

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CÂMPUS LONDRINA**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

Fábio Eidi Kataoka

**Ferramenta SWAT para modelagem hidrológica na área da bacia do  
ribeirão Cafezal em Londrina - PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA**  
**2017**

**Fábio Eidi Kataoka**

**Ferramenta SWAT para modelagem hidrológica na área da bacia do  
ribeirão Cafezal em Londrina - PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso Superior de Engenharia Ambiental da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Câmpus Londrina, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ligia Flávia Antunes Batista

**LONDRINA**

**2017**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Ferramenta SWAT para modelagem hidrológica na área da bacia do Ribeirão  
Cafezal em Londrina - PR

por

Fábio Eidi Kataoka

Monografia apresentada no dia 28 de junho de 2017 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Dr. Ricardo Nagamine Costanzi  
(UTFPR)

---

Profa. Dr<sup>a</sup>. Edilaine Regina Pereira  
(UTFPR)

---

Profa. Dr<sup>a</sup>. Ligia Flavia Antunes Batista  
(UTFPR)  
Orientadora

---

Profa. Dr<sup>a</sup>. Edilaine Regina Pereira  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me auxiliar em momentos em que mais precisei e aos meus pais, pois foram meus alicerces e motivação para que eu me esforçasse a cumprir meus objetivos e nunca mediram esforços para que eu pudesse ter uma boa educação.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Londrina, pelo conhecimento fornecido, a chance de conhecer grandes pessoas em meu trajeto e pelas oportunidades e conhecimentos adquiridos em todo o curso.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ligia Flávia Antunes Batista, sem a qual este trabalho não teria tido êxito de forma alguma. Pela paciência em sanar todas as dúvidas que tive durante todo o processo do trabalho e que surgiam a todo momento, pela orientação que foi de grande valia, a amizade conquistada durante todo esse período e colaborando não somente no crescimento profissional, mas como pessoal também. Deixo aqui meu sincero agradecimento.

Aos colegas de turma Bianca, Dioni, Franciele, Isadora, Juliana, Luiz e Thalita que não mediram esforços em me fazer rir durante todo o curso, pelas conversas sobre os mais diversos assuntos, além das dicas de estudos que mostraram a possibilidade de obter todo o conhecimento da matéria em cinco minutos antes da prova e por me fornecerem memórias que com certeza serão inesquecíveis. Obrigado pela amizade de cada um e pelo apoio a todo momento.

Aos amigos Daniel, Fabio Barros, Kathleen, Naoto, e Sabrina que me suportaram e sempre me apoiaram para que eu nunca desistisse dos meus sonhos e me ajudaram a levantar sempre que cai no caminho, meus sinceros agradecimentos.

Finalizo agradecendo a todos aqueles que marcaram a minha graduação, tornando-a um período de grande relevância em meu crescimento profissional e peço desculpas a aqueles que não foram citados diretamente.

## RESUMO

KATAOKA, F. E. **Ferramenta SWAT para modelagem hidrológica na área da bacia do Ribeirão Cafezal em Londrina - PR.** 2017. 64p. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2017.

A modelagem dos estudos ambientais abrange diversas áreas das ciências naturais, com ênfase nos recursos hídricos, pois a mesma refere-se, ainda, à simulação de eventos hidrossedimentológicos que possam ter relações com inundações associadas à impermeabilização dos solos. Dessa forma, informações que possam atribuir acurácia nos processos de tomadas de decisões são subsídios muito importantes, partindo da premissa de que a modelagem pode auxiliar na reprodução de cenários que sirvam de previsões futuras. O presente trabalho objetiva simular a vazão na parte alta da bacia hidrográfica do Ribeirão Cafezal, situado nos municípios de Rolândia, Cambé e Londrina, Paraná, por meio do modelo espaço-temporal SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). O modelo necessita da caracterização cartográfica da área de estudo, que abrange os dados de uso e cobertura do solo, pedologia e topografia, bem como as informações climatológicas de precipitação, vento, umidade, temperatura e radiação solar. As etapas metodológicas consistiram na: 1 - Obtenção dos dados e entrada no banco de dados do SWAT; 2 - Definição das sub-bacias e das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU); 3 - Análise de sensibilidade; 4 - Calibração do modelo; 5 - Simulação e 6 - Validação do modelo. Através desta metodologia os resultados diários de vazão simulada no ano de 2004 foram calibrados e comparados com a vazão observada em uma estação fluviométrica da ANA (Agência Nacional das Águas), localizada no exutório da bacia estudada. Obteve-se assim a soma dos quadrados dos resíduos de 0,17 e uma boa representação da tendência geral da vazão. Posteriormente, com os parâmetros calibrados, validou-se os dados com o ano de 2005, logrando o resultado da soma dos quadrados dos resíduos de 0,46, não sendo esses resultados muito satisfatórios para o período de validação. De uma forma geral, e possuindo informações qualificadas disponíveis o SWAT se mostrou uma ferramenta muito útil para a simulação e gestão dos recursos hídricos.

**Palavras-Chaves:** SWAT, modelagem ambiental, Ribeirão Cafezal, Dados climáticos.

## ABSTRACT

KATAOKA, F. E. **SWAT tool for hydrological modeling in the area of the Ribeirão Cafezal basin in Londrina – PR.** 2017. 64p. Monograph (Graduation) – Degree in Environmental Engineering, Federal Technological University of Paraná. Londrina, 2017.

The modeling of environmental studies encompasses several areas of the natural sciences, with emphasis on water resources, since the same refers to the simulation of hydrosedimentological events that have relationships with soil associated with waterproofing of soils. Thus, information that is attributed to accuracy in the decision-making processes are very important subsidies, based on the premise that a modeling can aid in the reproduction of scenarios that serve as future predictions. The present work aims to simulate a flow in the upper part of the Ribeirão Cafezal basin, located in the cities of Rolândia, Cambé and Londrina, Paraná, through the SWAT (Soil and Water Assessment Tool). The model requires the cartographic characterization of the study area, which includes data on land use and cover, pedology and topography, as well as climatological information on precipitation, wind, humidity, temperature and solar radiation. The methodological steps consisted of: 1 - Data acquisition and entry without SWAT database; 2 - Definition of the sub-basins and the Hydrological Response Units (HRU); 3 - Sensitivity analysis; 4 - Calibration of the model; 5 - Simulation and 6 - Validation of the model. Using the simulated void results methodology in the year 2004, they were calibrated and compared to the flow rate observed in a fluvimetric station of the ANA (Agência Nacional das Águas), located non-exuded in the studied basin, thus obtaining a sum of the squares of the residuals of 0,17 and a good representation of the general tendency of the flow. Subsequently with the calibrated parameters, the data were validated with the year 2005, obtaining the result of the sum of the squares of the residues of 0.46, these results are not very satisfactory for the period of validity. In general, and with available information available, it is possible to visualize a very useful tool for simulation and management of water resources.

**Keywords:** SWAT, Environmental modeling, Ribeirão Cafezal, Weather data.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da metodologia utilizada para geração do banco de dados e simulações do modelo SWAT na interface SIG.....	17
Figura 2 - Valores dos principais componentes do balanço hídrico. ....	19
Figura 3 - Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN. ....	23
Figura 4 - Bacia do Cafezal que abrange os municípios de Rolândia, Cambé e Londrina. ....	28
Figura 5 - Área de estudo.....	30
Figura 6 - Mapa de altimetria da região.....	41
Figura 7 - Série temporal de umidade. ....	42
Figura 8 - Série temporal de radiação solar. ....	43
Figura 9 - Série temporal de vento. ....	43
Figura 10 - Série temporal de temperatura.....	44
Figura 11 - Série temporal de precipitação.....	44
Figura 12 - Sub-bacias geradas pelo SWAT. ....	45
Figura 13 - Carta de solos da área de estudo. ....	46
Figura 14 - Gráfico vazão observada e simulada gerada pelo SWAT-QGis.....	47
Figura 15 - Gráfico vazão observada e simulada em barra.....	47
Figura 16 - Balanço hídrico simulado pelo SWAT. ....	48
Figura 17 - Mapa de Uso e ocupação do solo.....	49
Figura 18 - Gráfico de valores de vazão observados e estimados pelo SWAT-CUP. ....	52
Figura 19 - Análise de sensibilidade dos parâmetros calibrados.....	53
Figura 20 - Gráfico de valores de vazão simulada e observada da validação. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de CN para bacias urbanas e sub-bacia. ....	21
Tabela 2 - Grupo de Solos Hidrológicos da Bacia do Cafezal.....	32
Tabela 3 - Parâmetros gerados para entrada de dados de solo no SWAT. ....	33
Tabela 4 - Parâmetros de solo utilizados. ....	34
Tabela 5 - Parâmetros e intervalos utilizados na análise de sensibilidade.....	39
Tabela 6 - Parâmetros e valores sugeridos pelo SWAT CUP para melhor calibração...50	



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional das Águas  
CAD – *Computer Aided Design*  
CN2 – Curva Número para a condição de umidade antecedente II  
DEM – *Digital Elevation Map*  
Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
ESCO – Fator de compensação de evaporação do solo  
ETA – Estação de Tratamento de Água  
GW\_REVAP – Coeficiente “revap” de água subterrânea  
GWQMN – Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície  
HRU – *Hydrologic Response Unit*  
HRU\_SLP – Declividade média (m/m)  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INMET – Instituto Nacional de Meteorologia  
ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná  
MDE – Modelo Digital de Elevação  
MTE – Ministério do Trabalho e Emprego  
MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*  
NRCS – *Natural Resources Conservation Service*  
OV\_N – Coeficiente de Manning para superfície do solo  
REVAPMN – Profundidade em aquífero profundo para que haja “revap”  
Sanepar – Companhia de Saneamento do Paraná  
SCS-CN *Soil Conservation Service – Curve Number*  
SIG – Sistema de Informação Geográfica  
SIRGAS – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas  
SLSUBBSN – Comprimento da declividade média (m)  
SOL\_AWC – Capacidade de água disponível no solo (mm/h)  
SQR – Soma dos Quadrados dos Resíduos  
SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*  
SUFI-2 – *Sequential Uncertainty Fitting, version 2*  
SURLAG – Coeficiente de retardo do escoamento superficial (dias)

SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

SWRRB – *Simulator for Water Resources in Rural Basins*

TOPODATA – Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil

USDA-ARS – *United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service*

USGS – *United States Geological Survey*

UTM – Universal Transversa de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	14
3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	15
3.2.1 MODELO SWAT.....	15
3.2.2 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA HIDROLOGIA .....	18
3.2.3 MODELO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL .....	19
3.2.4 EQUAÇÃO DE PENMAN MONTEITH .....	24
3.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	25
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.2 ENTRADA DE DADOS .....	28
4.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO .....	29
4.2.2 SÉRIES DE VAZÃO .....	29
4.2.3 GEOLOGIA E SOLOS DA REGIÃO.....	30
4.2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS .....	31
4.2.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO .....	35
4.2.6 ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS.....	35
4.3 EXECUÇÃO DO MODELO SWAT.....	35
4.3.1 DELINEAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	36
4.3.2 CRIAÇÃO DAS HRUs .....	36
4.3.3 DADOS CLIMÁTICOS.....	37
4.3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO .....	37
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
5.1 MDE GERADO .....	41
5.2 PROCESSAMENTO DE DADOS.....	42
5.3 SIMULAÇÃO .....	46
5.4 CALIBRAÇÃO .....	49
5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	53
5.6 VALIDAÇÃO .....	54
<b>6 CONCLUSÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>58</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A modelagem ambiental proporciona auxílio no entendimento das mudanças ambientais, a fim de prevê-las em sequências de tempo e espaço (MOORE, 1993). Dessa forma a criação de modelos matemáticos tem como propósito auxiliar na visualização dos comportamentos dos sistemas ambientais, representando um determinado fenômeno em um ambiente controlado e eficiente (ARAL, 2010).

Os modelos podem ser aproximações altamente subjetivas, no sentido de não incluírem todas as observações ou medidas associadas ao fenômeno, mas, como tais, são valiosos por permitirem análises e estudos dos aspectos fundamentais da realidade. Para uma gestão adequada dos recursos naturais é imprescindível a utilização de bases de dados confiáveis, os quais, por sua vez, são frequentemente insuficientes ou inexistentes (HAGGET e CHORLEY, 1967; CASTRO, 2013).

Deste modo, os modelos matemáticos modernos voltados para a área ambiental, foram desenvolvidos para sustentar o entendimento dos complexos processos e conceitos de aplicações, como a Hidrologia, Climatologia, Topografia, Geologia e Pedologia (GHORABA, 2015).

Na perspectiva da Hidrologia, a simulação é utilizada normalmente para gerar hidrógrafos de escoamento a partir de dados climáticos e das propriedades físicas da bacia de drenagem (CHRISTOFOLETTI, 1999). Refere-se ainda, à simulação de eventos hidrográficos que possam ter relação com riscos de inundação associados à impermeabilização dos solos (XU, 2002).

Diante disso, empregou-se neste trabalho o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) como modelo a ser aplicado na bacia de estudo, com intuito de analisar a eficácia do mesmo em simular os principais componentes do balanço hídrico, com enfoque em particular a simulação da vazão no exutório da área de estudo, em relação aos dados apresentadas pela Agência Nacional das Águas (ANA). Os resultados podem auxiliar no monitoramento desta bacia, visto que a bacia do Cafezal abriga o ribeirão Cafezal, um dos principais mananciais de abastecimento de água de Londrina e Cambé, segundo a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR, 2011).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicar o modelo *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT) para simulação de dados hidrológicos com ênfase no estudo de vazões na região de Londrina, em parte da sub-bacia do Ribeirão Cafezal, por meio de dados topográficos e climatológicos.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o meio físico com dados de uso do solo, tipos de solos (pedologia), altimetria (modelo do terreno a ser estudado), para compor um banco de dados para aplicação do modelo SWAT;
- Calibrar o modelo SWAT com séries de dados do ano de 2004 para a área de estudo da bacia do Ribeirão Cafezal e seus afluentes, até a estação fluviométrica da Agência Nacional das Águas (ANA), localizada nas coordenadas 23° 21' 28.08" S e 51° 11' 38.039" W situada no ribeirão Cafezal. Com ênfase nos parâmetros CN2, SOL\_AWC, SURLAG, ESCO, GWQMN, GW\_REVAP, REVAPMN, HRU\_SLP, OV\_N, SLSUBBSN, que mais influenciam no diagnóstico da vazão;
- Comparar os resultados de vazão (hidrograma) gerados pelo SWAT com as medidas observadas pela estação fluviométrica da ANA, a fim de validá-los, com as séries de dados do ano de 2005.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS

Bacias hidrográficas são definidas como áreas de captação natural da água da precipitação que fazem convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. São compostas basicamente por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar um leito único no exutório (SILVEIRA, 2009).

Segundo Silveira (2009), as bacias hidrográficas também podem ser consideradas como um sistema físico, onde a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório. Ainda se considera como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também infiltrados mais profundamente nos solos. Em um evento isolado pode-se desconsiderar essas perdas e realizar a análise da transformação da chuva em vazão feita pela bacia, em que são representados o hidrograma (saída) e o hietograma (entrada).

As bacias hidrográficas incorporam uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nelas desenvolvidas uma vez que, mudanças significativas em qualquer dessas unidades, podem gerar alterações, efeitos e impactos a jusante e nos fluxos energéticos de saída (GUERRA e CUNHA, 1996).

Guerra e Cunha (1996) também explicam que as sociedades mais bem estruturadas utilizam as bacias hidrográficas como unidades de planejamento e gerenciamento, realizando análises de usos e interesses pela água garantindo sua qualidade e quantidade.

Dessa forma Yassuda (1993) aponta que a bacia hidrográfica é o palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural.

## 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Os modelos hidrológicos são ferramentas eficazes para o planejamento e gestão do uso sustentável dos recursos hídricos, a fim de atender diversas demandas (ABBASPOUR et al., 2015). Desta forma, um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície ou subsuperfície terrestre (RENNÓ e SOARES, 2000).

De acordo com a grandeza espacial das bacias hidrográficas, os modelos hidrológicos podem ser classificados em categorias direcionadas para pequenas, médias e grandes bacias (CHRISTOFOLLETTI, 1999).

Rennó e Soares (2000) classificam os modelos sob diferentes aspectos. Normalmente, os modelos recebem classificação de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de como será a representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Atualmente existem diversos modelos hidrológicos para atender as diferentes demandas, contudo, a escolha do modelo mais eficaz deve ser direcionada de acordo com o objetivo do estudo e da modelagem em si. Devia et al. (2015) afirmam que o modelo mais adequado é aquele que fornece resultados mais próximos da realidade simplificando parâmetros e reduzindo a complexidade.

### 3.2.1 MODELO SWAT

O modelo de “Ferramenta de Avaliação de Solo e Água” ou *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo desenvolvido pela *USDA Agricultural Research Service* (USDA-ARS) e a *Texas A&M AgriLife Research*, como parte do *The Texas A&M University System*. Desenvolvido na década de 1990 e baseado no modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB), que foi originalmente designado para auxiliar a gestão das águas e movimentação dos sedimentos nas bacias rurais dos Estados Unidos (GASSMAN et al., 2007).

O SWAT é um modelo de escala de bacia hidrográfica que é executado em passos de tempo diários. Projetado para prever os impactos de práticas de manejo de solos e água, produção de sedimentos e agroquímicos nas bacias hidrográficas (ARNOLD,

2012), desde a sua criação o SWAT vem sofrendo contínuos aprimoramentos e expansões de suas capacidades de processamento, sendo capaz também de realizar simulações contínuas por grandes períodos de tempos.

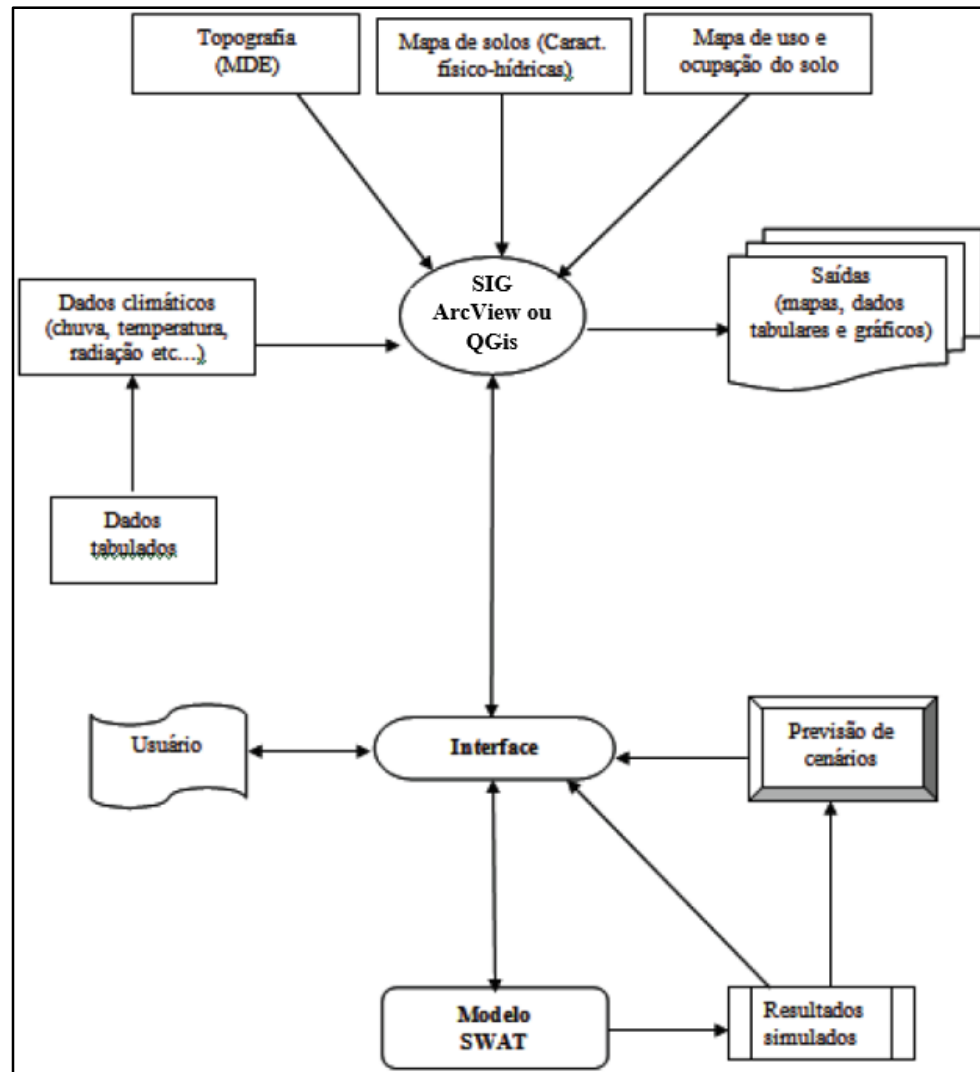
Segundo Rennó e Soares (2000) a discretização das bacias hidrográficas possuem dois tipos de abordagens, a primeira divisão denominada de objeto, definido como modelos que utilizam a divisão da bacia em sub-bacia, em base dos canais naturais e nos caminhos de escoamento da bacia, assim denominados de modelos semidistribuídos. A segunda discretização é fundamentada na divisão do espaço em campos contínuos, dessa forma se estrutura uma grade regular, em que cada campo corresponde a uma célula, desta maneira proporciona-se um maior nível de detalhamento.

O SWAT caracteriza-se como um modelo de escala de bacia hidrográfica, semidistribuído e contínuo no tempo, por apresentar características ditas no parágrafo anterior.

Os processos são descritos com fundamentação física ao invés de utilizar equações de regressão para a descrição das relações das variáveis de entrada e saída. O modelo necessita de dados específicos sobre o clima, propriedades do solo, topografia e vegetação, como pode ser observada na Figura 1. Os processos físicos associados à movimentação hídrica, movimentação sedimentar, crescimento da colheita e ciclo de nutrientes são diretamente moldados pelo modelo SWAT usando os dados de entrada (NEITSCH et al., 2011).



**Figura 1 - Diagrama da metodologia utilizada para geração do banco de dados e simulações do modelo SWAT na interface SIG**



Fonte 1 - Adaptado de Marchioro (2008)

Segundo o manual do SWAT (NEITSCH et al., 2011), o modelo possui a capacidade de realizar simulações de escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, e subterrâneo, evapotranspiração, neve e fluxo de rede 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. Ressalta-se que não é necessário trabalhar com todas essas abordagens para utilizar o modelo.

Ghoraba (2015), por exemplo aplicou o SWAT para modelar e simular a vazão, estabelecer o balanço hídrico e estimar o volume de entrada mensal na barragem de Symli (Paquistão), auxiliando na gestão do reservatório. Castro (2013) utilizou o modelo

para avaliar a sua aplicabilidade em uma bacia agrícola, com ênfase na parte sedimentológica.

Embora o SWAT possa realizar diversas simulações, a equação de balanço hídrico é a força motora relacionada a bacia hidrográfica.

Segundo NEITSCH (2011) o SWAT simula os processos hidrográficos em duas fases: a primeira é a fase do terreno do ciclo hidrológico, que controla a quantidade de água, sedimento, nutriente, e descarga de pesticidas no canal principal de cada sub-bacia. A segunda divisão é a fase do itinerário do ciclo hidrológico, que pode ser definida como a movimentação da água e sedimentos pela rede de canais da bacia hidrográfica até a descarga.

O SWAT utiliza a Equação Universal de Perda de Solo Modificada – MUSLE (WILLIAMS, 1995) para estimar a produção de sedimentos, levando em consideração a força do escoamento nas vertentes e no canal fluvial. Para a simulação do volume e da velocidade da água no canal, o modelo SWAT utiliza a equação de Manning's e o tempo de propagação é computado pela divisão do comprimento do canal pela velocidade (NEITSCH et al., 2005).

### 3.2.2 FUNDAMENTAÇÃO MATEMÁTICA DA HIDROLOGIA

A equação hidrológica representa a quantificação da água presente nas fases do ciclo para um determinado intervalo de tempo escolhido (FREIRE e OMENA, 2005). O SWAT se baseia na equação do balanço hidrológico, que pode ser determinada quantitativamente sob a forma de uma relação matemática (Eq. 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

As variáveis da equação são representadas como:

$SW_t$  Quantidade de água no solo da camada da zona radicular simulada no tempo  $t$  (mm);

$SW_0$  Quantidade inicial de água no solo no dia  $i$  (mm);

$t$  Duração do ciclo hidrológico simulado (dias);

$R_{day}$  Quantidade de água precipitada no dia  $i$  (mm);

$Q_{surf}$  Quantidade de escoamento superficial no dia  $i$  (mm);

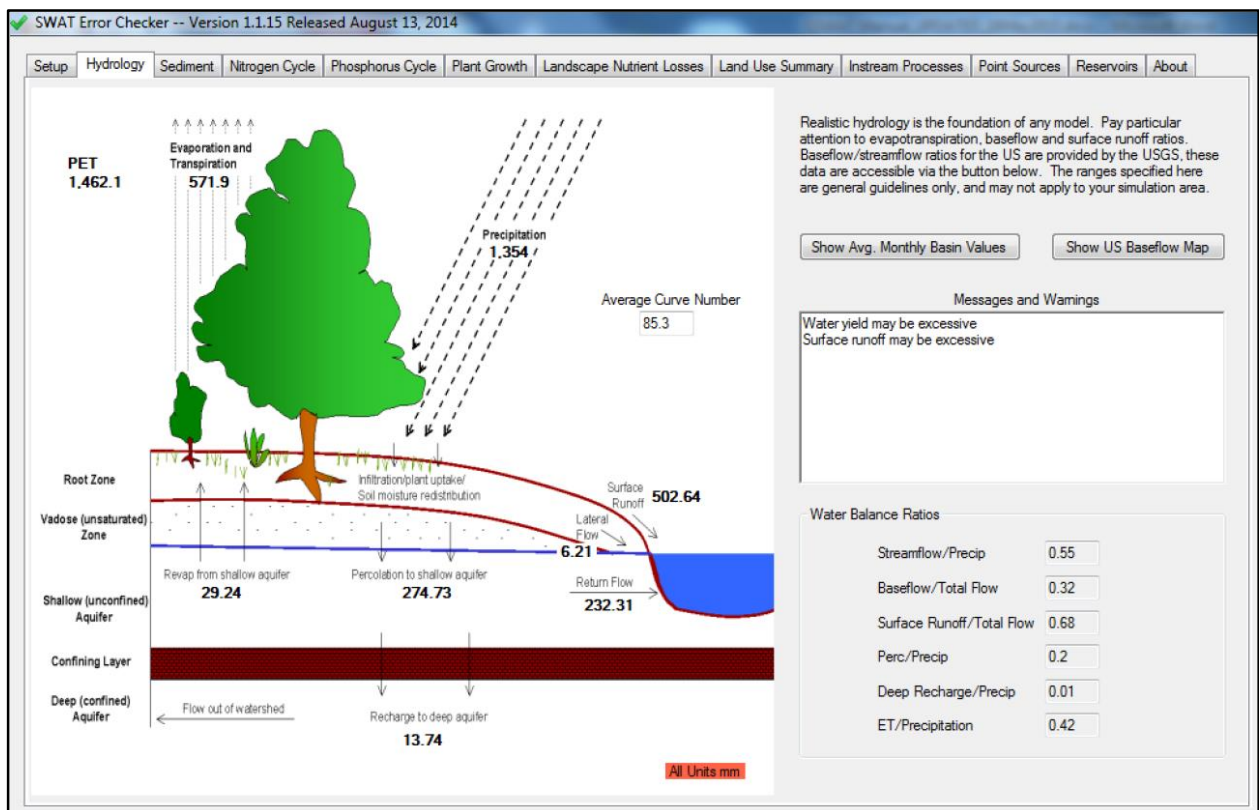
$E_a$  Quantidade de água evapotranspirada no dia  $i$  (mm);

$w_{seep}$  Quantidade de água que percola da camada simulada para a camada inferior, no dia  $i$  (mm);

$Q_{gw}$  Quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia  $i$  devido ao escoamento sub-superficial (mm).

A Figura 2 apresenta os principais elementos do balanço hídrico da bacia, calculadas com o auxílio da ferramenta *SWAT Check*. Essas são informações geradas para auxiliar no entendimento do sistema, estabelecido pelo próprio modelo. Os valores representados na Figura 2 são referentes ao exemplo disponibilizado pelo manual do modelo (YIHUN et al., 2016).

**Figura 2 - Valores dos principais componentes do balanço hídrico.**



Fonte 2 - SWAT manual (2016).

### 3.2.3 MODELO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O SWAT agrega duas metodologias para realizar a simulação do escoamento superficial, sendo eles o: SCS-CN (*Soil Conservation Service – Curve Number*) referido também apenas como método Curva-Número, e o procedimento de infiltração Green &

Ampt. O método de Green & Ampt requer o fornecimento de dados sub-diários de precipitação.

Na Hidrologia o método Curva Número (CN) é utilizado para determinar a quantidade de chuva que infiltra no solo e conseqüentemente no aquífero, e o quanto de água escoar sobre a superfície terrestre em função do uso e ocupação do solo (ZHAN e HUANG, 2004).

O método SCS - CN é um dos mais utilizados para o processamento do escoamento superficial de eventos chuvosos. Essa aproximação envolve o uso simples de formulas empíricas e tabelas de valores (SHERESTHA, 2003). Sendo definida pelas equações 2, 3 e 4.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

Algumas variáveis já foram descritas anteriormente na Eq. 1, assim as demais incógnitas são definidas como:

$I_a$  são as perdas iniciais referentes à altura de chuva precipitada, até o início do escoamento superficial (mm);

$S$  é o parâmetro de retenção da água (mm).

O valor de  $S$ , pode ser encontrado pela fórmula da Equação 3.

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

O CN é relacionado com a cobertura, tipo e condição de umidade do solo, sendo ele um parâmetro adimensional e seus valores encontram-se de acordo com os padrões de infiltração do mesmo, como mostrado na Tabela 1 de valores de CN para bacias urbanas e sub-urbanas, observa-se que o valor de CN é relacionado também com o grupo de solo.

**Tabela 1 - Valores de CN para bacias urbanas e sub-bacia.**

Utilização ou cobertura do solo		Grupo de solos			
		A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo		72	81	88	91
com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Florestas: cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições					
Com relva em mais de 75% da área		39	61	74	80
Com relva de 50% a 75% da área		49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93
Zonas residências					
Lotes de (m <sup>2</sup> )	% média impermeável				
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc		98	98	98	98
Arruamento e estradas					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

**Fonte - Tucci (1993).**

Por fim obtém-se o valor de  $I_a$  com a fórmula da Equação 4:

$$I_a = \lambda S \quad (4)$$

Em que  $\lambda$  é a constante de proporcionalidade da abstração inicial relacionado à capacidade máxima de água dos solos. Comumente utilizada o valor de 0,2. O SCS utiliza os dados obtidos de diversas pequenas bacias hidrográficas em diferentes localizações geográficas dos Estados Unidos e outros países ao redor do globo, dos quais 50% dos pares de dados estavam dentro dos limites de  $0,095 \leq \lambda \leq 0,38$ , assim adotando um valor padrão de  $\lambda = 0,2$  recomendado para um projeto para a taxa de abstração inicial (PONCE E HAWKINS, 1996; SUBRAMANYA, 2013).

O método SCS-CN define três tipos de condições de umidades antecedentes: I representa a umidade do solo no ponto de murcha, sendo também o menor valor assumido em condições secas; II representação da umidade média no solo e III representa a umidade do solo na sua capacidade de campo.

Os números da curva para as condições de umidade  $CN_1$  e  $CN_3$  são calculadas com as equações 5 e 6.

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

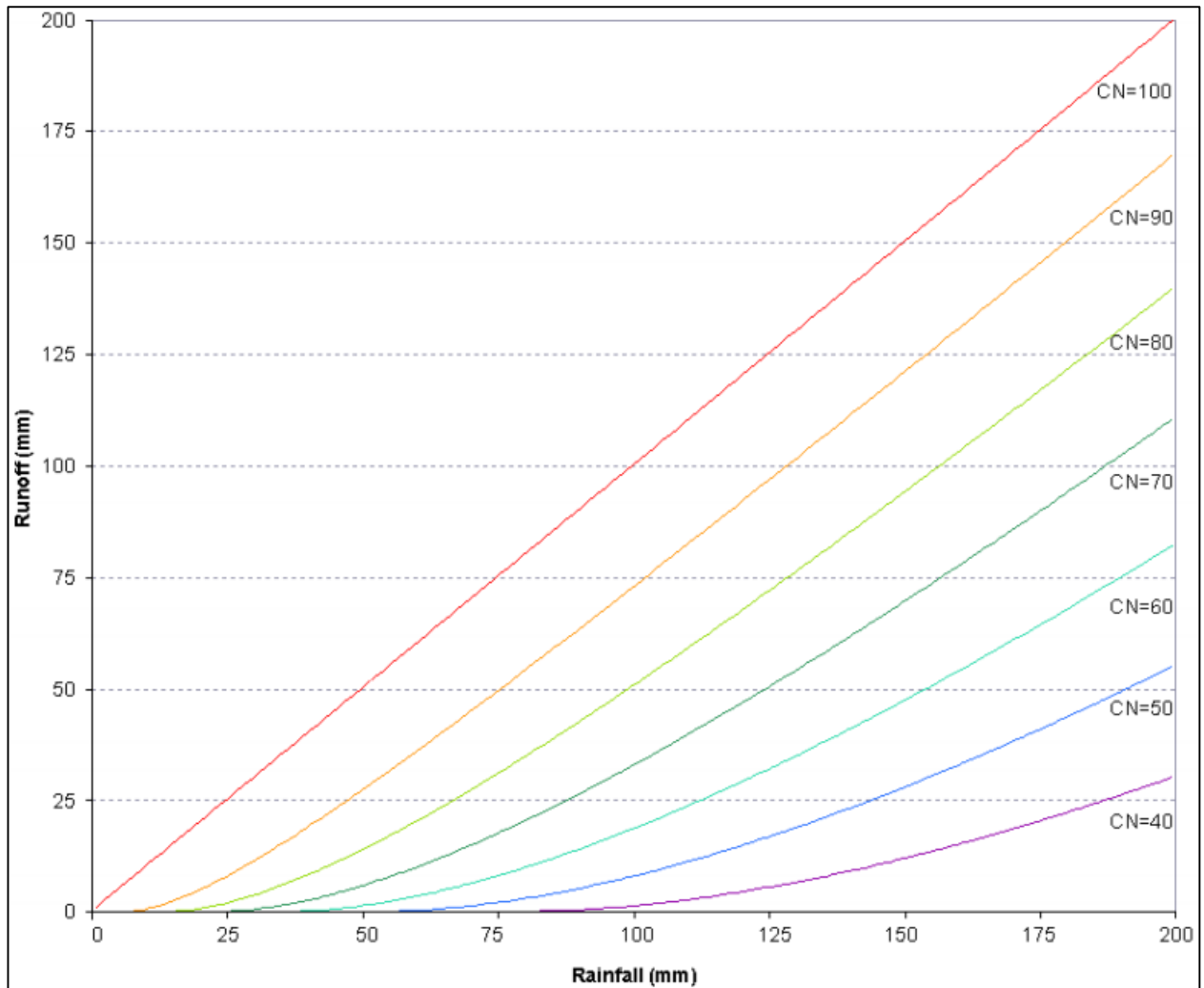
$$CN_3 = CN_2 * \exp(0,00673 * (100 - CN_2)) \quad (6)$$

Em que  $CN_1$  é o número de curva da condição de umidade I,  $CN_2$  é o número de curva da condição de umidade II, propostos pelos valores de CN da Tabela 1 e  $CN_3$  é o número de curva da condição de umidade III (NEITSCH et al., 2011).

A *Natural Resources Conservation Service* (NRCS) classifica os solos em quatro grupos hidrológicos, baseados nas características de infiltração do mesmo. Segundo Sartori (2005) a metodologia do SCS-CN reúne os solos dos Estados Unidos em quatro grandes grupos, relacionando sua capacidade de infiltração e transmissão de escoamento, desta forma é atribuído uma letra, A, B, C e D, as quais representam o acréscimo do escoamento superficial e conseqüentemente a diminuição da taxa de infiltração de um grupo para outro. As avaliações realizadas mediante as classificações dos solos estado unidenses podem ser aplicadas também a solos de diferentes localidades do mundo, por meio de análises texturais do mesmo.

Gonçalves (2007) determina que os valores do CN retratam as condições do solo, variando desde a cobertura muito permeável (limite inferior = 0) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior, valor = 100). Observa-se, contudo, a existência de condições teóricas extremas de S, ora tendendo ao infinito, ora sendo nulo, como mostrado na Figura 3.

**Figura 3 - Relação de escoamento superficial e chuva no método SCS-CN.**



Fonte 3 - Neitsch et al (2009).

As características dos grupos hidrológicos do solo, apresentadas pelo SCS, são (SARTORI, 2005):

**Grupo A:** Solos de baixo potencial de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme de escoamento e alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo principalmente de areia ou cascalho, ambos profundos e excessivamente drenados. Índice mínimo de infiltração:  $>7,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Grupo B:** Solos com taxa moderada de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a grossa. Índice mínimo de infiltração:  $3,81 - 7,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ .

**Grupo C:** Solos com baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água através das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Índice mínimo de infiltração: 1,27 – 3,81 mm · h<sup>-1</sup>.

**Grupo D:** Alto potencial de escoamento, os solos possuem taxa de infiltração baixa, quando completamente molhados, caracterizados por solos argilosos com alto potencial de expansão. Contém nesse grupo solos com grande permanência de lençol freático elevado, solos com argila dura ou camadas de argila próxima da superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Índice mínimo de infiltração: < 1,27 mm · h<sup>-1</sup>.

### 3.2.4 EQUAÇÃO DE PENMAN MONTEITH

A equação de Penman-Monteith (7) combina componentes que são responsáveis pela energia necessária para sustentar a evaporação, a força do mecanismo necessária para remover o vapor de água e termos de resistência da aerodinâmica e superfícies (NEITSCH et al., 2011).

Dessa forma obtêm-se a equação de Penman Monteith através das representações do fluxo de calor latente e sensível a partir da superfície úmida associada a equação do balanço de energia da superfície (COLLICHON & TASSI, 2010). Deve apresentar os valores de radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura.

$$\lambda E = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \rho_{air} * c_p * \left( \frac{e_z^0 - e_z}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma * \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (7)$$

Em que:

$\lambda E$  Fluxo de calor latente (MJ · m<sup>-2</sup> · dia<sup>-1</sup>);

$E$  Profundidade da taxa de evaporação (mm · dia<sup>-1</sup>);

$\Delta$  Inclinação da curva pressão de saturação do vapor pela temperatura;

$H_{net}$  Saldo da radiação (MJ · m<sup>-2</sup>);

$G$  Densidade do fluxo de calor para o solo (MJ · m<sup>-2</sup> · dia<sup>-1</sup>);

$\rho_{air}$  Densidade do ar (Kg · m<sup>-3</sup>);

$c_p$  Calor específico a temperatura constante (MJ · m<sup>-2</sup> · dia<sup>-1</sup>);

$e_z^0$  Pressão de saturação de vapor do ar na altura z (KPa);

$e_z$  Pressão do vapor da água na altura z (KPa);



$\gamma$  Constante psicrométrica ( $\text{KPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$r_a$  Resistência da difusão da camada do ar;

$r_c$  Resistência a copa das plantas.

Segundo Tucci (1998), os métodos mais utilizados para estimar a evapotranspiração potencial são os métodos de Thornthwaite e de Penman Monteith. O método de Thornthwaite possui grandes limitações e às vezes pode subestimar os resultados, é frequentemente empregado por utilizar apenas a variável temperatura. Penman Monteith é mais recomendado, devido a necessidade de mais informações climáticas. Como a variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração não é tão grande, se comparada a da precipitação, esses dados podem ser utilizados de estações que se situam fora da bacia.

### 3.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) incorporam os conceitos de banco de dados relacionais, algoritmos gráficos, interpolação, zoneamento e análise de redes simplificadas (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Há inúmeras definições que podem ser apresentadas para o SIG, dentre elas, o sistema de informação geográfica que é um conjunto integrado de programas (software) especificamente elaborados para serem utilizados com dados geográficos, executando um espectro abrangente de tarefas no manuseio dos dados. Essas tarefas incluem a entrada, o armazenamento, a recuperação e os produtos resultantes do manejo dos dados, em adição à ampla variedade de processos descritivos e analíticos (CALKINS e TOMLINSON, 1977 *apud* CHRISTOFOLETTI, 1999).

Tal sistema usado inicialmente apenas para a elaboração de mapas, pode ser também empregado para utilização em outros campos, como na agricultura, controle florestal, gestão de bacias hidrográficas, meio ambiente, geologia, dentre outros (PITZ e FIGUEIREDO, 2001).

A combinação de várias informações, por meio de algoritmos de manipulação, para gerar mapeamentos derivados, e por fim consultar, recuperar, visualizar e plotar o conteúdo da base de dados geocodificados, além de que os dados tratados em SIGs, incluem: imagens de satélite, modelos numéricos de terreno, mapas temáticos, redes e dados tubulares (CÂMARA, 2016).

A característica básica e geral de um SIG é a capacidade de tratar as relações espaciais entre os objetos geográficos, denotadas por *topologia*, como exemplos: vizinhança, proximidade, pertinência. Armazenar a topologia de um dado georreferenciado é uma das características básicas que fazem um SIG se distinguir de um sistema *Computer Aided Design* (CAD). A outra diferença fundamental é a capacidade de tratar as diversas projeções cartográficas. Para aplicações em análise geográfica e redes, o armazenamento da topologia permite o desenvolvimento de consultas a um banco de dados espacial, que não seriam possíveis de outras maneiras (CÂMARA, 2016).

Quando os modelos utilizam mapas como parte de seu processamento, normalmente são executados de forma acoplada a um SIG. Este é o caso do modelo SWAT.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

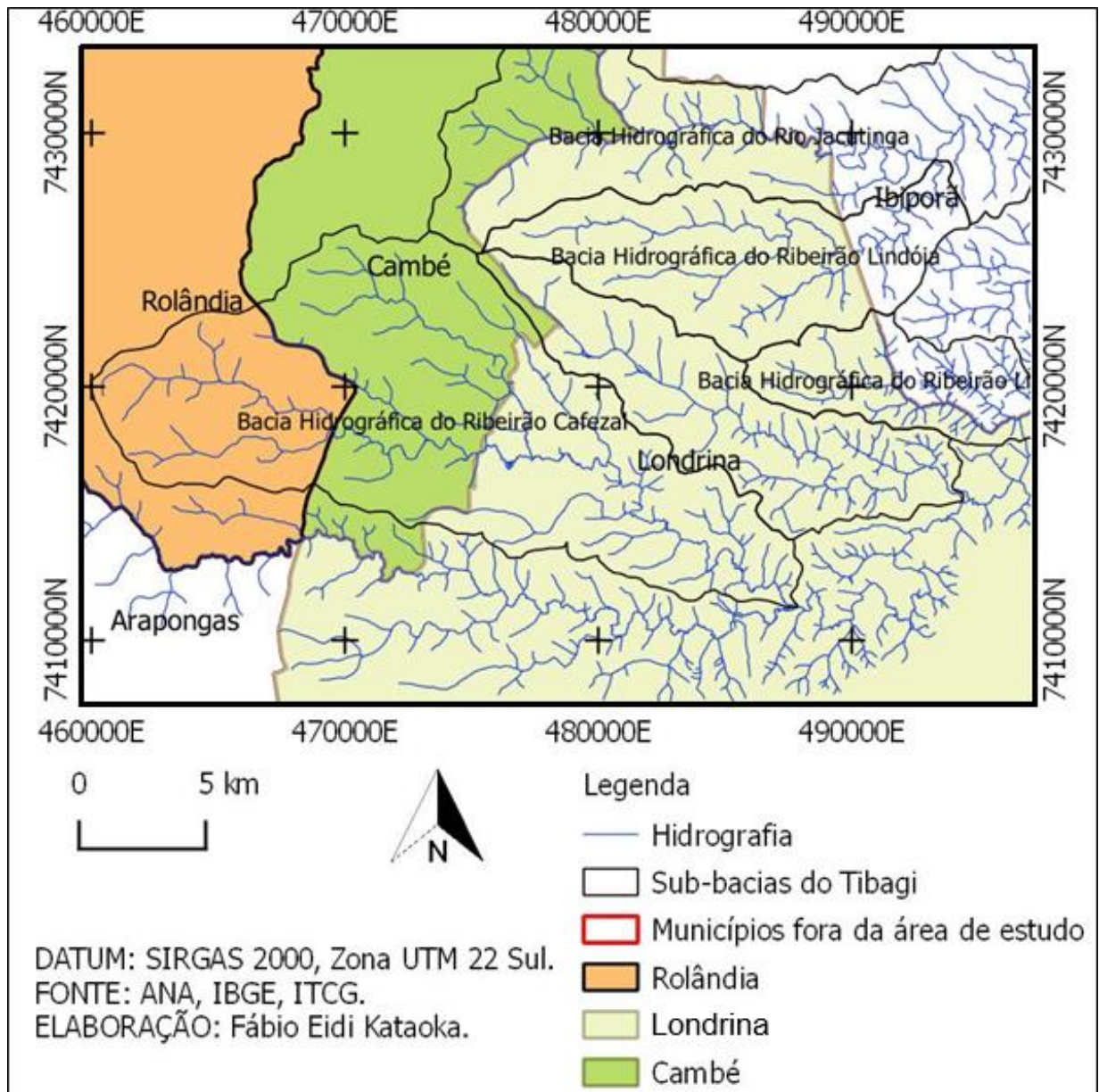
O Paraná é drenado por várias bacias hidrográficas. As principais como a do Vale do Ribeira e Litorânea, drenam para o Oceano Atlântico e as dos rios Paranapanema, Tibagi, Ivaí, Iguaçu, Cinzas, Itararé, Piquiri e Pirapó drenam para a bacia hidrográfica do Paraná (STIPP e OLIVEIRA, 2004).

O município de Londrina situado ao norte do Estado do Paraná nas coordenadas centrais 23° 17' 34" S 51° 10' 24" W, possui um perímetro urbano de 245,52 Km<sup>2</sup> e ocupa juntamente o interior das zonas das microbacias. Essas microbacias são divididas para o abastecimento público de água e a agricultura que envolve grande parte do território ao redor da cidade (PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE LONDRINA – PR, 2009).

Segundo Silva (2006), a bacia do ribeirão Cafezal abrange os municípios de Londrina, Cambé e Rolândia (Figura 4), tendo este último como local de sua nascente, apresenta uma área de 20.621,7 hectares aproximadamente. O sistema hidrográfico da bacia é composto por 23 afluentes diretos, desses são os ribeirões São Domingos, Pedroso, Unda do Salto, Ciclone e Esperança, além de 17 sem denominação notória e 10 afluentes indiretos que estão distribuídos ao longo dos 41 Km de extensão do Ribeirão Cafezal. A bacia é composta por colinas de topos arredondados, vertentes longas, declividade suave, com topografia diferenciando de plana a ondulada, indicado por Pereira Neto (1994), com vales amplos e abertos nas áreas de nascentes, do meio da bacia até à sua foz os rios são mais inseridos, por conseguinte apresentando solos profundos e bem desenvolvidos.

Köppen classifica o clima da região ao tipo Cfa, isto é, clima subtropical úmido, com chuvas em todas as estações, com ocorrência de secas no período de inverno. A temperatura média do mês mais quente é, geralmente, superior a 25,5 °C e a do mês mais frio, inferior a 16,4 °C (PREFEITURA DE LONDRINA, 2017).

**Figura 4 - Bacia do Cafezal que abrange os municípios de Rolândia, Cambé e Londrina.**



#### 4.2 ENTRADA DE DADOS

Tucci (1998) aponta que, a quantidade e a representatividade dos dados para regulagem e verificação dos modelos hidrológicos propriamente ditos são fundamentais para permitir um resultado de qualidade, dessa forma objetivando um resultado confiável ou um somente atrelado aos resultados esperados perante aos dados inseridos.

As variáveis requeridas pelo modelo SWAT são dados diários de precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar, velocidade do vento, umidade

relativa do ar, propriedades físicas do solo, topografia, uso e ocupação do solo ocorrentes na bacia de estudo (NEITSCH et al., 2005), porém, nem sempre os dados climáticos estão encontrados disponíveis em séries longas sem que haja falha em alguns dias.

Assim, uma das etapas de trabalho é a aquisição e organização dos dados de entrada necessários para compor o modelo de acordo com a realidade da bacia analisada, para que a modelagem possa ser realizada de forma consistente.

#### 4.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O Modelo Digital de Elevação ou MDE, foi obtido através do projeto TOPODATA, elaborado a partir da missão *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), cujos dados são disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS). Os dados SRTM para todo o território nacional foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (90 m) para 1 arco-segundo (30 m), pela interpolação da variabilidade espacial dos dados que se condicionam em função da relação dos pesos das amostras às suas distâncias, sendo este método definido como krigagem (VALERIANO e ROSSETTI, 2009).

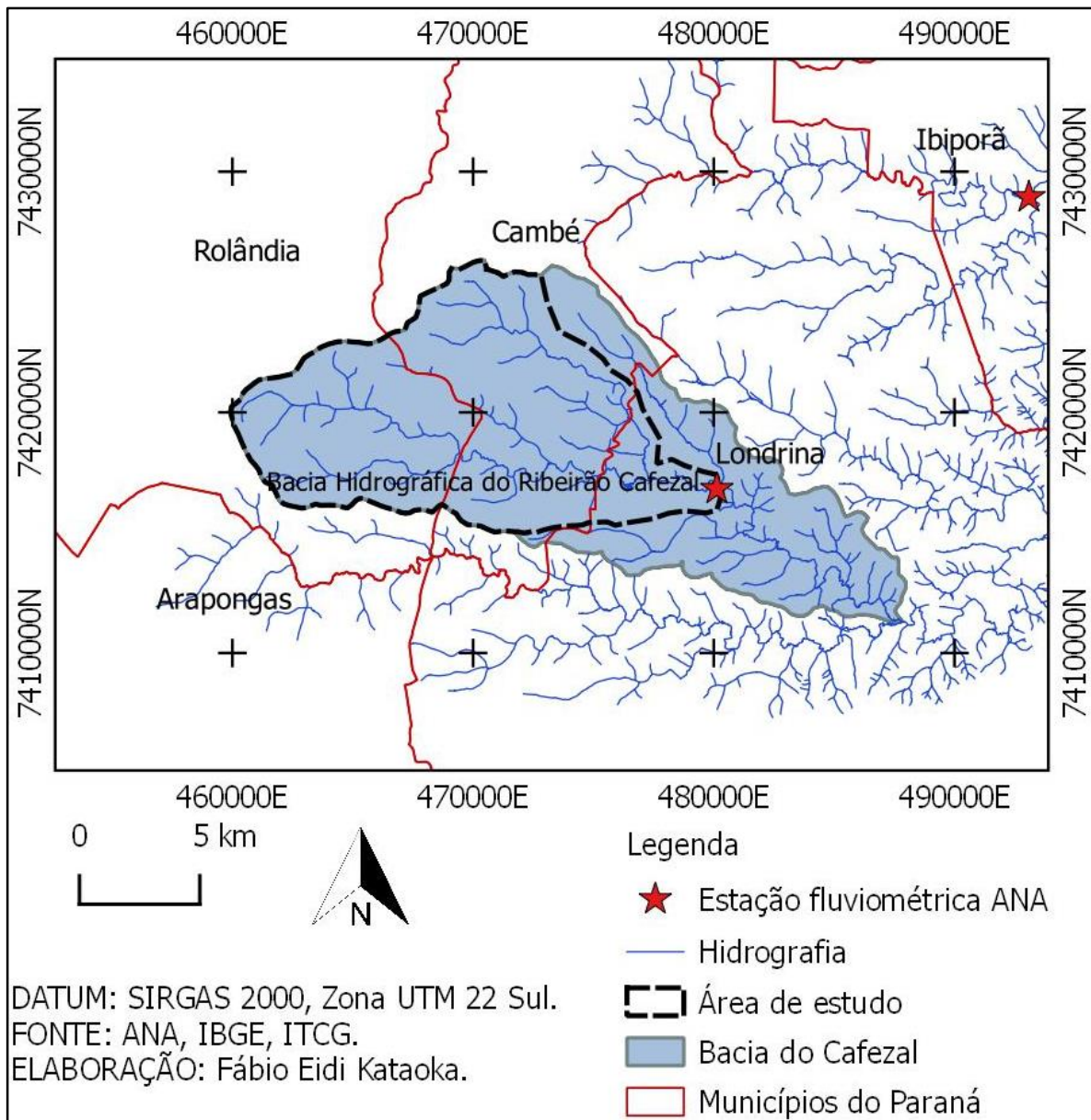
A carta altimétrica por sua vez deve ser configurada para os sistemas de projeção usados pelo SWAT, configurando assim o MDE para a projeção SIRGAS 2000 UTM zona 22 Sul.

Com os dados altimétricos, é possível realizar a geração das sub-bacias, redes de drenagem, declividade da área e as unidades de respostas hidrológicas ou *Hydrologic Response Units* (HRUs). As HRUs são as unidades de ocorrência onde os cálculos hidrológicos são realizados, caracterizando-se pela uniformidade das classes pedológicas e do uso e ocupação do solo, bem como a declividade.

#### 4.2.2 SÉRIES DE VAZÃO

O monitoramento da bacia de estudo é efetuado por uma estação da ANA localizada nas coordenadas 479955E e 7417228N, referenciadas ao sistema SIRGAS 2000, projeção UTM, fuso 22 Sul. A estação possui código 64504591, denominada Londrina MTE ETA Sanepar e foi definida como exutório da área de estudo desse trabalho. A Figura 5, representa a bacia, a estação fluviométrica e a parte definida como área de estudo, cuja área é de 134 km<sup>2</sup> aproximadamente.

**Figura 5 - Área de estudo.**



#### 4.2.3 GEOLOGIA E SOLOS DA REGIÃO

Segundo a Carta geológica apresentada pela Minérios do Paraná S. A. ( 2001), mostra que a bacia é formada por rochas ígneas básicas da Formação Serra Geral, introduzido ao grupo São Bento. Geologicamente é uma região considerada homogênea, caracterizado pela assuidade de lençóis de lava de origem vulcânica (basalto), resultando-se em Latossolos, Argissolos e Nitossolos (EMBRAPA, 2001).

Segundo Silva (2006) a bacia apresenta solos com grande fertilidade e topograficamente favoráveis à utilização agrícola, o que permitiu ocupação acelerada e grande dinamismo na economia local.

#### 4.2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS

A simulação realizada pelo SWAT necessita de uma série de dados de características físicas dos solos para poder executar as simulações hidrológicas. Os parâmetros necessários para a simulação são da tipagem de solo, profundidade das camadas de solo, grupos hidrológicos pertencentes de cada solo, teor de carbono orgânico, areia total, argila, silte e rocha (NEITSCH et al., 2005b ;CASTRO, 2013).

A classificação dos solos hidrológicamente está relacionada com os objetivos de suscetibilidade a erosão e a produção de escoamento. Uma vez definida a finalidade, os solos podem ser classificados de acordo com suas propriedades hidrológicas (SARTORI, 2005).

O presente estudo utilizou a classificação hidrológica de Sartori (2004), que classificou o Latossolo Vermelho Distroférico e o Latossolo Vermelho Eutroférico no grupo A e o Nitossolo Vermelho Eutroférico no grupo B.

A área de estudo não apresenta solos classificados como C e D, por não apresentarem perfis que se enquadram a classificação. A Tabela 2 descreve as características do tipo de solo classificado como A e B.

**Tabela 2 - Grupo de Solos Hidrológicos da Bacia do Cafezal.**

Classe do solo	Grupo Hidrológico	Características do solo
Latossolo vermelho distroférico	A	Solos com baixo potencial de escoamento, contendo alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhado, consistindo principalmente de areias ou cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados (taxa mínima de infiltração: $>7,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ).
Latossolo vermelho eutroférico		
Nitossolo vermelho eutroférico	B	Solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo principalmente de solos moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa (taxa mínima de infiltração: $3,81 - 7,62 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

**Fonte 4 - Sartori (2004) adaptado.**

A partir desses dados, Saxton e Rawls (2006), indicam como gerar outros 12 parâmetros (Tabela 3) por horizonte de solos e grupo hidrológico para serem utilizados no modelo SWAT. Os parâmetros são gerados com auxílio da planilha Excel SWAT\_soil\_generated, que possui funções matemáticas para gerar os valores dos parâmetros através das funções de Pedotransferência, que são as funções preditivas de certas propriedades do solo a partir de suas propriedades, desenvolvido por Narasimhan e Dhanesh (2006). As funções de pedotransferência podem ser definidas como equações ou algoritmos que expressam relação entre as propriedades do solo de difícil obtenção através de dados mais fáceis de se obter (PACHEPSKY e VAN GENUCHTEN, 2011).



**Tabela 3 - Parâmetros gerados para entrada de dados de solo no SWAT.**

<b>Parâmetros gerados</b>	<b>Descrição dos parâmetros</b>
SOL_ZMX	Profundidade máxima do enraizamento do perfil do solo (mm).
ANION_EXCL	Fração de porosidade.
SOL_CRK	Potencial ou volume máximo de fissura do perfil do solo, expresso em fração do volume total do solo.
TEXTURE	Textura da camada do solo.
SOL_Z	Profundidade da camada de solo (mm).
SOL_BD	Densidade do solo úmido ( $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ou $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada dos solos ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ).
SOL_CBN	Teor de carbono orgânico.
SOL_ALB	Albedo do solo úmido.
USLE_K	Equalização da erosão do solo.
SOL_EC	Condutividade elétrica ( $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

**Fonte 5 – SWAT documentation (2016).**

Os valores de granulometria, horizontes e carbono orgânico foram obtidos por meio do Sistema Sisolos (2017), e estão listados na Tabela 4, porém os dados de rocha presente nos solos, não tiveram valores agregados pelo fato de os mesmos não apresentarem fragmentos rochosos em sua composição. A necessidade da obtenção dos dados de análises químicas e de textura do solo se deve para à obtenção de uma

modelagem mais precisa, porém a simulação pode ser executada sem a entrada desses dados.

**Tabela 4 - Parâmetros de solo utilizados.**

Solo	Grupo Hidrológico	Profundidade (cm)	Carbono orgânico (%)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
Nitossolo vermelho eutroférico	B	0-5	19,30	56,00	30,70	13,30
		5-10	15,36	58,00	29,75	12,25
		10-20	13,86	66,00	21,90	12,10
		20-30	13,26	66,00	23,05	10,95
		60-80	5,72	78,00	15,75	6,25
Latossolo vermelho distroférico	A	0-5	10,96	66,00	26,15	7,85
		5-10	27,20	70,00	20,25	9,75
		10-20	21,00	64,00	26,45	9,55
		20-30	17,31	70,00	21,25	8,75
		60-80	26,56	64,00	26,50	9,50
Latossolo vermelho eutroférico	A	0-15	23,80	83,00	13,00	4,00
		15-46	12,70	81,00	16,00	3,00
		48-68	8,00	82,00	14,00	4,00
		68-135	9,40	81,00	15,00	4,00
		135-350	4,20	82,00	15,00	3,00

**Fonte 6 - Autoria própria.**

Posteriormente a compilação dos dados, foram verificados as unidades de medidas dos parâmetros empregados e estes procederam convertidos para as unidades utilizadas pelo SWAT. Logo ao final desta etapa os dados foram inseridos no banco de dados, de acordo com o padrão de armazenamento da base do banco de dados do SWAT.

#### 4.2.5 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

O uso e ocupação do solo do município de Londrina e da bacia do Cafezal foi elaborado por Sacramento (2016), que utilizou classificação supervisionada de imagem Landsat 8, sensor OLI, do ano de 2016. Foi utilizado método híbrido na classificação, aplicando Bhattacharya, para delimitar a área urbana e o método de Máxima Verossimilhança para definir as demais classes. A ocupação do solo é basicamente formada por corpos d'água, vegetação densa, agricultura e urbanização.

#### 4.2.6 ESTAÇÕES CLIMATOLÓGICAS

Os dados climáticos necessários, como a precipitação, temperaturas máximas e mínimas do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar foram obtidos a partir de uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes aos anos de 2004 para calibração e 2005 para validação, com periodicidade diária, esses anos foram escolhidos por não apresentarem falta de dados durante todo o ano. Segundo Neitsch et al. (2005a) esses parâmetros podem ser obtidos tanto por registros de estações ou podem ser simulados pelo próprio modelo.

É recomendável utilizar séries longas de informações para a realização das simulações, contudo houve dificuldade de encontrar série temporal sem interrupções. Na literatura é possível encontrar trabalhos que utilizaram séries de dados curtas. Lelis & Calijuri (2010) utilizaram séries de três anos para a realização de simulações em seu respectivo trabalho com o SWAT e Machado (2002) aplicou o modelo SWAT com um ano de dados temporais para a simulação do escoamento superficial e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Marins-SP.

#### 4.3 EXECUÇÃO DO MODELO SWAT

Os dados georreferenciados foram inseridos a partir de uma interface com o SIG Qgis, o qual possibilita que tanto as entradas quanto as saídas do modelo sejam exibidas em mapas e gráficos (NEITSCH et al., 2005).

A execução do SWAT para a modelagem hidrológica se dá em cinco passos que devem ser seguidos: delimitação da bacia hidrográfica; criação das HRUs; configuração e execução do SWAT; calibração, validação e visualização.

#### 4.3.1 DELINEAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Para o delineamento da bacia hidrográfica utilizou-se o MDE, que forneceu os valores de altimetria para a área e serviu como base para a discretização da bacia em sub-bacias (Di LUZIO et al., 2001). Na modelagem a divisão para sub-bacias é conveniente quando há predominância de diferentes tipos de solos influenciando o curso da bacia hidrográfica. Dessa forma além da delimitação da bacia em sub-bacia, gerou-se a demarcação da área da bacia e a delimitação dos cursos d'água.

O modelo possui duas alternativas, podendo ser realizado de forma automática (o programa delinea a bacia hidrográfica baseado no MDE) ou pode ser utilizado uma máscara, ou seja, adicionando um plano de informação com o contorno da bacia hidrográfica previamente demarcado. Dessa forma utilizou-se a metodologia em que o SWAT delinea automaticamente a bacia hidrográfica até o ponto do exutório, assim dividindo a bacia em sub-bacias, devido ao fato de não possuir o plano de informação com o contorno da bacia.

#### 4.3.2 CRIAÇÃO DAS HRUs

Após o delineamento da bacia, o SWAT gera as unidades de resposta hidrológica (HRU), a partir da divisão das sub-bacias criadas. Nesta etapa se utilizou os mapas de uso e ocupação do solo e bem como o mapa pedológico da região, dados requisitados para realizar a definição das HRUs. Uma HRU consiste em uma área com a mesma classe de uso e cobertura do solo e pedologia, além de considerar a inclinação do terreno (ARNOLD et al., 2012).

Com os dados inseridos o SWAT cria o mapa de declividade gerada a partir do DEM de forma automática, calculado através da análise da taxa máxima de mudança entre um pixel e seus vizinhos. Dessa forma considerando a inclinação, uso do solo e tipagem de solo, foi adicionado um ponto intermediário para encostas para dividir as HRUs em aquelas com declividade média na faixa de 0 a 10% e aquelas com inclinação média acima de 10%, podendo também ser adicionado outros pontos médios.

### 4.3.3 DADOS CLIMÁTICOS

Nesta etapa foram necessários a utilização dos parâmetros climáticos e de uma ferramenta denominada SWAT *weather database* para a conversão e geração de dados aceitos pelo SWAT. O modelo recomenda que se houver falha de dados nas séries temporais deve-se preencher a lacuna com o valor de -99 para não ocorrência de erros, este valor foi inserido no dia 19/08/2004, por não ter o dado referente de temperatura mínima.

Quanto aos dados de precipitação o SWAT distribui automaticamente no espaço delimitado, considerando-se assim a série de chuva por sub-bacia.

### 4.3.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

O período de calibração do modelo foi de 01/01/2004 a 31/12/2004, utilizando dados climatológicos e de vazão, localizada no exutório da sub-bacia quinze que coincide com a estação da ANA. O Procedimento foi realizado de forma manual através do SWAT\_CUP, em que cada parâmetro foi tendo seus intervalos alterados, até resultar em uma resposta satisfatória da vazão simulada em relação a observada. Para obter melhores resultados com maior eficácia, o SWAT\_CUP propõe novos intervalos dos valores dos parâmetros estabelecidos após a primeira simulação, com períodos que podem influenciar de forma mais coesa o estudo, contudo o *software* sugeria valores que extrapolavam os mesmos, assim, os intervalos discrepantes foram descartados da análise.

Para a análise de sensibilidade utilizou-se a ferramenta SWAT-CUP, executando o processo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*, versão 2) (ABBASPOUR et al., 2004), realizando um processo total de 500 simulações no processo de calibração e a métrica utilizada para verificar o ajuste do modelo foi a soma dos quadrados dos resíduos (SQR). Esta metodologia busca procurar a melhor faixa de valores para cada parâmetro, realizando uma busca global, otimizada para calibrar simultaneamente um grande número de parâmetros, por meio da amostragem por hipercubo latino, semelhante ao método de Monte Carlo.

No SWAT existem três metodologias para definir a alteração dos parâmetros dentro dos limites estabelecidos: substituição direta, adição e multiplicação. A substituição direta é onde o modelo altera o valor diretamente, a adição um valor

constante é adicionado no valor inicial do parâmetro e a multiplicação é onde a alteração dos valores é estabelecida variando o valor inicial por porcentagem.

Abbaspour et. al (2015), utilizaram os parâmetros GWQMN, GW\_REVAP, REVAPMN, CN2, SOL\_AWC e ESCO para melhor calibrar e enquadrar a vazão simulada no observado em seu trabalho de modelagem hidrológica e qualidade da água em escala continental para a Europa. Castro (2013) utilizou também os parâmetros descritos no trabalho de Abbaspour et. al (2015), além dos parâmetros SURLAG, HRU\_SLP, OV\_N e SLSUBBSN para realizar a simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado em Brasília, Distrito Federal.

O coeficiente REVAP de água subterrânea leva em consideração o fluxo do aquífero raso para uma zona insatura subjacente. Dessa forma em períodos de secas, a franja capilar que separa as zonas saturadas e insaturadas evapora no sentido de baixo para cima, conseqüentemente na medida em que o processo de evaporação ocorre o aquífero reabastece a própria franja capilar. Devido ao fato da cobertura vegetal afetar o balanço hídrico, os parâmetros que influenciam o REVAP podem ser alterados de acordo com o solo.

O presente trabalho utilizou dez parâmetros que são relevantes para a simulação do fluxo de água da área de estudo, inicialmente determinados com os limites apresentados na Tabela 5, aos quais foram definidos de acordo com algumas características da área de estudo e referências de outros trabalhos.

**Tabela 5 - Parâmetros e intervalos utilizados na análise de sensibilidade.**

Parâmetros	Sigla	Limite inferior	Limite Superior	Método
Curva número para condição 2	CN2	35	98	Substituição
Capacidade de água disponível no solo (mm/h)	SOL_AWC	0	1	Substituição
Coeficiente de retardo do escoamento superficial (mm)	SURLAG	8,4	26	Substituição
Fator de compensação de evaporação do solo	ESCO	0,2	0,75	Substituição
Limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (mm H <sub>2</sub> O)	GWQMN	0	5000	Substituição
Coeficiente “revap” de água subterrânea	GW_REVAP	0,02	0,2	Adição
Profundidade em aquífero profundo para que haja “revap”	REVAPMN	0	500	Adição
Correção do deslocamento inicial, diminuindo o declive	HRU_SLP	0	1	Adição
Aumento do coeficiente de rugosidade de Manning	OV_N	0,01	30	Substituição
Comprimento da declividade média (m)	SLSUBBSN	10	150	Substituição

**Fonte 7 - Autoria própria.**

Para a validação do modelo foi utilizado o período de 01/01/2005 a 31/12/2005, usando os valores obtidos na calibração para os parâmetros estabelecidos, seguidamente aplicou-se testes de simulação para avaliar se com os valores obtidos na calibração foram capazes de caracterizar a vazão de forma satisfatória para o período de validação.

O método empregado para executar o SWAT\_CUP foi através da soma dos quadrados dos resíduos, em que este método visa ajustar as distribuições de frequência

das séries observadas e simuladas, apontando quais parâmetros apresentavam maior sensibilidade ao modelo. O método pode ser exemplificado através da equação 8:

$$SSQR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{i,m} - Q_{i,s})^2 \quad (8)$$

Em que:

$Q$  variável de vazão;

$m$  medição;

$s$  simulação;

$i$  ranking.

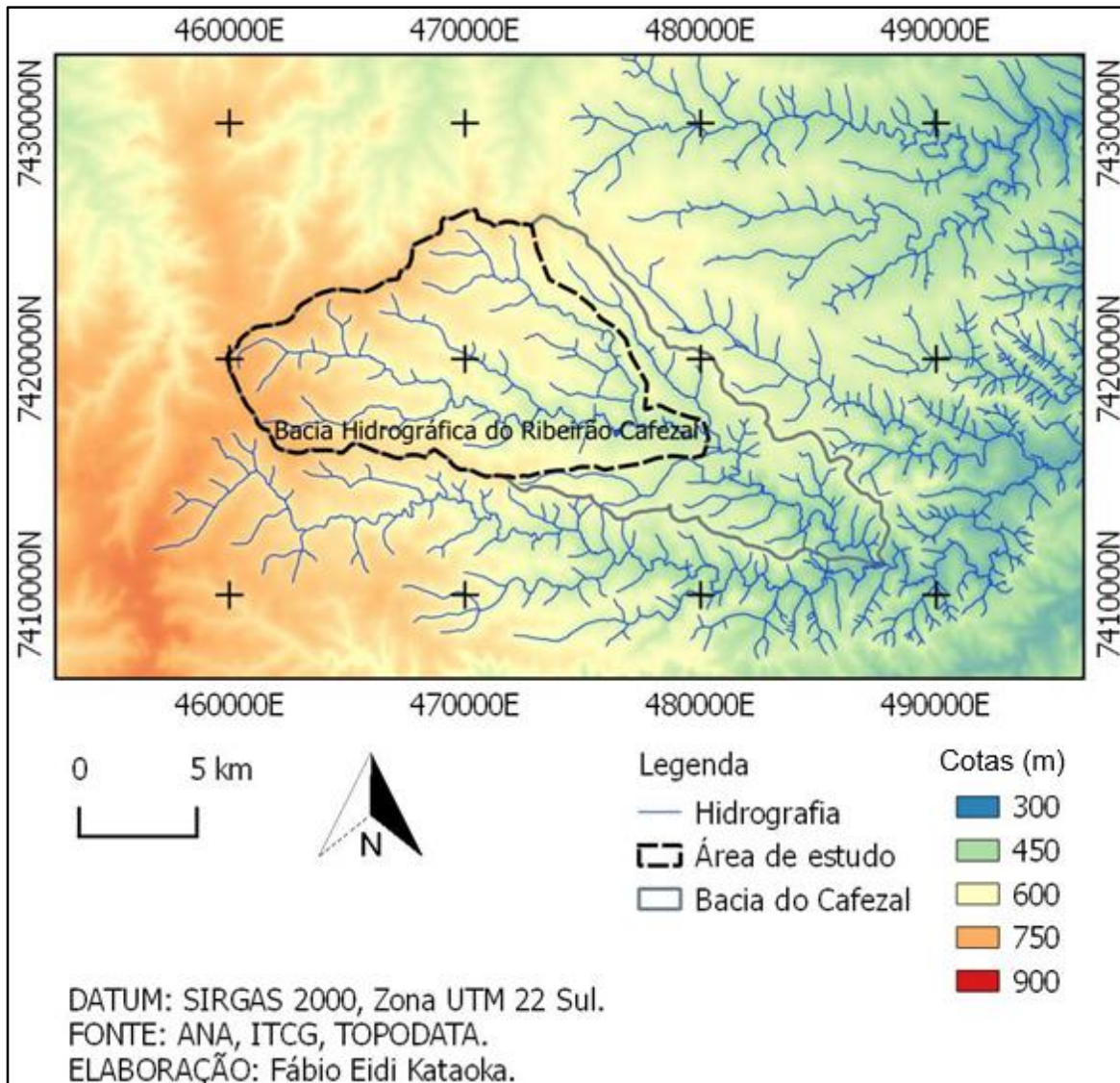


## 5. RESULTADOS

### 5.1 MDE GERADO

O MDE gerado pelo SWAT, representa a altimetria da área de estudo e arredores, onde a altimetria foi de aproximadamente 470 a 770 metros. A partir deste dado foi derivado as sub-bacias, rede de drenagem e as HRUs, como mostrado na Figura 10.

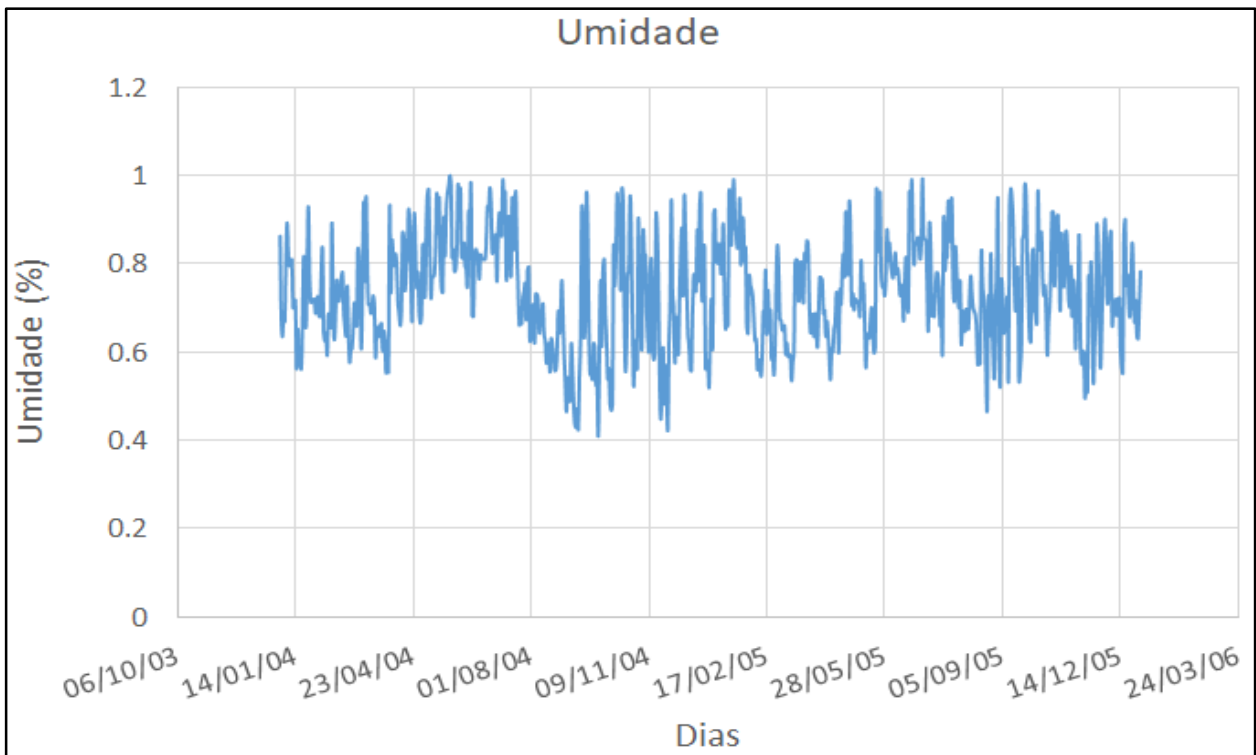
**Figura 6 - Mapa de altimetria da região.**



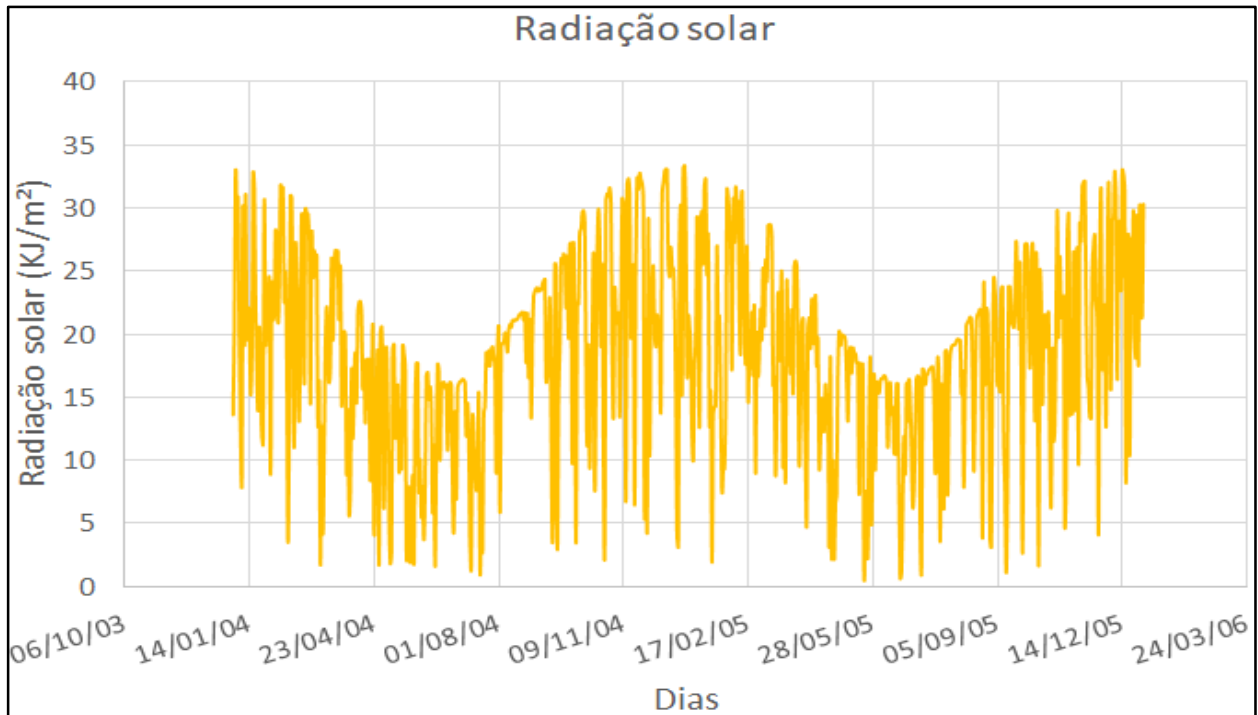
## 5.2 PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados climatológicos foram transformados para o formato de entrada do SWAT e posteriormente gerou-se os gráficos de cada variável climática, assim apresentando o comportamento dos parâmetros em seus respectivos períodos referentes a 01/01/2004 a 31/12/2005, mostrados nas Figuras 7, 8, 9, 10 e 11.

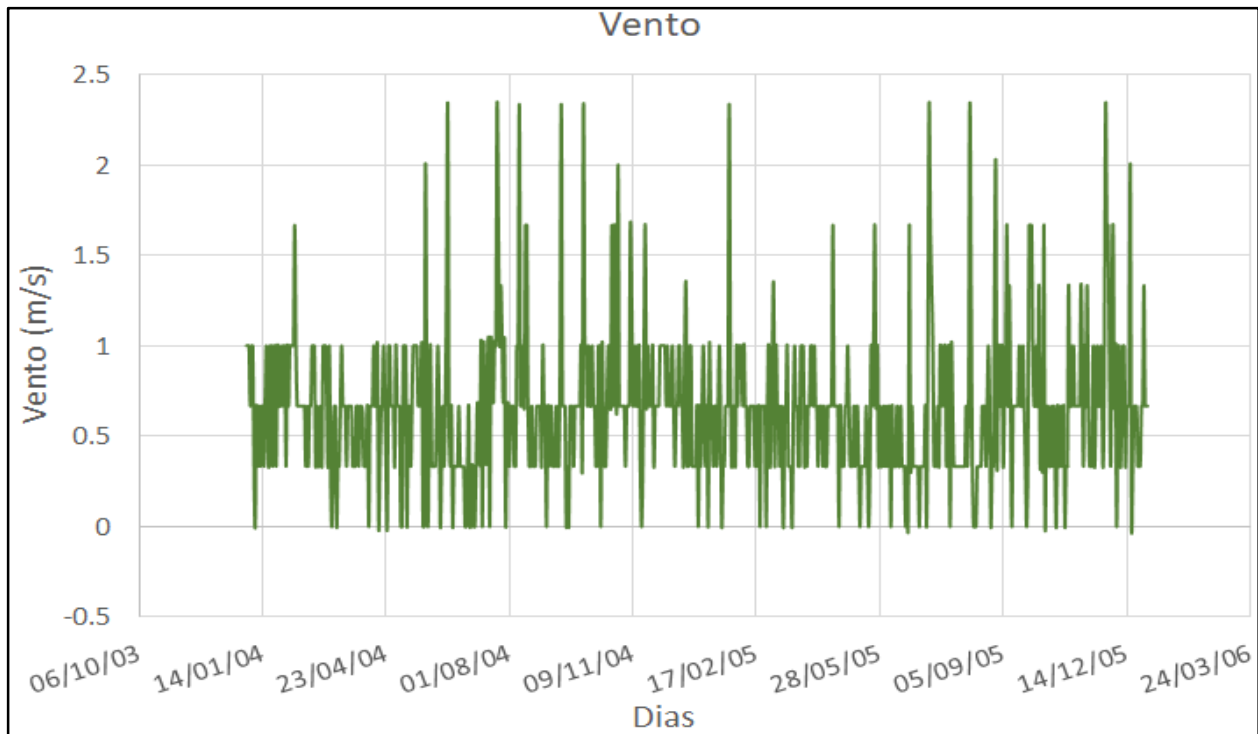
**Figura 7 - Série temporal de umidade.**



Fonte 8 - Autoria própria.

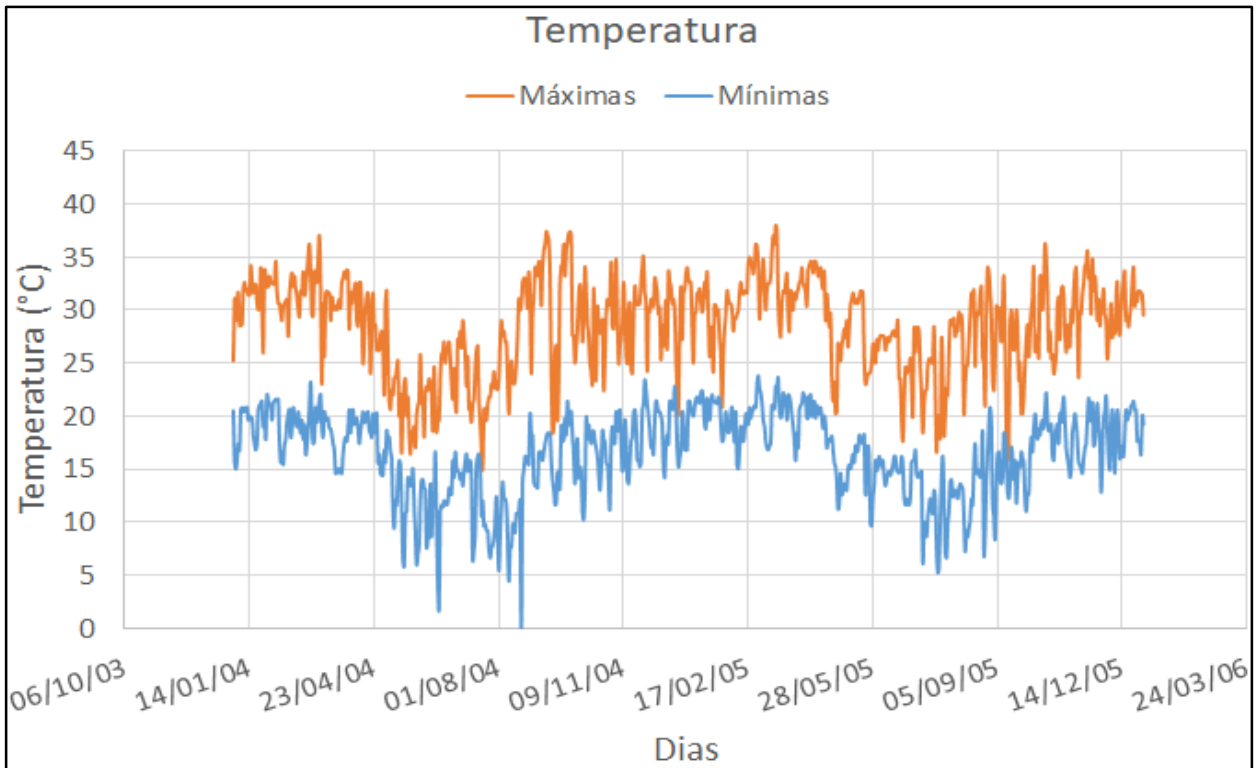
**Figura 8 - Série temporal de radiação solar.**

Fonte 9 - Autoria própria.

**Figura 9 - Série temporal de vento.**

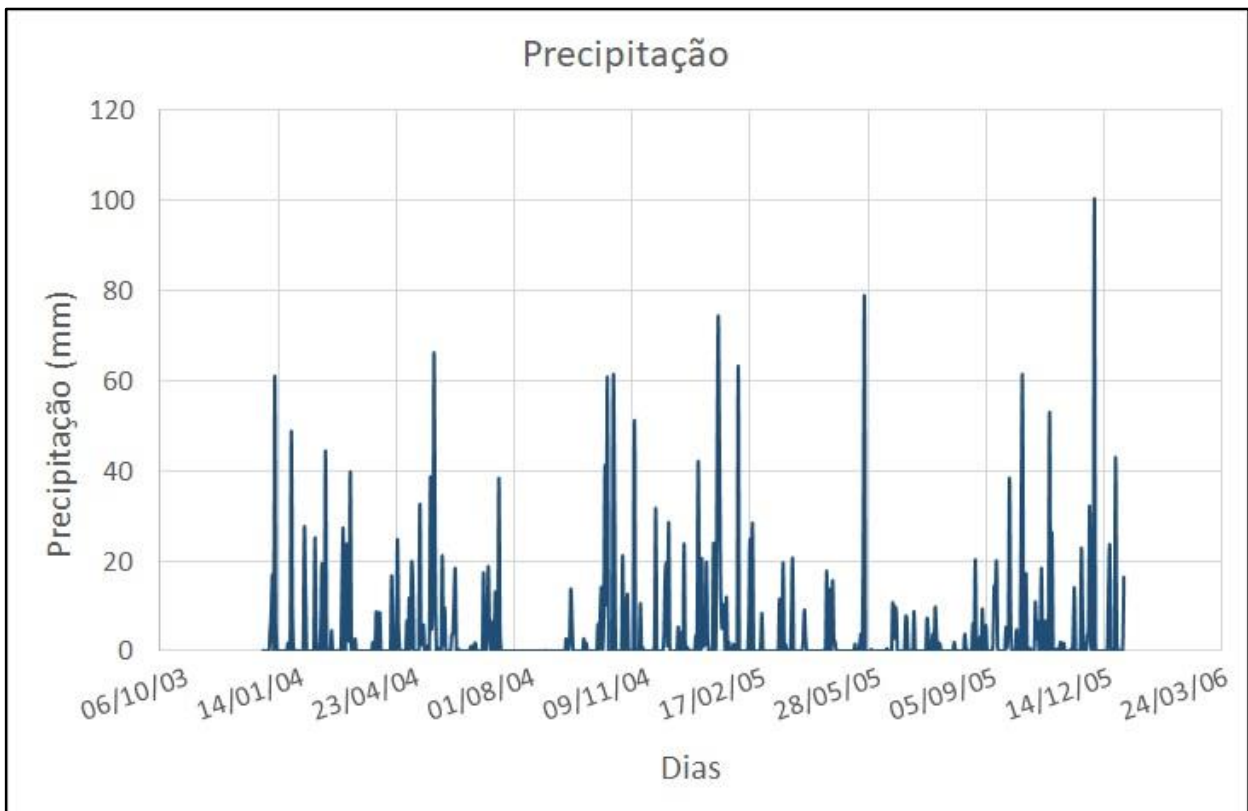
Fonte 10 - Autoria própria.

Figura 10 - Série temporal de temperatura.



Fonte 11 - Autoria própria.

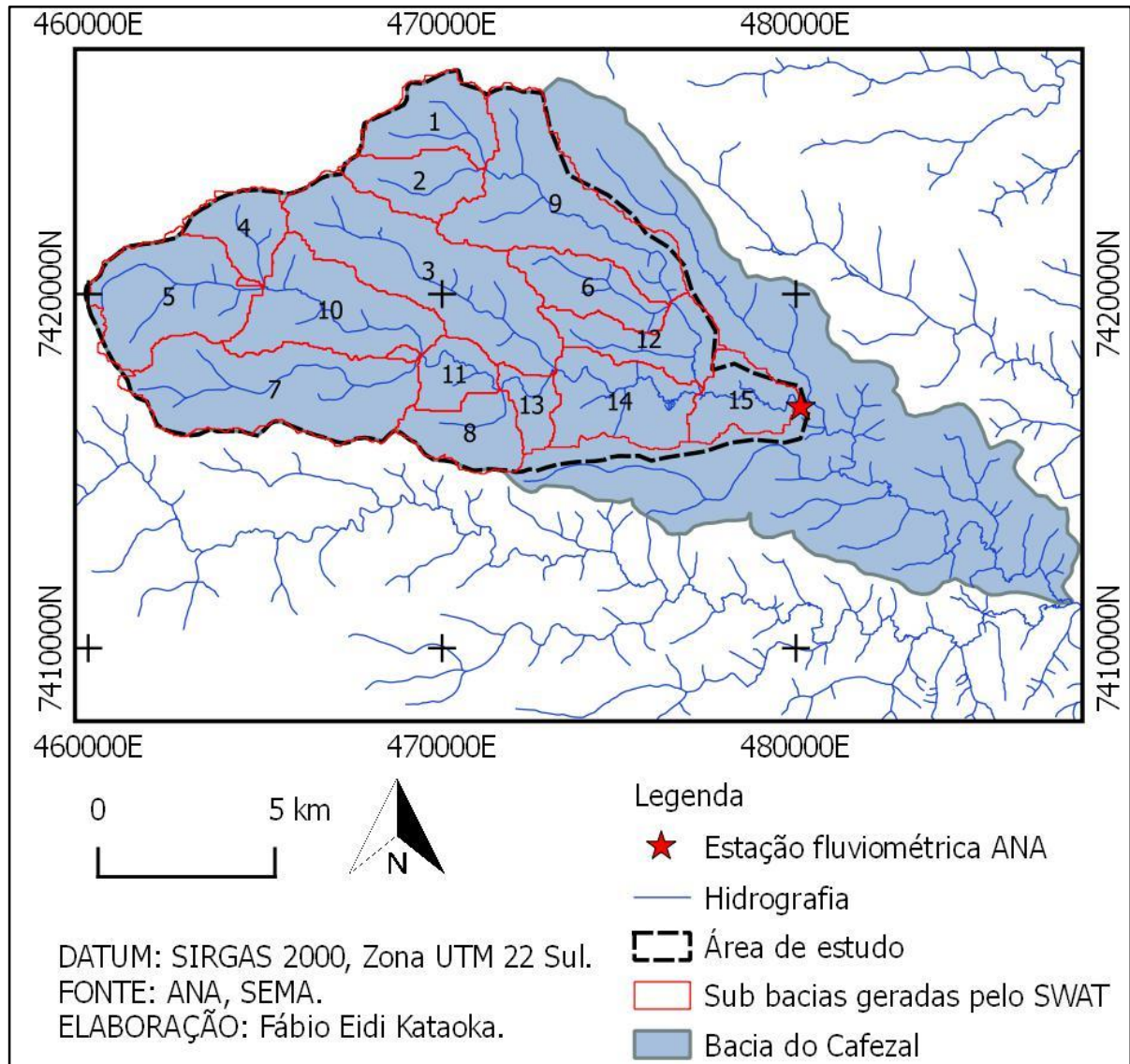
Figura 11 - Série temporal de precipitação.



Fonte 12 - Autoria própria.

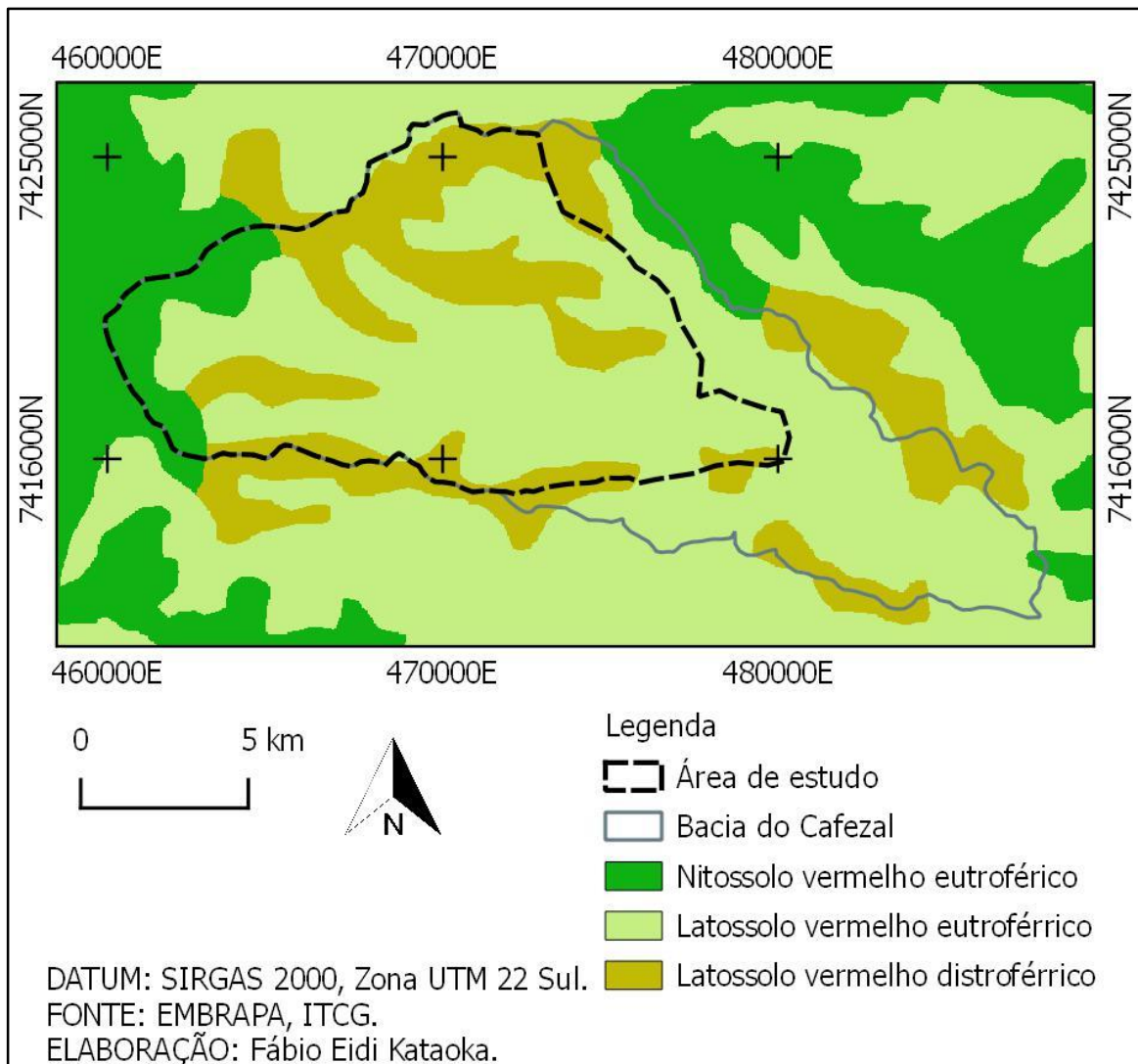
O delineamento automático baseado no MDE gerou quinze sub-bacias (Figura 12), cuja área total é de 134 km<sup>2</sup>, onde a sub-bacia quinze contém o exutório da área de estudo a qual também coincidiu com a estação fluviométrica da ANA.

**Figura 12 - Sub-bacias geradas pelo SWAT.**



Gerou-se também a carta de solos presentes na área de estudo, disposto pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geociências do Paraná (ITCG), dessa forma possibilitando realizar a identificação das classes de solos que compõem a região do presente trabalho, apresentado na Figura 13.

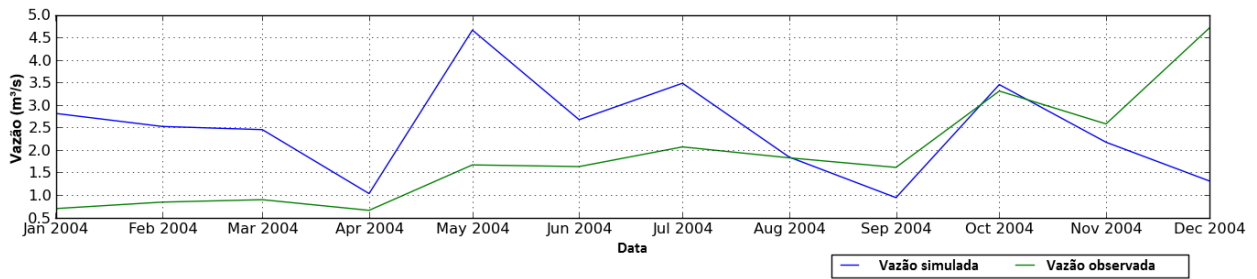
**Figura 13 - Carta de solos da área de estudo.**



### 5.3 SIMULAÇÃO

A simulação teve seu início em 01/01/2004 e final em 31/12/2004, usando séries climáticas diárias. A avaliação dos valores gerados foi realizada calculando-se a diferença dos simulados e observados em relação ao valor observado. Os resultados estão no gráfico da Figura 14.

**Figura 14 - Gráfico vazão observada e simulada gerada pelo SWAT-QGis.**

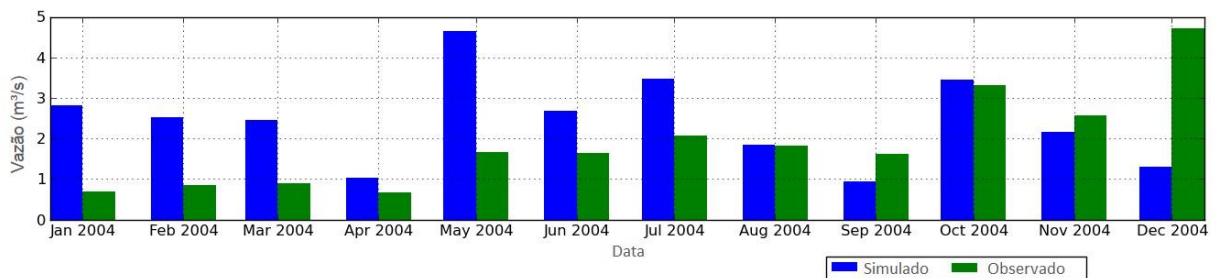


**Fonte 13 - Autoria própria.**

O SWAT-Qgis gerou o gráfico de vazão observada e simulada em formato de barras (Figura 15), para visualizar a diferença entre as vazões. O gráfico mostra a diferença entre as vazões nos meses de janeiro de  $2,11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , fevereiro  $1,67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , março  $1,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , abril  $0,37 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , maio  $2,99 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , junho  $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , julho  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , agosto  $0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , setembro  $-0,67 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , outubro  $0,14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , novembro  $-0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , dezembro  $-3,39 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Foi observado que nos meses de setembro, outubro e novembro a vazão simulada excedeu a observada, sendo posteriormente representada também no gráfico do SWAT-CUP.

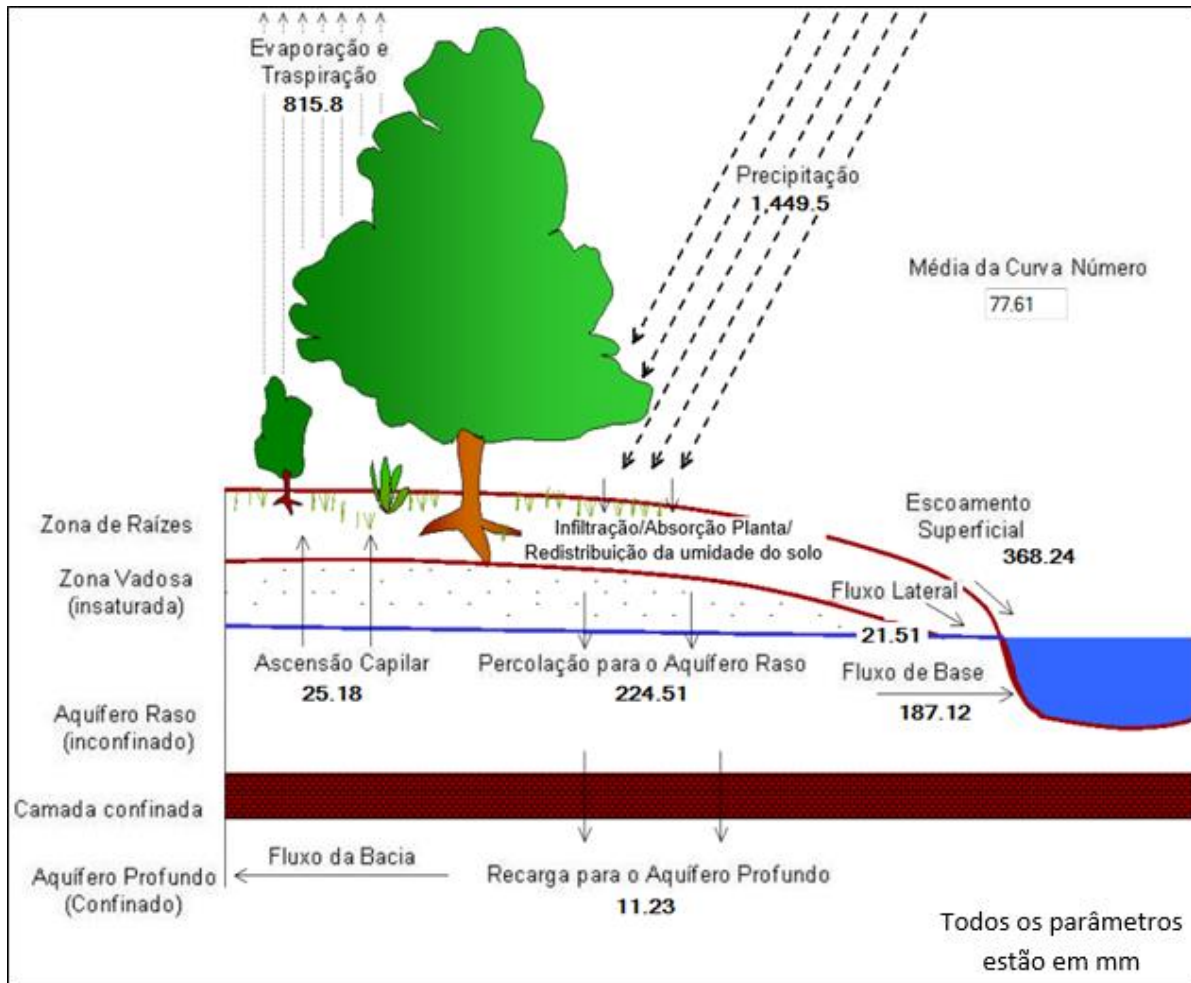
**Figura 15 - Gráfico vazão observada e simulada em barra.**



**Fonte 14 - Autoria própria.**

O SWAT, juntamente com os dados de saída compilados do modelo gerado foram introduzidos ao *SWAT Error Checker*, ferramenta que auxilia na visualização do balanço hídrico, mostrado na Figura 16.

**Figura 16 - Balanço hídrico simulado pelo SWAT.**



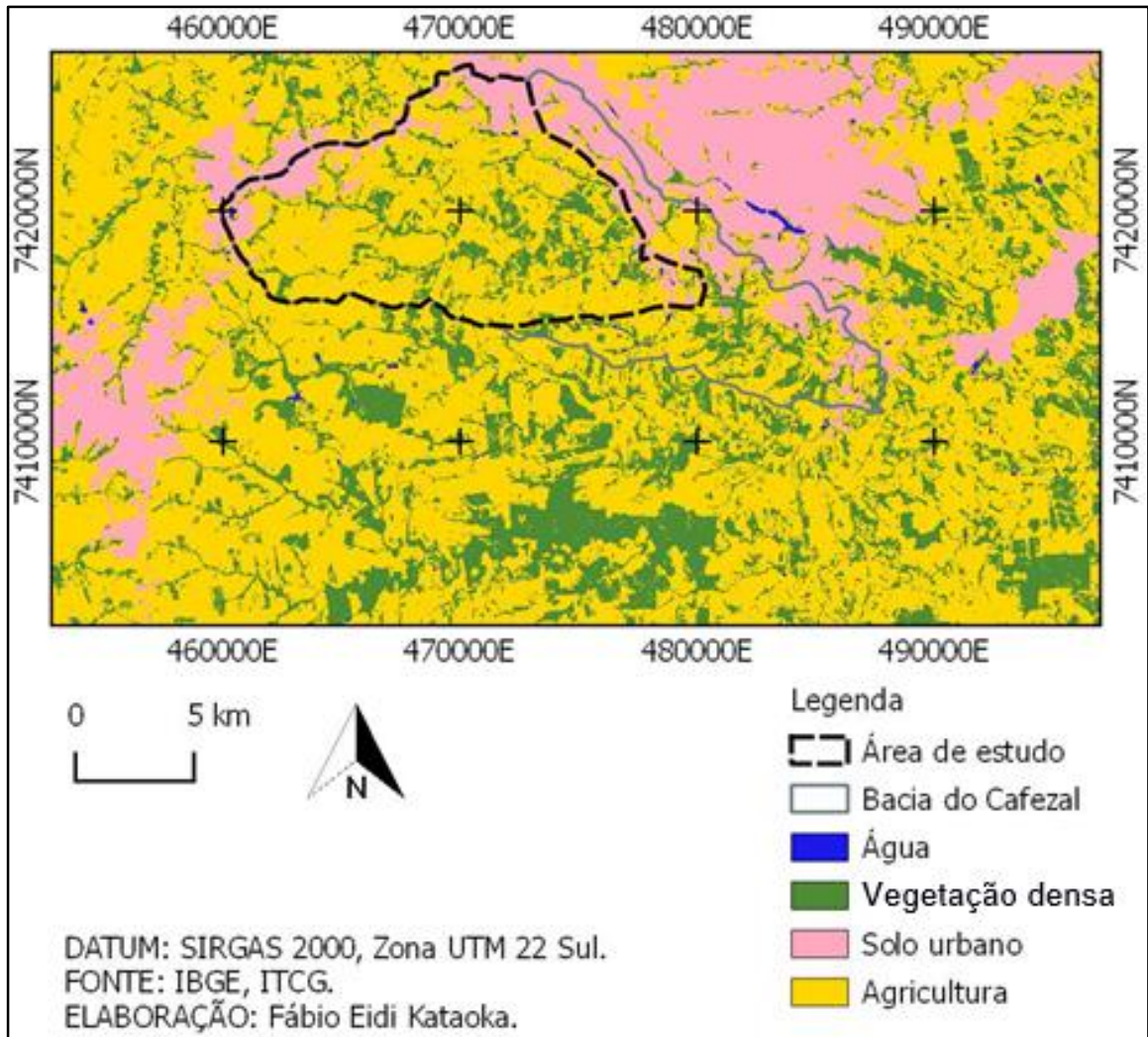
**Fonte 15 - Autoria própria.**

A Figura 16 representa o ciclo hidrológico da bacia do Ribeirão Cafezal, por meio da modelagem do SWAT. Como pode ser observado, a evapotranspiração compõe cerca de 815 mm, escoamento superficial 368 mm, fluxo lateral 21 mm, percolação 224 mm, fluxo de base 187, recarga para o aquífero profundo 11 mm e ascensão capilar do aquífero raso 25 mm. O CN médio para a bacia do Cafezal ficou estimado em torno de 77.

Contudo o valor de CN gerado, se mostrou levemente elevado para à área de estudo, visto que a bacia ainda não apresenta elevada urbanização, como mostrado na Figura 17.



**Figura 17 - Mapa de Uso e ocupação do solo.**



#### 5.4 CALIBRAÇÃO

O período correspondente à 01/01/2004 a 31/12/2004, apresentou um valor de SQR (Soma dos Quadrados dos Resíduos) de 0,17 para os dados calibrados, representando bem a tendência geral da vazão observada, mesmo apresentando valores de vazão superiores aos medidos na estação da ANA. Os parâmetros utilizados nesta etapa estão descritos no tópico de análise de sensibilidade, aos quais mostraram melhores representações para a calibração do modelo.

Abbaspour et. al (2015) propõe que após a primeira simulação e a mesma não apresentar resultados de forma satisfatória, alguns parâmetros podem ser redefinidos, afim de que a vazão estimada seja melhor ajustada com a observada. Em casos que a vazão base estava muito baixa e a evapotranspiração elevada, diminui-se os valores da

profundidade do aquífero raso (GWQMN) e o coeficiente revap de água subterrânea (GW\_REVAP) em contrapartida elevando a profundidade do aquífero profundo (REVAPMN), quando as vazões de pico se mostravam muito baixas diminuía-se os parâmetros da capacidade da água disponível (SOL\_AWC) e o fator de compensação de evaporação do solo (ESCO) e aumentava-se o valor de curva número para condição 2 (CN2), e por fim quando a vazão simulada apresentava-se mais para a direita em relação a observada diminuía-se o aumento do coeficiente de rugosidade de Manning (OV\_N) e o comprimento da declividade média (SLSUBBSN) e aumentava-se a correção do deslocamento inicial (HRU\_SLP).

Após as primeiras análises a ferramenta fornece melhores intervalos que possam refinar o resultado, diante dos primeiros intervalos propostos, tornando o processo de calibração iterativo.

Posteriormente foram sugeridos novos valores, apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Parâmetros e valores sugeridos pelo SWAT CUP para melhor calibração.**

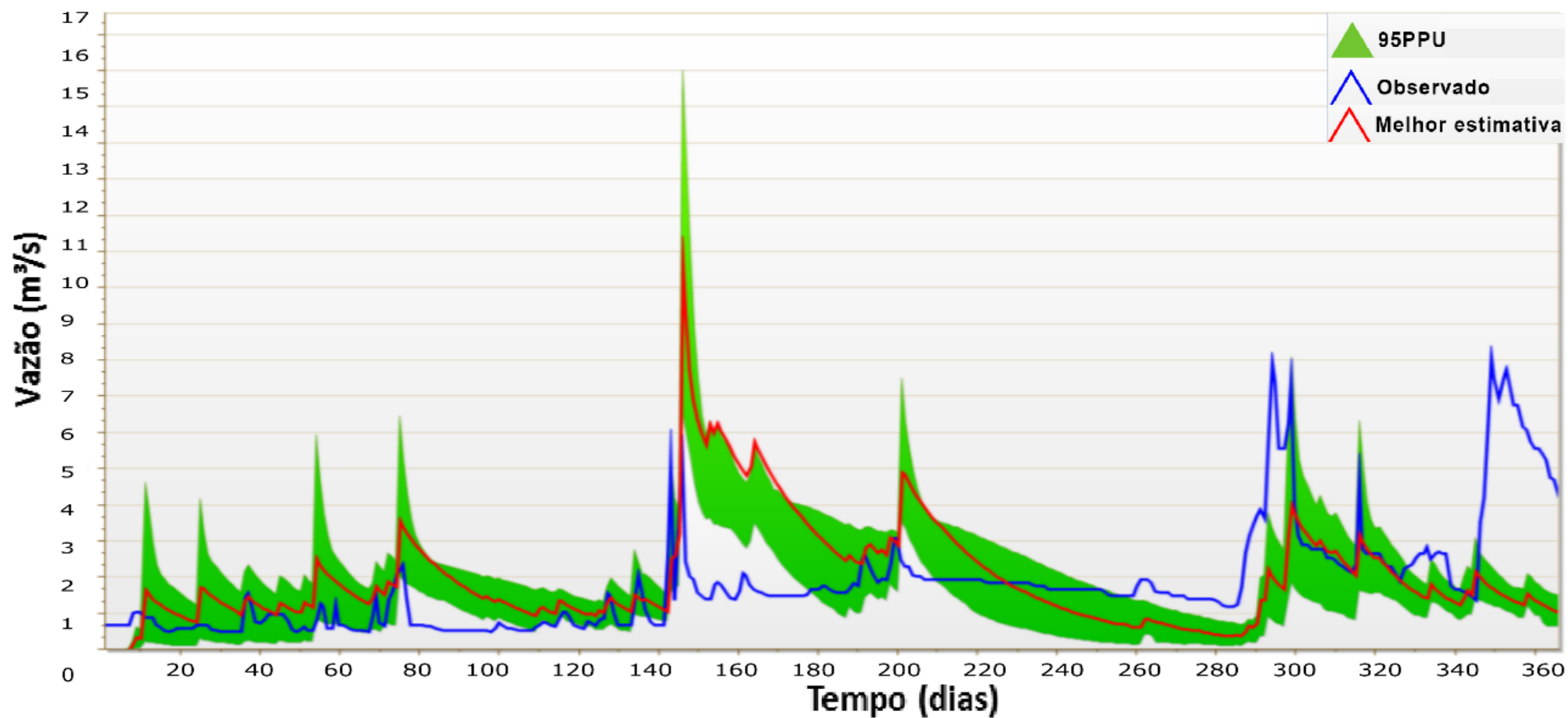
Parâmetros	Limite inferior	Limite superior
CN2	40,734608	79,035393
SOL_AWC	0,076385	0,693615
SURLAG	10,535443	20,872559
ESCO	0,200000	0,750000
GWQMN	0,000000	2943,142578
GW_REVAP	0,020000	0,116954
REVAPMN	145,674484	439,325531
HRU_SLP	0,000000	0,638605
OV_N	4,098042	21,413458
SLSUBBSN	41,695904	114,104095

**Fonte 16 - Autoria própria.**

Na calibração foi obtido o comportamento entre os valores observados de vazão, os simulados e 95% da incerteza percentual de previsão (95PPU, *Percent Prediction Uncertainty*) que é a faixa de incerteza da predição calculada nos níveis de 97,5% e 2,5% da função de distribuição cumulativa das variáveis, previstos pelo modelo que podem avaliar a análise de incertezas, apresentado na Figura 18. O modelo por si só representou

de forma satisfatória a tendência geral da vazão observada, mesmo apresentando valores de vazão superiores aos medidos na estação da ANA. Contudo divergências baixas ocorreram até o dia 140, com diferença de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A maior discrepância se mostra no dia 148, de quase  $7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a inversão dos valores no dia 230 se deve ao fato de estar no mês de agosto, considerado o mês mais seco no sul do Brasil. Por fim ao decorrer dos dias 300 e 360, foram observados dois picos de vazão observada que não foram bem representados pelo modelo, com valores simulados bem abaixo do que foi medido.

Figura 18 - Gráfico de valores de vazão observados e estimados pelo SWAT-CUP.



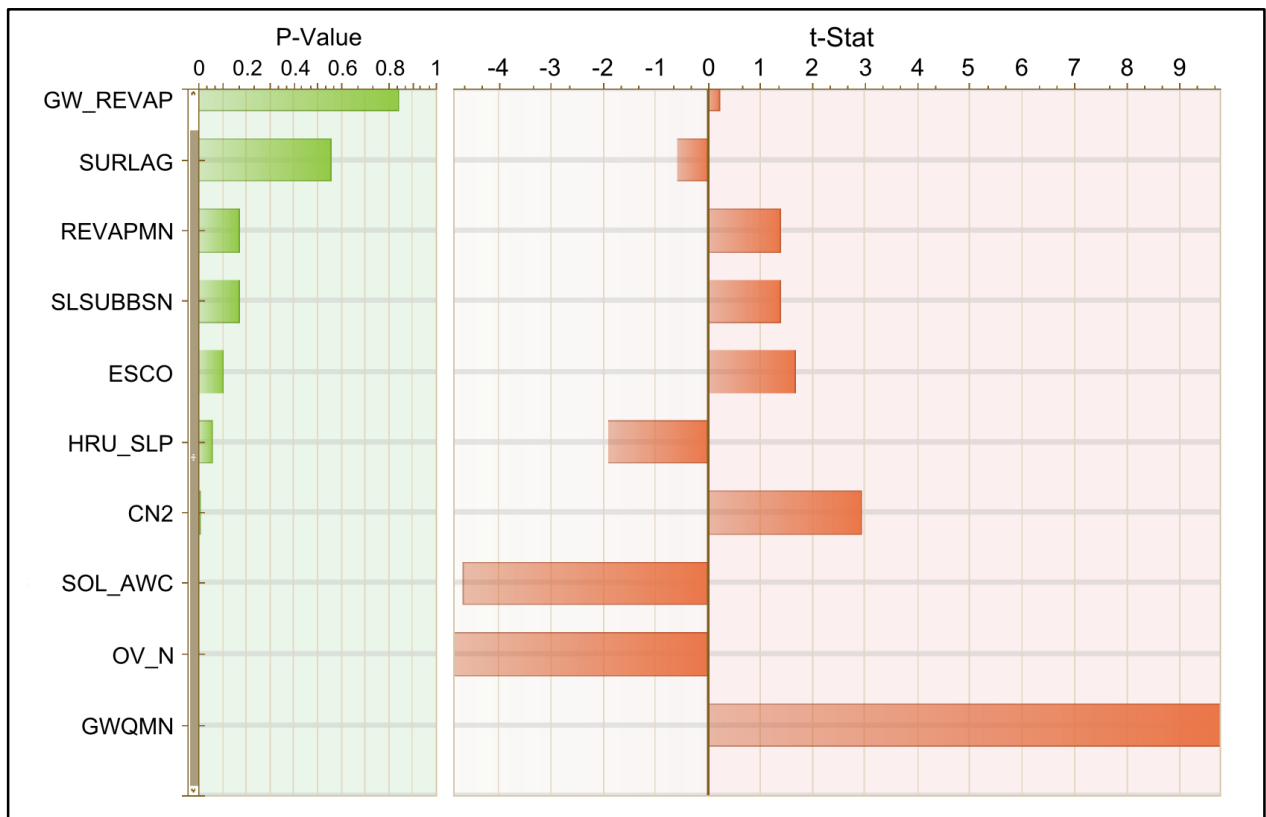
Fonte 17 - Autoria própria.

## 5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O processo de sensibilidade analisou a estatística-t que fornece uma medida de sensibilidade, considerado que um valor absoluto maior é mais sensível e o p-valor determina o significado da sensibilidade, desta forma um valor próximo a zero tem mais significado.

A análise de sensibilidade, baseada no p-valor e na estatística-t (Figura 19) apresentou o parâmetro que possui maior influência na modelagem da vazão é Gwqmn, associado ao limite entre a profundidade de água em aquífero raso a superfície, com maior valor da estatística-t e menor p-valor. O segundo parâmetro que mais afetou os resultados do modelo foi CN2, associado à condição de umidade do solo. Esta análise mostrou que para se obter um melhor resultados de forma mais satisfatória, tais parâmetros devem ser analisados e calibrados com maior cuidado.

**Figura 19 - Análise de sensibilidade dos parâmetros calibrados.**

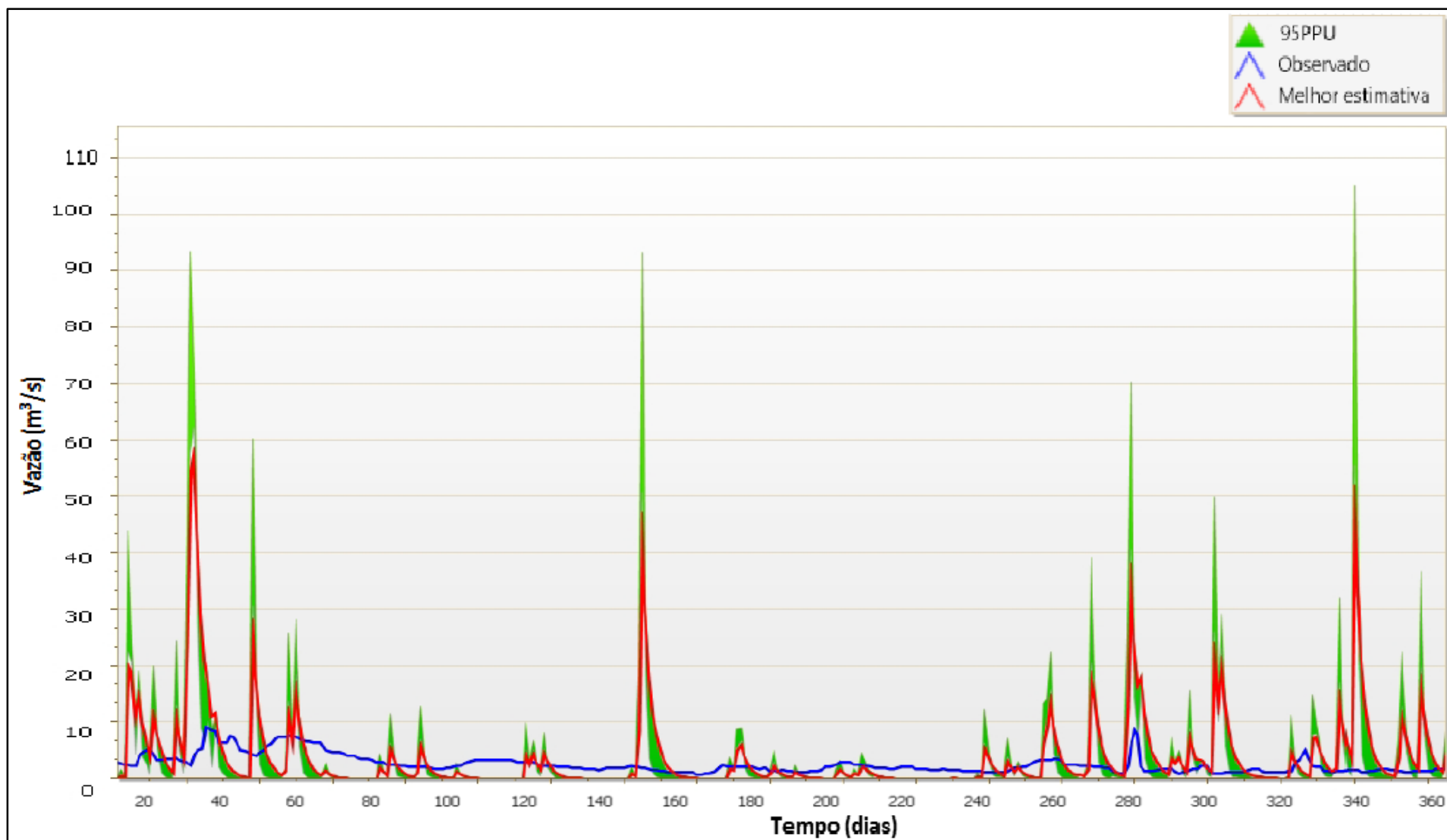


Fonte 18 - Autoria própria.

## 5.6 VALIDAÇÃO

Os valores de SQR para o período de 01/01/2005 a 31/12/2005 foram respectivamente de 0,46, considerado alto. Foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros obtidos no período de calibração para a validação do modelo. Os dados de vazão simulados e observados para a validação foram comparados e analisados (Figura 20). Por meio da análise do gráfico é possível observar que mesmo alterando alguns dos parâmetros na calibração, os dados simulados para a calibração não se aproximaram de forma correspondente com os observados, comparando-se aos dados de 2014, utilizados na calibração.

Figura 20 - Gráfico de valores de vazão simulada e observada da validação.



Fonte 19 - Autoria própria.

É importante ressaltar que tanto a calibração quanto a validação foram realizadas com somente um ano de dados cada e sem o período de aquecimento para o modelo que é uma fase de ajustes dos parâmetros requisitados pelo modelo (umidade, vento, temperatura, radiação solar e precipitação) o aquecimento é realizado devido as incertezas quanto às condições dos parâmetros utilizados (ARAGÃO et. al, 2013), dessa forma podendo apresentar índices de eficiência diferenciados.

Castro (2013), cita outra medida para melhorar a eficiência das simulações é realizando a calibração por sub-bacia, uma vez que existem estações fluviográficas, com dados de vazão diários.



## 6 CONCLUSÃO

O modelo SWAT mostrou-se muito amplo, por permitir uma diversidade de análises ambientais, devido a sua base física e pela possibilidade de representar espacialmente a área de estudo, e ainda analisar a dinâmica temporal do sistema.

A grande quantidade de parâmetros mensurados permite melhor caracterização da área de estudo, porém ao mesmo tempo os parâmetros dificultam a especificação e estimação de valores dos mesmos nos processos de modelagem, e também a escolha de quais serão utilizados na calibração.

O SWAT-CUP auxilia bastante no processo de calibração e validação, por fornecer melhores estimativas, sugerindo assim melhores períodos de intervalos onde o resultado poderia ser refinado. Em trabalhos futuros, antes de expandir para outros aspectos do modelo, melhorar a modelagem hidrológica por si só, utilizando dados de campo e suas análises posteriores para caracterização do solo, por exemplo, ao invés de utilizar a função de pedotransferência e também detalhar mais as classes de uso e ocupação do solo; utilizar também séries temporais mais longas para os dados climáticos e de vazão.

Assim dessa foram considerado-se que os resultados foram satisfatórios, embora possam ser melhorados.

## REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C., ROUHOLAHNEJAD, E., VAGHEFI, S., SRINIVASAN, R., YANG, H., KLØVE, B. A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and Uncertainty of a High-Resolution Large-Scale SWAT Model. **Journal of Hydrology**. p. 737. 2015.
- Agência Nacional das Águas (ANA), Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Bacias Hidrográficas do Paraná – série Histórica**. p. 75 – 77.
- ARAGÃO, R.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MENDONÇA, L. C.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. **Análise de Sensibilidade do Parâmetros do Modelo SWAT e Simulação dos Processos Hidrossedimentológicos em uma Bacia no Agreste Nordestino**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37: 1091-1102. 2013.
- ARAL, M. M. Chapter 2: Principles of Environmental Modeling – **Environmental Modeling and Health Risk Analysis (Acts/Risk)**. 2010, p. 37.
- ARNOLD, J. G., MORIASI, D. N., GASSMAN, P. W., ABBASPOUR, K. C., WHITE, M. J., SRINIVASAN, R., SANTHI, C., HARMEL, R. D., van GRIENSVEN, A., VAN LIEW, M. W., KANNAN, N., JHA, M. H. SWAT: Model Use, Calibration, And Validation. 2012. Transactions of the ASABE. p. 1491 – 1508.
- ARNOLD, J. G.; MUTTIAH, R. S.; SRIIVASAN, 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.
- BARROS, M. V. F. (et al). **Atlas Ambiental da Cidade de Londrina**. 2008. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/atlasambiental/>>. Acesso em: 10 de setembro de 2016.
- BOUMA, J.; VAN LANEN, J. A.J. Transfer functions and thresh-old values: from soil characteristics to land qualities. In: BEEK, K. J. (Ed). **Quantified land evaluation**. Washington: International Institute of Aerospace Survey Earth, 1987. P. 106-110.
- BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008.
- BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional dos recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília,

1997. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm)>. Acesso em 10 de setembro de 2016.

CALKINS, H. W. & TOMLINSON, R. F – **Geography Information Systems: Methods and Equipaments for Land Use Planning**. Ottawa, International Geographical Union, Commission of Geographical Data Sensing and Processing and U. S. Geological Survey, 1977. *Apud* CHRISTOFOLETTI, A. – **Modelagem de Sistemas Ambientais** 1ª ed. Editora Edgard Blücher LTDA, 1999. p 29.

CÂMARA G., Davis C., Monteiro A. M. V., D'Alge J.C.L., Felgueiras C., Freitas C. C., Fonseca L. M. G., Fonseca F. **Introdução à Ciência da Geoinformação**.

CÂMARA, G. **Sistema de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais:** uma visão geral. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf>>. Acesso em 08 de junho 2016.

CARVALHO, S. M., KRAVUTSHCHKE, A, C. Estrutura e Funcionamento do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Tibagi/Paraná. 2015. Anais Semana de Geografia. Vol. 1. Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG). p. 44.

CASTRO, K. B. Avaliação do Modelo SWAT na Simulação da Vazão em Bacia Agrícola do Cerrado Intensamente Monitorada. 2013. 141 páginas. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília – Instituto de Geociências.

CHRISTOFOLETTI, A. – **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Capítulo 1 – Sistemas e Modelos. 1ª ed. Editora Edgard Blücher LTDA, 1999. p 14.

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

Companhia de Saneamento do Paraná < <http://site.sanepar.com.br/>>. 2011. Acesso em: 15 de junho de 2017.

DEVIA G. K., GANASRI B. P., DWARAKISH G. S. (2015). A Review on Hydrological Models, *Aquatic Procedia*, Volume 4, 1001-1007.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J. 2001. ArcView interface for SWAT 2000 – User's Guide. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station. p. 365.

EBERVAL, M., FERNANDES. N. F., MACEDO, J. R., BHERING, S. B., GONÇALVES, A. O., PRADO, R. B. (2014). Modelagem da produção de sedimentos usando cenário ambiental alternativo no noroeste do Rio de Janeiro – Brasil. p. 59.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: SPI, 2001.

FREIRE C. C. & OMENA S. P. F. – **Princípios de Hidrologia Ambiental**. Capítulo 1: Hidrologia; Seção 1.4: **BALANÇO HÍDRICO**. 2005. p. 8.

GASSMAN, P. W., REYES, M. E., GREEN, C. H., ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *SWAT Invited Review Series*. 2007. p. 1212 – 1213.

GHORABA, M. S. **Hydrological modeling of the Simly Dam watershed (Pakistan) using GIS and Swat model**. Alexandria Engineering Journal. 2015, 54, p. 583-594.

GONÇALVES, T. D. 2007. Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 2007. p. 31.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Orgs.). *Geomorfologia e Meio Ambiente*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 353.

HAGGETT, P. & CHORLEY, R. J. – Chapter One - Models, paradigms and the New Geography. In *Models in Geography* p. 19. (CHORLEY, R. J. & HAGGETT, P., Eds.). Londres, Methuen & Co., 1967.

IAP. **QUALIDADE das ÁGUAS**: Microbacias Urbanas de Londrina, Norte do Estado do Paraná. 2007. p. 15.

Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina, Instituto Agrônomo do Paraná. **Plano Diretor Participativo de Londrina - Aspectos Ambientais**. 2007. Disponível em: [www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/.../ippul/apresentacao\\_produto\\_03.pps](http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/.../ippul/apresentacao_produto_03.pps) Acesso em: 15 de junho de 2017.

KIKER G. A.; BRIDGES T. A.; VARGHESE A.; SEAGER T. P.; LINKOV I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. **Integrated Environmental Assessment and Management**. 2015. p. 95-96.

KUCHMENT, S. L.; SINGH, V. P. Hydrological Systems Modeling. **Encyclopedia of Life Support Systems**, Volume 2. Ed. Eolss Co. Ltd/UNESCO. p. 17, 2009.

LELIS, A. et al. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudoeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**. vol. 5, núm.2, 2010. p. 158-174. Universidade de Taubaté. Taubaté, Brasil. *Apud* ALVARES, V. M. N **AVALIAÇÃO INICIAL DA APLICABILIDADE DO MODELO DE SIMULAÇÃO CAESAR**: Estudo aplicado à Bacia do Ribeirão Cambé, Londrina – PR, 2013.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.

LI, Z., LIU, W., ZHANG, X., ZHENG, F. **Impacts of land use change and climate variability on hydrology in a agricultural catchment on the Loess Plateau of China**. Journal of Hydrology, v. 337, p. 35-42, 2009.

LIMA Adalto G. A. **A bacia hidrográfica como recorte de estudos em geografia humana**. 2005.

LUO, P.; TAKARA, K. T.; YAMASHIKI, Y. A. **Calibration and uncertainty analysis of SWAT model in a Japanese river catchment**. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 55, 2011.

MARCHIORO, E; FERNANDES, N. F; MACEDO, J. R. de; BHERING, S. B; GONÇALVES, A.O; CAIADO, M.A.C. 2011. **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.

MINÉRIOS DO PARANÁ S.A. **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Curitiba, 2001.

MOORE, I. D., TURNER, A. K., WILSON, J. P., JENSON, S. K., BAND, L. E. (1993) **GIS and land surface-subsurface process modeling**, in M. F Goodchild, B. O. Parks and L. T Steyaert (eds) *Environmental Modelling with GIS*, Oxford University Press, New York, p. 196.

NARASIMHAM, B.; DHANESH, Y. SWAT\_Usersoil\_template\_new. 2008.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool**: theoretical documentation - version 2005. Texas: Blackland Research Center, 2005. p. 525.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool**: theoretical documentation - version 2009. Texas: Blackland Research Center, 2009. p. 8.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool**: theoretical documentation - version 2011. Texas: Blackland Research Center, 2011

PACHEPSHKY, Y.; VAN GENUCHTEN, M TH. **Pedotransfer Functions**. 2011.

PEREIRA NETO, Osvaldo C. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao estudo da adequação do uso do solo em bacias hidrográficas**. 1994. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE, São José dos Campos.

PIDD, M. *Computer Simulation in Management Sciences*, John Wiley and Sons, Chichester, 4<sup>th</sup> edition, 1998.

PITZ, J. C.; FIGUEIREDO, D. **Sistemas de Informações Geográficas**. Santa Catarina, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, SC. 2001. Disponível em <<http://www.inf.ufsc.br/~barreto/trabaluno/ICCPitz20011.pdf>>. Acesso em 08 de junho 2016.

PONCE, V. M.; HAWKING, R. H. 1996. **Runoff curve-number: has it reached maturity?**. *Journal of Hydrology Engineering*. v 1. n 1. p. 11 – 19.

Prefeitura do Município de Londrina – PR. **PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO BÁSICO DE LONDRINA – PR**: Diagnóstico 2008/2009.

RENNÓ, C. D., SOARES, J. V. *Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental*. 2000. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. **Relatório Técnico Parcial**. p. 8.

SACRAMENTO, B. H. **Análise multicritério aplicada ao zoneamento ambiental em parte da Região Metropolitana de Londrina**. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.

SALLES, L. A. Calibração e Validação do Modelo SWAT para a Predição de Vazões na Bacia do Ribeirão Pipuripau. Tese (Mestrado) – Departamento de Engenharia Florestal – Universidade de Brasília. p. 76. 2012.

SARMENTO, L. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese (Doutorado) – Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília/DF. p. 241. 2010.

SARTORI, A., NETO, F. L., 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 Parte1: Classificação. 2005. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos** *Volume 10 n. 4.* p.6.

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

SEMA (Londrina) 2004. **BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS DE LONDRINA.** Londrina, p. 13.

SHANNON, R. E., Systems Simulation – The Art and Science, Prentice-Hall, 1998.

SHERESTHA, M. N. 2003. **Spatially Distributed Hydrological Modelling considering Land-use changes using Remote Sensing and GIS.**

SILVA, J. A. **Tendências do Novo Rural na Bacia do Ribeirão Cafezal.** Dissertação (Mestrado em geografia, Meio Ambiente e Desenvolvimento) Centro de geociências, Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2006.

SILVEIRA, Alexandre L. L **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica.** In TUCCI, Carlos E. M (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2009. p 40.

SPERANDIO, H. V.; CECÍLIO, R. A.; CAMPANHARO, W. A.; CARO, C. F. D.; HOLLANDA, M. P. Avaliação da erosão hídrica pela alteração na superfície do solo em diferentes coberturas vegetais de uma sub-bacia hidrográfica no Município de Alegre, ES. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 33, n. 4, 2012.

STIPP, N. A. F.; OLIVEIRA, J. **Estudos ambientais na área da microbacia do ribeirão dos Apertado – Londrina – PR.** 2004.

SUBRAMANYA, K. **ENGINEERING HYDROLOGY**. 4 th Edition. MC Graw Hill Education, 2013.

SWAT, Soil & Water Assessment Tool. Disponível em <<http://swat.tamu.edu/>>. Acesso em 15 de abril de 2016.

TUCCI C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH. 2009.

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

VALERIANO, M.M.; ROSSETTI, D.F. TOPODATA: **Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2009.

WILLIAMS, J. R. Chapter 25: The EPIC Model. In: SINGH, V. P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Littleton: Water Resources Publications, 1995. p. 909-1000.

XU, C-Y. Chapter 1: Modelling in hydrology - **Hydrologic Models (Lärobok i Avrinningsmodeller)**. Uppsala University, Department of Earth Sciences, Hydrology. 2002, p. 1-1.

YASSUDA, E. R. **Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais**. Ver. Adm. Púb., v.27, n.2, p.8, 1993.

YIHUN, R. D., SRINIVASAN, R., GEORGE, C. QGIS Interface for SWAT (QSWAT). v 1.3. 2016.

ZHAN, X. & HUANG, M. L. 2004. **ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps**. Environmental Modelling & Software 19 (10). p. 875 – 879.