clima local. Estação que se localiza na área urbana do município de Marabá (Lat:  $-5.36$ ; Lon:  $-49.13$ ).

### *Aporte computacional*

O modelo SWAT por ter suas aplicações em ambiente de um SIG tem interface para Windows atuando como ferramenta do software ArcGis Environmental Systems Research Institute (ESRI), em colaboração com Texas A&M Spatial Sciences Laboratory, Blackland Research e Extension Center. Ao utilizar a interface com o ArcGis o modelo passa a ser denominado ArcSWAT. Diferentes versões do ArcSWAT são disponibilizadas gratuitamente compatibilizando-as com as versões do ArcGis adotadas pelo usuário.

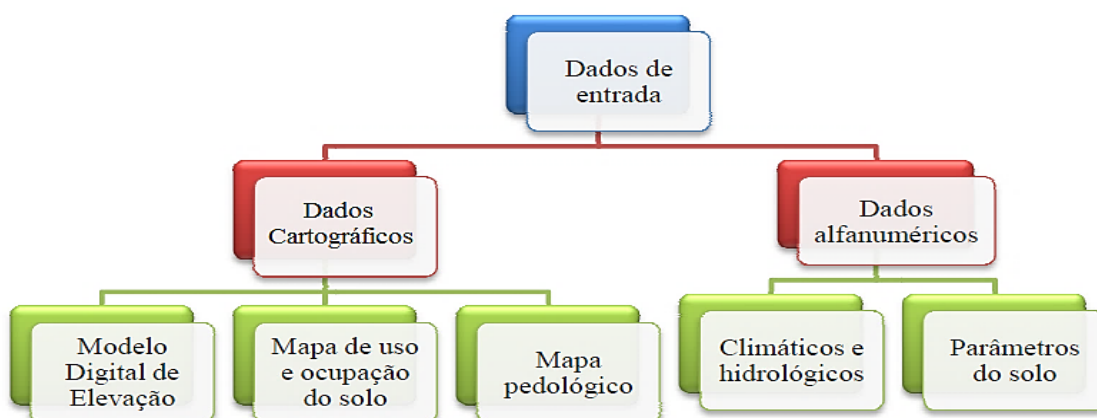
Foram utilizados para o estudo em questão os Softwares:

- *Hidro Desktop 1.2* (para manipulação dos dados fluviométricos).
- *Linguagem R* (para procedimentos estatísticos).
- *pcpSTAT* (Gerador dos parâmetros climatológicos da precipitação).
- *WGEN* (para estimar os parâmetros climáticos).
- *ArcGis 10.4* (para gerar a cartografia resultante e aporte do modelo).
- *ArcSWAT 2012.10.19* (versão para o ArcGis 10.4).
- *Swat-CUP 5.1* (Para calibração e análise de sensibilidade do modelo).

## 4.2. Metodologia

### 4.2.1. Etapas da Modelagem do SWAT

O SWAT requer uma grande quantidade de parâmetros de entrada que relacionam-se com as características físicas da bacia, estes já descritos anteriormente. Visto isso antes de começar a modelagem em si, o primeiro passo foi a entrada dos dados (MDE, Uso do solo e tipos de solo, drenagem, bem como a delimitação da bacia de acordo com a ANA.), dentro do ambiente SIG no ArcGis. Posteriormente utilizando as ferramentas do *ArcToolbox*, através da extensão *Data Management Tools – Projections e Transformations*, colocou-se todas os produtos no mesmo sistema de informação, (SIRGAS 2000). O modelo SWAT pode ser brevemente descrito através do fluxograma na Figura 11 onde todo o processo da modelagem se inicia com o modelo digital de elevação e pôr fim a saída das variáveis do ciclo hidrológico que se pretende estudada



**Figura 8.** Fluxograma esquemática das etapas realizadas pelo SWAT.

### 4.3. Análise da Susceptibilidade a Erosão (Solo, Declive e Uso e Ocupação do Solo)

A crescente demanda dos recursos naturais e sua rápida diminuição nas diversas escalas espaciais, impõem a necessidade de um planejamento racional desses recursos para a sua manutenção. O uso da terra sem um planejamento adequado provoca o empobrecimento dos solos quanto à fertilidade natural, aumenta a acidez, provocando baixa produtividade das culturas (Ribeiro e Campos, 2007). Neste aspecto a metodologia para elaboração da análise de vulnerabilidade à Erosão, foi a desenvolvida por Crepani et al. (2001) e tem como objetivo o suporte a análises ambientais e auxiliar na tomada de decisões, além de analisar regiões com tendências ao processo de erosão na Equação 1.

$$\mathcal{R} = \frac{d + s + u + c + p}{5} \quad (1)$$

Em que  $\mathcal{R}$  é o risco de erosão,  $d$  é a declividade do terreno;  $s$  é o tipo de solo;  $u$  é o uso do solo;  $c$  sendo a precipitação média para a área de estudo e  $p$  a pedologia da região.

A estabilidade ou vulnerabilidade, a resistência ao processo natural de erosão das unidades de paisagem natural é definida pela análise integrada do conjunto rocha, solo, relevo, vegetação e clima e cada um destes temas recebe uma pontuação de vulnerabilidade variando entre 1 e 3, onde mais próximo de 1 classifica estabilidade e 3 a vulnerabilidade mais elevada (Silva, 2014). Assim será realizado o estudo das componentes do: tipo de solo predominante na bacia; tipos de uso e ocupação do solo sendo desenvolvido atualmente na bacia e por fim a declividade do terreno gerada a partir do MDE, os valores correspondentes de vulnerabilidade de acordo com cada componente são apresentados nas tabelas de 1 a 3.

**Tabela 1.** Vulnerabilidade para o uso e cobertura do solo.

Classe de Uso do Solo	Valor de Vulnerabilidade
<i>Água</i>	1,5
<i>Cultura Perene</i>	2,5
<i>Cultura Anual</i>	3,0
<i>Pastagem</i>	2,0
<i>Mata</i>	1,0
<i>Várzea</i>	3,0
<i>Cidade</i>	1,0
<i>Reflorestamento</i>	1,5

Para a realização da cartografia resultante foi utilizado técnicas de geoprocessamento no ArcGis 10.4, onde a partir dos arquivos *raster's* das componentes a serem estudadas foram reclassificadas com auxílio do *ArcToolbox*, com a ferramenta *Spatial analyst tools – Reclass – Reclassify*, e assim agregando as principais classes. Com o novo arquivo raster classificado de acordo com a demanda, foi adicionado a tabela de atributos do raster os índices de vulnerabilidade de acordo com a classe. Dado esta etapa foi necessário transformar esse arquivo raster em um arquivo *shapefile* de ponto novamente fazendo uso do *ArcToolbox*, com a ferramenta *Conversion Tools – From Raster- Raster to Point*, somente com a nova informação adicionada, sendo está a da vulnerabilidade. De posse do arquivo shape de ponto da vulnerabilidade, é necessária uma nova conversão do shape de ponto em raster, para realizar a matemática dos raster's.

**Tabela 2.** Vulnerabilidade para os tipos de solo da bacia.

<i>Valores de vulnerabilidade dos solos</i>		
<i>Classes de solo</i>	<i>Legenda</i>	<i>Vulnerabilidade</i>
<i>Latossolo Vermelho- Amarelo</i>	CLVA	1,0
<i>Argissolo</i>	PVAD	2,0
<i>Neossolo Fúvico</i>	CNF	3,0

Ao realizar essas etapas para as três componentes a serem estudadas, é necessário fazer uso do *ArcToolbox*, com a ferramenta *Spatial analyst tools – Map Algebra – Raster Calculation*, e realizar a Equação 2 adaptada da proposta de Crepani et al. (2001).

$$\mathcal{R} = \frac{d + s + u}{3} \quad (2)$$

Em que  $\mathcal{R}$  é o risco de erosão,  $d$  é a declividade do terreno;  $s$  é o tipo de solo;  $u$  é o uso do solo. Logo o produto final foi um arquivo raster com todos os indices de vulnerabilidade de erosão em um único arquivo.



**Tabela 3.** Vulnerabilidade para a declividade do terreno.**Valores de vulnerabilidade para a declividade das encostas**

<i>DECLIVIDADE</i>	<i>Vulnerabilidade</i>
%	-
<3,5	1,0
3,5 - 5,8	1,1
5,8 - 8,2	1,2
8,2 - 10,3	1,3
10,3 - 12,9	1,4
12,9 - 15,1	1,5
15,1 - 17,4	1,6
17,4 - 19,8	1,7
19,8 - 22,2	1,8
22,2 - 24,5	1,9
24,5 - 27,2	2,0

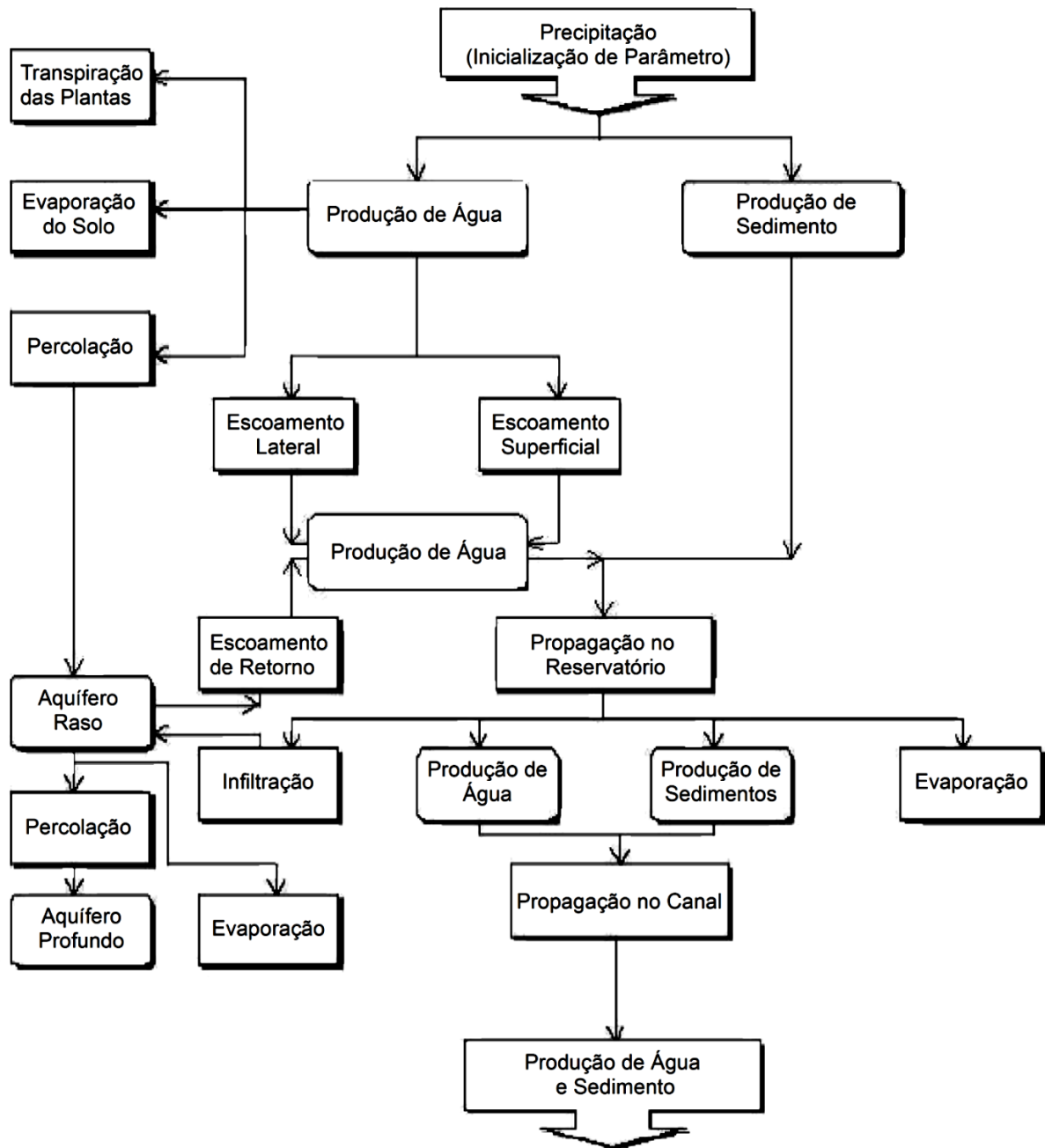
Dessa forma foi definido as classes de maior e menor vulnerabilidade, conforme os componentes selecionados, quatro grandes categorias hierárquicas foram adotadas para a produção da cartografia final: baixo risco, médio risco, risco moderado, alto risco.

#### **4.4. Descrição das equações do SWAT**

O modelo SWAT permite que vários processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica e a sua simulação será realizada com dois componentes: o escoamento superficial ou a fase de água e a erosão e transporte de sedimentos ou a fase de sedimentos (Silva, 2014).

Fundamentado nos trabalhos de Arnold et al., (1998), Machado (2002), Minoti (2006), Oliveira et al. (2006), Lutz (2009), Sousa (2015), Arnold et al. (2011), Neitsch et al. (2011), Arnold et al. (2012), Nunes (2012), Winchell et al. (2010) e Wagener (2011), serão descritos, sinteticamente, os principais componentes das duas fases do ciclo hidrológico simuladas pelo modelo SWAT, que influenciam nos processos que são o objetivo do trabalho sendo a simulação do escoamento superficial e do transporte de sedimentos.

Logo a modelagem no SWAT na fase terrestre se divide em sete módulos: 1. clima, 2. hidrologia, 3. cobertura vegetal/crescimento de plantas, 4. erosão, 5. nutrientes, 6. pesticidas e 7. práticas de manejo. Em que os parâmetros de vegetação, nutrientes e pesticidas não serão abordados por não fazerem parte dos objetivos do trabalho.



**Figura 9.** Fluxograma das equações existentes no SWAT para cada HRU (Fonte: Adaptado de King et al., 1996).

### *Ciclo hidrológico*

O ciclo hidrológico no modelo SWAT e determinação da produção de água da bacia hidrográfica tem como base a Equação 3, também sendo a principal equação do modelo, definida pelo balanço hídrico:

$$SW_T = SW_0 + \sum_{t=1}^t (P - Q_{sup} - ET - W_a - Q_{sub}) \quad (3)$$

Em que:  $SW_t$ : conteúdo final de água no solo (mm);  $SW_0$ : conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como a diferença entre a umidade de capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (mm);  $t$ : tempo (dias);  $P$ : precipitação pluvial (mm);  $Q_{sup}$ : escoamento superficial (mm);  $ET$ : evapotranspiração (mm);  $W_a$ : percolação (mm), e  $Q_{sub}$ : fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

A subdivisão da bacia hidrográfica em Unidades de Resposta Hidrológicas (HRU, do inglês *hydrologic response units*) possibilita uma análise mais detalhada das diferenças de evapotranspiração, e outras componentes do ciclo hidrológico para os diferentes tipos de usos e características do solo. O escoamento superficial é medido para cada HRU e, em seguida, é quantificado o total para a bacia inteira, melhorando a análise do balanço hídrico da bacia.

#### *Escoamento Superficial*

A estimativa do escoamento superficial é realizada pelo Método da Curva Número (CN) elaborado em 1954 pelo do *Soil Conservation Service* (SCS), representado nas Equações 4 e 5

$$Q_{sup} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, P > 0,2S \quad (4)$$

$$Q_{sup} = 0, P \leq 0,2S \quad (5)$$

Em que  $Q_{sup}$ : escoamento superficial diário (mm);  $P$ : precipitação pluvial diária (mm), e  $S$ : parâmetro de retenção.

Essa metodologia foi desenvolvida para fornecer de maneira consistente, uma estimativa do escoamento superficial para diferentes usos e ocupação do solo e tipo de solo, considerando ainda a umidade prévia do solo (Neitsch, 2005). Bastante difundido, este método possui relevância e prestígio no âmbito da hidrologia, devido a simplicidade, estabilidade e eficiência das previsões (Zhang et al., 2013).

O parâmetro de retenção é em função: 1. do tipo e uso, 2. do manejo, 3. Da inclinação do solo e 4. da permeabilidade, além de 5. ser temporalmente dependente das variações da quantidade de água no solo e é obtido através da Equação 6

$$S = 25,4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (6)$$

O parâmetro CN é fundamental ao estudo do escoamento superficial, sendo dependente da relação de informações de uso e cobertura do solo, das características pedológicas e das condições de umidade antecedentes da área em estudos. Dessa forma, o CN é função da combinação dos diferentes grupos hidrológicos do solo, conforme suas características físicas e de infiltração, com os diversos usos e manejos do solo (Sartori et al., 2005a). O fator CN foi determinado diariamente, no modelo SWAT, variando numericamente de 1 a 100, sendo 1 representando um solo totalmente permeável e 100 um solo que converterá toda a precipitação em escoamento, logo um solo impermeável (Neitsch, 2005).

#### *Evapotranspiração Potencial:*

O SWAT calcula a evapotranspiração potencial através do método de Penman-Monteith, de acordo com a Equação 7. Onde leve em consideração diversas variáveis tais quais: radiação solar (S), temperatura (T), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V). É o método mais recomendado no âmbito acadêmico e recomendado pela FAO-56 (Silva, 2016).

$$ETP = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (7)$$

Sendo que: R<sub>n</sub>: Saldo de Radiação (Mj/m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>); G: Fluxo de calor no solo (Mj m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); T<sub>a</sub>: Temperatura média do ar (°C); u<sub>2</sub>: Velocidade média diária do vento a 2m de altura; e<sub>s</sub>: Pressão de saturação de vapor média diária (kPa); e<sub>a</sub>: Pressão atual de vapor média diária (kPa); Δ: Declividade da curva de pressão de vapor; Γ: Constante psicrométrica (kPa/°C).

#### *Escoamento Lateral*

O Escoamento Lateral é caracterizado a partir do momento em que a água percolada verticalmente acha uma camada impermeável, acumula-se, e pela formação de uma zona saturada dá origem ao escoamento lateral. O cálculo desta componente é feito a partir do modelo de armazenamento cinemático, através da Equação 8.

$$Q_{lat} = 0,024 \cdot \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{Sat} \cdot Slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (8)$$

Em que  $Q_{lat}$  = é a descarga de água da rampa de saída ( $\text{mm.dia}^{-1}$ );  $SW_{ly, excess}$  = é o volume drenável da água armazenada na zona saturada da rampa por unidade de área ( $\text{mm}$ );  $K_{sat}$  = é a condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm.h}^{-1}$ );  $slp$  = é a declividade da rampa ( $\text{m.m}^{-1}$ );  $\phi d$  = é a porosidade drenável da camada de solo ( $\text{mm.mm}^{-1}$ );  $L_{hill}$  = é o comprimento da rampa ( $\text{m}$ ).

### *Sedimentos*

A erosão do solo foi estimada no modelo SWAT através da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MEUPS). A MEUPS é a versão modificada da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) apresentada na Equação 9.

$$Sed = 11,8 (Q_{sup} + q_{pico} + \text{ÁREA}_{HRU})^{0,56} \times K \times C \times LS \times P \times CFRG \quad (9)$$

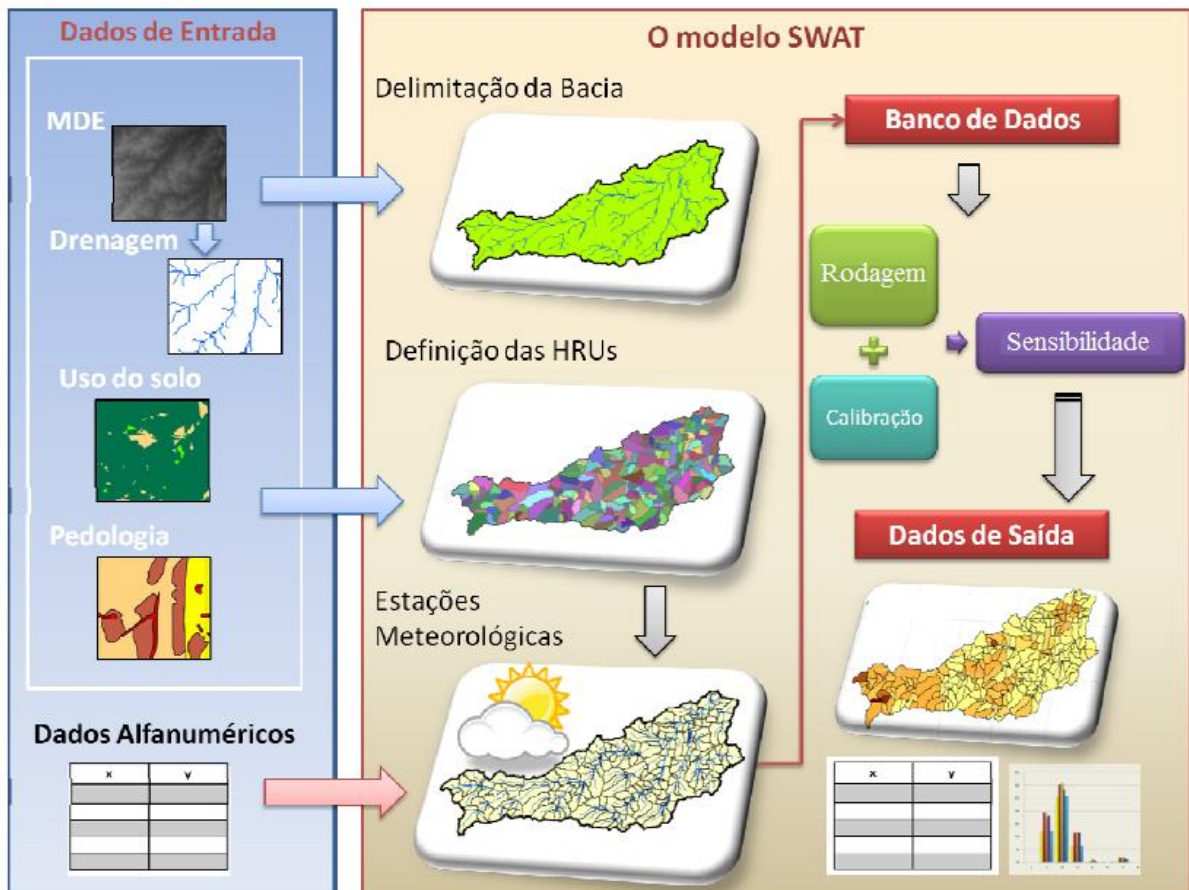
Sendo *sed*: produção de sedimentos após evento de precipitação no dia, em toneladas;  $Q_{sup}$ : escoamento superficial ( $\text{mm}$ );  $q_{pico}$ : vazão de pico do escoamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\text{Área}_{HRU}$ : área da Unidade de Resposta Hidrológica ( $\text{ha}$ );  $K$ : erodibilidade do solo [ $(0,013\text{ton m}^2 \text{hr})/(\text{m}^3 \text{ton cm})$ ];  $C$ : é o fator de uso e manejo do solo (adimensional);  $LS$ : fator topográfico (adimensional);  $P$ : fator das práticas conservacionistas (adimensional), e  $CFRG$ : fator de fragmentação esparsa (adimensional).

Enquanto a Equação Universal da Perda de Solos (USLE) trabalha com a precipitação como indicador de energia erosiva, a MUSLE utiliza o escoamento superficial para simular a erosão e o transporte de sedimentos, o que tem aumentado a eficiência dos resultados do modelo.

## **4.5. Processo de funcionamento do SWAT**

Inicialmente é indispensável saber quais dados serão necessários para a aplicação do modelo e organizar uma base com os dados que serão utilizados. As informações são inseridas no SWAT por meio de tabelas contendo as características físicas referentes à bacia e os dados espaciais por intermédio da interface. A aplicação do modelo SWAT foi realizada a partir da entrada de dados geoespaciais e inserção de informações para composição do banco de dados climatológico e pedológico. Assim a primeira etapa a ser desenvolvida no modelo SWAT é a entrada do MDE no modelo através da ferramenta *Watershed Delineation*, logo é possível gerar direção do fluxo e fluxo acumulado (*flow direction, flow accumulation*), em seguida criasse a rede hidrográfica, delimita a bacia de estudo e o exutório da bacia e de cada sub-bacia gerada.

Já com a bacia delimitada e drenagem distribuída é feito a sobreposição do mapa de uso e cobertura do solo, do mapa pedológico e das classes de declividade da bacia, que permite a formação das Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), esta que possuem uma única combinação dos mapas e classes. Com isso é possível inserir os dados climáticos e pedológicos da bacia dentro do modelo, e finalmente a etapa e execução do modelo. Todas as etapas estão melhor descritas na Figura 13.



**Figura 10.** Descrição das etapas de execução do SWAT. Fonte: (Adaptado de Taveira, 2012).

#### 4.6. Formação das Unidades de Resposta Hidrológicas.

A área de uma bacia pode ser dividida em unidades de resposta hidrológica (HRUs). Estas unidades são partes da bacia hidrográfica, antes delimitada e possuem tipo de solo, declividade e uso e cobertura do solo exclusivos. O escoamento é calculado para cada HRU e depois é realizado a soma para determinar as cargas totais de cada sub-bacia. Uma ou mais combinações de uso da terra/solo podem ser criadas para cada sub-bacia.

O mapa de solos e de uso e cobertura juntamente com o mapa de declividade, gerado com base no MDE, fornecerão as características fundamentais para que o modelo delimite as HRU's (Winchell et al., 2010). Antes de entrar com os mapas no modelo é importante inserir os dados exigidos com as características dos solos e de uso da terra, na base de dados do SWAT, pois a partir destas informações o modelo irá reclassificar os mapas de acordo com os dados tabelados, outrossim o modelo não realiza os HRU's impedindo o seguimento das demais etapas a serem realizadas.

Durante as definições das HRU's é possível escolher entre como subdividir essas HRU's em HRU's dominantes da área de estudo ou HRU's múltiplas onde:

*HRU dominante:* Para cada sub-bacia a combinação uso do solo, tipo de solo e declividade que apresentarem maior extensão será considerado para toda a área da sub-bacia e assim as demais combinações não são consideradas.

*HRUs Múltiplas:* É criado várias combinações de uso, tipo do solo e declividade, de acordo com a sensibilidade do usuário. Ou seja, o modelo permite que o operador manipule quais classes de cada variável é mais sensível para sua área de estudo.

Para o presente estudo, a opção de múltiplas HRUs foi escolhida com o intuito de evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas aos usos do solo, tipos de solos e declividade para as sub-bacias. Desta forma, estabeleceu-se como 10% da área da sub-bacia o limite mínimo da área para o uso da terra, solo e declividade para a formação das HRUs. Além disso foi utilizado quatro intervalos de declividade para gerar o produto final de declive sendo: 0 a 10%, 10 a 15%, 15 a 20% e acima de 20% até o valor limite 999%. Logo foi gerado um total de vinte e duas HRU's

#### **4.7. Entrada de Dados Climáticos e de Solo.**

O SWAT necessita de dados climáticos diários para sua rodagem, visto isso e como a rede de estações meteorológicas no Brasil é precária foram utilizados como dados de entrada os dados de Reanalyse do Climate Forecast System Reanalises (CFSR) no período de 1979 a 2014, pertencentes ao próprio banco de dados do SWAT, onde as variáveis necessárias são: Precipitação, Radiação solar, Umidade relativa, Velocidade do vento e Temperatura

Como faz-se necessário conhecer o clima da região foi utilizado os dados climáticos da estação de Marabá da rede de estações do INMET, onde juntamente com o software *pcpSTAT* foi gerado os parâmetros climáticos que são necessários para alimentar o modelo. Nesta fase é necessário que o usuário insira os dados da estação dentro do modelo iniciando com sua posição

geográfica, e o número de anos de dados acumulados desta forma é carregado todos os dados da estação climática a ser usada (Tabela 5).

**Tabela 4.** Parâmetros climáticos da estação de Marabá para entrada no SWAT.

VARIÁVEL	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
<b>RAINHHMX (mm)</b>	49,9	60,5	49,8	47,1	33,0	17,4	17,0	40,9	42,5	44,1	57,7	64,5
<b>PCPMM (mm)</b>	159,4	148,5	154,3	165,9	155,9	160,8	173,7	153,4	148,8	152,2	158,7	156,0
<b>PCPSTD (dia)</b>	10,8	11,7	12,0	13,7	11,1	12,4	13,2	12,0	10,3	10,8	13,3	12,2
<b>PCPSKW (mm)</b>	4,0	4,6	5,3	4,9	4,1	5,2	5,3	5,8	4,1	3,9	6,1	5,0
<b>PR_W1 (dia)</b>	0,28	0,26	0,26	0,24	0,29	0,25	0,29	0,26	0,29	0,25	0,24	0,26
<b>PR_W2 (dia)</b>	0,67	0,67	0,68	0,69	0,67	0,71	0,71	0,68	0,68	0,69	0,70	0,68
<b>PCPD (dia)</b>	15,2	13,4	14,8	14,1	15,3	14,7	16,4	14,7	15,0	14,7	14,5	15,0
<b>TMPMX (°c)</b>	30,5	30,5	30,8	31,3	31,9	32,3	32,8	32,7	32,7	32,0	31,4	30,8
<b>TMPMN (°c)</b>	22,3	22,2	22,5	22,6	22,5	21,6	21,1	21,5	22,4	22,4	22,4	22,2
<b>TMPSTDMX (°c)</b>	1,91	1,90	1,84	1,78	1,62	1,42	1,58	1,62	1,93	1,93	1,96	1,98
<b>TMPSTDMN (°c)</b>	1,06	1,11	1,08	1,30	1,21	1,36	1,48	1,45	1,35	1,47	1,41	1,41
<b>SOLARAV (MJ m<sup>2</sup>)</b>	14,8	14,6	14,9	16,3	16,5	18,7	18,0	18,5	18,9	15,9	16,2	14,7
<b>DEWPT (°c)</b>	22,5	22,7	22,7	23,7	23,1	22,1	21,1	21,9	21,9	22,5	22,9	23,5
<b>WNDVAV (m s<sup>-1</sup>)</b>	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0

- Valor máximo de meia hora de chuva em todo o período de registros de um determinado mês (RAINHHMX);
- Média mensal da precipitação total (PCPMM);
- Desvio padrão para a precipitação diária do mês (PCPSTD);
- Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima (PCPSKW)
- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias secos para o determinado mês (PR\_W1);
- Probabilidade de dias úmidos seguidos de dias úmidos para o determinado mês (PR\_W2);
- Média mensal de dias de precipitação (PCPD);
- Média mensal de temperatura máxima diária (TMPMX);
- Média mensal de temperatura mínima diária (TMPMN);
- Desvio padrão para a temperatura máxima diária de cada mês (TMPSTDMX);
- Desvio padrão para a temperatura mínima diária de cada mês (TMPSTDMN);



- Média de radiação solar diária para um determinado mês (SOLARAV);
- Média diária do ponto de orvalho para determinado mês (DEWPT),
- Média diária da velocidade do vento para determinado mês (WNDV).

Para os dados físicos dos solos dentro da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas foram utilizados os mesmos parâmetros encontrados por Silva (2016), onde foi feito um estudo sobre o impacto da expansão da palma de óleo sobre o escoamento superficial e produção de sedimentos em sub-bacias da mesma região que o presente estudo, e estão descritos conforme a Tabela 6.

**Tabela 6.** Variáveis físicas dos solos da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, encontrados por Silva (2016).

CARACT.	1° camada			2° camada			3° camada		
	CLVA	CNF	PVAD	CLVA	CNF	PVAD	CLVA	CNF	PVAD
<b>NLAYERS</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>HYDGRP</b>	C	C	C	C	C	C	C	C	C
<b>SOL_ZMX</b>	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300	3300
<b>ANION_EXCL</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>SOL_CRK</b>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>TEXTURE</b>	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL	STV-L-FSL-FSL
<b>SOL_Z1</b>	300	300	300	1000	1000	1000	2000	2000	2000
<b>SOL_BD</b>	1,4474	1,5441	1,5553	1,292	1,542	1,616	1,3076	1,5445	1,6171
<b>SOL_AWC</b>	0,1181	0,1008	0,0564	0,1213	0,1061	0,0768	0,1229	0,1049	0,0805
<b>SOL_K</b>	0,6513	5,5999	51,6526	0,3989	2,4008	9,9647	0,0321	1,4193	7,0361
<b>SOL_CBN</b>	1,506	1,385	1,165	0,632	0,741	0,385	0,21	0,38	0,21
<b>CLAY</b>	44,9	29,5	11,5	57,2	35	25	61	38	27,5
<b>SILT</b>	12,8	13,5	6,5	19,9	12	5,5	6	8	5
<b>SAND</b>	42,3	57	82	22,9	53	69,5	33	54	67,5
<b>ROCK</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>SOL_ALB</b>	0,2128	0,2314	0,24	0,2	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
<b>USLE_K</b>	0,1031	0,1163	0,0919	0,132	0,128	0,113	0,0968	0,1173	0,1102
<b>SOL_EC</b>	1	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>SOL_PH</b>	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Onde, NLAYERS - Número de camadas; SOL\_Z – profundidade da superfície do solo até o fundo da camada; SOL\_BD – massa específica aparente; SOL\_AWC – capacidade de água disponível na camada; SOL\_CBN – carbono orgânico; SOL\_K – condutividade hidráulica

saturada; CLAY – teor de argila; Valores estimados. SILT – teor de silte; SAND – teor de areia; ROCK – teor de pedregulhos e pedras; SOL\_ALB – albedo; USLE\_K – coeficiente de erodibilidade do solo; SOL\_EC – condutividade elétrica e SOL\_PH – o valor de PH do solo.

#### **4.8. Calibração e Validação Estatística do Modelo SWAT**

A calibração de um modelo hidrológico é encontrar os valores dos parâmetros do modelo que melhor representem o comportamento hidrológico do sistema (Collishonn e Tassi, 2010). Segundo Sammons e Neitsch (2000) a calibração é uma ferramenta que permite ao usuário editar o desempenho global das variáveis de entrada no modelo.

Já para Arnold et al., (2000) o primeiro passo de uma calibração é dividir os valores observados em duas séries temporais, sendo uma para a calibração e outra para a validação. Outra característica da calibração, é que os dados de entrada são ajustados até que se obtenha uma resposta satisfatória de saída. Uma vez realizado tal procedimento, o modelo é rodado usando os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação (Arnold et al., 2000).

O modelo SWAT utiliza uma calibração automática através do método *Shuffled Complex Evolution* (SCE) (Arnold; Fohrer, 2005, Griensven, 2005). De acordo com manual de calibração do SWAT (Griensven, 2005), o algoritmo SCE opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função, por meio de sucessivas interações e avaliações da função objetivo.

Uma segunda forma de calibração seria utilizando o software SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs for SWAT*) sua utilização é bastante difundida pelos usuários do SWAT afim de realizar a análise de sensibilidade, calibração, validação e análise de incertezas. Os procedimentos realizados pelo SWAT-CUP contemplam quatro algoritmos diferentes e podem ser usados de acordo com a necessidade do usuário: GLUE61 (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting) e MCMC (Markov Chain Monte Carlo) (Abbaspour, 2013). Destes, o método SUFI2 já vem sendo utilizado com êxito em outras pesquisas no Brasil (Blainski et al., 2017).

Nesse processo é utilizado o método de hipercubo latino para a definição dos parâmetros de análise, e o usuário define o intervalo para a calibração e o número de simulações a serem realizadas, a fim de definir o melhor ajuste (Abbaspour, 2013) Para o presente estudo será utilizado a calibração e análise de sensibilidade dos resultados do SWAT, utilizando o software SWAT-CUP sendo o mesmo de livre acesso e manipulação e ainda a possibilidade de modificar

os parâmetros do sistema de acordo com a necessidade, uma vez que, o programa tem o código aberto e será utilizado o método SUFI2.

Blainski et al., (2017) afirma ainda que, a principal dificuldade para realizar a calibração e a validação de modelos é a ausência de séries de dados medidos nas bacias modeladas. Porém para o estudo referente a bacia do rio Itacaiúnas tem-se a disponibilidade de 40 anos de dados, sendo possível utilizar desses procedimentos.

No processo de validação do modelo foi empregado os fundamentos estatísticos de acordo com o IPWG (*International Precipitation Working Group*), e descritos por Liu et al., (2013), replicado por (Alves e Vecchia, 2011) e Serrão et al (2016). Assim serão utilizados sete índices estatísticos sendo: o erro médio quadrático (RMSE - root mean square error), o desvio das médias (MBE - Mean Bias Error), o coeficiente de determinação ( $r^2$ ), o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), o coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe (NS), o índice de concordância (IC), com base em Willmott (1985), Hallak e Filho (2011) e Santos et al. (2011) e por fim na análise qualitativa dos dados empregou-se o coeficiente de qualidade (U), segundo Theil (1966).

O RMSE é a medida da magnitude média dos erros estimados entre os dados simulados e os medidos, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero melhor a qualidade dos valores estimados (equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{EST} - V_{OBS})^2} \quad (10)$$

Em que  $V_{EST}$  são os valores de vazão estimados pelo SWAT, e o  $V_{OBS}$ , são os valores de vazão observados pela estação fluviométrica da ANA, e  $n$  é o número de pontos de observação dentro da bacia do rio Itacaiúnas. Segundo Stone (1993) a desvantagem deste método é que bastam alguns valores discrepantes para que ocorra aumento significativo em sua magnitude.

O MBE (equação 2) indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo), os termos ( $V_{EST}$ ,  $V_{OBS}$  e  $n$ ) são iguais ao RMSE. O ideal é valor de MBE tendendo a zero. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (Stone, 1993; Ulgen; Hepbasli, 2009). Ou seja, caso a soma de erros positivos seja igual à soma de erros negativos, o MBE é imparcial (Hallak; Filho 2011).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((V_{EST} - V_{OBS})) \quad (11)$$

O  $r^2$  (equação 3) é definido como a relação que mede a proporção da variação total da variável dependente que é explicada pela variação da variável independente.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_I - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_I - \bar{Y})^2} \quad (12)$$

A expressão do  $r^2$  mostra que o coeficiente de determinação é sempre um número positivo entre zero e um, que quanto maior for o  $r^2$ , melhor será o poder de explicação da reta de regressão. Logo:  $\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_I - \bar{Y})^2$  corresponde à variação explicada, e  $\sum_{i=1}^n (Y_I - \bar{Y})^2$  é a variação não explicada.

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) (equação 13) mede o grau da correlação e a direção dessa correlação. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1. Quando 1 significa correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, quando -1 significa correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

$$R = \frac{\sum (X - \bar{X}) \cdot (Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \cdot \sum (Y - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe-NS inicialmente utilizado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos (Nash; Sutcliffe, 1970), também eficiente na calibração de estimada de precipitação por satélite e precipitação observada (Guilhon; Rocha, 2007). Ou ainda para averiguar quanto duas estimativas ou modelos estão correlacionados e eficientes entre eles (Duan et al., 1992; Kidd et al., 2003; Aonashi et al., 2009). O coeficiente de eficiência pode variar entre negativo infinito a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste. Conforme Silva et al. (2008), quando o valor do NS resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de NS entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de NS inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável. Para este estudo considerou-se como excelentes valores de NS acima de 0,90 em que:  $\bar{V}_{OBS}$ , é a vazão média de acordo com os dados fluviais da ANA.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{EST} - V_{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (V_{OBS} - \bar{V}_{OBS})^2} \quad (14)$$

O índice de concordância de Willmott (IC) mede o grau em que a vazão estimada pelo modelo SWAT se aproxima da vazão observada na estação fluvial. Este índice varia de zero a um, sendo zero, nenhuma concordância e um, concordância perfeita e é dado por:

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_{EST} - V_{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (|V_{EST} - \bar{V}_{OBS}| + |V_{OBS} - \bar{V}_{OBS}|)^2} \quad (15)$$

O coeficiente de U (Theil) (equação 7), consiste em uma medida qualitativa de precisão, ao compara os dados estimados com os dados observados (Spencer, 1993). Assim quando:  $U > 1$ , o erro da estimativa é maior que o observado, superestimando o real.  $U < 1$ , o erro da estimativa é menor que o observado, subestimando o real.  $U \cong 0$ , melhor será o resultado dos dados estimados em relação ao medido.

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{SWAT} - V_{obs})^2}{(\sum_{i=1}^n (V_{obs})^2)}} \quad (16)$$

Para a validação da evapotranspiração potencial foi utilizado a equação sugerida por Linacre (1977), equação 17. Utilizada por Silva (2014).

$$ETP_{Linacre} = \frac{500 \frac{T_{med} + (0,006H)}{100 - (L)} + 15 (T_{med} - T_o)}{(80 - T_{med})} \quad (17)$$

Sendo Tmed: Temperatura média (°C), H: Altitude (m), para a localidade, L: Latitude (°S), para a localidade, To: Temperatura de Orvalho (°C).

No intuito de buscar melhores estimativas para a validação da ETp simulado pelo SWAT, utilizou-se a equação de Turc (1961), melhorada e calibrada por Silva Junior, (2017) para o Município de Marabá (equação 18).

$$Etp_{Marabá} = (0,3922) \cdot (T_{med})^{0,732} \cdot (R_s)^{0,698} \cdot (UR)^{-0,494} \cdot (V)^{0,092} \quad (18)$$

Sendo Tmed: Temperatura média (°C), Rs: Radiação solar (MJ. m<sup>2</sup>), UR: Umidade relativa (%) e V: Vento médio (m.s)

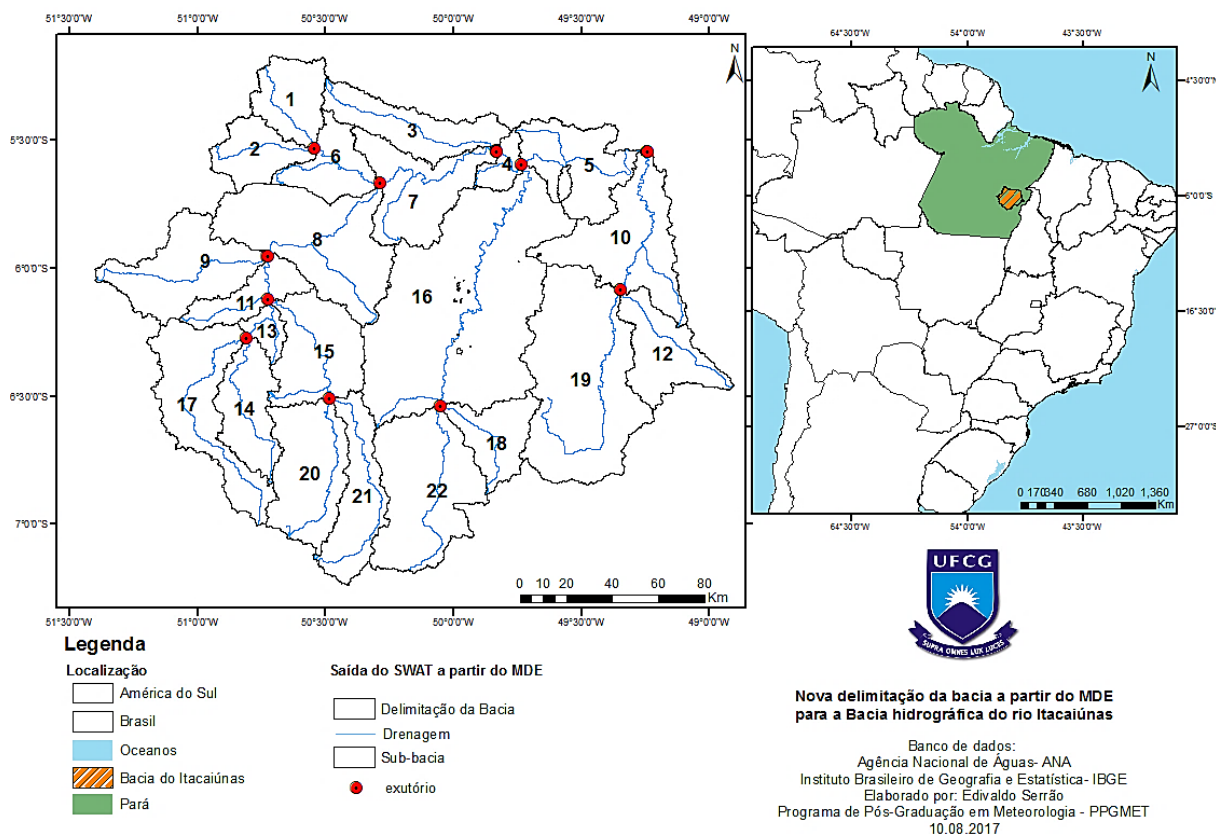
## 5. RESULTADOS

### 5.1. Delimitação da bacia e Análise do MDE

Bem como descrito anteriormente o modelo SWAT tendo como base o MDE da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas faz uma nova delimitação da área de drenagem da bacia, assim sendo, a delimitação utilizando o modelo de elevação tem suas ressalvas, haja visto que uma bacia hidrográfica é uma área cercada com topografia elevada onde a drenagem tende a escoar para o ponto mais baixo. Estudos como Mark (1984), Band (1986), Jenson e Domingue (1988), Tarboton et al. (1991), Fairfield e Leymarie (1991), Turcotte et al. (2001), Vogt et al. (2003), Jordan e Schott (2005), Merkel et al. (2008), Alves Sobrinho, (2010) e Yan et al (2013), nos dizem que o processo de delimitação de bacias hidrográfica com o uso do MDE e em modelos hidrológicos, são eficazes e auxiliam no entendimento dos processos hidrológico ocorrentes nas respectivas bacias.

Jenson e Domingue (1988) afirmam que parâmetros hidrológicos extraídos de MDEs mostram-se acurados e compatíveis com aqueles obtidos por métodos manuais, que dependem de maior tempo no seu processamento e têm detalhamento menor na sua configuração. Tarboton et al., (1991) e Walker e Wilgoose (1999) descrevem que o MDE apresenta boa correlação entre a declividade e a área de contribuição, exibindo os pontos de inflexão que marcam o início da captação fluvial, de modo que a rede de drenagem pode ser determinada com confiança elevada.

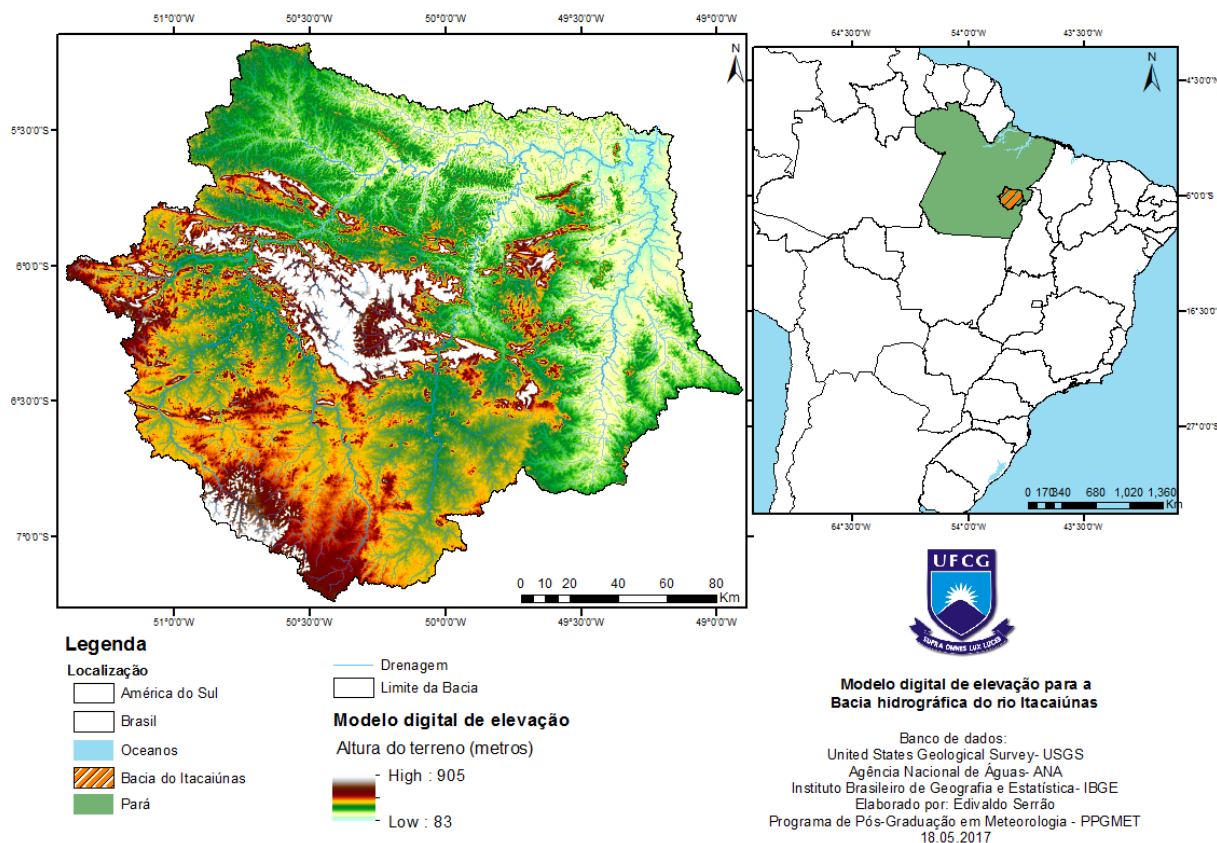
Dentro do modelo SWAT a partir da ferramenta Watershed delineation o SWAT definiu a delimitação para a bacia e gerou as sub-bacias, rede de drenagem e exutório descritos na Figura 10.



**Figura 11.** Delimitação da bacia e sub-bacia a partir do MDE pelo SWAT.

Nesta delimitação da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas o modelo gerou vinte e duas sub-bacias e onze exutório, onde é feito o cálculo das componentes hidrológicas para cada sub-bacia. A sub-bacia dez será utilizada como a última sub-bacia antes do exutório real da bacia do Itacaiúnas. Durante a delimitação da bacia foi possível inserir um arquivo shapefile do contorno real da bacia do rio Itacaiúnas, utilizando-a como *mascara*, para que a nova delimitação da bacia ficasse mais próximo do real possível. Essa interação entre o SWAT e a plataforma de GIS, no caso o ArcGis, é de extrema importância para que o usuário possa manipular melhor os resultados do modelo de acordo com a sua necessidade. Com essa nova delimitação a bacia do Itacaiúnas ficou com uma área de drenagem de 38.000km<sup>2</sup>.

Já analisando o modelo digital de elevação para a bacia, é perceptível que a região ao sul da bacia e a porção do central da bacia, são as áreas de maior elevação com máximo de 905 metros. Seguido das áreas de planície na porção leste da bacia, rumo a jusante do Itacaiúnas com 83 metros de altitude observado na Figura 15.

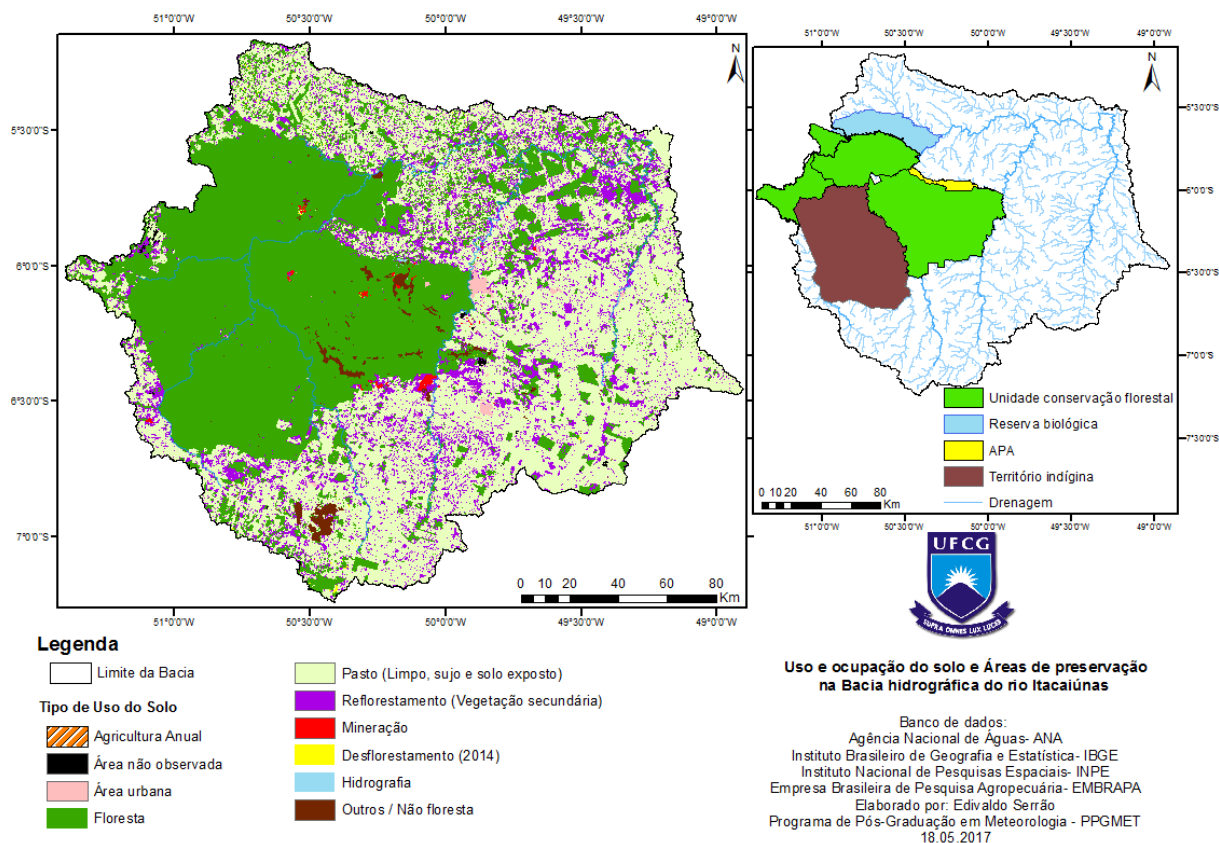


**Figura 12.** Modelo digital de elevação da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

## 5.2. Unidades de Resposta Hidrológica

Analisando a Figura 16 é observado que 43% da bacia é composta por área de floresta nativa amazônica, e ainda 41% da bacia é composta de pastagem seguido de reflorestamento, mineração e áreas urbanas. Logo é observado que a bacia é bastante heterogênea com diversos tipos de uso e ocupação do solo, ainda para a Figura 16 temos o mapa das áreas de preservação dentro da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, onde todas as áreas de preservação estão inseridas dentro da região de floresta sendo dominadas por território indígena e unidades de conservação florestal. É importante observar que mesmo dentro das áreas de preservação existe atividade de extração mineral e desflorestamento, o que aumenta a degradação ambiental e põem em risco a fauna, flora e todo o balanço hidrológico e de energia.





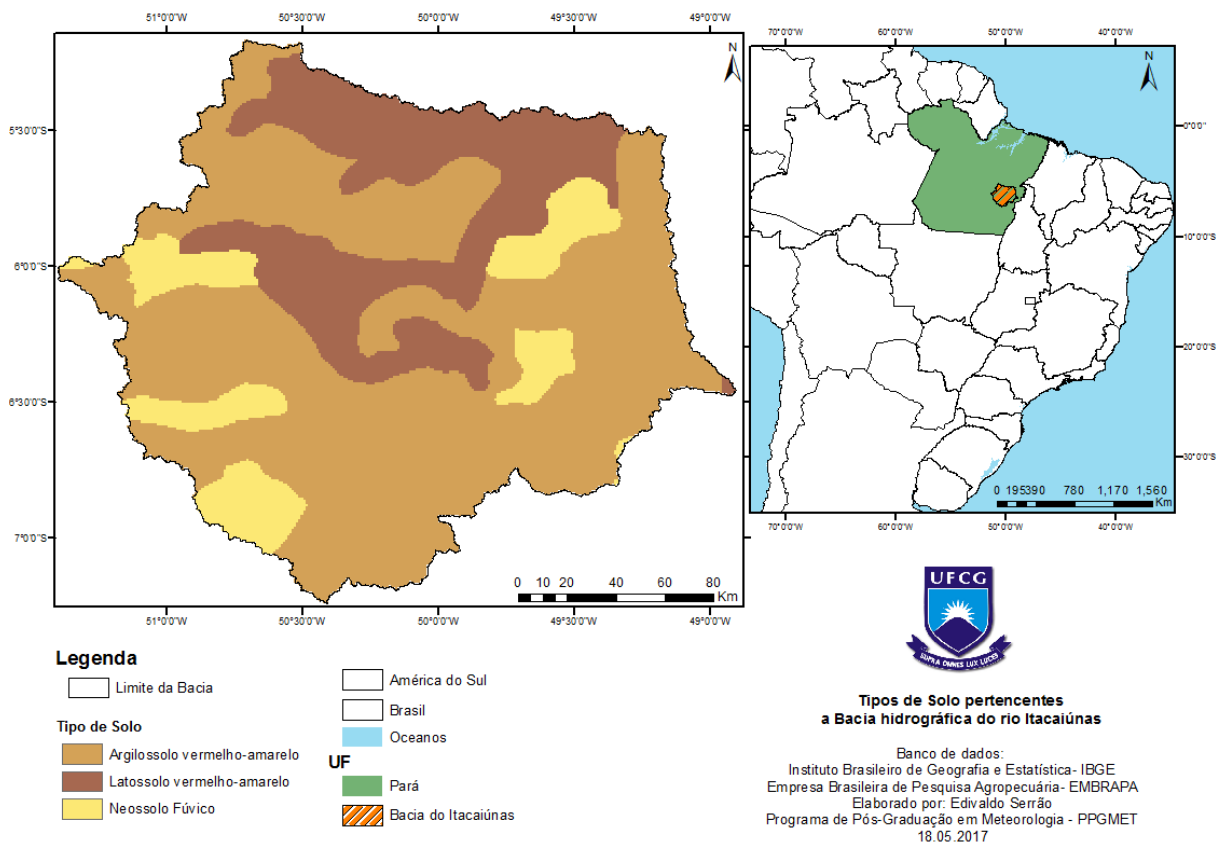
**Figura 13.** Tipos de uso e ocupação do solo dentro da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

Como é necessário a reclassificação do tipo de uso do solo existente na bacia com o tipo de uso existente no banco de dados do modelo SWAT, a nova classificação ficou de acordo com a tabela 7. Ficando com sete classes e agregando classificações, assim as áreas não observadas, outros/não floresta e mineração ficou como *Barren*, ou seja, área estéril. Assim como reflorestamento entrou como áreas de plantação de eucalipto, agricultura anual como agricultura genérica e região urbana como área residencial de média densidade.

**Tabela 6.** Tipos de uso e ocupação do solo reclassificado pelo SWAT.

Uso do solo	Área (%)
<i>Agricultural land-generic</i>	0,01
<i>Barren</i>	0,35
<i>Residential-medium density</i>	0,57
<i>Forest-mixed</i>	43,19
<i>Pasture</i>	44,04
<i>Eucalyptus</i>	11,72
<i>Water</i>	0,12

Para a análise dos tipos de solo existentes dentro da bacia de estudo, é observado na Figura 17, que mais de 50% da bacia tem é composto por solo argiloso, seguido do latossolo vermelho-amarelo e neossolo flúvico, já carregados no banco de dados do SWAT com as nomenclaturas de PVAD, CLVA e CNF respectivamente. Ressaltando que as manchas de neossolo e latossolo estão dentro da área de floresta e que também possui maior altitude.



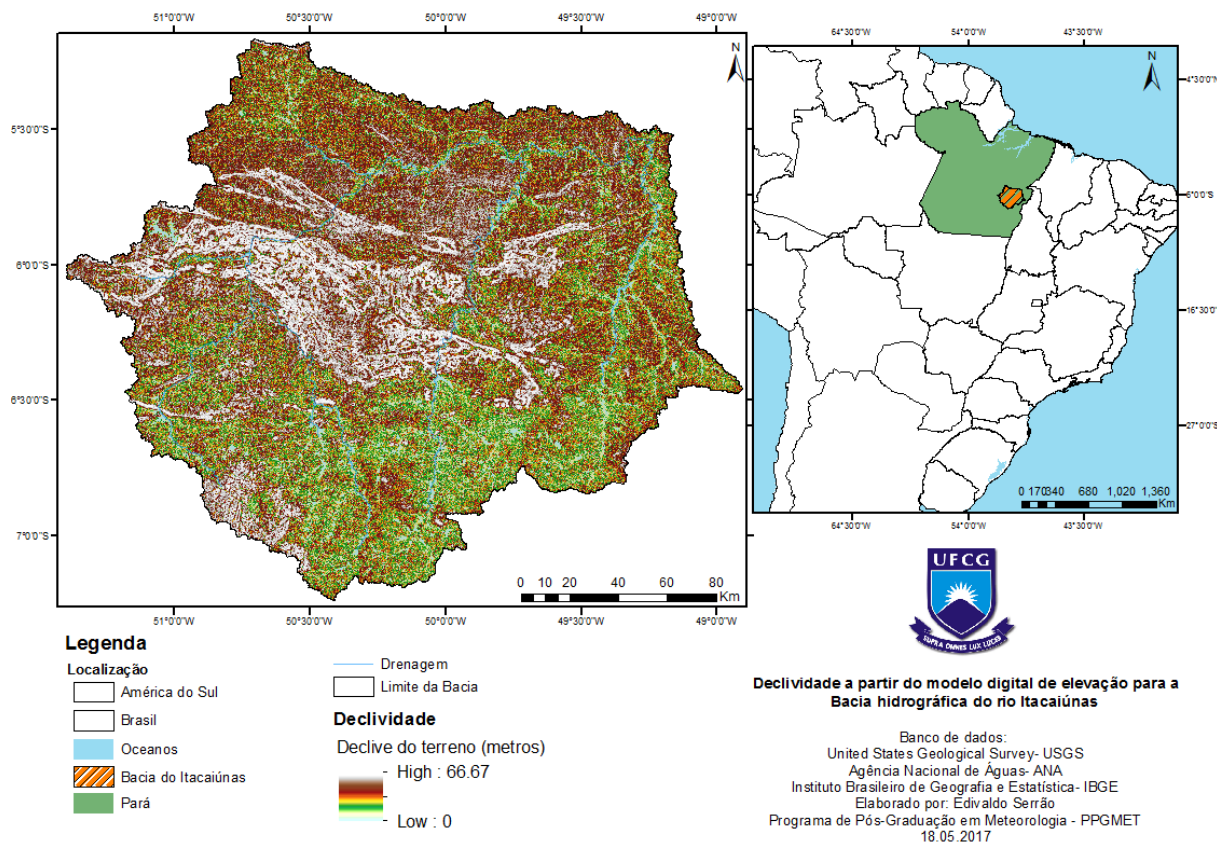
**Figura 14.** Tipos de solo presentes na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

Apresentado na tabela 8 estão os tipos de solo e sua porcentagem em área dentro da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, com o domínio do argilossolo na bacia, principalmente na porção leste da bacia.

**Tabela 7.** Tipos de solo inseridos no banco de dados do SWAT

Tipos de solo	Área (%)
<b>CLNA</b>	23,61
<b>CNF</b>	12,1
<b>PVAD</b>	64,3

A declividade do terreno na bacia (Figura 18) se deu de forma análoga ao visto na Figura 14 da altitude, onde as regiões de maior declive são as áreas de maior altitude, com máximo de declive em 66 metros apresentado na porção central da bacia, mais da metade da área da bacia tem um baixo declive e 16% da bacia tem uma área mais íngreme apresentando declive acima de 20 metros.



**Figura 15.** Declividade do terreno na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

**Tabela 8.** Declividade do terreno na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas gerada pelo SWAT.

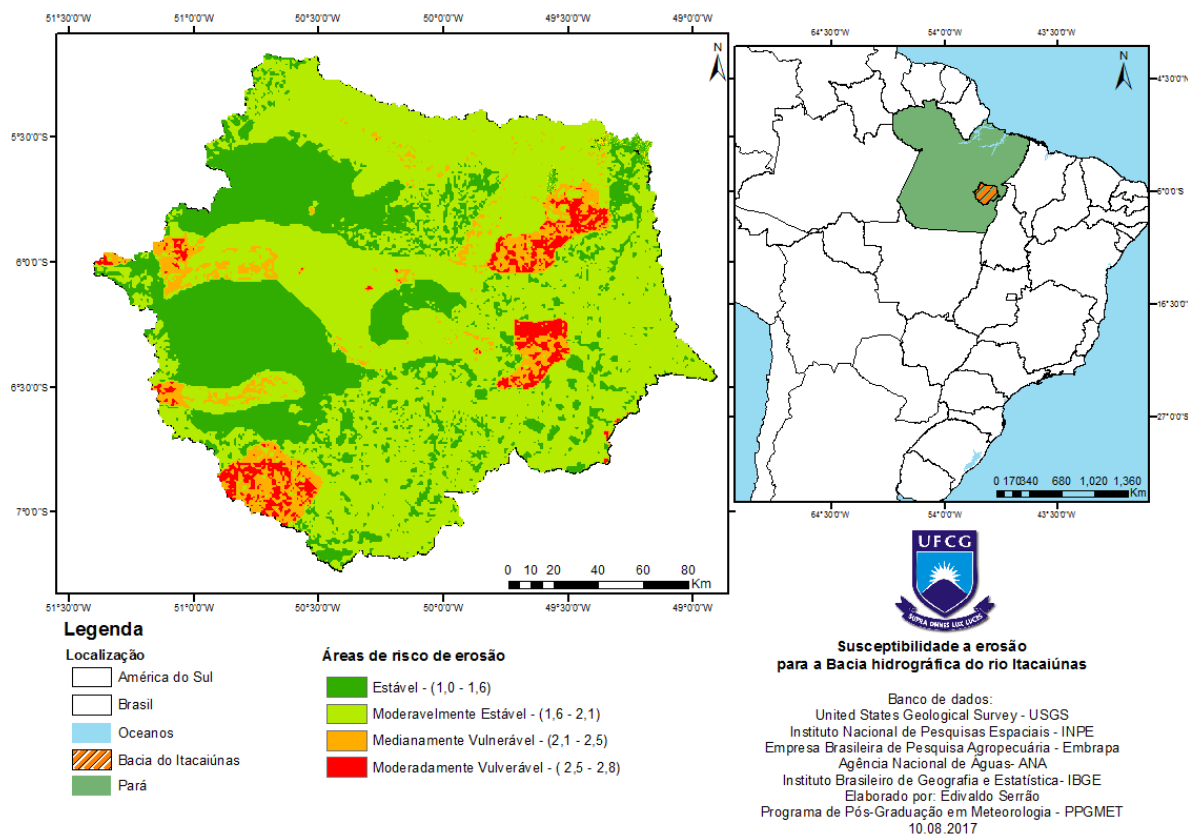
Declividade do terreno	
Declive (metros)	Área (%)
0 – 10	64,38
10 – 15	12,4
15 – 20	7,07
20 – 999	16,15

### 5.3. Análise de Risco de Erosão

O Estado do Pará tem cerca de 1.248,000 km<sup>2</sup> e apresenta os maiores índices de desmatamento e queimadas entre os estados Brasileiros (IBGE, 2010), o processo contínuo de alteração no uso e cobertura do solo na Amazônia, vem aumentando exponencialmente nos últimos anos, principalmente nas atividades agropecuárias. Almeida et al. (2016) explica que mais de 30% das reservas florestais no Pará foram substituídas por pastagem para o agronegócio.

O grau de degradação do solo é, em muitos casos, reflexo do estado da cobertura vegetal, uma vez que a vegetação que cobre o solo, afeta toda sua dinâmica de distribuição de água em seu perfil e a sua atividade biológica (Ribeiro e Campos, 2007). Estes processos de alteração colocam em risco de erosão o solo, aumentando a necessidade do monitoramento contínuo dessas áreas. Por erosão se entende a perda acelerada de espessura do solo, com diminuição dos componentes minerais e orgânicos. A erosão é provocada por uma série de fatores que pode interferir individual ou coletivamente, entre os quais se destacam a chuva e o vento, além das ações antrópicas (Sá et al., 2011). Hudson (1995) relata que a cobertura vegetal funciona como uma capa protetora para o solo e a sua presença é o fator chave na redução da erosão hídrica.

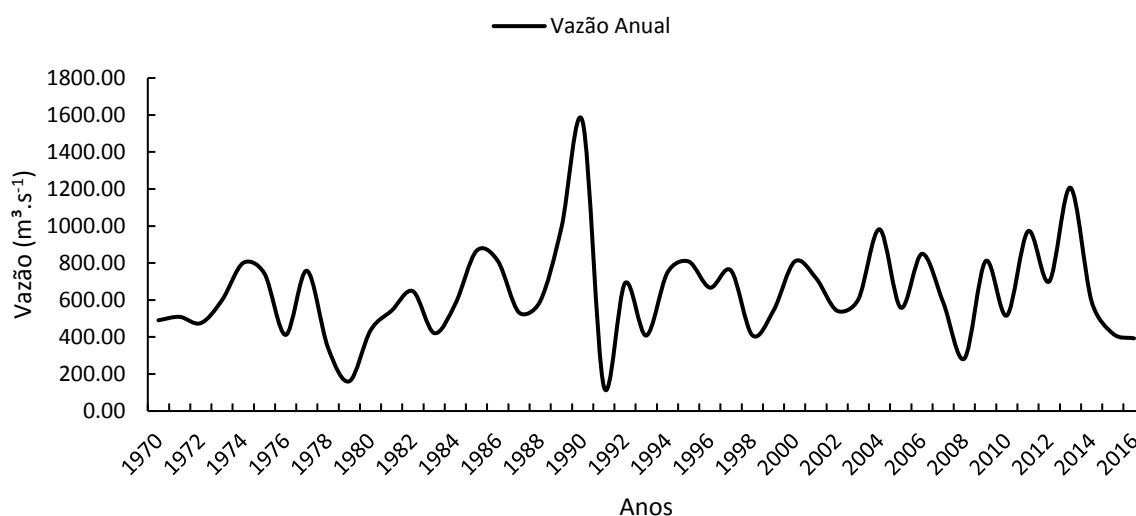
De acordo com a Figura 19, é perceptível que as áreas de maior risco a erosão estão na classe de moderadamente vulnerável e se encontram principalmente no sul e na porção leste da bacia, onde se encontram as áreas de maior declive, tipo de solo neossolo e são regiões utilizadas para o pasto, reflorestamento e atividade mineradora. Ficando de acordo com a classificação de Crepani et al. (2001), na porção central da bacia onde se encontra os maiores declives, também está inserida a floresta nacional dos Carajás e solos de risco baixo a moderado. Ou seja, para a classificação adotada é uma área de risco estável a moderado para o processo de erosão.



**Figura 16.** Susceptibilidade a erosão para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

#### 5.4. Análise Hidrológica do rio Itacaiúnas

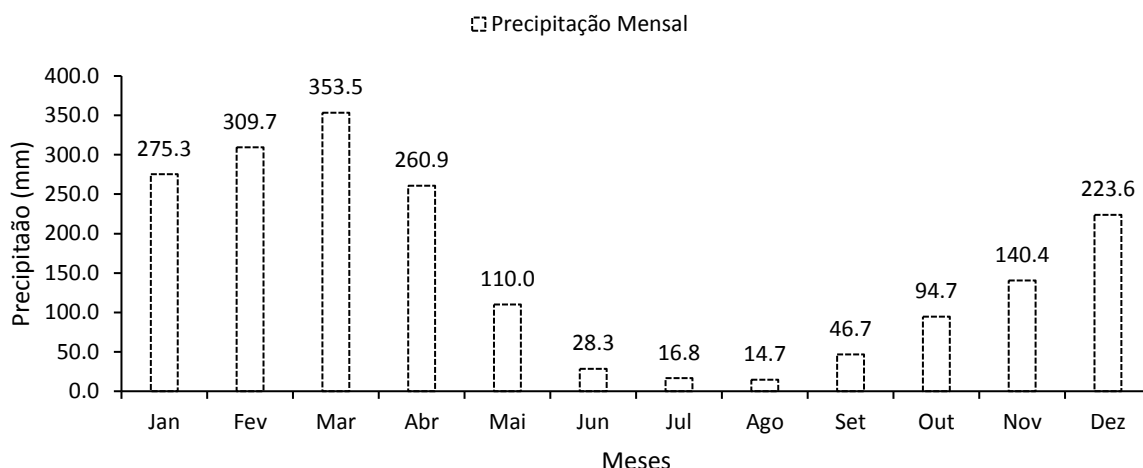
Utilizando os dados da estação fluviométrica da Fazenda Alegria pertencente a rede de estações da ANA na zona rural do município de Marabá, é observado no Figura 17 a vazão média anual do rio Itacaiúnas com vazão média de  $638 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , tendo seu pico máximo e mínimo com vazão de  $1.564 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  e  $133 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  respectivamente no biênio 90-91 estando associado a ocorrência de um ano de El Niño e outro de La Niña, que modula a precipitação na região e tem seu reflexo na descarga hídrica. Outros extremos de vazão também são observados na série e condizem com anos de fenômenos atmosféricos que marcaram déficits e excedentes de precipitação como os anos de 2005, 2008, 2010 e 2016, onde foram registradas as maiores estiagens da região amazônica por intermédio de mecanismos acoplados oceano-atmosfera que atuaram simultaneamente nos oceanos Atlântico e Pacífico (Serrão et al., 2015; Serrão et al., 2016).



**Figura 17.** Vazão média anual para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

Analisando a Figura 18 em que é observado a precipitação média mensal da estação do INMET em Marabá, nota-se que os meses de maior precipitação pluviométrica correspondem a quadra de janeiro a abril, com máximo em março alcançando valores de 353,5 mm de chuva no mês. Dentre muitos sistemas atmosféricos que atuam na região amazônica a ZCIT é o principal sistema responsável por esses períodos de chuvas fortes. Outrossim devido à localização geográfica da bacia, sistemas como ZCAS e Sistemas Frontais auxiliam na organização de SCM que também dão suporte na recarga hídrica da bacia com abundantes precipitações.

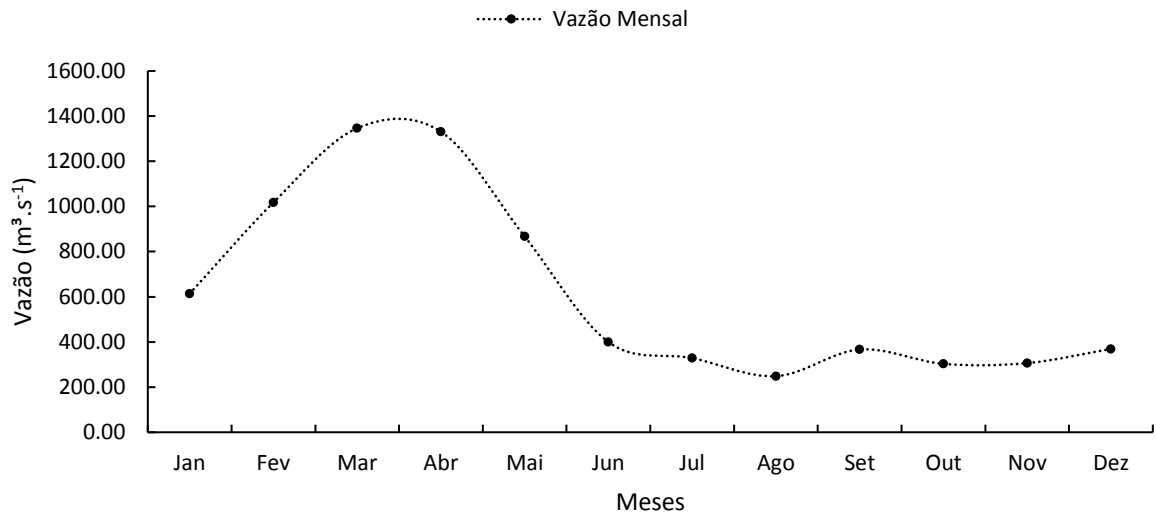
Durante o inverno austral a ZCIT migra para o hemisfério norte e com isso existe uma diminuição drástica na precipitação na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, com mínimo de chuva de 14,7 mm no mês de agosto. Neste período a precipitação é dada principalmente por sistemas de escala local, centralizados na região. Já na estação da primavera austral o cenário começa a favorecer maior ocorrência de sistemas de Mesoescala, que tende a aumentar a precipitação na bacia, isso ocorre principalmente nos meses de outubro e novembro dando início ao ano hidrológico na região.



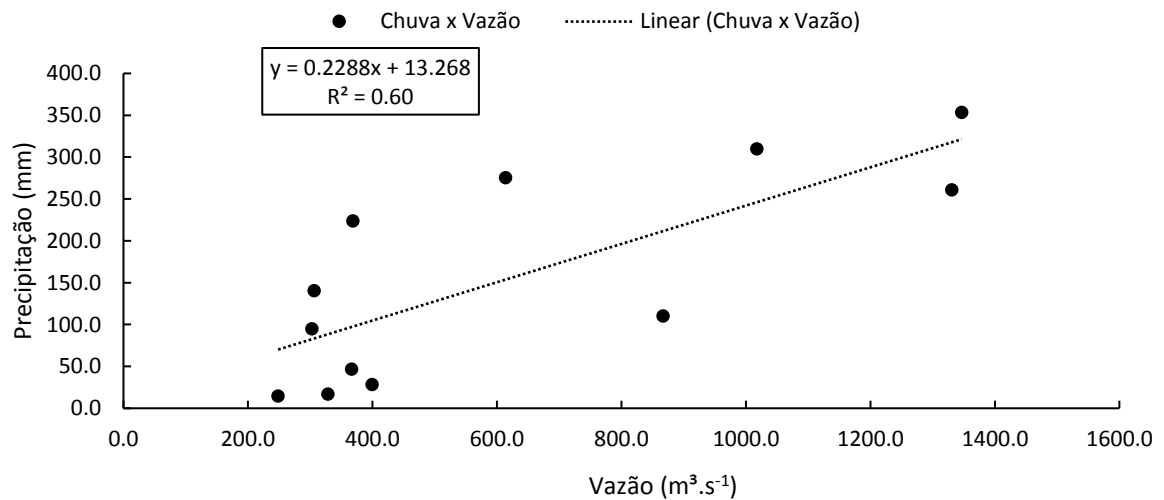
**Figura 18.** Precipitação média mensal para a estação de Marabá na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas (1973 a 2013).

Analisando a Figura 19 em que é observado a vazão média mensal da bacia, nota-se que os meses de maiores vazões fluviométricas correspondem ao trimestre de fevereiro a abril, concomitante com o período de chuvas, onde a vazão máxima está no mês de março com média de  $1.346 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , a partir do mês de maio existe uma diminuição da vazão fluviométrica com mínimo no mês de agosto, onde a vazão é de  $248,4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  voltando a aumentar a partir de outubro. É perceptível que os escoamentos lateral e de base para a calha do rio Itacaiúnas são o motivo do rio continuar perene o no todo, uma vez que, com a baixa taxa de precipitação no período do inverno não haja uma grande recarga hídrica com o escoamento superficial na bacia.

Observando a Figura 20 da relação chuva – vazão, é perceptível que as menores vazões estão associadas as baixas taxas de precipitação, para vazões entre  $200 \text{ a } 400 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  estão associadas com precipitações entre  $10 \text{ a } 150 \text{ mm}$ . E a relação chuva – vazão obteve um valor do coeficiente de determinação  $R^2$  de  $0,60$  sendo considerado um valor razoável, e ainda reafirma que nem toda a precipitação é diretamente convertida em vazão e que no período de estiagem o escoamento lateral e de base mantem o rio perene.



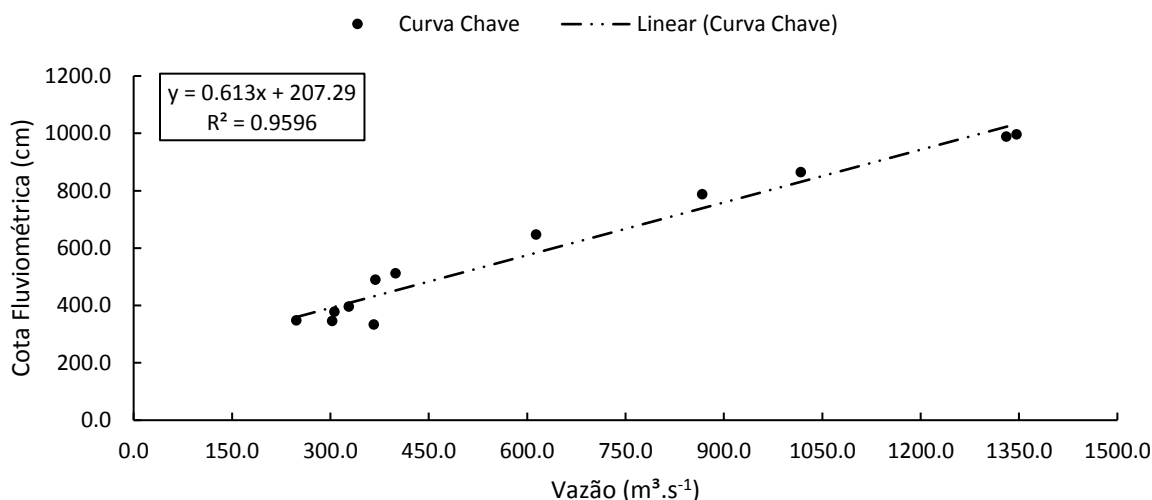
**Figura 19.** Vazão média mensal para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.



**Figura 20.** Relação chuva – vazão para o exutório da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

Como a estação fluviométrica da Fazenda Alegria está na região rural no município de Marabá e a cidade sofre com constantes enchentes no período chuvoso na região metropolitana, e a estação fluviométrica de marabá não está alocada no rio Itacaiúnas e sim as margens do rio Tocantins-Araguaia. Logo faz necessário uma alternativa de vazão a curto prazo para a tomada de decisões, visto isso na Figura 21 é observado a curva chave para a estação fluviométrica Fazenda Alegria, onde o coeficiente de determinação é de 0,95 o que é considerado um ótimo valor. Assim seguindo as equações de estimativa de vazão através da curva chave proposta por Chevalier (2004) pode auxiliar os governantes locais na tomada de decisão afim de mitigar desastres futuros.



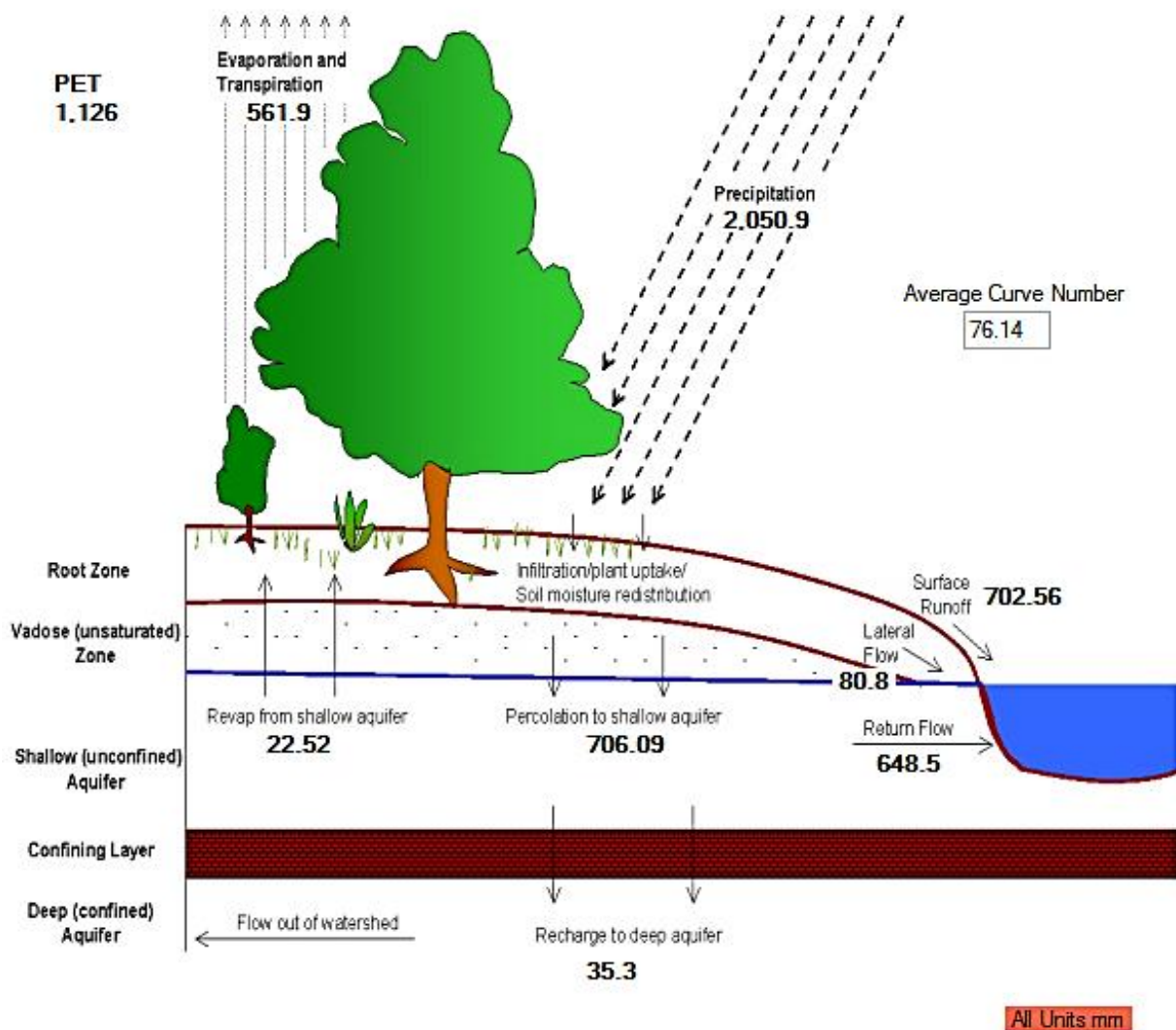


**Figura 21.** Curva chave para o exutório da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas.

## 5.5. Análise da Simulação Hidrológica do SWAT

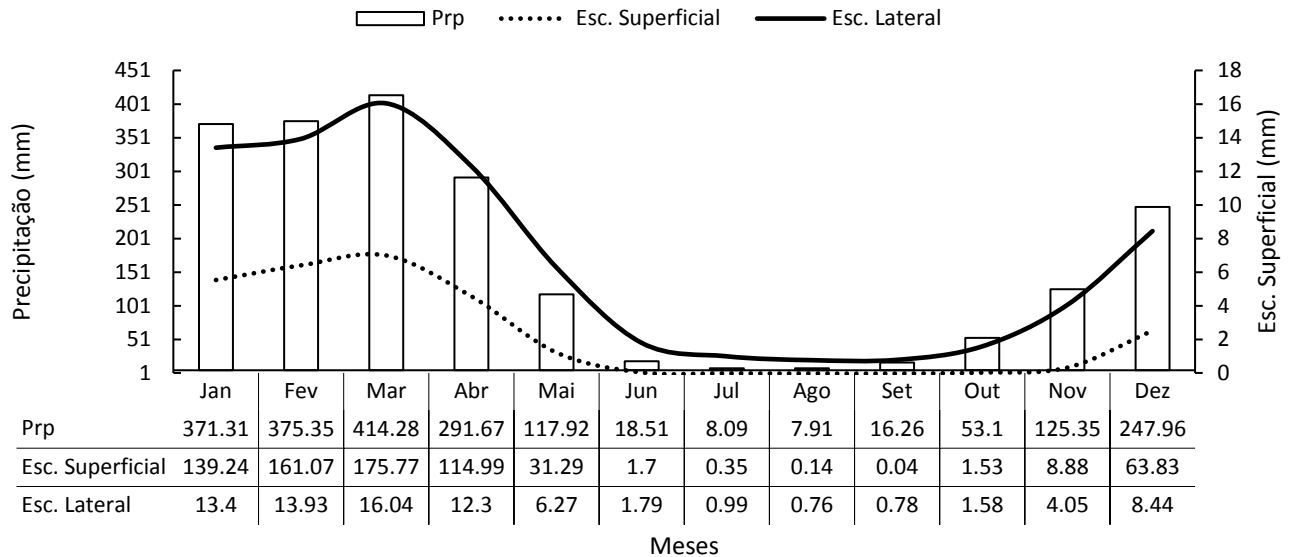
A simulação hidrológica da bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas foi realizada inicialmente para 41 anos hidrológicos (1969 – 2010), usando dados diários de precipitação. Onde foi utilizado dez anos para o aquecimento do modelo *warm up* nos anos de (1969 – 1979), esse período de três anos que é retirado da série para o aquecimento do modelo é de suma importância, uma vez que o modelo não conhece as condições iniciais das variáveis da bacia. Melo Neto et al (2014) relata que no início da simulação ocorrem grandes incertezas, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente a umidade do solo, justificando a utilização de um período de aquecimento do modelo.

Os resultados da simulação foram visualizados a partir do complemento SWAT-Check que permite ao usuário uma melhor interação dos resultados do modelo e visualização do balanço hídrico anual gerado (Figura 22). Onde é observado o ciclo hidrológico gerado na bacia por meio da modelagem com o SWAT, e apresentam resultados de: Precipitação com 2.051 mm, evapotranspiração real compõe cerca de 561,9 mm, evapotranspiração potencial em 1.126mm, o escoamento superficial 702,7 mm, o fluxo lateral 80,8 mm, a percolação 706,1 mm, o fluxo de base 648,5 mm, a recarga para o aquífero profundo 35,3mm e ascensão capilar do aquífero raso 22,5 mm e o CN médio para a bacia ficou em torno de 76.14.



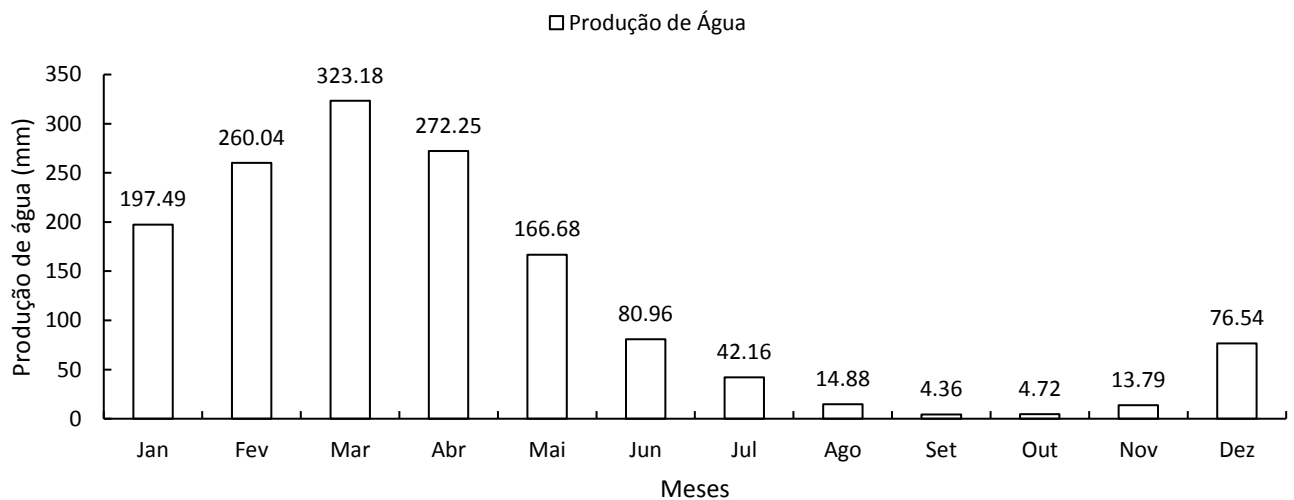
**Figura 22.** Balanço hídrico simulado pelo SWAT para 41 anos.

Na Figura 23 é observado a precipitação, o escoamento superficial e lateral mensal gerados pelo SWAT, é visível que o modelo descreveu bem a sazonalidade da bacia, destacando os períodos chuvoso e de seca. Com precipitação máxima no mês de março com 414 mm de chuva e mínimo em agosto com precipitação em 7,9 mm, para o escoamento superficial os maiores valores estão na quadra chuvosa chegando ao máximo no mês de março e o mínimo na estação da primavera em setembro. Analisando o escoamento lateral, é visto que o modelo conseguiu representar de forma eficiente que o rio Itacaiúnas não seca no período de menor precipitação devido o escoamento lateral e o fluxo de base, onde ambos são superiores ao escoamento superficial quando há menor precipitação. Confirmando o capítulo anterior.



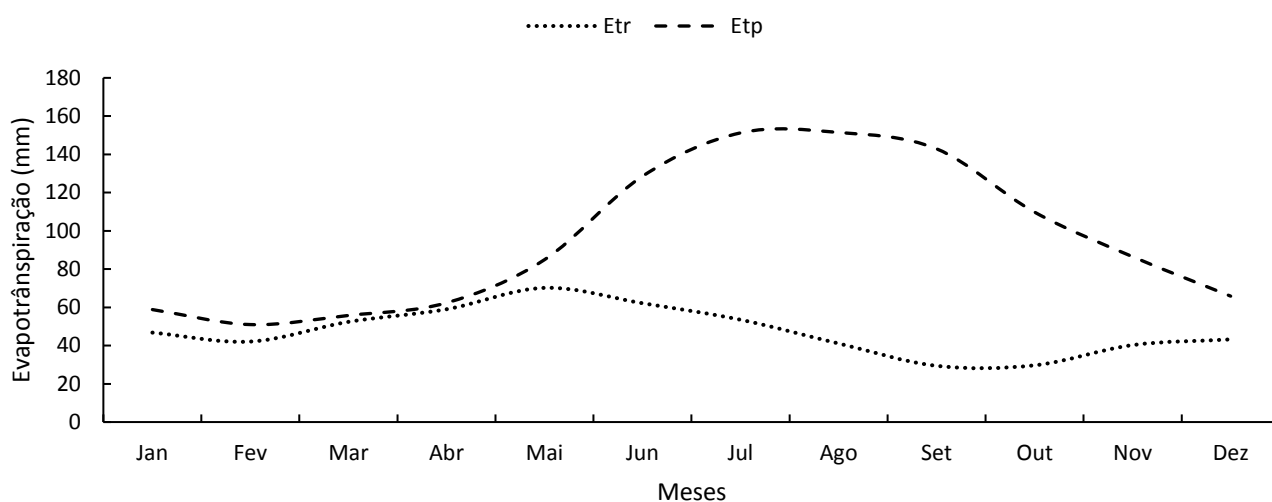
**Figura 23.** Variáveis hidrológicas de saída do SWAT para a bacia do rio Itacaiúnas.

A produção de água ou taxa de entrega de água aos canais da rede de drenagem da bacia, está relacionada ao escoamento superficial e o escoamento de base e pode ser observado na Figura 24, onde o modelo representou a sazonalidade da bacia e mostrou que os valores máximos e mínimos da produção de água estão associados também com a variação da precipitação durante o ano. O SWAT determina ainda o quando cada variável contribui para o ciclo total, onde 70% da vazão é devido a precipitação pluviométrica na bacia, para a produção de água 51% é proveniente do fluxo base e 49% está relacionado com o escoamento superficial. A relação entre a precipitação e evapotranspiração é de 27%, assim como a relação precipitação e percolação está em 34%.



**Figura 24.** Produção de água gerada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas

Referente ao fluxo de água evapotranspirada para a bacia do Itacaiúnas, temos na Figura 25 a variação da evapotranspiração real e evapotranspiração potencial. Ou seja, o que pode evaporar e o que realmente evapora. Se observarmos a variação com os meses e concomitante ao regime de precipitação da bacia, é visível que a evapotranspiração segue a tendência dos períodos de maior e menor disponibilidade de energia. No período chuvoso onde há uma maior nebulosidade e menor entrada de radiação no sistema as duas variáveis são próximas. Porém no período seco, a evapotranspiração potencial é muito maior que a real, uma vez que a mesma depende do saldo de radiação. Sendo o mês de maior o mês que apresenta maior evapotranspiração real e julho a maior potencial.



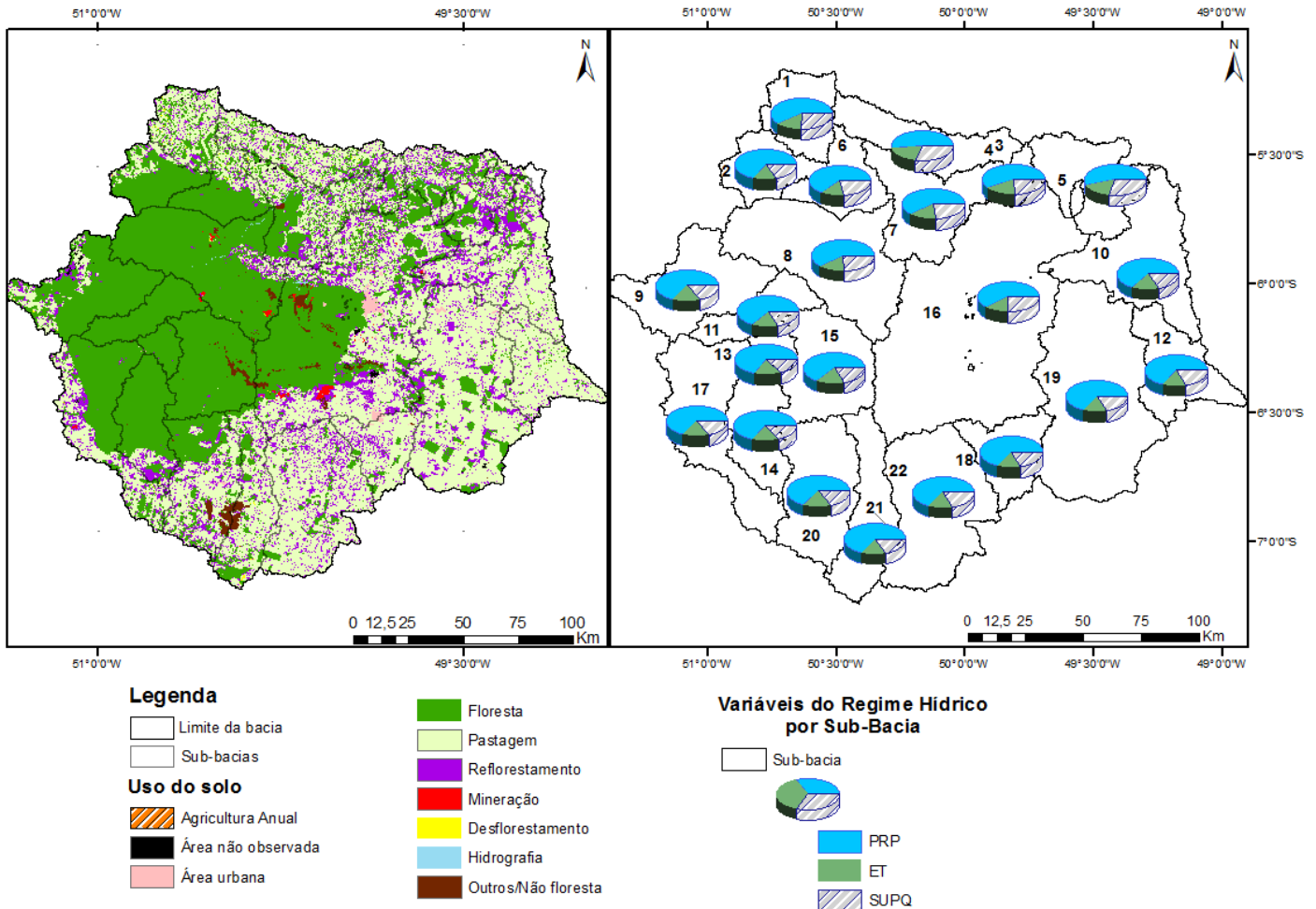
**Figura 25.** Evapotranspiração simulada pelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas

## 5.6. Análise da Simulação por Uso do solo e Sub-Bacia

Levando em consideração que cada tipo de uso do solo exerce uma influência sobre as variáveis do balanço hídrico, a Figura 26 expõem os diversos tipos de uso do solo para a bacia do Itacaiúnas e as variações da precipitação (PRP), evapotranspiração real (ET) e escoamento superficial (SUPQ) por sub-bacia. É observado que as sub-bacias com áreas de floresta como uso predominante do solo, tem maior estabilidade das variáveis de PRP, ET e SUPQ. Com exceção da sub-bacia 8, que tem áreas de desmatamento, mineração, pastagem e reflorestamento o que acarreta em um maior escoamento superficial.

Analisando as sub-bacias a oeste da floresta, com uso de solo predominantemente de pastagem, é perceptível um contraste com os demais usos de solo, principalmente no

escoamento superficial. Nas sub-bacias 3, 4, 5, 7 e 16 é nitidamente visível o aumento do escoamento superficial na área de pastagem, uma vez que esse tipo de uso de solo facilita que a água precipitada escoe devido a retirada da floresta. Isso acarreta em uma superfície com menor rugosidade, geralmente um solo compactado e tem menor área foliar, evapotranspirando menos. Resultados semelhantes foram encontrados por COE et al., (2009) onde o escoamento superficial aumentou a pós a simulação da substituição de áreas florestadas por pastagem.

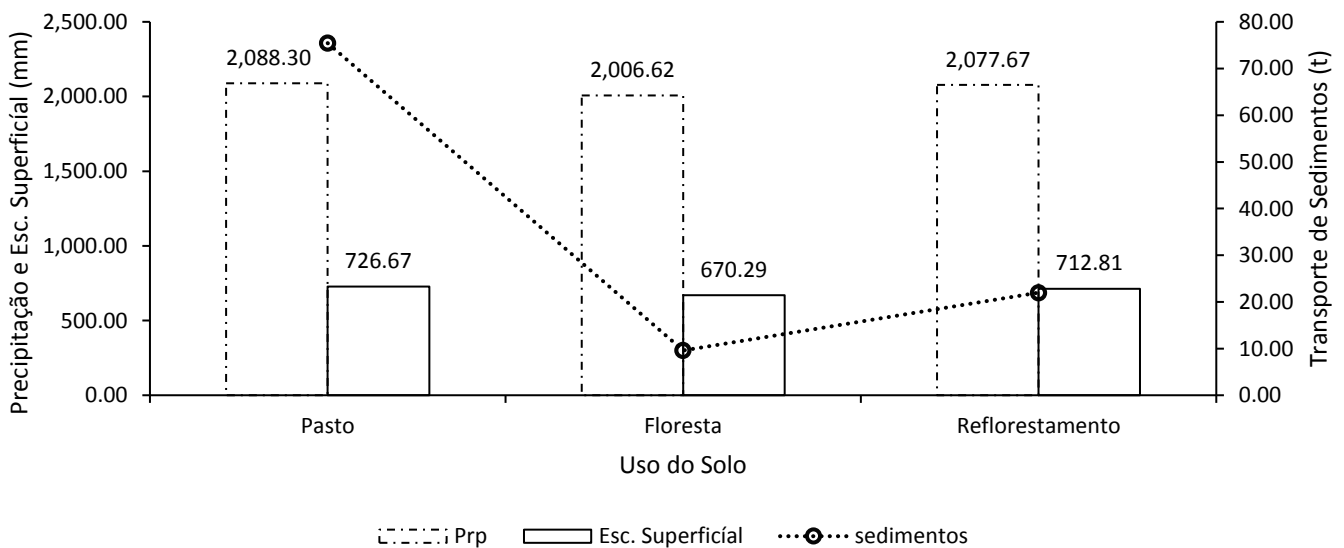


**Figura 26.** Uso e ocupação do solo e sua relação com as variáveis do balanço hídrico por sub-bacia.

Tendo em vista que os principais usos do solo para a bacia do Itacaiúnas são as áreas de floresta, pastagem e reflorestamento, a Figura 27 apresenta a variação entre a precipitação, escoamento superficial e o transporte de sedimentos para estes principais usos de solo na bacia, em um período de 41 anos. Analisando a precipitação para os três usos de solo, é constatado baixa variação entre os usos de solo, porém as áreas de pastagem e reflorestamento tem maior

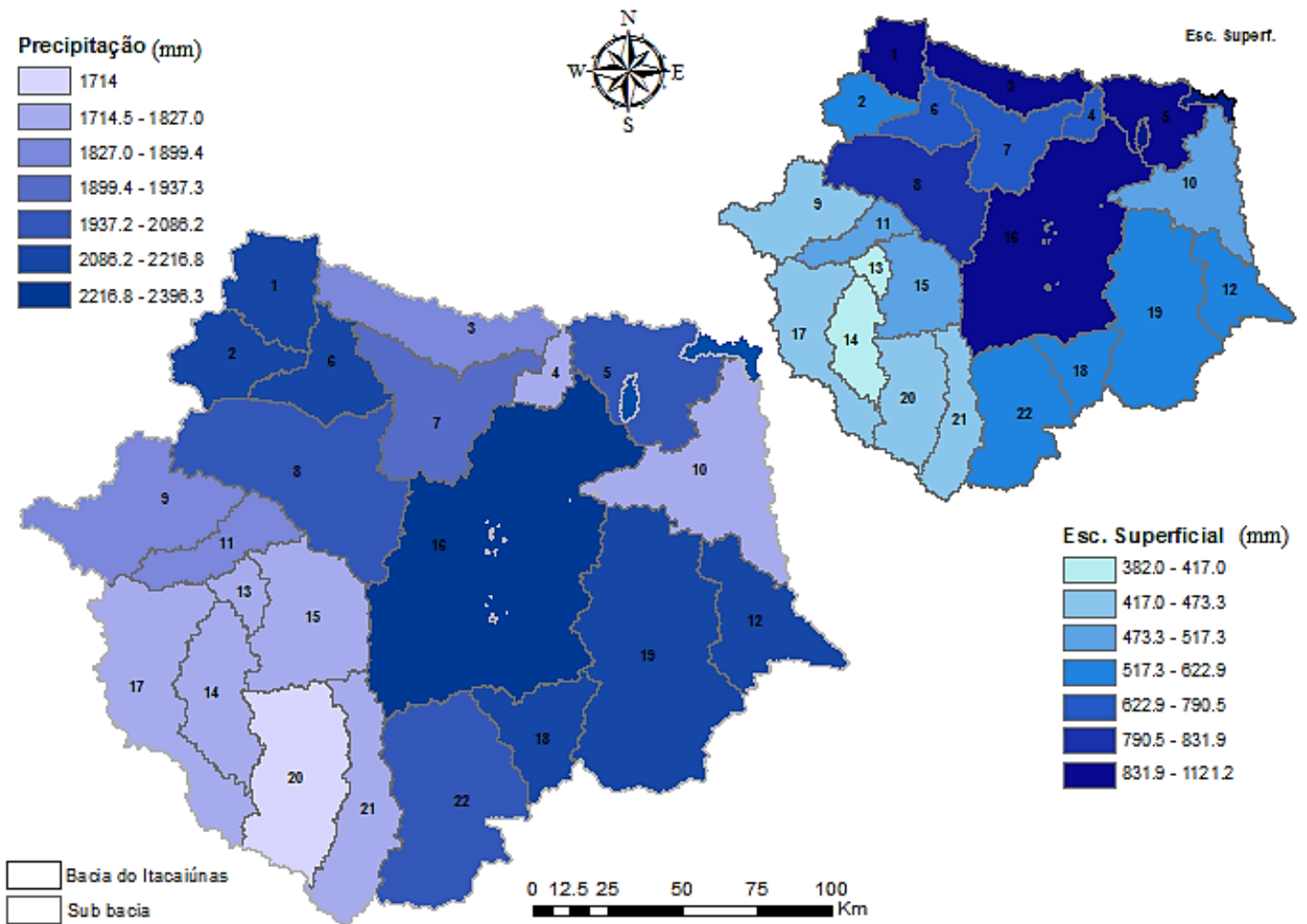
precipitação que a região de floresta. O mesmo se aplica ao escoamento superficial, como já visto é maior na pastagem assim como nas áreas de reflorestamento. Às áreas de reflorestamento tendem a ter vegetação de pequeno a médio porte e são esparsas entre si, o que auxilia no escoamento da água precipitada. A taxa de água escoada superficialmente no pasto é 56,38 mm a mais do que a taxa de água escoada na floresta, bem como para o reflorestamento com escoamento superficial de 712 mm para o período hidroclimatológico estudado.

No tocante do transporte de sedimentos para os três usos de solo a bacia, é apurado que a tendência dessa variável é seguir o escoamento superficial, uma vez que são diretamente correlacionados. A pastagem com menor rugosidade e solo compactados é mais susceptível a lixiviação do solo e transporte de sedimentos, para a simulação estudada o pasto teve o maior transporte de sedimentos, com mais de 75 toneladas de sedimentos carregados. Com relação as áreas de reflorestamento o total de sedimentos transportados chegou próximo de 22 toneladas, o que nos remete a importância da vegetação como fator de mitigação para áreas degradadas, principalmente na bacia de estudo que existe atividade de mineração. Com apenas 9,6 toneladas de sedimentos transportados a floresta se mostra eficiente na retenção de sedimentos, o que se faz importante para o não assoreamento dos rios da bacia.



**Figura 27.** Relação entre as variáveis do regime hídrico simuladas pelo SWAT para os principais usos de solo na bacia do rio Itacaiúnas no período de 41 anos.

Para uma melhor compreensão na Figura 28 observa-se a especialização da precipitação e por consequência o escoamento superficial por sub bacia do Itacaiúnas. É perceptível que a precipitação é maior na porção central e oeste da bacia com chuvas entre 1.990 mm e 2.216 mm e a porção sul da bacia é a de menor precipitação, por se tratar de uma área de maior altitude e mais ao sul do Estado do Pará, ou seja, não sofre influência da ZCIT na estação chuvosa, e sim da ZCAS e Sistemas Frontais quando atingem essa região. A sub bacia 20 foi a que apresentou menor precipitação, com 1.714mm.



**Figura 28.** Distribuição Espacial da Precipitação e Escoamento Superficial por sub-bacia.

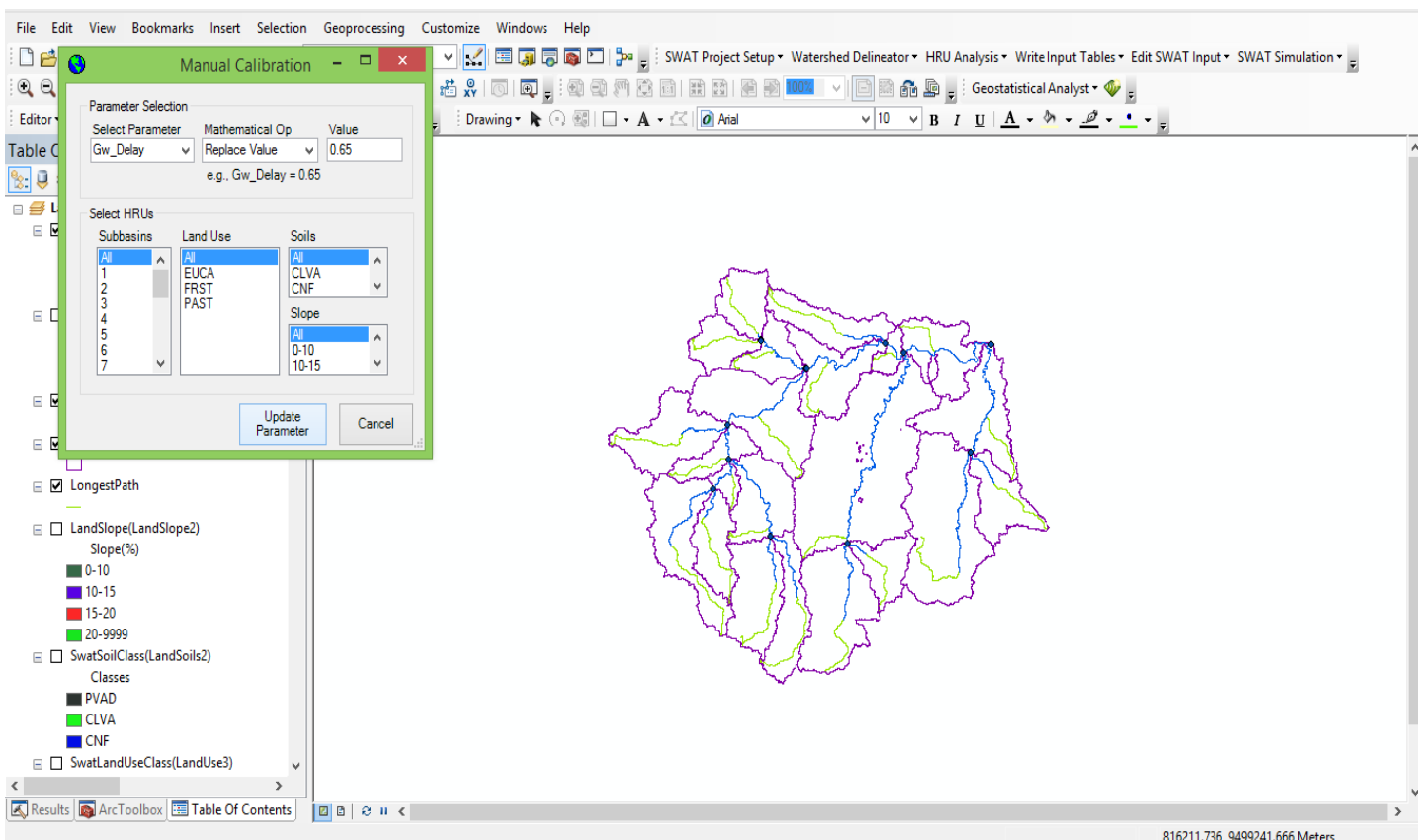
No tocante do escoamento superficial, a distribuição espacial é semelhante a precipitação, nas sub bacias de maior precipitação apresentaram maior escoamento, como a sub bacia 16 e a sub 14 foi a sub bacia que teve o menor escoamento superficial. Uma possibilidade deste fato, pode estar no uso e ocupação do solo nesta bacia, ao observarmos a figura anterior

(Figura 27), é visível que esta sub bacia detém vários tipos de uso do solo e está em uma área de elevação e dominado por Neossolo flúvico, o que acarreta em maior infiltração e menor escoamento. Os maiores escoamentos estão nas sub bacias 1, 3, 5 e 16 com mais de 831 mm e os menores escoamentos estão na faixa de 382 mm a 417mm nas sub bacias 13 e 14 respectivamente.

## 5.7. Calibração e Validação da simulação

### 5.7.1. Calibração

Na calibração do modelo SWAT tentou-se utilizar do software SWAT-CUP, porém a pós várias tentativas de rodagem com um total de 125 horas de máquina trabalhando, obtivemos um resultado parcial com a vazão estimada em torno de 50% da vazão observada na estação fluviométrica da ANA. Logo procurou-se utilizar da literatura especializada para a calibração manual do modelo observado na figura 29.



**Figura 29.** Calibração manual do modelo SWAT.

Seguindo como base o trabalho de Blainski et al (2017), a modelagem com SWAT para a bacia do Itacaiúnas foi calibrada de acordo com os parâmetros na tabela 9. Apesar da bacia



estudada por Blainski et al (2017) ser em latitudes médias, a topografia e o regime de precipitação é similar a bacia do Itacaiúnas. Além dos parâmetros calibrados por Blainski, foi calibrado mais dois parâmetros, sendo eles o CN2 e SURLANG também inseridas na tabela 9. O parâmetro do SURLANG foi calibrado um valor para cada tipo de solo, a exemplo do Neossolo Flúvico que se trata de um solo mais poroso e com menos tempo de compactação, foi ajustado um valor maior que o Argiloso vermelho-amarelo, este que já é um solo mais compactado e de maior tempo de formação, ou seja, tende a infiltrar menos e escoar mais.

Ranking	Parâmetro	Descrição	Faixa de variação
1	Lat_Time	Tempo necessário para o retorno do fluxo lateral (dias)	0 a 180
2	Esco	Fator de compensação da taxa de evaporação de água no solo	0 a 1
3	Gwqmin	Nível limite da água no aquífero raso para a ocorrência de fluxo de base (mm)	0 a 5.000
4	Revapmn	Profundidade limite de água no solo para a ocorrência de ascensão da água à zona não saturada (mm)	0 a 1.000
5	Alpha_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)	0 a 1
6	Gw_delay	Intervalo de tempo necessário para a recarga do aquífero (dias)	0 a 500
7	CN2	Curva número inicial para condição de umidade AMC II (adm.)	35 a 90
8	SURLANG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto (dias)	0,05 a 24

**Tabela 9.** Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com os valores ajustados e as respectivas faixas de variação.

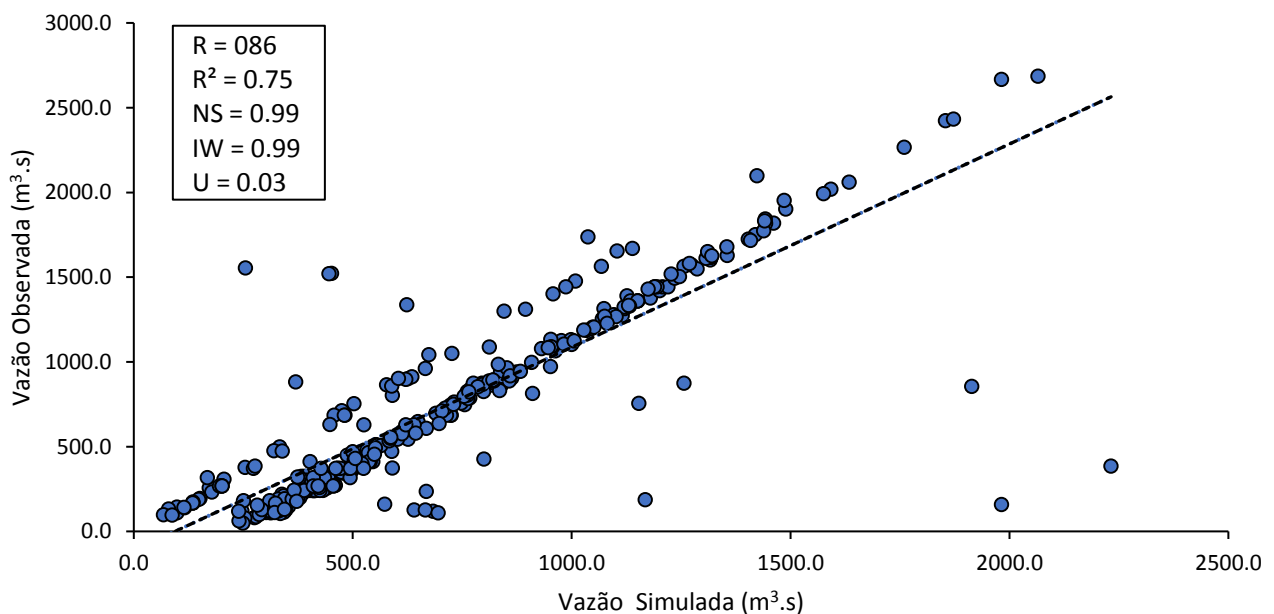
A pós a calibração do SWAT o modelo foi novamente rodado com os novos parâmetros e foi obtido novos resultados das variáveis hídricas. Os parâmetros mostrados na Tabela 9

representam variáveis de difícil medição, ademais, existem poucas informações disponíveis acerca dessas variáveis para bacias hidrográficas brasileiras, principalmente para as bacias amazônicas.

### 5.7.2. Validação da vazão

Na validação das variáveis simuladas pelo SWAT foi utilizado os dados de vazão no período de (2010 a 2016) e na evapotranspiração foi utilizado os dados climatológicos da estação de Marabá e aplicado os índices estatísticos descritos no capítulo 4.9 e assim foi obtido a validação da vazão e evapotranspiração para a bacia do Itacaiúnas. Na figura 30 é observado a relação vazão observada e vazão simulada, é visível que durante alguns anos na simulação com SWAT ocorreram uns *outliers* ou pontos fora da curva, mostrando que em alguns anos o modelo não conseguiu uma boa simulação da vazão.

Silva (2016) destaca as incertezas da simulação hidrológica em bacias amazônicas visto que há poucas estações na região e normalmente medindo poucas variáveis, como cota e vazão gerando muitas dúvidas sobre os demais processos hidrológicos existentes em uma bacia. Existe ainda o efeito da grande dinâmica do uso e cobertura do solo sobre a vazão, diversos estudos sobre o tema foram abordados por (BOSCH; HEWLETT, 1982; BOTTA; CARDILLE; COSTA, 2003; COE; COSTA; HOWARD, 2008; COE et al., 2011) e todos concluem que quanto maior a dinâmica de uso do solo, menos a precipitação é convertida em vazão.



**Figura 30.** Relação vazão observada e simulada e validação.

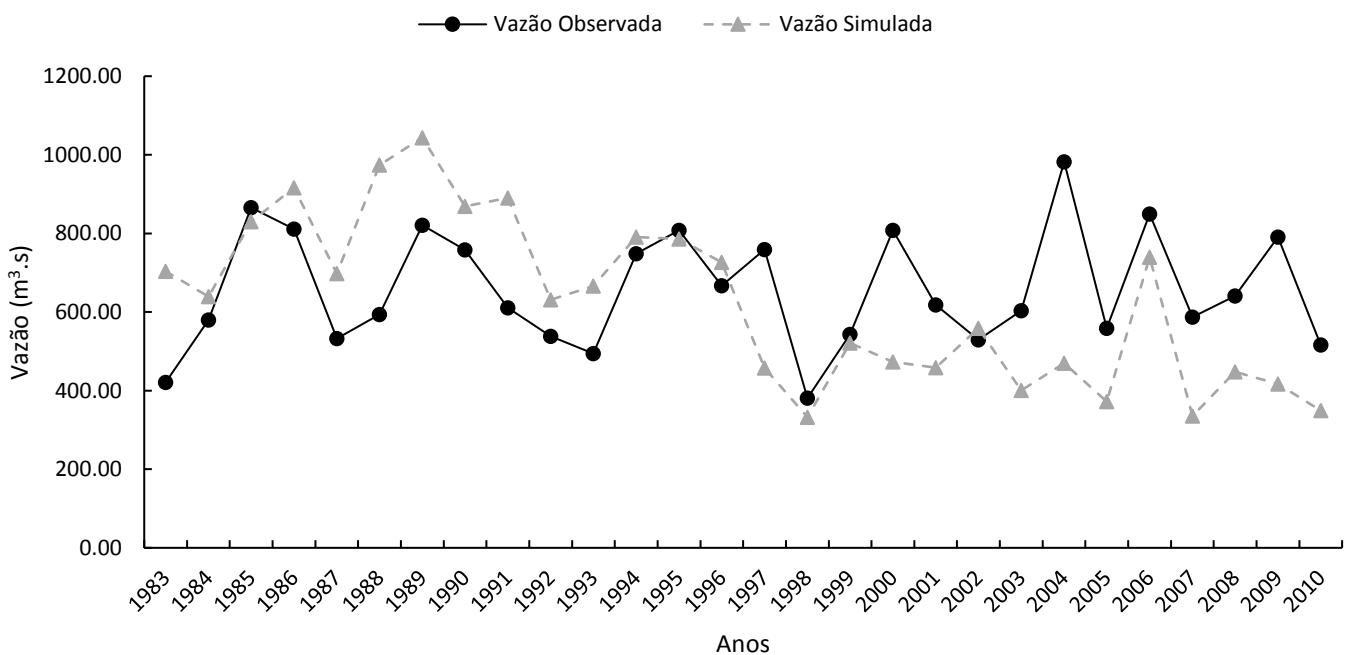
Mesmo que o modelo não reproduzisse bem alguns períodos da vazão, os índices estatísticos obtiveram desempenho satisfatório para o período de validação, sendo o coeficiente de correlação Pearson de 0,86 e o de determinação com valor de 0,74 sendo bons valores visto a incerteza da modelagem. Para o coeficiente de Nash-Sutcliffe e índice de concordância de Willmott obtiveram um valor de 0,99 ambos, considerados excelentes pela literatura, já o coeficiente U de theil teve valor de 0,03 sendo um excelente valor.

Beskow (2009), trabalhando em uma bacia hidrográfica experimental no sul de Minas Gerais, com o modelo LASH, obteve um Nash-Sutcliffe da ordem de 0,82 durante o processo de calibração.

Chiang et al. (2010) utilizaram o SWAT para simulações hidrossedimentológicas na bacia do rio Lincoln, noroeste da bacia do rio Illinois, nos Estados Unidos e obtiveram um Nash-Sutcliffe de 0,6 na calibração da vazão concluindo que o modelo está adequado para simulações.

Notter et al. (2007), desenvolvendo e aplicando um modelo semidistribuído, baseado no método CN-SCS, para a região do Monte Kenya na África, obtiveram Nash-Sutcliffe de 0,51 na etapa de validação do modelo. Baldissera (2005) encontrou um Nash-Sutcliffe de 0,78 na validação do modelo SWAT, para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá, estado do Mato Grosso.

Na Figura 31 é observado a vazão anual (observada e simulada) no período de simulação, é visível que em 1996 a vazão simulada começou a subestimar a vazão observada.



**Figura 31.** Vazão média anual observada e simulada.

Novamente a questão da alta dinâmica de uso do solo durante os anos pode influenciar na vazão a jusante, visto ainda que os tipos de uso do solo inseridos no modelo, são os usos que já existem no banco de dados do SWAT e apresentam semelhança com o uso atual da bacia. Gerando ainda mais incertezas na simulação. A alteração na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica pode alterar o balanço hídrico na região. O desmatamento altera a porosidade do solo pelo selamento dos poros durante eventos de precipitação, mudando suas propriedades hidráulicas.

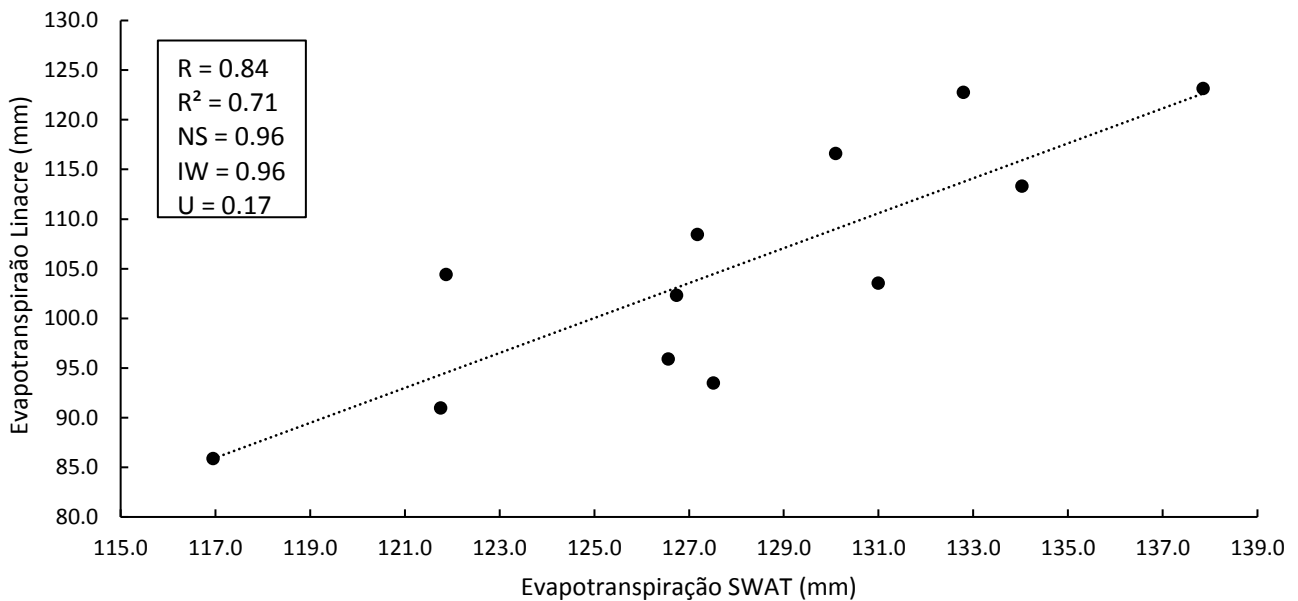
Quando o solo se torna menos poroso, a infiltração é reduzida, aumentando o escoamento superficial, causando incremento nas vazões máximas e diminuindo as vazões mínimas no ciclo sazonal. Também pode interferir na evapotranspiração, através do aumento do albedo, diminuição da rugosidade aerodinâmica e também a profundidade das raízes, em relação à floresta tropical, causando aumento na vazão de longa duração (COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003).

O desmatamento altera os estados hidrológicos, geomorfológicos e bioquímicos dos fluxos (Bonan et al., 2004). As mudanças antropogênicas na vegetação geralmente resultam em maior descarga porque as culturas anuais e as pastagens perenes reduziram a densidade e profundidade da raiz, o índice de área foliar da planta e o período da estação de crescimento, portanto, menor evapotranspiração em comparação com os sistemas de vegetação natural mais diversos que eles têm substituído (Eagleson, 1978; Canadell et al., 1996; Costa et al., 2003; Raymond et al., 2008).

O desmatamento também frequentemente resulta em aumento da erosão da superfície terrestre e deposição nos canais e nas planícies de inundação devido ao aumento da área do solo nu, alterações na infiltração e escoamento superficial e práticas de manejo precárias (Bruijnzeel, 1991). Costa et al. (2003) analisaram os dados de descarga e clima em uma sub-bacia de 175 000 km<sup>2</sup> da bacia hidrográfica de Tocantins no leste da Amazônia e concluíram que a maior parte do aumento observado de 25% na descarga naquela bacia hidrográfica era atribuível ao desmatamento.

### 5.7.3. Validação da Evapotranspiração

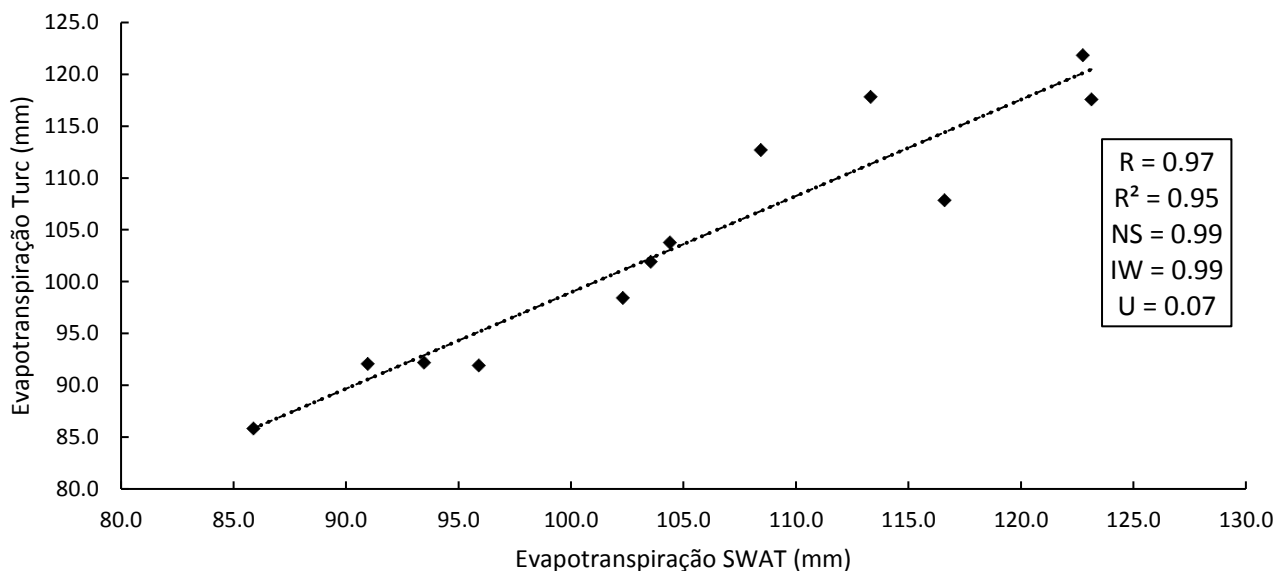
Outra variável de extrema importância que temos como saída do modelo SWAT é a evapotranspiração, assim foi feita a validação por dois métodos de estimativa de evapotranspiração potencial, Linacre e Turc, descritos no capítulo 4.9. Primeiro foi feita a correlação entre as estimativas SWAT-Linacre (Figura 32), e aplicado os índices estatísticos de validação do modelo.



**Figura 32.** Correlação entre as Evapotranspirações estimadas pelo SWAT e Linacre.

Foi observado que os coeficientes de correlação e determinação apresentaram um bom desempenho entre as duas estimativas, ambos a cima de 0,70. Para o índice de Nash-Sutcliffe e índice de concordância de Willmott, as estimativas obtiveram desempenhos excelentes segundo a literatura, com valores a cima de 0.95. No coeficiente U de theil Linacre e SWAT tiveram um valor muito próximo de zero, com 0,17 é considerado um excelente desempenho do modelo, levando em conta Linacre como referência.

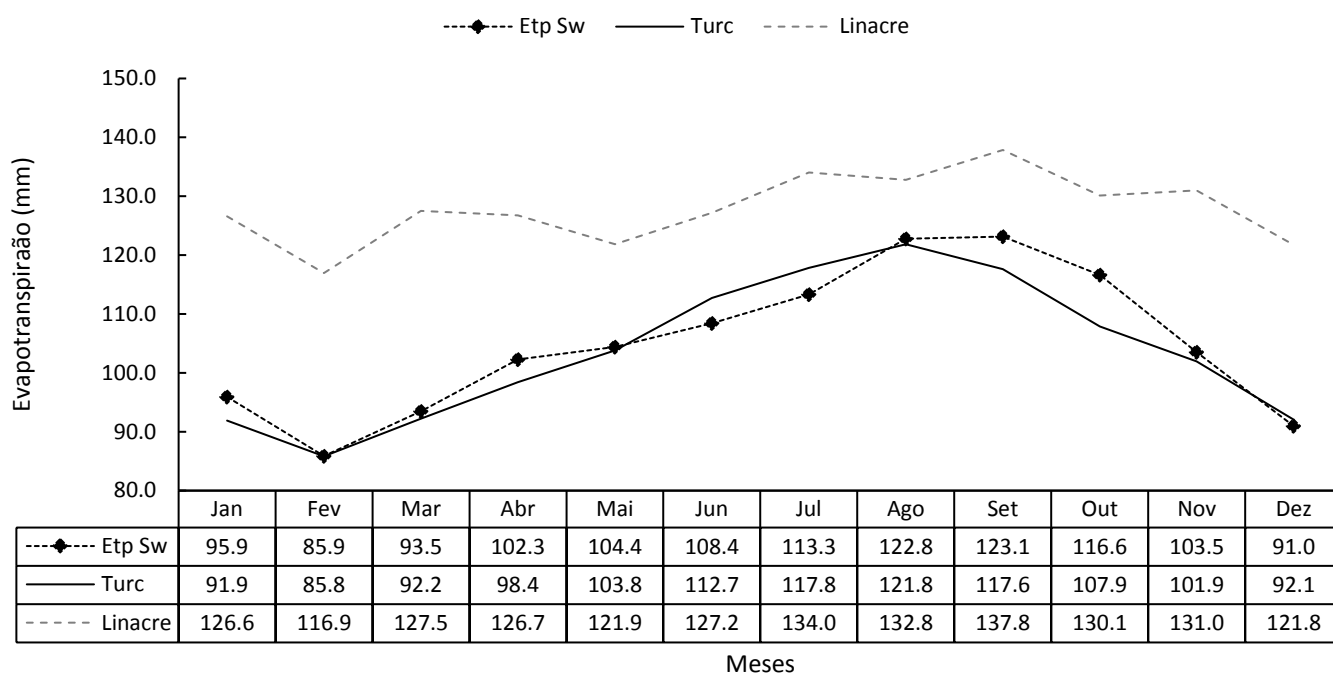
Foi feito ainda uma segunda estimativa de evapotranspiração para fim de validação e comparação, na Figura 33, é observado a correlação entre as estimativas de evapotranspiração entre SWAT e Turc, e aplicado os índices estatísticos de validação do modelo.



**Figura 33.** Correlação entre as Evapotranspirações estimadas pelo SWAT e Turc.

É perceptível que os resultados da correlação SWAT-Turc tiveram um melhor desempenho que SWAT-Linacre, haja vista que são necessários mais dados observados para a estimativa de evapotranspiração por Turc. Além da mesma utilizar dados de radiação, o que deixa a estimativa mais robusta (Machado et al., 2014). Para os índices estatísticos os coeficientes de correlação e determinação apresentaram um bom valor entre as duas estimativas, ambos a cima de 0,95. O índice de Nash-Sutcliffe e índice de concordância de Willmott obtiveram excelentes desempenhos, com valores a cima de 0.95. Já o coeficiente U de Theil entre SWAT-Turc tiveram um valor muito próximo de zero, com erro de 0,07 sendo uma excelente aproximação entre as estimativas.

Na Figura 34 é observado a sazonalidade das três estimativas de evapotranspiração, sendo SWAT e Turc que melhor representaram o ciclo sazonal, em que na estação mais chuvosa (Dez-Mai) há uma evapotranspiração menor, que na estação seca (Jun-Nov) por conta do aumento da radiação disponível para os processos de fotossíntese e outros. Na estimativa feita pelo método de Linacre, a “curva” da evapotranspiração é menos sinuosa, uma vez que esse método leva em consideração apenas temperaturas, latitude e altura do local estudado. Porém nos meses de junho e setembro foram os meses com menores diferenças entre as estimativas.



**Figura 34.** Evapotranspirações mensais estimadas (SWAT - Linacre – Turc).

De acordo com Negrón Juárez et al., (2007), a faixa da ET em vários pontos na Amazônia é  $2,5 \pm 0,4$  a  $4,1 \pm 0,4$   $\text{mm.d}^{-1}$  na estação chuvosa e  $3,8 \pm 0,6$  a  $4,3 \pm 0,9$   $\text{mm.d}^{-1}$  na estação seca. Além disso, ao investigar a variabilidade temporal e espacial da ET, usando as medidas de fluxo de eddy Covariance de oito torres diferentes da Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA), Hasler e Avissar (2007) concluíram que a evapotranspiração em estações próximas a o equador ( $2\text{-}3^{\circ}\text{S}$ ) tem forte estacionalidade, aumentando durante a estação seca e diminuindo durante a estação chuvosa.

Vários estudos mostraram que o balanço de radiação superficial é o principal responsável pela evapotranspiração na estação seca, a ET é mais influenciado pela quantidade de umidade armazenada no solo durante a estação chuvosa anterior do que pelos eventos pluviométricos durante a estação seca. Além disso, durante a estação seca, a umidade do solo armazenada disponível para absorção de raízes pode ser suficiente para manter a taxa de evapotranspiração igual ou maior do que aquela durante a estação chuvosa (Shuttleworth, 1988.; Nepstad et al., 1994.; Negrón Juárez et al., 2007.; Von Randow et al., 2011). Assim, isso sugere que, na estação seca, a transpiração é a principal fonte de ET regional, que seria vinculada à floresta primária. Logo como a bacia do Itacaiúnas tem aproximadamente 50% do seu território

coberto por pastagem, é esperado que a evaporação seja próxima da evapotranspiração, principalmente em períodos de estiagem e na estação seca da região.

Todos os aspectos da hidrologia tropical a partir de fluxos de energia e água dentro da atmosfera, para os que estão dentro da vegetação, da superfície terrestre até a jusante nos oceanos se distinguem de outras regiões do globo, por apresentar uma maior dimensão espacial e variabilidade temporal, maiores magnitudes, gradientes espaciais pronunciados e conseqüentemente o potencial de mudanças rápidas e significativas em resposta a alterações antropogênicas e fluxos de água associados (Wohl et al., 2012).

De acordo com Zhao et al., (2013), em regiões úmidas, a evapotranspiração é responsável por aproximadamente 50% da precipitação anual, enquanto que em regiões áridas, a proporção atinge 90%. Estudos sobre o equilíbrio atmosférico-hidrológico da Amazônia (Costa e Foley, 1999.; Zeng, 1999.; Roads et al., 2002.; Marengo, 2005) concluíram que a ET representa aproximadamente 59 a 82% da precipitação. Além disso, eles consideram que os métodos de estimativa ETo baseados no balanço energético, como Turc (áreas de pastagem) e Priestley-Taylor (superfícies úmidas), são os mais adequados para regiões úmidas.



## 6. CONCLUSÕES

Na análise do risco de erosão para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas foi constatado que as áreas de maior risco para erosão, foram as regiões de maior altitude com solos de fácil degradação e com uma dinâmica de uso de solo elevada, sendo estas na jusante da bacia e na porção sul do município de Marabá.

A partir das análises da série histórica da vazão do rio Itacaiúnas, foi perceptivo que a vazão tem suas variações anuais de acordo com as variações da precipitação, e isto se dá de acordo com as modulações dos sistemas precipitantes que atuam na Amazônia. Bem como as influências de mecanismos oceano-atmosfera que agem como forçantes para inibir ou aumentar a precipitação, e com isso a vazão do Itacaiúnas.

Para os resultados do modelo SWAT o balanço hidrológico representou bem os processos hídricos da bacia em questão, bem como as influências de cada variável do balanço na vazão. Ficou claro que durante o período de estiagem na região os principais componentes da vazão são o escoamento de base e escoamento lateral, condizente com a literatura.

Os resultados do SWAT por uso de solo demonstraram que os três principais usos de solo da bacia têm diferentes influências nas variáveis de regime hídrico. A pastagem teve destaque por ser o tipo de uso que obteve os maiores valores de precipitação, escoamento superficial e transporte de sedimentos.

Esses resultados são de suma importância no manejo sustentável dos recursos hídricos na bacia do Itacaiúnas, uma vez que, foi possível saber como as variáveis hídricas estão condicionadas as ações antrópicas e em quais sub-bacias isso é mais proeminente.

Com a parametrização do modelo foi possível observar que alguns parâmetros são mais influenciáveis aos processos hídricos que outros, o que nos deu a possibilidade de melhorar a simulação na bacia do rio Itacaiúnas.

Na validação da vazão obtida através do modelo SWAT, foi observado que todos os índices estatísticos aplicados mostraram que a vazão simulada teve um bom desempenho, em relação a vazão observada na estação fluviométrica da ANA.

Na validação e comparação da evapotranspiração estimada com SWAT e os métodos de Linacre e Turc, observou-se que todos os índices estatísticos aplicados a evapotranspiração simulada com SWAT tiveram um bom desempenho em relação aos outros dois métodos de estimar evapotranspiração. Porém, o método de Turc foi melhor, haja visto é levado em consideração mais variáveis meteorológicas.

Visto isso, o modelo SWAT teve um bom desempenho em simular a vazão, evapotranspiração e outros processos hidrológicos para a bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas. Bacia está que é de fundamental importância para o Estado do Pará e para o Brasil, visto que a vazão do Itacaiúnas contribui para a geração de energia elétrica na Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Logo um contínuo monitoramento e estudo é necessário na bacia para que possamos utilizar de seus recursos de maneira correta e sem degradação.

O modelo SWAT está cada vez mais inserido no contexto científico e tem grande potencial para ser melhor utilizados em bacias hidrográficas pouco monitoradas, o que se faz necessário na Amazônia Brasileira com baixa densidade de estações fluviométricas e meteorológicas. Os resultados encontrados podem servir como um viés para os tomadores de decisão no intuito de criar políticas públicas e planejar o manejo sustentável de bacias amazônicas.

## **7. PROPÓSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros é proposto que se faça a simulação de cenários futuros no dinâmica de uso e ocupação do solo, sendo possível assim ter um viés de como as variáveis hidrológicas iriam responder a tais mudanças. Outro ponto a ser seguindo seria a utilização de precipitação estimada por sensoriamento remoto como variável de entrada do modelo, ou utilizar outra bacia hidrológica na região que tenha mais estações meteorológicas com dados de precipitação disponível, melhorando a modelagem. Bem como a coleta de dados de solo em campo, o que auxiliaria muito a simulação com SWAT, visto que o modelo é bastante sensível as variáveis do solo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

ABBASPOUR, K.C. SWAT-CUP2012: SWAT **Calibration and Uncertainty Programs—a user manual. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM)**, Eawag. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. Duebendorf, Switzerland, 103 p. 2013.

ADRIOLO, M. V., SANTOS, I., GIBERTONI, R. C., CAMARGO, A. S. G. 2008. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. **In: VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas**. Belo Horizonte – Minas Gerais. Brasil.

ALCÂNTARA, C. R. Linha de instabilidade da Amazônia: estudo de caso e importância das características do perfil do vento na sua formação e desenvolvimento. **Ciência & Natura**, v. 33, n. 2, p. 197-226, 2011.

ALMEIDA, C.A.; COUTINHO, A.C.; ESQUERDO, J.C.D.M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C.G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A.R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **Acta Amazonica**, v, 46 (3), p. 291-302, 2016

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação Automática De Bacias Hidrográficas Utilizando Dados SRTM. **Engenharia Agrícola** (Impresso), v. 30, p. 46-57, 2010.

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de Diferentes Métodos de Interpolação para a Precipitação Pluvial no Estado de Goiás. **Acta Scientiarum Human and Social Sciences**, v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011.

AONASHI, K, J.; AWAKA, M. H.; KOZU, T.; KUBOTA, T.; LIU, G. SHIGE, S. GSMaP Passive, Microwave Precipitation retrieval algorithm: Algorithm Description and Validation. **Journal of Meteorology**, v.87A, p. 119-136, Japan, 2009.

ANA- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Dados fluviométricos, 2017. Acesso em: 07 abr de 2017. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp> >

ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil: **abastecimento urbano de água: resultados por estado**. Brasil. Brasília: ANA, 92 p. 2010.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Online), v. 17. p. 69-76, 2013.

ANDREOLI, R. V., KAYANO, M. T., A Importância Relativa do Atlântico Tropical Sul e Pacífico Leste na Variabilidade de Precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 63-74, 2007.

ANGSTRÖM, A. Teleconnections of climate changes in present time. **Geography Annals**. v. 17, p 242- 258, 1935.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.

ARNOLD, J.G.; MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. **Journal of Hydrology**, v.227, p.21-40, 2000.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. **Hydrological processes**. v. 19(3), p. 563-572, 2005.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R. et al. SWAT: Model use calibration and validation. **Transactions of ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, 2012.

BALDISSERA, G. C. **Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a bacia hidrográfica do rio Cuiabá/MT**. 2005. 132 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BALTOKOSKI, V. 2008. **Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco/PR**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel. 115p.2008

BAND, L.E. Topographic partition of watershed with digital elevation models. **Water Resource Research**, Washington, v.22, n.1, p.15-24, 1986.

BESKOW, S. **LASH model**: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; COELHO, G.; SILVA, A. M.; VIOLA, R. M. Estimativa do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica com base em modelagem dinâmica e distribuída. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v. 33, n. 1, p. 169-178, jan./fev. 2009.

BEKIARIS I.G.; PANAGOPOULOS I.N.; MIMIKOU M. Application of the SWAT (Soil and water assessment tool) model in the Ronnea catchment of Sweden. **Global NEST International Journal**. 7(3), 313 - 322, November. 2005.

BETRIE, G. D., Y. A. MOHAMED, A. VAN GRIENSVEN, AND R. SRINIVASAN. Sediment management modelling in the Blue Nile Basin using SWAT model. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 15, p. 807-818, 2011.

BJERKNES, J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, Mon. **Weather Rev.** v. 97, p. 163 – 172, 1969.

BLAINSKI, E.; ARAUJO, I.; GOMES, P. 2011. Modelagem e simulação do uso do solo e as alterações no ambiente. **In: XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2011, Uberlândia. XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.

BLAINSKI, E.; COSTA, E. A.; NOBREGA, P. C. P.; Calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica do litoral norte catarinense. **Rev. Ambient. Água**. Taubaté, v. 12, n. 2, p. 226-237, 2017.

BLAINSKI, E., GARBOSSA, L. H. P., MALUTA, S. 2010. Aplicação do modelo hidrológico SWAT (Soil Water Assessment Tool) para a simulação da perda de solo e da disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica não instrumentada. **In: X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Fortaleza – Ceará. Brasil.

BONAN, G. B.; DEFRIES, R. S.; COE M. T.; OJIMA, D. S. **Land use and climate**. In: Gutman G (ed) *Land change science*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, p. 301–314, 2004.

BONUMÁ, N. B., REICHERT, J. M., MINELLA, J. P., BARROS, C. A. P., RODRIGUES, M. F., BUARQUE, D. C. 2010. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. **In: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Brasília, Distrito Federal. Brasil.

BOSCH, J.; HEWLETT, J. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n. 1-4, p. 3–23, 1982.

BRACMORT, K. S., M. ARABI, J. R. FRANKENBERGER, B. A. ENGEL, AND J. G. ARNOLD. Modeling longterm water quality impact of structural BMPs. **Trans. ASABE** v. 49(2), p. 367-374, 2006.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Lei n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

BRUIJNZEEL L. A. Hydrological impacts of tropical forest conversion. **Nature Resour.** v. 27, p.36–46, 1991.

CANADELL, J.; JACKSON, R. B.; EHLERINGER, J. R.; MOONEY, H. A.; SALA, O. E; SCHULZE, E. D. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. **Oecologia**. v. 108, p. 583–595, 1996.

CASTRO FILHO, H. C. C.; STAINKE, T. E.; STAINKE, V. A. Análise espacial da precipitação pluviométrica na bacia do lago Paranoá: comparação de métodos de interpolação. **Revista Geonorte**, v.1, n. 5, p. 336-3455, 2013.

CASTRO, K. B. Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada. 2013. 122 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geociências), Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Simulação Hidrossedimentológica, Analisando Dois MDE's, De Duas Pequenas Sub-Bacias No Cariri Paraibano Utilizando O Modelo Swat. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 5, p. 48-58. 2011.

CAVALCANTI, I. F. A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. São José dos Campos, INPE – 2494 – TDL/097, 1982.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of hydrology**. v. 369, n. 1-2, p. 165–174, 2009.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 1-3, p. 119–131, 23 fev. 2011.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and flow parameterizations. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 14, p. 2542–2553, 2008.

COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Aspectos Climatológicos das Linhas de Instabilidade na Amazônia. **CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática**, v. 4, p. 34-40, 1989.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Trends in the hydrologic cycle of the Amazon basin. **Geophys Res**. v. 104, p. 14189-14198, 1999.

CHANG, P. L.; LI, H. A decadal Climate variation in the tropical Atlantic Ocean from Thermodynamic Air-Sea Interactions. **Nature**, v.385, p.516-518, 1997.

CHEVALIER, P. Aquisição e processamento de dados, in. TUCCI C.E.M., **Hidrologia ciência e aplicação**, 3°.ed. Revisada, ABRH-Edusp, Porto Alegre, 2004, p. 485-525.

CHIANG, L. et al. Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a CEAP watershed using SWAT model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 53, n. 5, p. 1569-1584, Sept. 2010.

CHOW, V.T. Hydrology and it's development. 1964. In: Chow, V.T. Handbook of applied hydrology: a Compendium of Water-resources Technology. New York: McGrawhill Book. 1400p.

CHOWDARY, V. M.; YATINDRANATH.; KAR, S.; ADIGA, S. Assessment of non-point source pollution on watershed basis using remote sensing, GIS and AGNPS Model. **In: ASIAN CONFERENCE ON REMOTE SENSING**, v. 22. Singapura.: ACRS, 2001.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise Morfométrica Das Bacias Hidrográficas. **Notícia Geomorfologia**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1999.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 2010, p 82.

CONAN, C. F; BOURAOUI, N; TURPIN, G; DE MARSILY; G. BIDOGLIO. Modeling flow and nitrate fate at catchment scale in Brittany (France). **Journal Environmental Quality**. v. 32 (6), p. 2026-2032, 2003.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, n. 1-4, p. 206–217, dez. 2003.

CUARTAS, L. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, A. D.; NOBRE, C. A.; HODNETT, M. G.; WATERLOO, M. J.; MOTA DE OLIVEIRA, S. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 462-463, p. 15-27, 2012.

CUNHA, L. V. D. **Gestão das Águas: Principais Fundamentos e sua Aplicação em Portugal**, Fundação Calouste Gulbenkian. 1982.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. DE; AZEVEDO, L. G. DE.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V. **Curso De Sensoriamento Remoto Aplicado Ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José Dos Campos: INPE, 2001. 25p.



DAVIDSON, E. A. et al. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.

DEBELE, B.; SRINIVASAN, R.; PARLANGE, J. Y.; Accuracy Evaluation of Weather data Generation and Disaggregation Methods at Finer Timescales. **Advances in Water Resources**, V. 30 (5), P. 1286–1300. 2007.

DE SOUZA, E. B.; ROCHA, E. J. P. Diurnal Variations of Rainfall in Bragança-PA (Eastern Amazon) During Rainy Season: Mean Characteristics and Extreme Events. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3<sup>a</sup>, p. 142-152, 2006.

DE SOUZA, E.B.; KAYANO, M.T.; AMBRIZZI, T. The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113-122, 2004.

DILE Y. T.; SRINIVASAN R. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 50, p. 1226–1241. 2014.

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

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research.**, v.28, n.4, p. 1015-1031, 1992.

EAGLESON P. S. Climate, soil, and vegetation 1. Introduction to water balance dynamics. **Water Resources Research**. v. 14, p. 705–712, 1978.

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

ENFIELD, D. B.; MAYER, D. A. Tropical Atlantic SST variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation, **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 929–945, 1997.

EPISÓDIOS Históricos El Nino/La Nina (1950-Presente): **Índice Oceânico do Niño (ION)**. 4 de Maio de 2015. Disponível:

<[http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)>

Acesso em: 15 de Abr. 2015.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models.

**Water Resources Research**, Washington, v.27, n.5, p.709-717, 1991.

FALORNI, G.; TELES, V.; VIVONI, E.R.; BRAS, R.L.; AMARATUNGA, K.S. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.110, n.2, p.1-20, 2005.

FERNANDES, J. G.; GALVÍNIO, J. D.; FREIRE, M. B. G. S. O Modelo SWAT e suas Possibilidades de Aplicações em APL Agrícolas. **Revista Brasileira de Geografia Física**. p. 115-126, 2012.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 22, n. 2, p. 101-126, 1998.

FUKA, D.R., M.T. WALTER, C. MACALISTER, A.T. DEGAETANO, T.S. STEENHUIS, AND Z.M. EASTON. Using the Climate Forecast System Reanalysis as Weather Input Data for Watershed Models. **Hydrological Processes**. v. 28(22), p. 5613–5623, 2013.

FRANÇA, G. V. **Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicadas a solos da região de Piracicaba**. Tese Doutorado. Piracicaba: ESALQ-USP, 1968, 151p.

GASSMAN, P. W; JHA, M; SECCHI, S; ARNOLD, J. **Initial calibration and validation of the swat model for the upper Mississippi river basin. Polution diffuse**. Conference Dublin. Center of Agricultural and Rural Development. Iowa State University. v. 10B, p. 10-40. 2003.

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

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1988, 291p.

GIANNINI, A.; SARAVANAN, R.; CHANG, P. The preconditioning role of Tropical Atlantic Variability in the development of the ENSO teleconnection: implications for the prediction of Nordeste rainfall. **Climate Dynamics**. v. 22, p. 839-855, 2004.

GRIENSVEN, A. van. **Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005**. Disponível em: <<http://groups.google.com/group/swatuser/files>>. Acesso em: 23 jun. 2017.

GOMES, A.G.; VARRIALE, M.C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**. Santa Maria, UFSM, 2001.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 3, p. 683-692, 2005.

GRUNWALD, S.; NORTON, L. D. Calibration and validation of a non-point source pollution model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 45, n. 1, p. 17-39, June 2000.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. R. Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.12, n. 3, p. 13-20. 2007

HALLAK, R.; FILHO, A. J. P. Metodologia para Análise de Desempenho de Simulações de Sistemas Convectivos na Região Metropolitana de São Paulo com o Modelo ARPS: Sensibilidade a Variações com os Esquemas de Advecção e Assimilação de Dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 26, n.4, p.591-608, 2011.

HASLER N AND AVISSAR R. What Controls Evapotranspiration in the Amazon Basin? **Journal Hydrometeorology**. v. 8, p. 380-395, 2007.

HOREL, J. D.; WALLACE, J. M. Planetary scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 109, p. 813-829, 1981.

HOSKINS, B. J.; KAROLY, D. J. The steady linear responses of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 38, p. 1179-1196, 1981.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**. v. 56, p. 275 - 370, 1945.

HU, X; MCISAAC, G. F; DAVID, M. B; LOUWERS, C. A. L. Modeling riverine nitrate export from an East-Central Illinois watershed using SWAT. **Journal of Environmental Quality**. v. 36, p. 996–1005, 2007.

HUDSON, N. **Soil conservation**. Ames, Iowa State University Press, 1995. 391p

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/mapas\\_doc3.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/mapas_doc3.shtm)>

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Prodes**, 2017. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>>

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto TerraClass**. 2014. Disponível em <[http://www.inpe.br/cra/projetos\\_pesquisas/terraclass2010.php](http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2010.php)>. Acesso em 10 mar. 2017.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Rede de Estações Meteorológicas Automáticas e Convencionais do INMET**. Brasília, 2017. Disponível em: <<http://inmet.gov.br>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

JENSON, S.K.; DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v.54, n.11, p.1.593-1.600, 1988.

JORDAN, G.; SCHOTT, B. Application of wavelet analysis to the study of spatial pattern of morphotectonic lineaments in digital terrain models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.94, n.1. p.31-38, 2005.

KÄÄB, A. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.94, n.4, p. 463- 474, 2005.

KEENAN, R. J. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. **Annals of Forest Science**, v. 72, n. 2, p. 145-167, 2014.

- KIDD, C.; D. R. KNIVETON, M. C. TODD.; BELLERBY, T. J. Satellite rainfall estimation using combined passive microwave and infrared algorithms. **Journal Hydrometeorology**, v. 4, p. 1088-1104. 2003.
- KINNELL, P. I. A. AGNPS-UM: applying the USLE-M within the agricultural non point source pollution model. **Environmental Modelling & Software**, Oxfordshire, v. 15, n. 3, p. 331-341, 2000.
- KING, K.; ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R.; SRINIVASAN R. **Soil and Water Assessment Tool – SWAT**. Texas: USDA, Agricultural Research Service, 1996. 450p.
- KLEIN, S. A.; SODEN, B. J.; LAU, N. C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for tropical Atmospheric bridge. **Journal of Climate**, v. 12, p. 917-932, 1999.
- KOUSKY, E. V. Diurnal rainfall variation in northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, p.488-498, 1980.
- LIEBMANN, B.; MARENGO, J. A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 4308-4318, 2001.
- LEAL, M. S. **Gestão ambiental de recursos hídricos: princípios e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 176 p. 1998.
- LI, W.; FU, R.; JUÁREZ, R. I.; FERNANDES, K. Observed change of the standardized precipitation index, its potential cause and implications to future climate change in the Amazon region. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci**, v. 363, n. 1498, p. 1767-1772, 2008.
- LI, M.; SHAO, Q.; ZHANG, L.; CHIEW, F. H. S. A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 389, n. 1-2, p. 137-145, 2010.
- LELIS, T. A; CALIJURI, M. L. 2010. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. v. 5(2). p158-174, 2010.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**. v. 36, p. 623-634, 2012.

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

LIMA, W. P. **Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ-USP. 1969. 242p.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, v.18, p.409-424, 1977.

LENZI, M. A.; DI LUZIO, M. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the alpone watershed using AGNPS integrated with a geographic information system. **European Journal of Agronomy**, London, v. 6, n. 1/2, p. 1-14, Mar. 1997.

LIU, Z.; ALEXANDER, M. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. **Reviews of Geophysics**, v. 45, 2007.

LIU, Z.; OSTRENGA, D.; TENG, W. L.; KEMPLER, S. J. Implementing the International Precipitation Working Group (IPWG) Validation Statistics in Online Tools to Inter-compare and Characterize Satellite-derived Global Precipitation Products. American Geophysical Union. **Fall Meeting**, San Francisco, p. 9-13. December 2013.

LINO, J. F. L., CORSEUIL, C. W., KOBİYAMA, M., MALUTTA, S., UDA, K., BORTOLOTTI, N. L., SANTOS, I. 2009. Análise da vazão da bacia hidrográfica do rio Preto com o modelo SWAT. **In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Campo Grande, Mato Grosso do Sul. Brasil.

LOPES, N. H. Y. 2008. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais utilizando o modelo SWAT**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 164p.

LOPES, N. H. Y.; GODOY, F. B.; KOBİYAMA, M. Análise da produção de água e de sedimento em uma microbacia experimental com a aplicação do modelo SWAT. **In: VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental**, Serra Negra. 2008.

LUBITZ, E. 2009. **Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à Bacia do Ribeirão Concórdia – Lontras**, SC. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Regional de Blumenau. 125p.

LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, New York, v.62, n.4, p.283-294, 2007.

MACHADO, R. E. 2002. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. Piracicaba. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 152p.

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**. v. 8, n. 1. p. 147-155, 2003.

MAIDMENT, D, R. (1993). **Hydrologic Cycle**. In: Handbook Of Hydrology. McGraw- Hill, 2ªEd, 1.1-15p.

MALDONADO, O. A.; PALACIOS, O. L.; SPRINGALL, R.; FERNÁNDEZ, D. S. Empleo Modelo SWRRB Generar Alternativas de Manejo em La Cuenca Itzapa, Guatemala. **Agrociência**. México. v. 35, p. 335-345, 2001.

MALUTTA, S. 2012. Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do rio negrinho - SC com o modelo SWAT. Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. 126p.

MANTUA, N. J. et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1079, 1997.

MARCHIORO, E; FERNANDES, N. F; MACEDO, J. R.; BHERING, S. B; GONÇALVES, A. O; CAIADO, M.A.C. Modelagem da produção de sedimentos no noroeste fluminense como subsídio ao planejamento ambiental: um estudo de caso da bacia do córrego Santa Maria. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 12, p. 29-38, 2011.

MARENGO, J. A. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon basin: Spatial and temporal variability. **Clim Dynam**. v. 24, p. 11-22, 2005.

MARENGO J. A.; NOBRE. C.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazônia in 2005. **Journal of Climate**, n. 21, p. 495-516, 2008.

MARENGO, J. A. Long-term trends and cycles in the hydrometeorology of the Amazon basin since the late 1920s. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 22, p. 3236-3244, 2009.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CHOU, S. C.; TOMASELLA, J.; SAMPAIO, G.; ALVES, L. M.; OBREGÓN, G. O.; SOARES, W. R.; BETTS, R.; KAY, G. **Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil: Análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das Mudanças Climáticas e do Desmatamento na Amazônia**. São Jose dos Campos, SP: INPE, 2011a, 55 p.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES. W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1-5, 2011b.

MARK, D.M. Automatic detection of drainage networks from digital elevation models. **Cartographica**, Toronto, v.21, n.3, p.168-178, 1984.

MELO NETO, J. O.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MELLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o modelo SWAT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 177-188, 2014.

MERCURI, E. G. F., DEPPE, F., LOHMANN, M., SIMÕES, K. Metodologia da geração de dados de entrada e aplicação do modelo SWAT para bacias hidrográficas brasileiras. **In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal – Rio Grande do Norte. Brasil. 2009.

MERKEL, W.H.; KAUSHIKA, R.M.; GORMAN, E. NRCS GeoHydro-A GIS interface for hydrologic modeling. **Computers & Geosciences**, Oxford, v.34, n.8, p.918-930, 2008.

MINOTI, R. T. 2006. **Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrografias e áreas alagáveis de um compartimento do médio mogisuperior, SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 231p.

MO, K. C.; HIGGINS, R. W. The Pacific–South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter. **Monthly Weather Review**, v. 126, p. 1581-1596, 1998.



MORUZZI, R. B.; CONCEIÇÃO, F. T.; SARDINHA, D. S.; HONDA, F. P.; NAVARRO, G. R. B. Avaliação de cargas difusas e simulação de autodepuração no córrego da Água Branca, Itirapina (SP). **Geociências**, v. 31, n. 3, p. 447-458, 2012.

MÜLLER, V. C. A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area. New York: Virginia and Tennessee. **Dept. of Geology**, n. 3, p. 30, 1953.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, p. 282–290. 1970

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 Climate**. v. 20, p. 2827-2839, 2007.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J.J. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation – version 2005**. SERVICE., G-S. A. W. R. L. – A. R. Texas USA. 525p. 2005a.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R. Soil and water assessment tool. Input/output file documentation: Version 2005. Temple: **Blackland Research Center**, Texas Agricultural Experiment Station, EUA. 530p. 2005b.

NEPSTAD, D. C.; CARVALHO, C. R.; DAVIDSON, E. A.; JIPP, P. H.; LEFEBVRE, P. A.; NEGREIROS, G. H.; SILVA, E.; STONE, T.; TRUMBORE, S. A.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**. v. 372, p. 666-669, 1994.

NEPSTAD, D.; LEFEBVRE, P.; SILVA, U. L.; TOMASELLA, J.; SCHLESINGER, P.; SOLORZANO, L.; MOUTINHO, P.; RAY, D.; BENITO, J. G. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 704-717, 2004.

NEVES FF; SILVA, FGB; CRESTANA, S. 2006. Uso do modelo AVSWAT na avaliação do aporte de nitrogênio (N) e fósforo (P) aos mananciais de uma microbacia hidrográfica contendo atividade avícola. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. vol.11 no.4. Rio de Janeiro Oct./Dec. 2006. 311-317.

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

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian Deforestation and regional climate change. **Journal of Climate**, v. 4, n. 10, p. 957-988, 1991.

NOTTER, B. et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya Region. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 343, n. 3/4, p. 266-278, 2007.

NUNES, J. G.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, F. P.; NUNES, J. C. Tolerância de perda de solo por erosão na região sul do Amazonas. **Ambiência Guarapuava (PR)**, v. 8, n. 3, p. 859-868, 2012.

OLIVERA, F.; VALENZUELA, M.; SRINIVASAN, R.; CHOI, J.; CHO, H., KOKA, S., AGRAWAL, A. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS interface for SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**. v. n. 2, p. 295-309, 2006.

PAGLIERO, L.; BOURAOUI, F.; WILLEMS, P.; DIELS, J. Large-scale hydrological simulations using the soil water assessment tool, protocol development, and application in the Danube Basin. **Journal of Environmental Quality**, v. 43, n. 1, p. 145-154, 2014.

PAIM, J. B; MENEZES, J. T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. **Revista Geográfica Acadêmica**. v. 3(2), p. 5-14, 2009

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. **Climate Dynamics**, v. 17, n. 2-3, p. 205-212, 2001.

PIKOUNIS M.; VARANOUE.; BALTAS E.; DASSAKLIS A.; MIMIKOU M. Application of the SWAT model in the Pinios river basin under different land use scenarios. **Global Nest: The International Journal**. v. 5(2), p. 71-79, 2003

PHILLIPS, O. L. et al. Drought Sensitivity of the Amazon Rainforest. **Science**, v. 323, p. 1344-1347, 2009.

RADCLIFFE, D. E., Z. LIN, L. M. RISSE, J. J. ROMEIS, AND C. R. JACKSON. Modeling phosphorus in the Lake Allatoona watershed using SWAT: II. Effect of Land Use Change. **Journal of Environmental Quality**. v. 38(1), p. 111-120, 2009.

RAYMOND P, A.; OH N. H.; TURNER, R. E.; BROUSSARD, W. Anthropogenically enhanced fluxes of water and carbon from the Mississippi River. **Nature**. v. 451, p. 449–452, 2008.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185 - 204, 2010.

REBOITA, M. S.; SANTOS, I. A.; Influência de alguns padrões de teleconexão na precipitação no Norte e Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 15, p. 28-48, 2014.

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

RIBEIRO, F. L.; CAMPOS, S. Vulnerabilidade à erosão do solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.11, n.6, p.628–636, 2007.

RODIGUES, E. L.; ELMIR, M. A. T.; JACOBI, C. M.; LAMOUNIER, W. L. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Soc. nat.** v. 27, n. 3, p. 485-500, 2015.

ROADS, J.; KANAMITSU, M.; STEWART, R. Water and energy budgets in the NCEP-DOE reanalyses. **Journal of Hydrometeorology**. v. 3, p. 227-248, 2002.

SÁ, I. I. S.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B.; SÁ, I. B.; Avaliação da Degradação Ambiental na Região do Araripe Pernambucano Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto. **Revista Brasileira de Geografia física**, v. 06, p. 1292-1314, 2011.

SAJI, N. H. et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. **Nature**. v. 401, p 360 – 363, 1999.

SALIO, P.; NICOLINI, M.; ZIPSER, J. Mesoscale convective systems over southeastern South American low-level jet. **Monthly Weather Review**, v. 135, p. 1290-1309, 2007.

SAMMONS, N.; Neitsch, S. L. **Until interface for SWAT2000** – User guide. SERVICE, GUAR, 14p. 2000.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J.; DELLA FLORA, L. P.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T. Infiltração de água no solo, determinada por diferentes métodos, como indicador do potencial produtivo em dois Latossolos manejados com agricultura de precisão. **Interciência**, v. 37, p .204-208, 2012.

SANTHI, C., R. SRINIVASAN, J. G. ARNOLD, AND J. R. WILLIAMS. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas. **Environ. Model. Soft.** v. 21(8), p. 1141-1157, 2006.

SANTOS, J. S.; RIZZI, N. E. Dinâmica de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Luís Alves, sub-bacia do rio Itajaí, Santa Catarina, Brasil. **Floresta**, v. 40, n. 2. p. 335-344. Curitiba, abr/jun. 2010.

SANTOS, R. S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B.G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO SECA/PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 26, p. 313-321, 2011

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005a.

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian Rainforest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**. v. 233, p. 321-346, 1988.

SERRÃO, E. A. O.; SANTOS, C. A.; WANZELER, R. T. S.; GONÇALVES, L. J. M.; LIMA, A. M. M. Avaliação da seca de 2005 e 2010 na Amazônia: uma análise a bacia hidrográfica do rio Solimões. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 2, p. 5-20, 2015.

SERRÃO, E. A. O.; WANZELER, R. T. S.; SANTOS, C. A.; GONÇALVES, L. J. M.; LIMA, A. M. M.; ROCHA, E. J. P. Avaliação Estatística entre as Estimativas de Precipitação da Constelação GPM com TRMM: Uma Análise a Bacia Hidrográfica do Rio Solimões. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 256-275, 2016.

SETEGN, S.G., SRINIVASAN, R., DARGAHI, B. Hydrological Modeling in the Lake Tana Basin, Ethiopia using SWAT model. **The Open Hydrology Journal**. v. 2, p. 49-61. 2008

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Agência Nacional da Água. Brasília. 2001, 225p.

SEYLER, F.; CALMANT, S.; SILVA, J.; FILIZOLA, N.; COCHONNEAU, G.; BONNET, M.P.; COSTI, A. C. Z. Inundation risk in large tropical basins and potential survey from radar altimetry: example in the Amazon Basin. **Marine Geodesy**, n. 32, p. 303-319, 2009.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2, p. 133-150, 1987.

SILVA, M. T. 2014. **Mudança no uso de solo e no aporte de sedimentos na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco**. Tese de Doutorado (Doutorado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 122p.

SILVA, M. T.; SILVA, V. P. R.; SOUZA, E. P.; ARAÚJO, A. L. Aplicação do modelo SWAT na estimativa da vazão na bacia hidrográfica do submédio rio São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 08, n.06. p. 1615-1627, 2015.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; SOUZA, E. P. Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of the São Francisco river basin. **Engenharia Agrícola**. v. 36, n.06. p. 1005-1015, 2016.

SILVA, V. P. R.; SILVA, M. T.; BRAGA, C.C.; SINGH, V. P.; SOUZA, E. P.; SOUSA, F. A. S.; HOLANDA, R. M.; ALMEIDA, R. S. R.; BRAGA, A. C. R. Simulation of stream flow and

hydrological response to land-cover changes in a tropical river basin. **Catena**. v. 162, p. 166-176, 2017.

SILVA, A. K. L. 2016. **Impacto da Expansão da Palma de Óleo Sobre o Escoamento Superficial e Produção de Sedimentos nas Sub-Bacias Hidrográficas não Monitoradas dos Rios Bujaru e Mariquita no Nordeste do Estado do Pará, Amazônia Oriental**. Tese de Doutorado (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Universidade do Estado de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 325p.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v.12, n.3, p. 258-265, 2008.

SILVA JÚNIOR, R. O.; SOUZA, E. B.; TAVARES, A. L.; MOTA, J. A.; FERREIRA, D. B. S.; SOUZA FILHO, P. W. M.; ROCHA, E. J. P. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**. v. 89, p. 1985-2002, 2017.

SIERRA, J. P.; ARIAS, P. A.; VIEIRA, S. C.; Precipitation over northern South America and its seasonal variability as simulated by the CMIP5 models”. **Advances in Meteorology**. v. 2015, p. 22, 2015.

SINGH, P. 1995. **Computer models of watershed hydrology**. Boulder, Water Resources Publications. 1995, 1144p.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. O modelo SWAT como ferramenta para gestão de recursos hídricos: avaliação de vazões de outorga na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro. **In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais do Congresso**. 2009

SOUSA, A. M. L. D.; VITORINO, M. I.; CASTRO, N. M. D. R.; BOTELHO, M. D. N.; SOUZA, P. J. O. P. D. Evapotranspiration from Remote Sensing to Improve the Swat Model in Eastern Amazonia. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 4, p. 456-464, 2015.

SPENCER, D. E. Developing a Bayesian vector autoregressive forecasting model. **International Journal of Forecasting**. v. 9, p. 407-421. 1993.

STRAUCH, M.; BERNHOFER, C.; KOIDE, S.; VOLK, M.; LORZ, C.; MAKESCHIN, F. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. **Journal of Hydrology**. Amsterdam. v. 414-415, p. 413-424, 2012

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993

SURANJANA SAHA, SHRINIVAS MOORTHY, HUA-LU PAN, XINGREN WU, JIANDE WANG, SUDHIR NADIGA, PATRICK TRIPP, ROBERT KISTLER, JOHN WOOLLEN, DAVID BEHRINGER, HAIXIA LIU, DIANE STOKES, ROBERT GRUMBINE, GEORGE GAYNO, JUN WANG, YU-TAI HOU. et al., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **American Meteorological Society**. p. 1015-1057. 2010.

TAVEIRA, I. M. L. M. 2012. **Avaliação de Alternativas de Uso do Solo Através da Simulação Hidrossedimentológica da Bacia Representativa de Sumé com o Modelo Swat**. Dissertação de Mestrado, (Mestrado em Eng. Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 158p.

TARBOTON, D.G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*, Chichester, v.5, n.1, p.81-100, 1991.

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

TUCCI, C. E. M. (2005) **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. 2ª Edição. Porto Alegre, 675 p.

TUCCI, C. E. M. 2009. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – ABRH. Porto Alegre, RS. 4 ed. 1 reimp. 943p.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.240, n.3, p.225-242, 2001.

TURC L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. **Ann Agron**. V. 12, p. 13-49, 1961.

UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P.G.; MORO, M. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. v. 36, n. 2, 2012.

ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 1, p. 149-156, 2009.

VAL, A. L.; ALMEIDA-VAL, V. M. F.; FEARNSIDE, P. M.; SANTOS, G. M.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W.; NOZAWA, S. R.; SILVA, S. T.; DANTAS, F. A. C. Amazônia: recursos hídricos e sustentabilidade. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (org.) **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo-SP: Instituto de Botânica, 2010, 224 p.

VISSMAN JR., W. & LEWIS, G. L. 1996. **Introduction to hydrology**. New York. Haper Collins College Publishers. 4 ed.

VOGT, J.V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, Amsterdam, v.53, n.3, p.281-298, 2003.

VON RANDOW RCS, VON RANDOW C, HUTJES RWA, TOMASELLA J AND KRUIJT B. Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. **Theor Appl Climatology**. v. 109, p. 1-16, 2011.

WAGENER, T.; MONTANARI, A. Convergence of approaches toward reducing uncertainty in predictions in ungauged basins. **Water Resources Research**, v. 47, n. 6, p. 1-8, 2011.

WALKER, J.P.; WILLGOOSE, G.R. On the effect of DEM accuracy on hydrology and geomorphology models. **Water Resource Research**, Washington, v.357, n.7, p.2.259-2.268, 1999.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparisons of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5. p.8995-9005, 1985.

WINCHELL, M., SRINIVASAN, R., DI LUZIO, M., AND ARNOLD, J. G. **ArcSWAT interface for SWAT2009** User's guide. USDA Agricultural Research Service and Texas A&M Blackland Research Center, Temple, Texas. 431p. 2010.



WOHL, E. et al. The hydrology of the humid tropics. **Nat Clim Change**. v. 2, p. 655-662, 2011.

YAN, B., FANG.; N. F.; ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal of hydrology**. v. 484, p. 26-37. 2013.

YOON, J. H.; ZENG, N. An Atlantic influence on Amazon rainfall. **Climate Dynamics**, v. 34, p. 249-264, 2010.

ZENG, N. Seasonal cycle and interannual variability in the Amazon hydrologic cycle. **J Geophys Res**. v. 104, p. 9097-9106, 1999.

ZHANG, P.; LIU, Y.; PAN, Y.; YU, Z. Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 58, n. 3, p. 588-595, 2013.

ZHAO, L.; XIA, J.; XU, C. Y.; WANG, Z.; SOBKOWIAK, L.; LONG, C. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. **J Geogr Sci**. v. 23, p. 359-369, 2013.

ZENG, N.; YOON, J. H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes And Impacts Of The 2005 Amazon Drought. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 14, p. 002, 2008.