



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



CAIO VINICIUS FERREIRA MARMONTEL

**MODELO HIDROLÓGICO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAIBUNA, REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA - SÃO PAULO, BRASIL**

Botucatu

2018

CAIO VINICIUS FERREIRA MARMONTEL

**MODELO HIDROLÓGICO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PARAIBUNA, REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA - SÃO PAULO, BRASIL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

Orientador: Prof^o. Dr. Valdemir Antonio Rodrigues

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Teresa Cristina Tarlé Pissarra

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

M352m Marmontel, Caio Vinicius Ferreira, 1988-
Modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do rio Paraibuna, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil / Caio Vinicius Ferreira Marmontel. - Botucatu:[s.n.], 2018
113 p.: ils. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Valdemir Antonio Rodrigues
Coorientadora: Teresa Cristina Tarlé Pissarra
Inclui bibliografia

1. Água - Conservação. 2. Bacias hidrográficas. 3. Calibração. 4. Hidrologia florestal. 5. Mata Atlântica. 6. Hidrologia - Modelos. 7. Estudos de validação. I. Rodrigues, Valdemir Antonio. II. Pissarra, Teresa Cristina Tarlé. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: MODELO HIDROLÓGICO SWAT NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAIBUNA, REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA, SÃO PAULO, BRASIL

AUTOR: CAIO VINICIUS FERREIRA MARMONTEL

ORIENTADOR: VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES

COORIENTADORA: TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em CIÊNCIA FLORESTAL, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. VALDEMIR ANTONIO RODRIGUES
Departamento de Ciência Florestal / FCA/UNESP - Botucatu, SP



Prof. Dr. LINCOLN GEHRING CARDOSO
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu

Pesquisador MARCELO ZANATA
Divisão de Florestas e Estações Experimentais / Instituto Florestal - Batatais/SP



Prof. Dr. MAURÍCIO RANZINI
- / Engenharia Rural - Instituto Florestal



Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS
Departamento de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, sp

Botucatu, 03 de maio de 2018.

Aos meus amados pais
(Solange e Marcos),
irmã (Camila) e a minha
namorada (Débora
Luíza), dedico.

AGRADECIMENTOS

Mais um ciclo foi finalizado e seria muito difícil realizar essa etapa sem ajuda de muitas pessoas: GRATIDÃO a todos que contribuíram para o término na fase do meu doutorado, em especial:

À coordenação do programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da FCA/UNESP do Câmpus de Botucatu, pela oportunidade e suporte para a realização do doutorado;

À Comissão Técnico Científica (COTEC) pela autorização e apoio na realização da pesquisa no Instituto Florestal na área experimental do Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo no doutorado (DS);

Ao Professor Dr. Valdemir Antonio Rodrigues (FCA-UNESP) pela orientação, por todo apoio, confiança, incentivo, motivação e momentos descontraídos de amizade;

À professora Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissarra (FCAV-UNESP) pela coorientação, por toda atenção, conhecimento, apoio, generosidade, ensinamento fornecido durante a elaboração da modelagem hidrológica SWAT;

Ao Pesquisador Científico Dr. Maurício Ranzini (IF-SP) por toda ajuda na tabulação dos dados hidrológicos e climáticos, paciência de corrigir os erros na tabulação dos dados, disposição de ensinar as técnicas e o manuseio dos equipamentos da estação meteorológica e fluviométrica, críticas para a melhoria na redação científica no exame de qualificação e na defesa final, além dos momentos descontraídos durante as viagens para o Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha;

Aos membros da banca da defesa final (Professor Dr. Lincoln Gehring Cardoso (FCA-UNESP), Pesquisador Científico Marcelo Zanata (IF-SP) e Professor Dr. Sérgio Campos (FCA-UNESP)) e da qualificação (Professor Dr. Luiz Alberto Blanco Jorge (FCA-UNESP)), por todas críticas e sugestões realizadas, no qual visou para a tese;

Ao Doutorando João Marcos Villela (EESC-USP) pela colaboração, disponibilidade e ajuda no *software* SWAT-CUP;

Ao Dr. Diego Silva Siqueira (FCAV-UNESP) pela colaboração na parte da estatística dos dados;

Aos técnicos (João, Wanderley e Ivail) por todo apoio e auxílio na coleta de dados no Laboratório de Hidrologia Florestal Engº Agrº Walter Emmerich do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha;

À seção de Pós-Graduação (Taynan, Débora, Kátia), Departamento de Ciências Florestais (Rosângela), e aos funcionários da biblioteca (Célia, Ana Lúcia, Airton, Valdemir, Solange, Nilson, Messias, Eliane, Maísa) pela atenção e serviços prestados;

Aos docentes da UNESP durante o meu período de doutorado, transmitindo seus conhecimentos científicos, além do incentivo de emancipar o meu espírito crítico das coisas e a capacidade de elaborar o planejamento, metodologia, estatística e a redação científica;

Ao motorista (Dagol) que durante o período do projeto que fazia o trajeto de ida e volta de Botucatu a Cunha com muita generosidade e alegria;

Aos colegas (Luiza, Gláucia, Luiz e Samara) do Laboratório de Hidrologia Florestal (LHIF) pela companhia, ajuda e momentos descontraídos;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES), pela oportunidade de realizar doutorado sanduíche pelo Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE - Edital nº 19/2016 – Processo nº 88881.135469/2016-01) no Departamento de Ciencia y Tecnologia Agroforestal y Genética da Universidad Castilla-La Mancha, Albacete – Espanha;

Ao professor Manuel Esteban Lucas Borja do Departamento de Ciencia y Tecnologia Agroforestal y Genética da Universidad Castilla-La Mancha, Albacete – Espanha por todo ensino, conhecimento e aprendizado durante o meu estágio durante o PDSE;

À meus amigos da “rep. sem nome”: “Renanzeras”, “Bixones”, “Hermaneras”, durante dois anos de convivência (2016-2017), conversas, risadas, planos para o futuro e acompanhamento diário durante a minha fase no doutorado;

Aos meus pais Marcos e Solange Marmontel, minha irmã Camila, por terem me apoiado;

À minha namorada Débora Luíza por todo amor, apoio e paciência, durante essa jornada acadêmica no doutorado.

“Água;
A água é fonte de vida;
Sem ela ninguém viveria;
A água produz energia;
E sem a água;
A energia também não existiria;
A água está acabando nos rios;
E por isso os peixes estão indo embora; Sem vitória;
A importância da água para o homem;
É fundamental;
Porque sem água;
Todos viveriam mal.”

Lorenza Silva Santo

RESUMO

A água disponível para o consumo humano vem se tornando cada vez mais escassa, um exemplo, foi a crise hídrica iniciada em 2014 na Região Metropolitana de São Paulo. Diante desse problema, uma possibilidade de melhorar a compreensão do comportamento hidrológico, é a utilização de tecnologias, ou seja, as bases computacionais, em especial a integração do SIG com a modelagem hidrológica, por possuir um grande potencial de estimar quantitativamente a vazão. O presente estudo teve como objetivo testar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT para estimação de vazões em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica, no estado de São Paulo. O rio Paraibuna utiliza suas águas para gerar energia elétrica e é um dos formadores do rio Paraíba do Sul, importante corpo d'água da região sudeste do Brasil. Os dados climáticos e fluviométricos foram coletados no LHFWE/PESM-NC com uma série histórica de 22 anos. O trecho da bacia hidrográfica estudada tem elevação de 974 a 1662 metros, cinco tipos de solos e três tipos de usos da terra. As avaliações dos dados observados e simulados na calibração e validação foram feitas por meio da avaliação dos gráficos-visuais de dispersão, hidrogramas e índices estatísticos pelo SWAT-CUP. Os dados gerados do balanço hídrico pelo SWAT, após a calibração foram valores próximos com a realidade. Na calibração e validação foi verificado boa aderência entre os dados simulados e observados, ou seja, os valores simulados reconheceram os picos e recessões dos valores observados. Os índices estatísticos (NS, PBIAS, RSR e R^2) calculados para a calibração e validação do SWAT foram qualificados como "muito bom" para a estimação das vazões. Os resultados confirmaram a aplicabilidade do modelo, dessa forma, pode servir como ferramenta para planejamento e gestão de políticas públicas dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, na região da Mata Atlântica. O modelo hidrológico SWAT mostrou-se muito bom e apto para estimação de vazões e do balanço hídrico no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna.

Palavras-chave: Água. Bacia hidrográfica. Calibração. Hidrologia florestal. Mata Atlântica. Modelagem hidrológica. Validação.

ABSTRACT

The water available for human consumption is becoming increasingly scarce, an example was the water crisis started in 2014 in the Metropolitan Region of São Paulo. Faced with this problem, one possibility to improve the understanding of hydrological behavior, is the use of technologies, that is, the computational bases, especially the integration of GIS with hydrological modeling, because it has a great potential of quantitatively estimate the flow rate. The present study had as objective to test the applicability of the SWAT hydrological model for flow estimation in the stretch of the Paraibuna river basin - Paraiba Valley, in the Atlantic Forest region, in the state of São Paulo. The Paraibuna River uses its waters to generate electricity and is one of the creators of the river South Paraiba, an important body of water in the southeastern region of Brazil. Climatic and fluviometric data were collected at the LHFWE/PESM-NC with a historical series of 22 years. The stretch of the studied basin has elevation of 974 to 1662 meters, five types of soils and three types of land use. The evaluations of the data observed and simulated in the calibration and validation were done by means of the evaluation of the visual graphics of dispersion, hydrograms and statistical indexes by SWAT-CUP. The data generated from the SWAT water balance after calibration, were close to reality. In the calibration and validation, in good adherence was observed between the simulated and observed data, that is, the simulated values recognized the peaks and recessions of the observed values. The statistical indices (NS, PBIAS, RSR and R^2) calculated for SWAT calibration and validation were qualified as "very good" for the estimation of flows. The results confirmed the applicability of the model, so it can serve as a tool for planning and management of water resources public policies in watersheds, in the Atlantic Forest region. The SWAT hydrological model was very good and suitable for estimation of flow and water balance in the stretch of the Paraibuna river basin.

Keywords: Water. Watershed. Calibration. Forest hydrology. Atlantic Forest. Hydrological modeling. Validation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do ciclo hidrológico.....	35
Figura 2 - Processo de entrada de dados do modelo SWAT.....	42
Figura 3 - Localização do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, estado de São Paulo - Brasil.....	53
Figura 4 - Localização do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, estado de São Paulo - Brasil.....	54
Figura 5 - Fluxograma metodológico	56
Figura 6 - Modelo Digital de Elevação no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	58
Figura 7 - Classes de declividade no trecho bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	59
Figura 8 - Tipos de solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	60
Figura 9 - Usos do solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	65
Figura 10 - Sobreposição dos mapas temáticos utilizados no modelo SWAT para gerar as HRU's	66
Figura 11 - Localização das estações meteorológica e fluviométrica no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil	67
Figura 12 - Etapas para avaliação da aplicabilidade do SWAT	70
Figura 13 - Características fisiográficas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	75
Figura 14 - Série de dados de precipitação média diária e vazão média diária da MA/LHFWE no PESH-NC do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	80
Figura 15 - Correlação dos dados de precipitação média diária e vazão média diária da MA/LHFWE no PESH-NC do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	80

Figura 16 - Balanço hídrico sem calibração, simulado pelo SWAT	81
Figura 17 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas sem calibração, durante o período de 1996 até 2005	82
Figura 18 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas, vazões médias diárias mensais simuladas sem calibração pelo modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005.....	83
Figura 19 - Ranking de importância de 15 parâmetros de sensibilidade.....	86
Figura 20 - Balanço hídrico simulado pelo SWAT após a calibração	89
Figura 21 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas após a calibração, durante o período de 1996 até 2005	90
Figura 22 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas, vazões médias diárias mensais simuladas após a calibração do modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005.....	92
Figura 23 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas após a validação, durante o período de 2006 até 2014	94
Figura 24 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas, vazões médias diárias mensais simuladas após a validação do modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 2006 até 2014.....	95
Figura 25 - Distribuição espacial da média diária mensal de vazão no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Grupos hidrológicos do solo	45
Quadro 2 - Classes de declividade e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil	59
Quadro 3 - Tipos de solo e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	61
Quadro 4 - Parâmetros físico-hídricos do solo empregados pelo modelo SWAT	62
Quadro 5 - Classes de uso do solo e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil	66
Quadro 6 - Localização das estações meteorológica e fluviométrica no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil	68
Quadro 7 - Parâmetros climáticos a serem empregados no modelo SWAT.....	69
Quadro 8 - Parâmetros, métodos e limites utilizados para a análise de sensibilidade	71
Quadro 9 - Classificação dos índices estatísticos de qualidade da simulação da vazão média diária mensal no SWAT-CUP	73
Quadro 10 - Características fisiográficas das 27 sub-bacias no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	76
Quadro 11 - Características da declividade das 27 sub-bacias no trecho da bacia do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil.....	77
Quadro 12 - Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT na região sudeste.....	87
Quadro 13 - Valores dos parâmetros utilizados na calibração semi-automática pelo SWAT-CUP, com seus respectivos valores iniciais, limites (inferiores e superiores) e os valores calibrados	88

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Valores da estatística descritiva calculadas a partir dos dados climáticos do LHFWE/PESM-NC no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil..... 78
- Tabela 2** - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados sem calibração, durante o período de 1996 até 200585
- Tabela 3** - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados após a calibração, durante o período de 1996 até 200593
- Tabela 4** - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados após a validação, durante o período de 2006 até 201496

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

abr.	abril
ago.	agosto
AGRC	Agrícola
AGWA	<i>Automated Geospatial Watershed Assessment</i>
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
ANION_EXC	Porosidade do solo em que os ânions são excluídos
APP	Área de Preservação Permanente
ARS	<i>Agricultural Research Service</i>
C	Cambissolo
CANMX	Armazenamento máximo do dossel
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal principal
CH_N2	Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal
CH3	Associação de CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico + CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente e moderado, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado
CLAY	Percentual de argila
CN	Curva Número
CN2	Número da curva na condição II de umidade
COTEC	Comissão Técnico Científica
CUP	<i>Calibration and Uncertainty Procedures</i>
CX16	Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média ou argilosa, fase relevo forte ondulado
CX22	Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente e moderado + CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado
CX23	Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média, fase relevo forte ondulado
DEWPT	Temperatura no ponto de orvalho

dez.	dezembro
DF	Distrito Federal
EF-MA	Estação fluviométrica da microbacia A
EM	Estação Meteorológica
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta
EPM	Erro padrão médio
ES	Espírito Santo
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo
ESRI	<i>Environmental System Research Institute</i>
ESSC	Escola de Engenharia de São Carlos
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
EXC	Somente excesso
FCA	Faculdade de Ciências Agrônomicas
FCAV	Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias
fev.	fevereiro
FRSE	vegetação florestal
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo
GW_REVAP	Coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular
GWQMN	Limite entre a profundidade de água no aquífero raso para o escoamento de base
H	Amplitude altimétrica
HRU	<i>Hydrologic Response Unit</i>
HRU's	<i>Hydrologic Response Units</i>
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo
I	Índice de calor anual
IA	Abstrações iniciais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia
IF	Instituto Florestal
jan.	janeiro
JICA	Japan International Cooperation Agency
jul.	julho
jun.	junho
LH	<i>Latin Hypercube</i>

LHFWE	Laboratório de Hidrologia Florestal Eng° Agr° Walter Emmerich
LHIF	Laboratório de Hidrologia Florestal
LI	Limite inferior
LS	Limite superior
mar.	março
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
MT	Mato Grosso
NC	Núcleo Cunha
NLAYERS	Número de camadas no perfil do solo
nov.	novembro
NS	Nash & Sutcliffe
NYSKIP	Período de aquecimento
out.	outubro
P	Precipitação
PAST	Pastagem
PBIAS	Percentual de tendência
PCPD	Número de dias de precipitação
PCPMM	Precipitação média
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para precipitação máxima
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação
PDSE	Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior
PESM	Parque Estadual da Serra do Mar
PR	Paraná
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos após dias secos
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos após dias úmidos
q	Deflúvio
RAINNHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo
RCTAS	<i>Research Center of Texas Agricultural Station</i>
REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o ocorrer o "revap"

RL26	Associação de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico A moderado, textura média ou argilosa, substrato granitóides + CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico A moderado textura média ou argilosa, ambos fase relevo forte ondulado
ROCK	Percentual de pedra
RSR	Erro padrão médio normalizado
S	Sul
SAND	Percentual de areia
SC	Santa Catarina
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
set.	setembro
SHE	<i>Système Hydrologique Européen</i>
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SILT	Percentual de silte
SNAM	Nome do solo
SOL_ALB	Albedo de solo em condições saturadas
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_BD	Densidade do solo seco ou aparente ou global
SOL_CBN	Carbono orgânico
SOL_EC	Condutividade elétrica
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado
SOL_ZMX	Profundidade das raízes
SOLARRAV	Radiação solar
SP	São Paulo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	<i>Sequential Uncertainty Fitting</i>
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
TMPMN	Temperatura mínima
TMPMX	Temperatura máxima
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima
TOPMODEL	<i>Topography Based Hydrological Model</i>

txt.	Texto
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	Equação Universal da Perda de Solo
USLE_K	Fator erodibilidade do solo
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
W	Oeste
WINDAV	Velocidade do vento
X	Longitude
Y	Latitude

LISTA DE SÍMBOLOS

m	metros
mm	milímetros
Δs	variação de água no solo
P	fósforo
mm.hr ⁻¹	milímetros por hora
g.cm ⁻³	gramas por centímetro cúbico
mm.mm ⁻¹	milímetros por milímetros
%	porcentagem
°C	graus
MJ.m ² .dia ⁻¹	megajoule por metro quadrado ao dia
m.s ⁻¹	metros por segundo
H ₂ O	água
t	tempo
mm H ₂ O mm.solo ⁻¹	milímetro de coluna de água no solo
km ²	quilometro quadrado
R ²	coeficiente de determinação
m ³ .s ⁻¹	metro cúbico por segundo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	31
2	REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1	Mata Atlântica	33
2.2	Ciclo Hidrológico	35
2.3	Bacias Hidrográficas	38
2.4	Integração de SIG com modelos hidrológicos	40
2.5	Modelo SWAT	41
2.5.1	Conceito e fundamentação	41
2.5.2	Entrada de dados	42
2.5.3	Análise de sensibilidade, calibração e validação	46
2.5.4	Aplicações	49
3	MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1	Caracterização da área	53
3.2	Sistemas computacionais	55
3.3	Métodos	56
3.3.1	Aquisição, parametrização, entrada de dados e execução	57
3.3.2	Análise de sensibilidade, calibração e validação no SWAT-CUP	70
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	Características fisiográficas	75
4.2	Modelo SWAT	81
4.2.1	Sem calibração	81
4.2.2	Análise de sensibilidade	85
4.2.3	Calibração	87
4.2.4	Validação	93
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
6	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS	100

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento em abundância e reciclável, sendo fundamental para a existência de todos os seres do planeta Terra. No entanto, a água disponível para o consumo humano vem se tornando cada vez mais escassa, um exemplo, foi a crise hídrica iniciada em 2014 na Região Metropolitana de São Paulo. Esses problemas são ocasionados diante da poluição dos recursos hídricos, desmatamento e desperdícios, gerados principalmente pela urbanização e a industrialização, além da má distribuição da água, tanto espacial quanto temporal.

Diante desses problemas, uma possibilidade de melhorar a compreensão do comportamento hidrológico, é a utilização de tecnologias, ou seja, as bases computacionais, em especial a integração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) com a modelagem hidrológica, por possuir um grande potencial de estimar quantitativamente a vazão.

Os estudos em modelagem hidrológica Soil and Water Assessment Tool (SWAT) são comuns em bacias hidrográficas com usos e coberturas de pastagem e agricultura, porém poucos estudos avaliaram o potencial de produção de água em sistemas protegidos de ecossistemas florestais, como por exemplo, a Mata Atlântica.

A bacia do rio Paraíba apresenta um déficit, quando se refere a modelagem e necessita deste tipo de estudo para fornecer um suporte para o auxílio na tomada de decisão do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. O rio Paraíba utiliza suas águas para gerar energia elétrica e é um dos formadores do rio Paraíba do Sul, importante corpo d'água da região sudeste do Brasil e o principal manancial de abastecimento do Vale do Paraíba, inclusive a cidade do Rio de Janeiro. Além de recentemente ter sido interligado (após a crise hídrica de 2014) ao Sistema Cantareira, responsável pelo abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo.

A parceria do Instituto Florestal (IF) e a Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) possibilita realizar estudos de modelagem hidrológica em bacias localizadas em uma Unidade de Proteção Integral do bioma Mata Atlântica. Dessa forma, possibilita nortear a aplicabilidade dessa ferramenta para a gestão e políticas públicas dos recursos hídricos. Neste sentido a hipótese do trabalho é de que seria possível a partir do uso do modelo SWAT, simular a vazão.

O presente estudo teve como objetivo testar a aplicabilidade do modelo hidrológico SWAT para estimação de vazões em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica, no estado de São Paulo, Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção apresentam-se informações sobre a importância da Mata Atlântica e sua relação com a água, também é mostrado os processos hidrológicos do ciclo hidrológico e os fatores que influenciam e é apresentado as características da bacia hidrográfica e a importância de utilizá-la como unidade de planejamento.

2.1 Mata Atlântica

A Mata Atlântica é considerada Patrimônio Nacional pela Constituição Federal (art. 255), mas esse bioma brasileiro está ameaçado de extinção e necessita ser protegida (VARJABEDIAN, 2010). É considerada a segunda maior floresta pluvial tropical da América, que se estendia ao longo da costa brasileira, percorrendo do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul, leste do Paraguai e nordeste da Argentina (GALINDO-LEAL, 2003).

No ano de 1500 ela ocupava uma área de 1.315.000 km², ou seja, 15% do território brasileiro, que ao longo do tempo foi reduzido drasticamente, restando 8,5% de remanescentes florestais acima de 100 hectares e 12,5% acima de 3 hectares da sua área original (SOS MATA ATLANTICA, 2015). Vivem na Mata Atlântica cerca de 72% da população brasileira (VARJABEDIAN, 2010).

A devastação da Mata Atlântica foi ocasionada em função dos recursos financeiros, principalmente por atividades agrícolas, industriais e expansão urbana (MORELLATO; HADDAD, 2000). Cerca de 50% da Mata Atlântica encontra-se protegida por Unidades de Conservação (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005).

Os remanescentes de maior extensão localizam-se ao longo da Serra do Mar, a leste do estado, pois devido ao relevo acidentado, não era possível o uso da terra para fins econômicos (SOUZA et al., 2008). Ela protege uma das poucas áreas contínuas de Mata Atlântica, sendo que sua importância está na conservação da biodiversidade, devido a presença de espécies endêmicas e ameaçadas em extinção (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005).

A Mata Atlântica está entre as cinco regiões do planeta com maior biodiversidade, considerada um “hotspot”, denominada como uma área rica em espécies endêmicas e um dos biomas mais ameaçados do mundo (GALINDO-LEAL; CÂMARA, 2005). Apesar de grande parte já ter sido desmatada, ainda possui 20 mil espécies vegetais e mais de 8.000 espécies endêmicas, entre elas, 298 espécies de

mamíferos, 992 espécies de aves, 200 espécies de répteis, 370 espécies de anfíbios e 350 espécies de peixes (MYERS et al., 2000; SOS MATA ATLÂNTICA, 2015).

A Mata Atlântica tem uma grande diversidade florística, devido as diferentes condições climáticas, ecológicas, geomorfológicas e a forte influência oceânica (GOMES et al., 2011). Possui o recorde de plantas lenhosas (angiospermas) por hectare, com 450 espécies no sul da Bahia (VARJABEDIAN, 2010).

Existem diversas fitofisionomias na Mata Atlântica, dentre elas: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Decidual e Floresta Ombrófila Aberta, restingas, manguezais e campos de altitude. A Floresta Ombrófila Densa apresenta abundância de lianas lenhosas e epífitas, possui características de climas tropicais com temperaturas elevadas e altas precipitações, distribuídas de forma homogênea durante o ano, não tendo praticamente período de estiagem (IBGE, 2012). A predominância da vegetação serrana é a Floresta Ombrófila Densa (VELOSO et al., 1991).

A Serra do Mar e da Mantiqueira apresentam uma grande variação altimétrica, podendo apresentar a capacidade de alterar a fisionomia da vegetação (MOREIRA; CAMELIER, 1977). A Floresta Ombrófila Densa Alto-Montana possui no mínimo 1.000 metros (m) de altitude, também é conhecida como “Mata de Neblina” (WALTER, 1986; VELOSO et al., 1991), “Mata ou Floresta Nebular” (FALKENBERG; VOLTOLINI, 1995).

Nesses locais, por exemplo a Serra do Mar (Núcleo Cunha), ocorre o nevoeiro orográfico, devido ao encontro do ar úmido e do mar em direção ao continente pelos ventos da brisa marítima e ao encontrar a escarpa da Serra do Mar, o ar é forçado a subir e se condensa em pequenas gotículas que se mantêm suspensas na atmosfera e a água evaporada se condensa em nevoeiro, ocorrendo a precipitação nessas áreas elevadas (ARCOVA, 2013).

Nesses ambientes, há um ganho extra de água por estarem localizados nas partes superiores das montanhas, onde as nuvens são mais frequentes, além da retenção hídrica ser menor, por ter redução da evapotranspiração e da radiação solar (BRUIJNZEEL; PROCTOR, 1995; HAMILTON et al., 1995).

Um maior acúmulo de matéria orgânica no solo é ocorrido em altitudes elevadas que possuem menores temperaturas, devido a diminuição da taxa de decomposição da biomassa, indicando maior potencial de retenção hídrica e fixação de carbono (MOREIRA; CAMELIER, 1977).

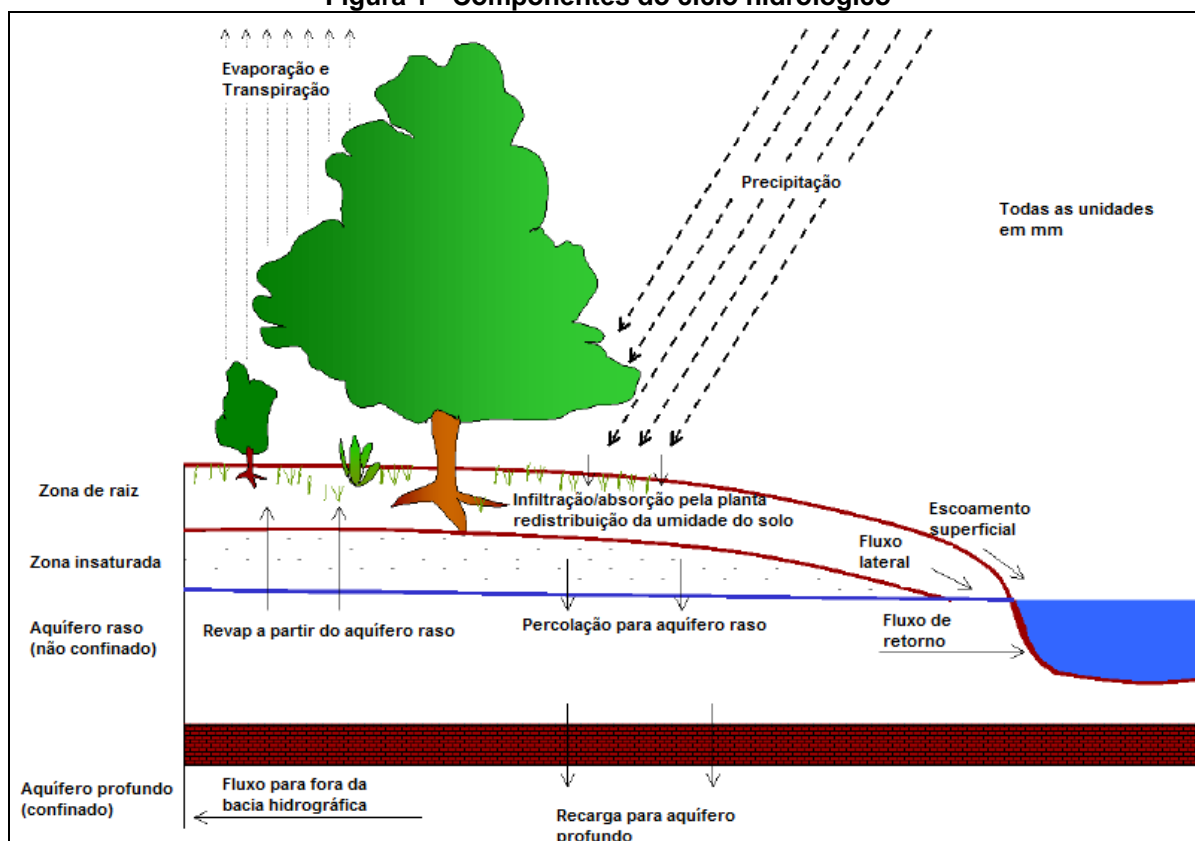
O clima na região da Mata Atlântica está em uma faixa de transição entre o tropical e o subtropical, predominante quente e úmido, as temperaturas médias são elevadas em todas as estações do ano (SOS MATA ATLÂNTICA, 2015). Possui solos quimicamente pobres, topografia acidentada e por ter elevada densidade no interior da mata a energia solar é com menor intensidade (RIZZINI et al., 1988).

Na Mata Atlântica existem diversos rios que abastecem as cidades/metrópoles brasileiras e com a presença da vegetação regulam o fluxo dos mananciais hídricos, melhora a fertilidade do solo e as condições climáticas, protege escarpas e encostas das serras e preserva o patrimônio natural e cultural (VARJABEDIAN, 2010).

2.2 Ciclo Hidrológico

A hidrologia é uma ciência interdisciplinar que estuda o comportamento da água e como ciência está voltada para a representação dos estudos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica (TUCCI, 2009). De acordo com Kobiyama (2000) o tema principal da hidrologia é o ciclo hidrológico que envolve diversos processos hidrológicos (Figura 1).

Figura 1 - Componentes do ciclo hidrológico



Fonte: NEITSCH et al. (2011, p. 8).

O ciclo hidrológico é um processo dinâmico que representa os diferentes caminhos que a água pode percorrer e se modificar ao longo do tempo (LIMA, 2008), além dos fatores que têm influência, exclusivamente a vegetação que é importante para os processos verticais: evapotranspiração, precipitação, interceptação, escoamento pelo tronco, infiltração e processos horizontais: escoamento superficial e sub-superficial (KOBAYAMA, 2000).

O ciclo hidrológico é constituído por um conjunto de fases, que realiza a circulação em três partes do sistema da terra, sendo atmosfera, hidrosfera e a litosfera. A entrada e a saída de água variam em função do armazenamento no sistema em uma determinada área, e a forma de avaliar cada fase do ciclo hidrológico é pela equação do balanço hídrico (VILLELA; MATTOS, 1975; LIMA, 2008).

O balanço hídrico pode ser estimado mensalmente ou anualmente, com todas as variáveis em milímetros (mm) (LIMA, 2008). A água que entra, reabastece o sistema (lençol freático-solo-planta-atmosfera), aflora nas nascentes que também ocorre variação de água no solo (ΔS) e por meio da vazão da bacia, estima-se a produção de água (RODRIGUES, 2014).

Os processos hidrológicos podem ocorrer em duas direções, uma na direção atmosfera-superfície, e a outra direção é superfície-atmosfera, onde o fluxo de água, ocorre fundamentalmente na forma de vapor, como resultado dos fenômenos de evaporação e transpiração (SILVEIRA, 2009). A superfície terrestre engloba os continentes e os oceanos, sendo que parte do ciclo hidrológico é formado pela circulação de água no interior e na superfície dos solos e rochas, nos oceanos e nos seres vivos (MIRANDA et al., 2010).

Em qualquer local e tempo por onde circula a água na superfície terrestre, seja nos continentes ou nos oceanos, há evaporação para a atmosfera, sendo que cerca de 70% da contribuição da evaporação é dos oceanos (SILVEIRA, 2009). A energia solar que atinge a superfície e transforma a água (principalmente a água dos oceanos) em vapor, sobe também para a atmosfera pela transpiração dos organismos vivos, onde esfria gradativamente e origina as nuvens (SETTI et al., 2001).

Em forma de precipitação, quando ocorre complexos fenômenos de aglutinação e o crescimento de microgotículas em nuvens, com presença de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo) formam uma grande quantidade

de gotas e pesos suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência (SILVEIRA, 2009). Quando o vapor de água se transforma diretamente em cristais de gelo e atingem o peso suficiente, a precipitação pode ocorrer na forma de granizo ou neve (LIMA, 2008).

A precipitação é toda água líquida ou sólida que cai da atmosfera para a superfície da Terra, que representa o elo entre as fases atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico, se tornando a entrada (“input”) do sistema hidrológico (LIMA, 2008). A precipitação retroalimenta a dinâmica dos ecossistemas garantindo a sobrevivência dos seres vivos (RODRIGUES, 2014).

A interceptação pelas copas é parte da precipitação retida acima da superfície do pela cobertura florestal, que é uma forma de obstrução ao escoamento (RODRIGUES, 2017). As copas das árvores formam um sistema de amortecimento, direcionamento e retenção das gotas que chegam ao solo, afetando a dinâmica do escoamento superficial e infiltração (OLIVEIRA JÚNIOR; DIAS, 2005).

A interceptação depende das características das precipitações, das chuvas antecedentes, condições climáticas, do tipo e densidade da floresta e da estação do ano (LLOYD; MARQUES FILHO, 1988). Em florestas tropicais a interceptação é consideravelmente maior do que em florestas temperadas (LIMA, 2008).

As copas das árvores da floresta influenciam no recebimento das chuvas, onde uma parte é temporariamente retida pela massa vegetal e em seguida evaporada para a atmosfera (ARCOVA et al., 2003), o restante alcança o solo florestal como gotejamento, precipitação interna e escoamento pelo tronco (SILVEIRA, 2009).

A precipitação interna é a chuva que atinge o piso florestal, incluindo gotas que passam diretamente pelos espaços existentes entre as copas das árvores (BALBINOT et al., 2008). Uma fração da precipitação retida pelas copas atinge diretamente os troncos e posteriormente escoam pelas árvores chegando ao solo, chamado de escoamento pelo tronco. A soma desses dois fluxos hídricos que passam pelo dossel florestal é chamada de precipitação efetiva, sendo responsável pela água do solo, pela absorção por meio das raízes, transpiração das plantas e abastecimento dos rios (ARCOVA et al., 2003).

A água que atinge o solo segue diversos caminhos, e como o solo é poroso há infiltração de toda precipitação que chega ao solo, enquanto a superfície do solo não se satura (SILVEIRA, 2009). A capacidade de infiltração depende do solo, tipo e do uso do solo (RODRIGUES, 2014). A presença da floresta protege o solo dos efeitos

da radiação solar e vento, com isso reduz a evaporação direta do piso florestal e ocorre pelo processo de transpiração (MIRANDA et al., 2010).

A água do solo em bacias florestadas do ponto de vista hidrológico, é classificada em zona de aeração (zona não saturada) e zona saturada (água subterrânea), podendo ser chamado de fase subsuperficial do ciclo hidrológico (LIMA, 2008). A infiltração e a percolação no interior do solo são conduzidas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade (SILVEIRA, 2009).

A umidade do solo realimentada pela infiltração é absorvida (raízes) em parte pelos vegetais e, posteriormente, devolvem à atmosfera pela transpiração (LIMA, 2008). A outra parte é percolada para o lençol freático que provavelmente contribuirá para o escoamento de base dos rios (SILVEIRA, 2009).

O excesso não infiltrado da precipitação, gera o escoamento superficial, que é movido pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo (RODRIGUES, 2014). A presença da vegetação na superfície do solo contribui como obstáculo e favorece que a água em percurso seja infiltrada, além da vegetação reduzir a energia cinética de impacto das gotas de chuva no solo, minimizando a erosão (SILVEIRA, 2009).

Para a elaboração de um plano de bacia hidrográfica é essencial conhecer o ciclo hidrológico, nele deverá ser apontado metas, diretrizes, prioridades e prazos a serem observados pelas respectivas ações de gestão do recurso hídrico, respeitando o comportamento hidrológico do local (ANTUNES, 2015).

2.3 Bacias Hidrográficas

As bacias hidrográficas são um sistema aberto, formado por elementos naturais do meio físico aliado as atividades humanas (PINTO; AGUIAR NETTO, 2008). Elas possuem uma superfície limitada por um contorno, onde a água precipitada quando não é infiltrada, retida ou evaporada é escoada para o curso d'água (SANTOS et al., 2001).

As bacias hidrográficas são unidades fisiográficas delimitada por divisores topográficos e freáticos, sendo que seus limites separam a precipitação incidente para dentro da unidade e toda drenagem da mesma sai por uma única foz (ANTUNES, 2015). São constituídas por uma rede de drenagem e um conjunto de superfícies compostas por cursos d'água que se unem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 2009).

As bacias hidrográficas são compostas por sub-bacias e microbacias, sendo que as sub-bacias reúne várias microbacias, ou seja, as microbacias são as menores unidades do ecossistema (RODRIGUES, 2014). Elas podem ser denominadas um ente sistêmico, ou seja, as chuvas geram os balanços de entrada e saída de água, com isso são delineadas as bacias, sub-bacias e microbacias que possuem uma interconexão (PORTO; PORTO, 2008).

Todos os elementos relacionados com a qualidade e disponibilidade de água possuem em uma bacia hidrográfica, por exemplo: rochas, solos, vegetação natural, atmosfera, paisagem, corpos d'água, entre outros (MOLDAN; CERNY, 1994). A interação das águas com o meio físico, meio biótico, social, cultural e econômico são itens exclusivos de uma bacia hidrográfica (YASSUDA, 1993).

Os estudos hidrológicos em bacias são de fundamental importância para fornecer informações quantitativas e também qualitativas dos processos hidrológicos que ocorrem nesses sistemas (PORTO; PORTO, 2008). Todos os fatores de influência no ciclo hidrológico são envolvidos em uma bacia hidrográfica, sendo adequadas para a realização de estudos de produção de água, conservação e manejo do uso do solo (RODRIGUES, 2011), considerado uma unidade ideal para realizar análises da superfície terrestre, podendo conseguir estudos de inter-relações de diversos elementos que formam a paisagem e os processos que atuam na formação (GUERRA et al., 1999).

Ações de manejo devem ser realizadas com critérios técnicos e com finalidade para um desenvolvimento sustentável, preservando a capacidade de produção de água e sua regularidade (RODRIGUES, 2014). A consciência política-ambiental, comprometimento dos agricultores e as práticas conservacionistas são fatores importantes para minimizar os impactos ambientais (PISSARRA, 2002). Sem as práticas de manejo, ocasionam prejuízos ao meio, tais como: diminuição gradual da água disponível no solo e no sistema hidrológico, erosão do solo e a degradação do ecossistema ripário (RODRIGUES, 2014).

O planejamento das bacias hidrográficas se torna essencial, principalmente em regiões onde há escassez de água (SILVA; PRUSKI, 2000). O planejamento norteia a gestão dos recursos hídricos, que deve ser realizado visando os aspectos hidrológicos, sociais e econômicos (ANTUNES, 2015).

2.4 Integração de SIG com modelos hidrológicos

Para buscar um melhor diagnóstico da situação ambiental e hídrica de uma determinada bacia, ocorre a combinação de modelos hidrológicos unido ao SIG (BALDISSERA, 2005). Essa associação acontece devido a facilidade que as interfaces têm para a compilação de dados espacialmente localizados em toda a área de estudo, além também da facilidade da entrada dos dados exigidos pelo modelo (PACHECO, 2011).

O SIG utiliza as informações espacialmente distribuídos e determina a caracterização da drenagem em bacias hidrográficas, melhorando a preparação dos dados nos estudos de modelagem hidrológica, substituindo a representação cartográfica usual do relevo pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), facilitando a atividade de preparação dos dados (MACHADO, 2002). A determinação dos parâmetros hidrológicos pela MDE pode ter contradições, com isso, nessa fase é fundamental a concretização de um modelo hidrológico para ter o mínimo de erro possível e não se acumular durante a modelagem (MELO et al., 2008).

A integração do SIG com modelos hidrológicos ligado ao trabalho de campo em bacias hidrográficas, visa automatizar as atividades que eram feitas manualmente para definir caracterizações físicas e biológicas do ambiente de uma área de estudo (PISSARRA, 2014). Essa integração é completamente normal, pois o SIG é apropriado para capturar, armazenar, manipular, analisar e visualizar diversos dados georreferenciados (VIEUX, 2004).

O SIG possui um banco de dados com interface geográfica que fornece extensões e operações de dados vetoriais e matriciais, propiciando a modelagem e a extração de informações dos dados (PISSARRA, 2014). Com essa integração pode ser realizado várias operações, além de admitir simplificações da bacia hidrográfica em subáreas homogêneas (CALIJURI et al., 1998).

Pesquisas desenvolvidas na integração da tecnologia do SIG com modelos hidrológicos são realizadas em dois ramos: modelo de dados hidrológicos, que concebem as propriedades e relacionamentos entre as classes geoespaciais e temporais dos dados hidrológicos que descrevem o meio ambiente da água; e o modelo de simulação hidrológica que trabalha os processos e informa como é o movimento da água por meio desse ambiente (WHITEAKER, 2004).

A interface de SIG e a modelagem são atividades de pesquisa voltadas principalmente à área de manejo de recursos naturais e ao planejamento de uso da

terra (TIM; JOLLY, 1994). As ferramentas SWAT, *Topography Based Hydrological Model* (TOPMODEL) e *Système Hydrologique Européen* (SHE) são exemplos que integram SIG com modelos hidrológicos (BEVEN, 2012).

2.5 Modelo SWAT

Nesta subseção são mostrados o conceito, fundamentos, entrada de dados, qualidade dos resultados e as aplicações que já foram realizadas no modelo hidrológico SWAT.

2.5.1 Conceituação e fundamentação

O modelo hidrológico SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS) do *United States Department of Agriculture* (USDA), na década de 90 pelo Dr. Jeff G. Arnold (ARNOLD et al., 1998; NEITSCH et al., 2011).

A ferramenta SWAT é um modelo hidrológico de domínio público, que trabalha em escala de bacias hidrográficas, executando simulações de processos físicos de forma semi-distribuída tanto espacial quanto temporal (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). Pode ser realizada em escala diária/mensal e tem a capacidade de simular por longos períodos (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994; NEITSCH et al., 2011).

O modelo foi criado para desenvolver simulações do ciclo hidrológico, predições de vazão, hidrossedimentológico, aspectos climáticos, qualidade de água, temperatura do solo, análises em reservatórios, crescimento vegetal, práticas agrícolas, escoamento superficial, percolação, fluxos lateral e subterrâneo, evapotranspiração, neve, fluxo de rede de drenagem, pesticidas e bactérias (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012a). A aplicação mundial do SWAT mostra que é um modelo hidrológico versátil, de baixo custo e pode ser utilizado em diversos processos ambientais que se integram, oferece apoio a gestão de bacias hidrográficas e tomada de decisões (GASSMAN et al., 2007).

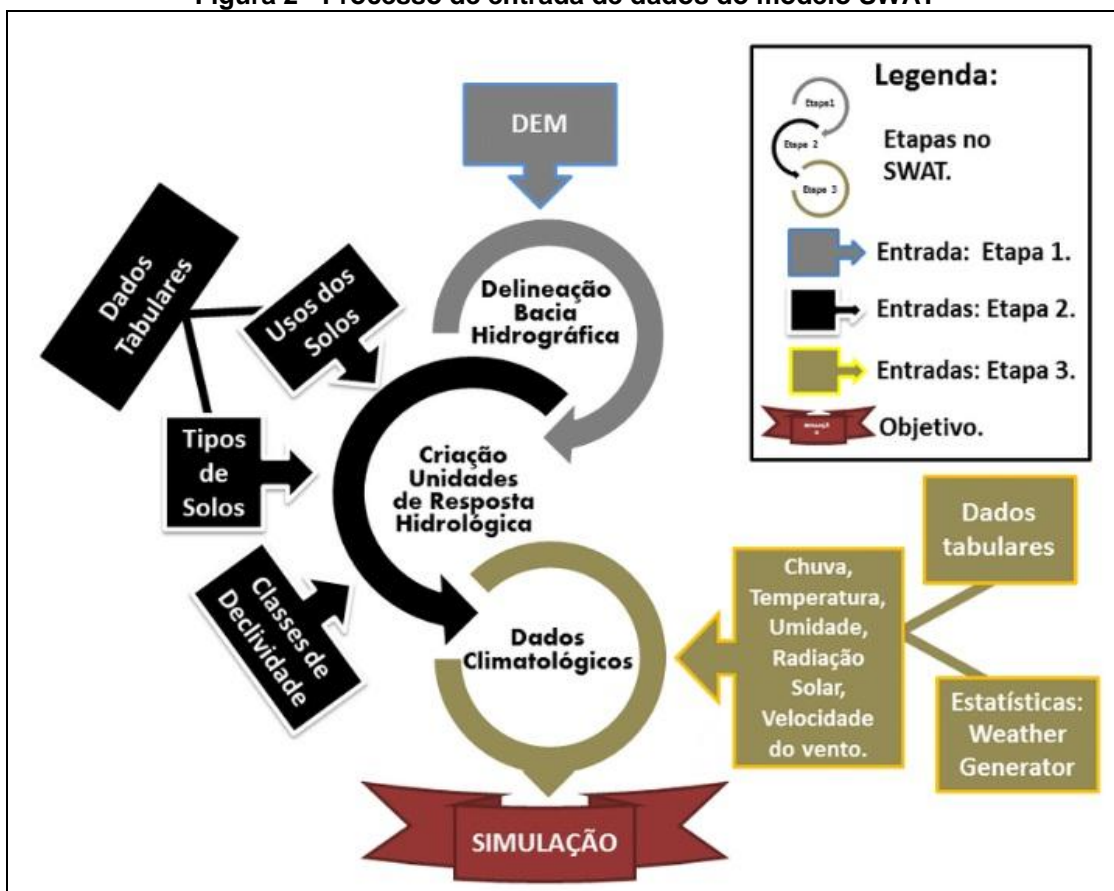
Desde sua criação, o modelo tem sido alvo de modificações e aperfeiçoamento dos seus recursos e expansões de suas capacidades (KRYSAKOVA, ARNOLD, 2008). O modelo tende a evoluir diante das necessidades dos usuários, permitindo a simulação mais precisa dos processos, avanços na ciência e novas funções para expandir o domínio de simulação do SWAT (GASSMAN et al., 2007).

2.5.2 Entrada de dados

A análise integrada dos processos hidrológicos vem sendo um grande destaque para aplicação do SWAT. A base de dados é fundamental para buscar o entendimento das interações entre o uso da terra e a água (OLIVEIRA, 2014). O SWAT pode ser configurado em diferentes interfaces, como por exemplo, o software ArcGIS que tem uma extensão do modelo hidrológico ArcSWAT, do qual possui uma entrada gráfica para o usuário (GEORGE; LEON, 2008).

O modelo SWAT necessita para seu funcionamento uma ampla base de dados de entrada, porém, possibilita ao usuário, método para simular o processo hidrológico (NEITSCH, 2005). Oliveira (2014) informa que o processo se inicia com a entrada de dados na interface na Delimitação Automática da Bacia Hidrográfica, amparando a projeção e a unidade de medida de distância desejada. As informações sobre o relevo, uso da terra e tipos de solo são processadas no SIG para criar as imagens temáticas e inserir os arquivos de entrada requeridos pelo modelo (Figura 2).

Figura 2 - Processo de entrada de dados do modelo SWAT



Fonte: SILVA; CHRISTÓFARO (2016, p. 34).

A entrada do modelo necessita de dados climáticos, tais como: temperaturas máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa, precipitação e radiação solar; na ausência de algum deles, o gerador climático do modelo realiza sua simulação (NEITSCH et al., 2011). Benaman et al. (2005) afirma que o desempenho do modelo é relacionado a disponibilidade de dados climáticos.

A simulação dos processos hidrológicos necessita da divisão em duas partes: fase terrestre do ciclo hidrológico, que quantifica a evapotranspiração real e potencial, escoamento superficial, deslocamento da água pelas camadas do solo, fluxo de base, níveis de erosão entre outros; a segunda parte é em relação ao movimento da água, sedimentos, pesticidas, nutrientes, entre outros, pelas redes de drenagem, até o exutório da bacia (NEITSCH et al., 2005).

A simulação no modelo SWAT da produção de água tem como base a equação do balanço hídrico:

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

Onde SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm H₂O), t é o tempo (dias), R_i é o volume de precipitação no dia i (mm H₂O), Q_i é a quantidade do escoamento superficial no dia i (mm H₂O) é a ET_i é a quantidade de evapotranspiração no dia i , P_i é a quantidade de água que infiltra no solo dia i (mm H₂O) e QR_i é a quantidade do fluxo que retorna no dia i (mm H₂O).

A forma para estimar o escoamento superficial é utilizada a partir do coeficiente de escoamento e a vazão, que é determinado como base em tabelas estabelecidas de estimativas geralmente teóricas em função da área impermeável e a vazão máxima correspondente, utilizando a formulação modificada do Método da Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS) (ARNOLD et al., 2012a). O método CN varia de 0 a 100, definido, em um único valor numérico (NEITSCH et al., 2011).

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

Onde Q_{sup} é o escoamento acumulado (mm H₂O), R_{dia} é a quantidade de chuva (mm H₂O), I_a é as abstrações iniciais que incluem o armazenamento de água na superfície, interceptação e a infiltração (mm H₂O) e S é o parâmetro de retenção (mm H₂O).

As abstrações iniciais (I_a), geralmente têm sido consideradas como sendo igual a $0,2 S$, de forma que a equação, pode ser reescrita dessa maneira:

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

O parâmetro de retenção (S) pode ser calculado pela equação:

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

Onde CN é a Curva-Número (dia).

O método Curva-Número define três condições de umidade nos solos, sendo que os valores de CN1 (ponto de murcha permanente) e de CN3 (capacidade de campo) podem ser calculados, a partir do valor do CN2 (média de um solo), com as seguintes equações:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 * (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp [2,533 - 0,00636 * (100 - CN_2)])} \quad (5)$$

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

Baseados na classificação de USDA (2007), relaciona-se os grupos hidrológicos do solo com o mesmo potencial de escoamento em condições similares de precipitação e cobertura vegetal (Quadro 1).

Quadro 1 - Grupos hidrológicos do solo

Grupo Hidrológico	Características
A - baixo potencial de escoamento	Solos com alta taxa de infiltração, mesmo em condição saturada.
	Menos de 10% de argila e 90% de areia ou cascalho, texturas de areia e cascalho.
	$K > 144$ mm/h.
B - moderadamente a baixo potencial de escoamento	Solos com moderada taxa de infiltração, em condição saturada.
	10% a 20% de argila, 50% a 90% de areia.
	$36 < K < 144$ mm/h.
C - moderado potencial de escoamento	Solos com baixa taxa de infiltração, em condição saturada.
	20% a 40% de argila, 50% de areia.
	$3,6 < K < 36$ mm/h.
D - alto potencial de escoamento	Solos com reduzidas taxas de infiltração, em condição saturada.
	Mais de 40% de argila e menos 50% de areia.
	$K < 3,6$ mm/h.

Fonte: Adaptado de USDA (2007, p. 4-7).

O modelo SWAT foi delineado para simular os processos que envolvem o uso e classificação dos solos, chuvas e vazão, com um elevado nível de detalhamento espacial (NEITSCH et al., 2011). Nele é admitido que a bacia seja dividida em sub-bacias, formadas por combinações homogêneas da declividade, tipo do solo e uso do solo, realizado por meio da sobreposição desses mapas, criando o mapa de unidade de resposta hidrológica - *Hydrologic Response Unit* (HRU) (ARNOLD et al., 2012b).

Com o uso da HRU ocorre o aumento da precisão na previsão dos processos, a partir da formação das sub-bacias (NEITSCH et al., 2011). O processamento do modelo SWAT é feito primeiramente pelos cálculos dos fluxos de cada HRU, em seguida, é gerado os resultados para cada HRU que são computados em cada sub-bacia e direcionadas para as calhas dos rios diante da rede de drenagem presente na bacia hidrográfica, dessa forma, aumenta a precisão e gera uma descrição física melhor do balanço hídrico da bacia (NEITSCH et al., 2005; ARNOLD et al., 2012a).

A discretização hierárquica por sub-bacias mostra que a saída de uma sub-bacia entra na outra, garantindo a relação espacial entre elas (ARNOLD et al., 2012a). A maioria das equações que o SWAT utiliza são executadas com a HRU (NEITSCH et al. 2011).

O SWAT fornece algumas opções para gerar as HRU's que podem ser: *Dominant Land Use, Soil, Slope* e *Dominant HRU*, que tem como critério a predominância do uso do solo, solo e classes de declividade em termos de área, no entanto, a maior extensão é adotada para a área da sub-bacia, eliminando as demais e também tem a opção *Multiple HRUs*, que gera combinações de tipo de solo, uso e declividade, diante dos valores atribuídos, que pode ser em área ou porcentagem (MINOTI, 2006). O método de trabalho com múltiplas HRU é feita para explicar a complexidade da paisagem dentro do limite da sub-bacias (ARNOLD et al., 2012b).

2.5.3 Análise de sensibilidade, calibração e validação

O SWAT é um modelo hidrológico que diversas técnicas são desenvolvidas para melhorar e aperfeiçoar, incluindo os procedimentos de análise de sensibilidade, calibração e validação (OLIVEIRA, 2014). Uma simulação descalibrada indica falhas na potencialidade do modelo (BONUMÁ et al., 2013), por exemplo, as vazões superestimadas e subestimadas da vazão (OLIVEIRA, 2014).

Em quase todos os estudos envolvendo o modelo SWAT abrange a análise de sensibilidade, calibração e validação que são as partes mais importantes e necessárias no estudo de modelagem, sendo fatores preponderantes para a aplicação das práticas conservacionistas (WHITE; CHAUBEY, 2005; GASSMAN et al., 2007).

O *Calibration and Uncertainty Procedures* (SWAT-CUP) é uma ferramenta desenvolvida recentemente de domínio público e que auxilia no processo de análise de sensibilidade, calibração e validação. O SWAT-CUP agrupa uma abordagem semi-automática, usando tanto a calibração manual como a automática (ABBASPOUR, 2012).

A ferramenta permite importar os arquivos diretamente do SWAT no formato texto (txt), economizando tempo e facilitando os processos da modelagem hidrológica. A utilização do SWAT-CUP para calibração semi-automática dos parâmetros torna mais rápido e prático o ajuste entre os dados da vazão simulada pelo SWAT e os dados observados (FUKUNAGA, 2012).

O primeiro passo da calibração e validação é a análise de sensibilidade que faz uma previsão dos parâmetros do modelo sobre os resultados de sua saída, permitindo uma racionalização da etapa da calibração e validação (DURÃES et al.,

2011). É um método que avalia a sensibilidade das suas variáveis em relação aos resultados dos modelos hidrológicos, de forma sistemática e livre de variação de erros sistemáticos existentes nos dados mensurados (McCUEN; SNYDER, 1986).

A análise de sensibilidade determina quais são os parâmetros mais importantes para uma determinada bacia hidrográfica, dessa forma, norteia o conjunto de parâmetros que são utilizados no processo de calibração (OLIVEIRA, 2014). Ela identifica os parâmetros que mais influenciaram na simulação do SWAT (ANDRADE et al., 2017).

No SWAT-CUP, há cinco métodos de algoritmos: *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2), *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (ParaSol), *Markov Chain Monte Carlo* (McMc) e *Particle Swarm Optimization* (PSOL) (ABBASPOUR, 2012). A utilização de algoritmos de otimização para calibração de modelos hidrológicos computacionalmente intensivos está se tornando comum (ZHANG et al., 2009).

Um dos métodos mais utilizados em modelagem hidrológica é o SUFI-2, que é um algoritmo robusto e pode utilizar uma grande quantidade de variáveis, além de combinar a otimização da função objetivo e análise de incerteza (ABBASPOUR, et al., 2007). O SUFI-2 possui dois tipos de análise de sensibilidade, a local que altera os valores um de cada vez e a sensibilidade global, é um procedimento demorado e requer um grande número de simulações e permite que as faixas dos valores dos parâmetros possam variar (ABBASPOUR, 2012).

Os valores mensurados devem ser distribuídos em duas séries temporais, sendo uma para a análise de sensibilidade/calibração e outra para a validação (MACHADO, 2002). O período utilizado deve abranger-se de cheias e estiagens prolongadas, para que o modelo tenha condições de simular em sua maior amplitude possível (DURÃES, 2010).

As avaliações da qualidade dos resultados dos modelos hidrológicos são realizadas em duas etapas: calibração e validação (MORIASI et al., 2007). Essas avaliações são usadas para poder comparar os dados simulados com os reais (NEITSCH et al., 2011; ARNOLD et al., 2012b).

A calibração permite que o usuário por meio de uma técnica numérica, otimize os valores dos parâmetros do modelo hidrológico, encontrando uma boa aceitação entre os valores simulados e os valores observados das variáveis de saída (TUCCI, 1998).

A calibração manual procede a alteração dos parâmetros por vez, até que um ajuste aceitável seja alcançado e que os valores simulados cheguem próximos dos observados, entretanto, é bastante custoso, subjetivo, depende da experiência do pesquisador e o conhecimento da sua área de estudo (NEITSCH et al., 2005).

A calibração semi-automática utiliza algoritmos de otimização que busca o melhor ajuste dos parâmetros, processo menos subjetivo, mais rápido e possui maior confiabilidade dos resultados do que a calibração manual (MULETA; NICKLOW, 2005). Ela consegue lidar com um grande número de parâmetros com base na técnica da modelagem inversa, que ajustam os valores simulados aos valores observados do fenômeno em análise (SILVA, 2010).

Para a calibração semi-automática uma metodologia típica para a modelagem hidrológica é necessária ter pelo menos quatro elementos: função objetivo, algoritmo de otimização, critérios de aceitação e dados para calibração (SINGH; WOOLHISER, 2002). Além disso, é imprescindível determinar os valores de ponto de partida e o intervalo de valores para os parâmetros (GUPTA et al., 1999).

De acordo com Antunes (2015) a alteração dos parâmetros pode acontecer de três formas: substituição do valor atribuído da iteração semi-automática, adição da quantia gerada pela iteração semi-automática ou a multiplicação do valor original, atribuído na iteração, alterando o valor do parâmetro em porcentagem.

A iteração é uma forma de obter a representatividade dos processos físicos da bacia, no qual cada iteração busca uma maior relevância que a anterior (ABBASPOUR, 2012). Cada iteração é uma simulação realizada pelo SWAT-CUP, do qual cada parâmetro é pré-definido e varia no intervalo estabelecido na rodagem da calibração semi-automática (ANTUNES, 2015). Abbaspour et al. (2015) relata que 500 simulações para cada iteração é adequado para calibrar o modelo.

Os parâmetros são otimizados pelo SWAT-CUP de forma simultânea, sendo que cada iteração é atribuída a determinados valores dos parâmetros e o algoritmo relaciona os resultados dos dados simulados e observados de vazão em cada iteração (SILVA, 2015). Concluído as simulações, o programa apresenta os valores dos parâmetros de cada simulação realizada e mostra a melhor simulação, para cada iteração (ABBASPOUR, 2012; SILVA, 2015).

O passo final da modelagem hidrológica é a validação, sendo necessário outra série temporal de dados (ARNOLD; ALLEN, 1996). Validação é a utilização dos dados de entrada para outros períodos de dados não utilizados na calibração, para

buscar exatidão do modelo (MORIASI et al., 2007). Os valores dos parâmetros na etapa da validação não podem ser ajustados de acordo com os modelos dos dados, porque essa etapa tem o potencial de avaliar a capacidade do modelo para a previsão de períodos e áreas externas dos dados de calibração, se tornando a fase mais rigorosa do modelo (BENAMAN et al., 2005).

2.5.4 Aplicações

Vários trabalhos nos Estados Unidos e em outras partes do mundo, têm-se utilizado o modelo hidrológico SWAT com enfoque na predição de vazão, sedimentos, carga de poluentes e gestão dos recursos hídricos (GASSMAN et al., 2007). O uso do SWAT em escala de bacias hidrográficas no Brasil iniciou-se em 1999 e tem aumentado consideravelmente durante a última década (BRESSIANI et al., 2015).

Têm sido utilizados por muitas agências governamentais e empresas privadas, bem como, universidades, auxiliando na tomada de decisão para possíveis problemas nos recursos hídricos (ARNOLD; FOHRER, 2005; WILLIAMS et al., 2008).

Dias (2017) testou o desempenho e a viabilidade da aplicação do modelo SWAT na simulação de vazão na área de drenagem do reservatório da UHE Furnas – Minas Gerais (MG) e foi estatisticamente satisfatório, mostrando que o modelo conseguiu representar os processos hidrológicos.

Pereira et al. (2016) tiveram como objetivo calibrar e validar o modelo SWAT para uma sub-bacia do rio Pomba (Brasil) e concluíram que pode ser utilizado para a simulação hidrológica com boas estimativas dos componentes do balanço hídrico e dos fluxos diários médios, máximos e mínimos.

Rosa (2016) avaliou a capacidade de o modelo SWAT simular os processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do rio Pomba (MG) e concluiu que o modelo demonstrou potencial de utilização para simular e ser utilizados como ferramenta para a gestão de recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica.

Yang e Zhang (2016) aplicaram o SWAT para simular a interação do ciclo da água, biogeoquímico e fisiologia de floresta nos Estados Unidos e concluíram que o SWAT obteve simulações razoáveis e discutiram orientações para pesquisas futuras para melhorar a estrutura do SWAT para avaliar esses parâmetros.

Meaurio et al. (2015) avaliaram a capacidade do modelo SWAT na bacia Aixola (Espanha) e de acordo com as estatísticas tiveram bons resultados de simulação de vazão.

O estudo de Antunes (2015) teve como objetivo avaliar os processos hidrológicos no modelo Hidrológico SWAT na bacia do Alto Canoas, Santa Catarina (SC), concluindo no geral que o modelo foi adequado para as simulações de vazões, mas a escala mensal foi melhor do que a diária.

Brito (2015) estimou a produção de água e sedimentos na Bacia do rio Santa Maria da Vitória, Espírito Santo (ES), mostrando que o SWAT apresentou bons resultados para ambos, mostrando que o solo interfere diretamente na produção de sedimentos nas sub-bacias estudadas.

Oliveira (2014) realizou um estudo com o objetivo de avaliar a aplicabilidade do SWAT na predição de vazões em um microbacia na região de Aracruz (ES), concluindo que as simulações de calibração e validação apresentaram um desempenho bom e satisfatório, assim como, a simulação de vazões para cenários com mudanças de uso do solo, indicaram mudanças no regime hidrológico.

Pissarra (2014) aplicou a modelagem SWAT na predição da vazão e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do córrego Rico na região de Jaboticabal, São Paulo (SP), os resultados atestaram sua aplicabilidade, servindo como apoio a gestão e planejamento dos recursos hídricos.

Andrade et al. (2013) também aplicaram e testaram o modelo hidrológico SWAT na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara na região Alto Rio Grande (MG), concluindo que o modelo foi calibrado e validado de forma adequada e apto a simulação hidrológica e as vazões atestaram a aplicabilidade do modelo como ferramenta de gestão e planejamento dos recursos hídricos na região do estudo.

Baker e Miller (2013) tiveram como objetivo determinar as mudanças de cobertura da terra no período de 17 anos em Rift Valley (Quênia) com o modelo SWAT e AGWA (*Automated Geospatial Watershed Assessment*). Constataram alteração no armazenamento de água superficial e subterrâneo como resposta hidrológica do rio Njoro. As simulações realizadas tiveram como resultado o aumento no escoamento superficial e a menor recarga das águas subterrâneas, ocasionando implicações negativas para a conservação do sistema de drenagem superficial, bem como, as comunidades locais.

Castro (2013) simulou a vazão em uma bacia de uso agrícola localizada no bioma Cerrado, avaliando a aplicabilidade do modelo SWAT, concluindo que sem a calibração dos parâmetros mais sensíveis não foi possível representar a realidade de forma satisfatória. O autor também considera que o modelo foi aplicável para a área de estudo, se analisadas as limitações dos dados e processos, bem como, os objetivos das simulações.

Fukunaga (2012) objetivou avaliar a aplicabilidade do SWAT da vazão do rio Itapemirim (ES) e concluiu que o SWAT foi capaz de simular com qualidade.

Salles (2012) realizou a predição de vazões na bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau na região do Distrito Federal (DF), com objetivo da aplicabilidade do SWAT, concluindo de que foi feita de forma satisfatória a predição de vazões na bacia de estudo.

Durães et al. (2011) objetivaram a aplicabilidade do modelo SWAT, sob diferentes usos e ocupação do solo e os resultados foram satisfatórios na simulação do comportamento hidrológico sob diferentes cenários de mudanças de uso do solo.

Baltokoski et al. (2010) tiveram como objetivo realizar a calibração para a simulação da vazão e exportação de fósforo total (P) no modelo SWAT 2005, nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro na região de Pato Branco, Paraná (PR), no qual concluíram que o modelo realizou de forma aceitável as simulações de vazão e de exportação de P total, quando a calibração foi feita com dados com frequência de amostragem regular. Quando a frequência de amostragem foi irregular e o número de dados pequeno, a análise de sensibilidade e a autocalibração não foram eficientes na calibração do modelo.

Jain et al. (2010) aplicaram o modelo SWAT para simulação de escoamento e produção de sedimentos em Satluj River (681,5 Km²), na região do Himalaia ocidental e concluíram que os resultados do SWAT foram razoavelmente satisfatórios mesmo com dados escassos.

Stackelberg et al. (2007) simularam os impactos hidrológicos com o modelo SWAT em uma bacia hidrográfica no rio Tacuarembó no Uruguai. O modelo teve desempenho satisfatório, sendo estimado uma redução do fluxo de 23% da substituição da pastagem para *Pinus taeda*.

Baldissera (2005) num estudo com objetivo de testar a aplicabilidade do SWAT para simulação de vazão, comparou a vazão observada em duas séries temporais de 05/1994 a 01/1998 e de 01/2000 a 12/2002 da bacia do rio Cuiabá na região de

Santo Antônio do Leverger, Mato Grosso (MT), com características heterogêneas de relevo, de uso do solo e de processos hidrológicos. Encontraram dificuldades no ajuste do fluxo de base, devido a base de dados ser limitada, que prejudicou o desempenho das simulações de vazão.

Mapfumo et al. (2004) testaram a capacidade do modelo SWAT para simular o solo em três pequenas bacias hidrográficas na região de Alberta no Canadá e o modelo foi adequado em simular os padrões de água no solo com dados diários.

Ranzini et al. (2004) realizaram um trabalho cujo objetivo foi verificar a validade das premissas da modelagem hidrológica TOPMODEL na bacia "D" do Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha, avaliando os processos hidrológicos e a influência do corte raso. Os autores concluíram que o modelo se mostrou sensível aos parâmetros, sinalizando que a parte física reflete nos processos reais da bacia, e que também a simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso diminuiu o tempo de pico e aumentou a vazão de 17% para 44%. Com o corte raso há um aumento da área de saturação e com isso maior escoamento superficial, o que poderia acarretar problemas ambientais na bacia estudada.

Machado (2002) na bacia hidrográfica do rio Marins na região de Piracicaba (SP) encontrou uma diminuição de 10,8% da produção de sedimentos, em uma simulação de cenário em que a Área de Preservação Permanente (APP) estariam enquadradas na legislação. No outro cenário, onde as pastagens foram substituídas por vegetação nativa, ocorreu uma diminuição de 94% na produção de sedimentos.

Fohrer et al. (2001) simularam o efeito sobre o balanço hídrico com o modelo SWAT em dois distintos cenários de uso e ocupação do solo para uma região da Alemanha. Em comparação com outros modelos, com o uso dos mesmos cenários, os resultados com o SWAT foram satisfatórios.

Spruill et al. (2000) analisaram a aplicabilidade do SWAT em reproduzir vazões diárias em uma microbacia nos Estados Unidos, durante dois anos. Os resultados não foram satisfatórios para os dados diários, porém, adequados nas análises comparativas mensais.

O modelo SWAT tem sido utilizado em diversos locais do mundo, com bons resultados, fundamentação científica, motivando discussões e propostas de soluções aos problemas ambientais em bacias hidrográficas (UZEIKA, 2009).

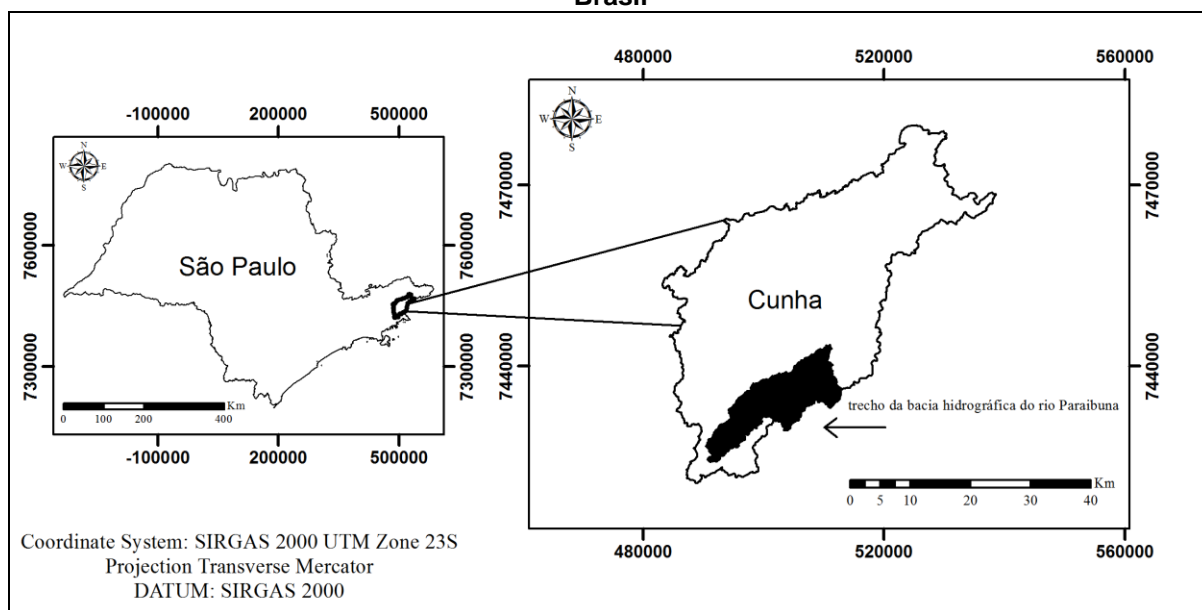
3 MATERIAL E MÉTODOS

Na seção de material e métodos apresentam-se a área de estudo e suas características física, geológica, edafoclimática, geográfica e hidrológica, as bases computacionais, metodologia e os índices de qualidade dos resultados para alcançar com maior precisão o objetivo proposto na pesquisa.

3.1 Caracterização da área

O estudo da avaliação da aplicabilidade do modelo hidrológico foi realizado em um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, com uma área de 15.640 ha (156,4 km²). Está localizado no Vale do Paraíba, município de Cunha, leste do estado de São Paulo - Brasil, entre os paralelos 23°07'43" a 23°16'57" de latitude sul e os meridianos 44°53'20" a 45°04'41" de longitude oeste de Greenwich, com altitude média de 1190 m (Figura 3).

Figura 3 - Localização do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, estado de São Paulo - Brasil



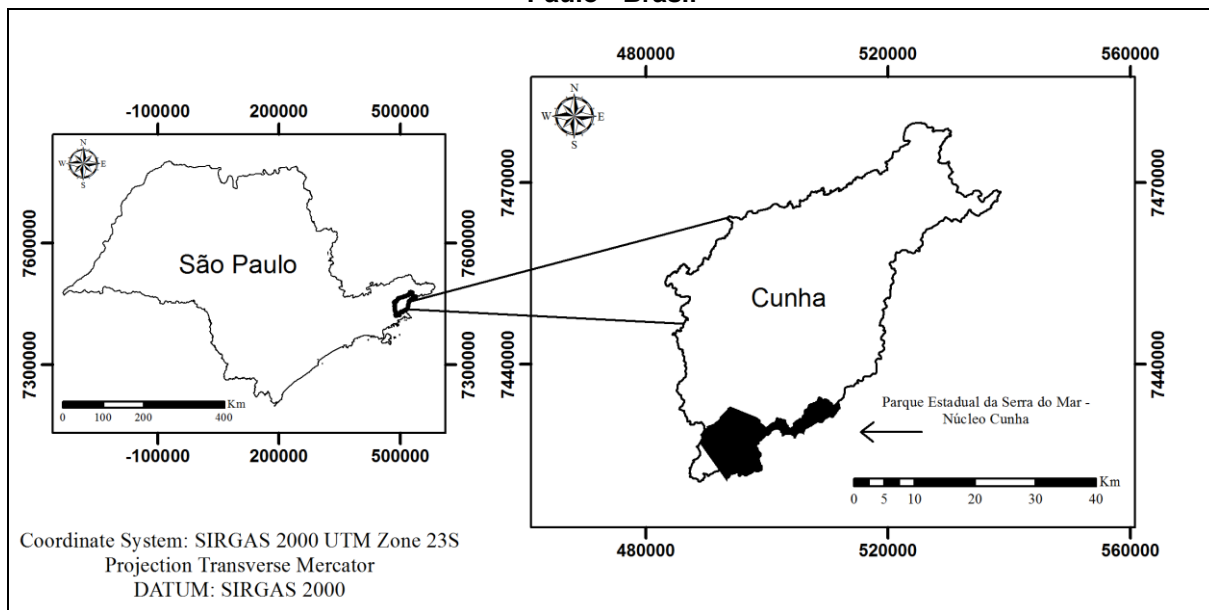
A nascente do rio Paraibuna localiza-se na cidade de Cunha, aproximadamente 1.600 m de altitude, que segue em direção ao sudoeste, sendo o ponto de exutório do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna quando o rio bonito deságua nele. O rio Paraibuna passa pelo município de São Luiz do Paraitinga (próximo aos limites de Ubatuba), Natividade da Serra e no município de Paraibuna, que recebeu seu nome. No município de Paraibuna, as águas se unem ao rio Paraitinga para formar o

rio Paraíba do Sul na Serra da Bocaina (RANZINI, 2002; CICCIO, 2009; VENEZZIANI et al., 2009).

Em sua jusante, a bacia atravessa o Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha (PESM-NC), onde se localiza o Laboratório de Hidrologia Florestal Eng^o Agr^o Walter Emmerich (LHFWE), administrado pelo Instituto Florestal de São Paulo (IF), órgão da Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA), no município de Cunha, estado de São Paulo - Brasil. Está entre os paralelos 23°13'28" a 23°16'10" de latitude sul (S) e os meridianos 45°02'53" a 45°05'15" de longitude oeste (W) de Greenwich, com altitude média de 1050 m.

O Núcleo situa-se na divisa dos municípios de São Luís do Paraitinga (SP), Cunha (SP), Ubatuba (SP) e Paraty (RJ) e se encontra em uma região de encostas altas, nas cercanias das cabeceiras do rio Paraíba (Figura 4).

Figura 4 - Localização do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, estado de São Paulo - Brasil



Antes da criação do PESM, a área era utilizada para extração de madeira, agricultura de subsistência, criação de gados e segundo as informações dos moradores da região, em alguns pontos isolados aconteceram incêndios florestais (AGUIAR et al., 2001). O governo do estado de São Paulo desapropriou em 1974 a área do Núcleo, que inicialmente tinha a denominação de Reserva Estadual de Cunha e no ano de 1977 passou a ser incorporada ao PESM (CICCIO, 2009).

A área se insere na superfície Pré-Serra do Mar, cujas origens englobam tanto deformações tectônicas Cenozóicas, quanto flutuações climáticas e de níveis de

base regional. A história geológica está intimamente ligada à evolução tectônica pós-cretácea ou pós-eocênica da porção sul oriental do Escudo Brasileiro (FURIAN, 1987). Ela está no reverso do domínio morfoestrutural da Serra do Mar de forma geológica fazendo parte do Complexo Cristalino do período pré-cambriano, possuindo granitos miloníticos, gnaisses, xistos cristalinos (micaxistos e quartzoxistos), granitos e diabásios básicos de intrusão parcial na Era Mesozóica (JICA, 1980).

O local é uma área de preservação dos recursos naturais, representando um dos poucos locais do Planalto Atlântico ainda recoberto pela vegetação original de Mata Atlântica. Diante disso, o Núcleo Cunha oferece importantes informações dos diversos componentes do meio biofísico, praticamente inalterados pela ocupação humana (VILAS BOAS et al., 1986/88). O Planalto Atlântico é caracterizado por planícies e escarpas das serras e pela grande variedade topográfica (SILVA et al., 2005).

O relevo é caracteristicamente montanhoso, ou seja, possui topos angulosos e vales em forma de “V” (CARVALHO; et al., 1990). O leito do Paraíba possui perfil longitudinal de acentuado declive e corresponde a influência litológica, em vales estreitos e restritas planícies de inundação (COLÂNGELO, 1990). O clima da região segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo Cwb, ou seja, clima temperado chuvoso e moderadamente quente, com predomínio de chuvas em verões moderadamente quentes.

3.2 Sistemas computacionais

Os programas utilizados como ferramentas computacionais para o processamento de dados foram:

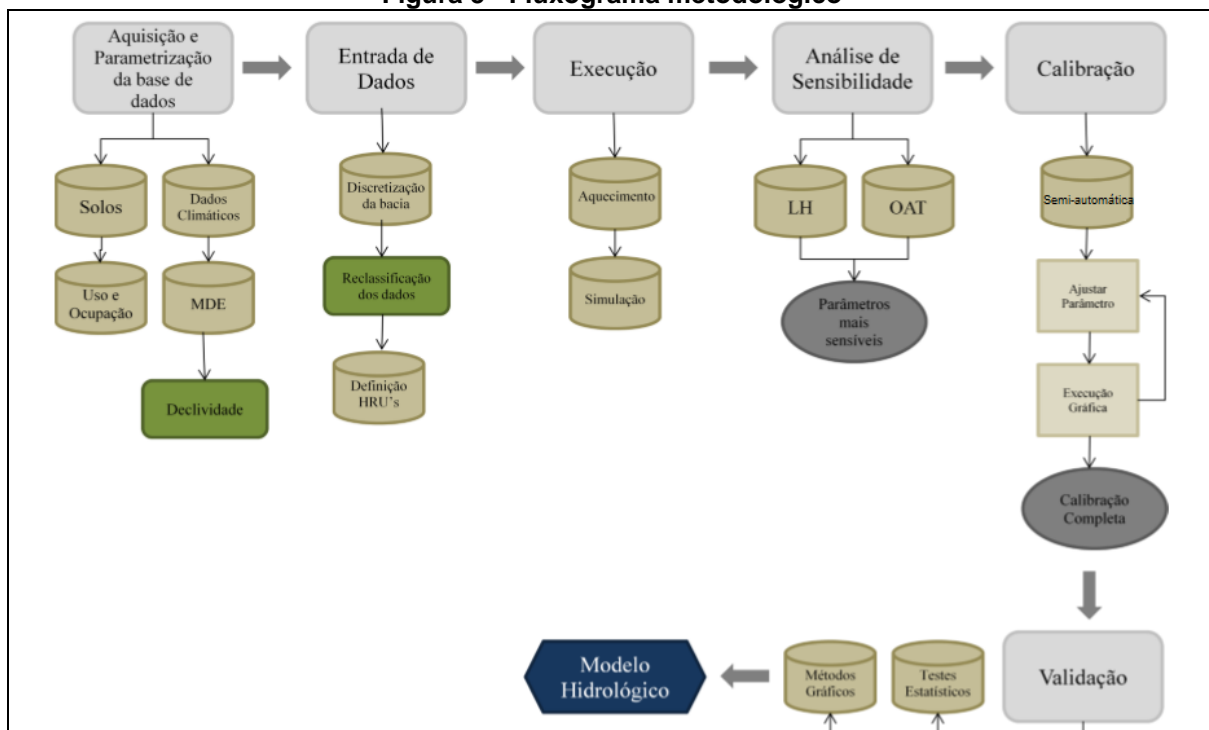
- ✓ Software ArcGIS na versão 10.2.2 (ESRI ArcGIS® 10, 2013), desenvolvido pelo *Environmental System Research Institute* (ESRI), Estados Unidos. O uso do ArcGIS para esse trabalho teve como função a manipulação dos mapas temáticos (MDE, declividade, solo e uso do solo) associados com os dados, que são necessários para realizar a modelagem hidrológica.
- ✓ Para realizar a modelagem hidrológica foi utilizado o programa ArcSWAT, na versão 2012 (2012.10.15), disponível no site: <http://swat.tamu.edu/software/>.
- ✓ A tabulação dos dados climáticos e de vazões foram utilizados o Microsoft Excel 2013 (formato .xls) e o bloco de notas (formato .txt).

- ✓ O Weather Data Base foi utilizado para calcular as estatísticas da estação meteorológica, para criar o banco de dados no SWAT, disponível no site: <http://swat.tamu.edu/>.
- ✓ O SWAT-CUP foi desenvolvido no ano de 2013 por Abbaspour e Srinivasan e a versão utilizada foi a 5.1.6.2. O *software* foi utilizado para realizar a análise de sensibilidade, calibração e a validação da modelagem hidrológica SWAT, disponível no site: <http://swat.tamu.edu/software/>.

3.3 Métodos

As etapas para execução do modelo foram seguidas pelo fluxograma metodológico, constituída em seis etapas: a primeira etapa foi a aquisição, parametrização da base de dados; a segunda etapa foi a entrada de dados no ArcSWAT; a terceira etapa foi a execução dos dados para a realização da simulação do modelo; quarta etapa foi a análise de sensibilidade; a quinta e a sexta etapa foram a calibração e a validação do modelo hidrológico (Figura 5).

Figura 5 - Fluxograma metodológico



Fonte: Adaptado de CASTRO (2013, p. 52).

3.3.1 Aquisição, parametrização, entrada de dados e execução

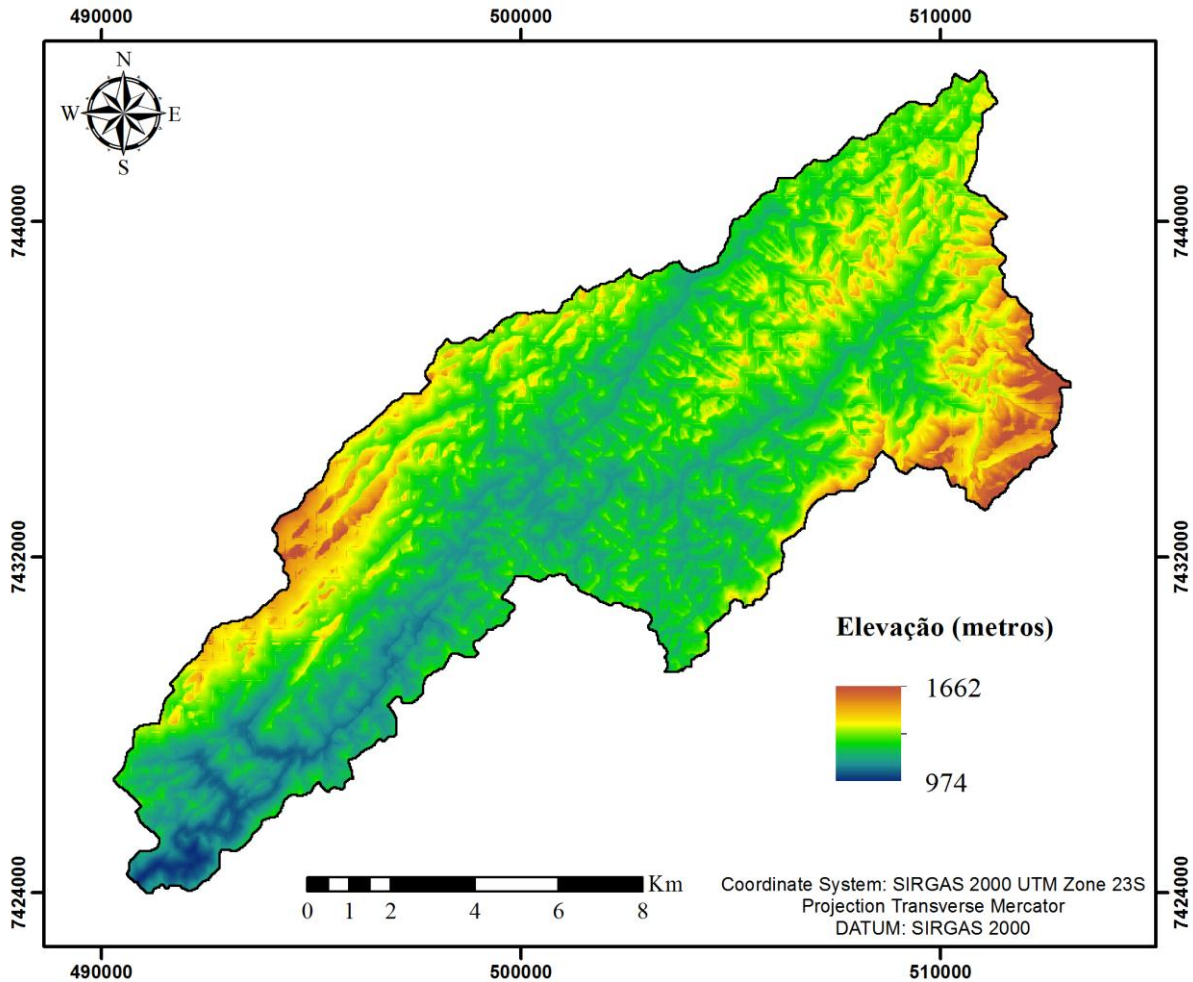
Nas etapas de aquisição, parametrização da base de dados o software ArcGIS foi utilizado para a estruturação do banco de dados, do qual foi empregado para criar, armazenar, efetuar o georreferenciamento dos mapas, manipulação simultânea de dados vetoriais/matriciais, apresentar extensões que permitem a modelagem e a extração de informação dos dados.

A fundamentação científica consistiu na elaboração dos mapas temáticos e aferição das variáveis em considerações técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, na análise quantitativa das características ambientais e morfométricas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna.

Para confeccionar os mapas foi utilizado o sistema *Universal Transversa de Mercator* (UTM), com Datum SIRGAS 2000, no qual foi implicado a padronização de todos os mapas.

O MDE foi obtido no projeto Topodata (INPE) na resolução espacial de 30 metros, oriundo da imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 30 metros após o processo de interpolação. As cenas utilizadas foram as identificadas como 23S465 e 23S45, do qual foram processadas de acordo com Santos (2015). A elevação do trecho da bacia hidrográfica tem variação de 974 a 1662 metros (Figura 6).

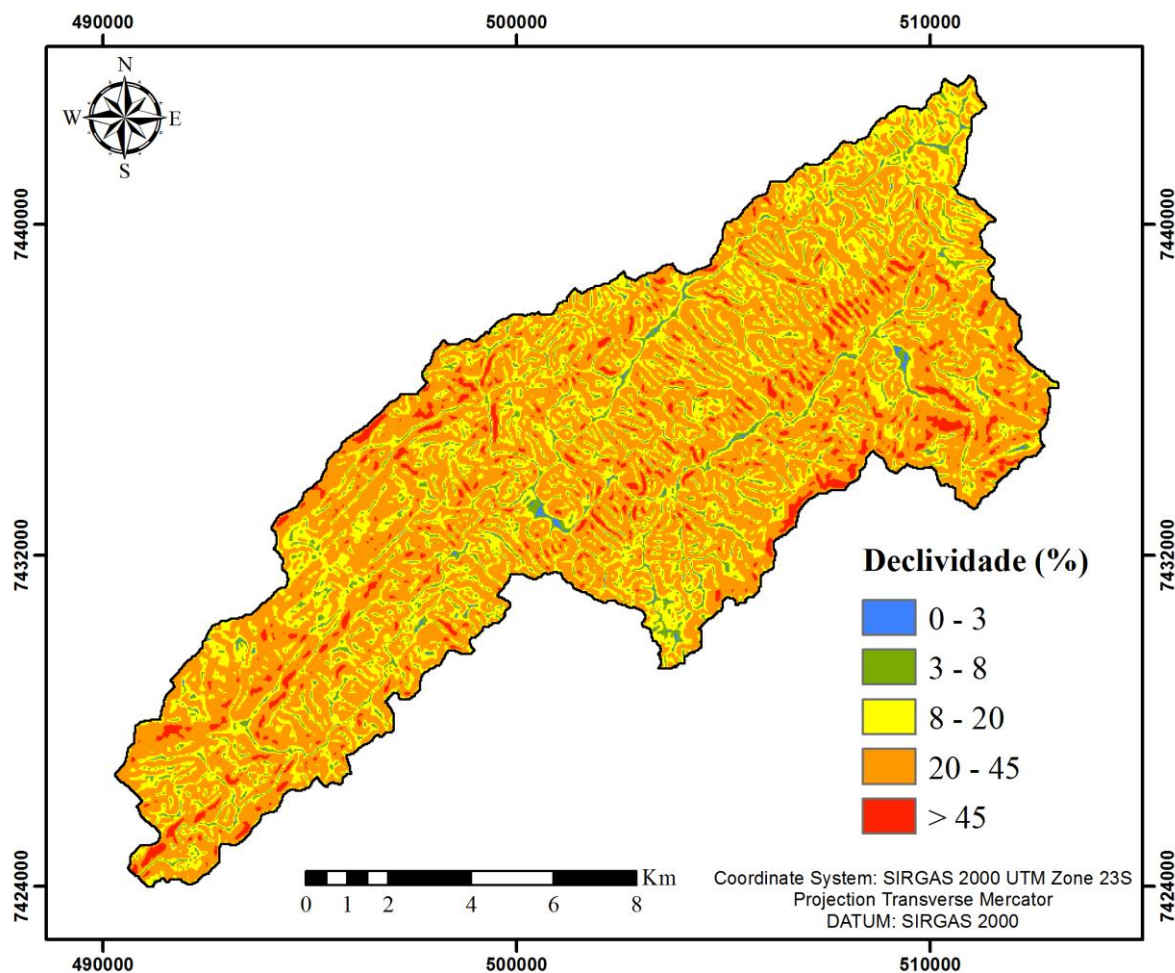
Figura 6 - Modelo Digital de Elevação no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



As informações do relevo foram determinadas a partir da classificação desenvolvida pela EMBRAPA (2006) no qual o relevo plano é a superfície topográfica esbatida ou horizontal, e os desnivelamentos são muito pequenos, com declividade de 0 a 3%; suave ondulado é a superfície topográfica pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros (declives suaves), com declividade de 3 a 8%; ondulado é a superfície topográfica movimentada, constituído por conjunto de colinas ou outeiros (declives moderados), variando de 8 a 20%; forte ondulado: superfície topográfica movimentada, formada por outeiros ou morros e raramente colinas (declives fortes), variando de 20 a 45%; montanhoso é a superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos

montanhosos com desnivelamentos grandes e declives fortes e muito fortes, variando de 45 a 75% (Figura 7).

Figura 7 - Classes de declividade no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



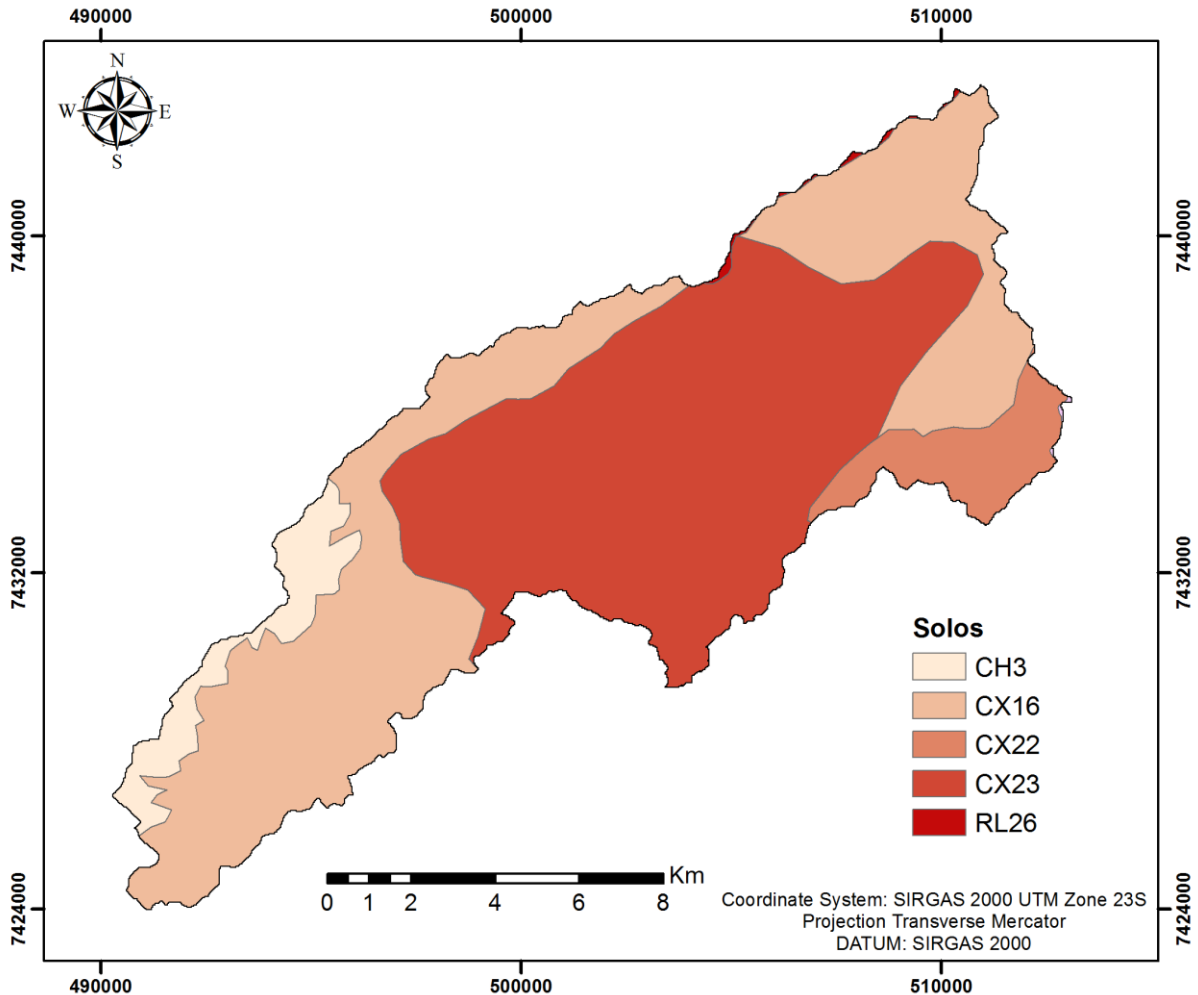
O relevo caracteriza-se como forte ondulado, do qual mais da metade da área foi atribuído a essa designação (Quadro 2).

Quadro 2 - Classes de declividade e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Declividade (%)	Área (ha)	Área (%)
0 - 3	157,8	1
3 - 8	871,5	5,6
8 - 20	4374,9	28
20 - 45	9506,9	60,8
> 45	728,8	4,6
Total	15640	100

O solo da área de acordo com Rossi (2017) possui 5 tipos distintos (subordem) de solos (Figura 8).

Figura 8 - Tipos de solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



De acordo com Rossi (2017) a descrição dos cinco tipos de solos são:

- 1) CH3 - Associação de CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico + CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente e moderado, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado;
- 2) CX16 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média ou argilosa, fase relevo forte ondulado

- 3) CX22 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO A proeminente e moderado, + CAMBISSOLO HÚMICO típico ou léptico, ambos Distróficos, textura argilosa e média, fase relevo forte ondulado;
- 4) CX23 - Associação de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb A moderado ou proeminente + LATOSSOLO AMARELO/VERMELHO-AMARELO típico ou cambissólico A moderado, ambos Distróficos, textura média, fase relevo forte ondulado;
- 5) RL26 - Associação de NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico A moderado, textura média ou argilosa, substrato granitóides + CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico A moderada textura média ou argilosa, ambos fase relevo forte ondulado.

O CX23 possui a maior porcentagem de área, enquanto o RL26 tem a menor área de solo (Quadro 3).

Quadro 3 - Tipos de solos e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Solos	Área (ha)	Área (%)
CH3	782	5
CX16	6412,5	41
CX22	891,48	5,7
CX23	7538,5	48,2
RL26	15,64	0,1
Total	15640	100

No banco de dados do SWAT dos parâmetros físico-hídricos foi inserido de acordo com Mercuri et al. (2009) referente as ordens dos solos do estudo, ou seja, Cambissolo (CH3 e CX22), Latossolo Vermelho-Amarelo (CX16 e CX23) e Neossolo Litólico (RL26), seguindo o processo de Arnold et al. (2012a) (Quadro 4).

Quadro 4 - Parâmetros físico-hídricos dos cinco tipos de solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, empregados pelo modelo SWAT
(continua)

Parâmetro	Descrição	Unidade de medida	Solos				
			CH3	CX16	CX22	CX23	RL26
SNAM	Nome do solo	-	CH3	CX16	CX22	CX23	RL26
NLAYERS	Número de camadas no perfil do solo	-	5	4	5	4	2
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo	-	B	B	B	B	B
SOL_ZMX	Profundidade das raízes	mm	1100	1500	1100	1500	800
ANION_EXCL	Porosidade do solo em que os ânions são excluídos	decimal	0,47	0,38	0,47	0,38	0,4
SOL_Z1	Profundidade do horizonte 1	mm	300	360	300	360	50
SOL_BD1	Densidade do solo seco ou aparente ou global 1	g.cm ⁻¹	1,6	1,5	1,6	1,5	1,6
SOL_AWC1	Capacidade de armazenamento da água 1	mm.mm ⁻¹	0,15	0,3	0,15	0,3	0,15
SOL_K1	Condutividade hidráulica saturada 1	mm.hr ⁻¹	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
SOL_CBN1	Carbono orgânico 1	% peso do solo	1,4	1,1	1,4	1,1	0,4
CLAY1	Percentual de argila 1	%	36,3	36,3	36,3	30,3	17,2
SILT1	Percentual de silte 1	%	18	16	18	16	29,4
SAND1	Percentual de areia 1	%	93,4	47,7	93,4	53,7	53,4
ROCK1	Percentual de pedra 1	%	0	0	0	0	0
SOL_ALB1	Albedo de solo em condições saturadas 1	decimal	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K1	Fator erodibilidade do solo 1	-	0,05	0,13	0,05	0,13	0,17
SOL_EC1	Condutividade elétrica 1	mm.hr ⁻¹	0	0	0	0	0
SOL_Z2	Profundidade do horizonte 2	mm	600	760	600	760	300
SOL_BD2	Densidade do solo seco ou aparente ou global 2	g.cm ⁻¹	1,4	1,7	1,4	1,7	1,6
SOL_AWC2	Capacidade de armazenamento da água 2	mm.mm ⁻¹	0,18	0,3	0,18	0,3	0,15
SOL_K2	Condutividade hidráulica saturada 2	mm.hr ⁻¹	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5

Fonte: adaptado de BALDISSERRA (2005); MERCURI et al. (2009).

Quadro 4 - Parâmetros físico-hídricos dos cinco tipos de solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, empregados pelo modelo SWAT (continuação)

Parâmetro	Descrição	Unidade de medida	Solos				
			CH3	CX16	CX22	CX23	RL26
SNAM	Nome do solo	-					
SOL_CBN2	Carbono orgânico 2	% peso do solo	0,6	0,2	0,6	0,2	0,6
CLAY2	Percentual de argila 2	%	34	34	34	29,8	24,7
SILT2	Percentual de silte 2	%	35,7	14,3	35,7	14,3	25,6
SAND2	Percentual de areia 2	%	30,3	51,7	30,3	55,9	49,7
ROCK2	Percentual de pedra 2	%	0	0	0	0	0
SOL_ALB2	Albedo de solo em condições saturadas 2	decimal	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K2	Fator erodibilidade do solo 2	-	0,16	0,14	0,16	0,14	0,16
SOL_EC2	Condutividade elétrica 2	mm.hr ⁻¹	0	0	0	0	0
SOL_Z3	Profundidade do horizonte 3	mm	800	1210	800	1210	300
SOL_BD3	Densidade do solo seco ou aparente ou global 3	g.cm ⁻¹	1,4	1,7	1,4	1,7	1,6
SOL_AWC3	Capacidade de armazenamento da água 3	mm.mm ⁻¹	0,18	0,4	0,18	0,4	0,15
SOL_K3	Condutividade hidráulica saturada 3	mm.hr ⁻¹	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
SOL_CBN3	Carbono orgânico 3	% peso do solo	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6
CLAY3	Percentual de argila 3	%	28,4	29,5	28,4	29,5	24,7
SILT3	Percentual de silte 3	%	37,7	13,8	37,7	13,8	25,6
SAND3	Percentual de areia 3	%	33,9	56,7	33,9	56,7	49,7
ROCK3	Percentual de pedra 3	%	0	0	0	0	0
SOL_ALB3	Albedo de solo em condições saturadas 3	decimal	0	0,15	0	0,15	0,15
USLE_K3	Fator erodibilidade do solo 3	-	0,17	0,14	0,17	0,14	0,16
SOL_EC3	Condutividade elétrica 3	mm.hr ⁻¹	0	0	0	0	0

Fonte: adaptado de BALDISSERRA (2005); MERCURI et al. (2009).

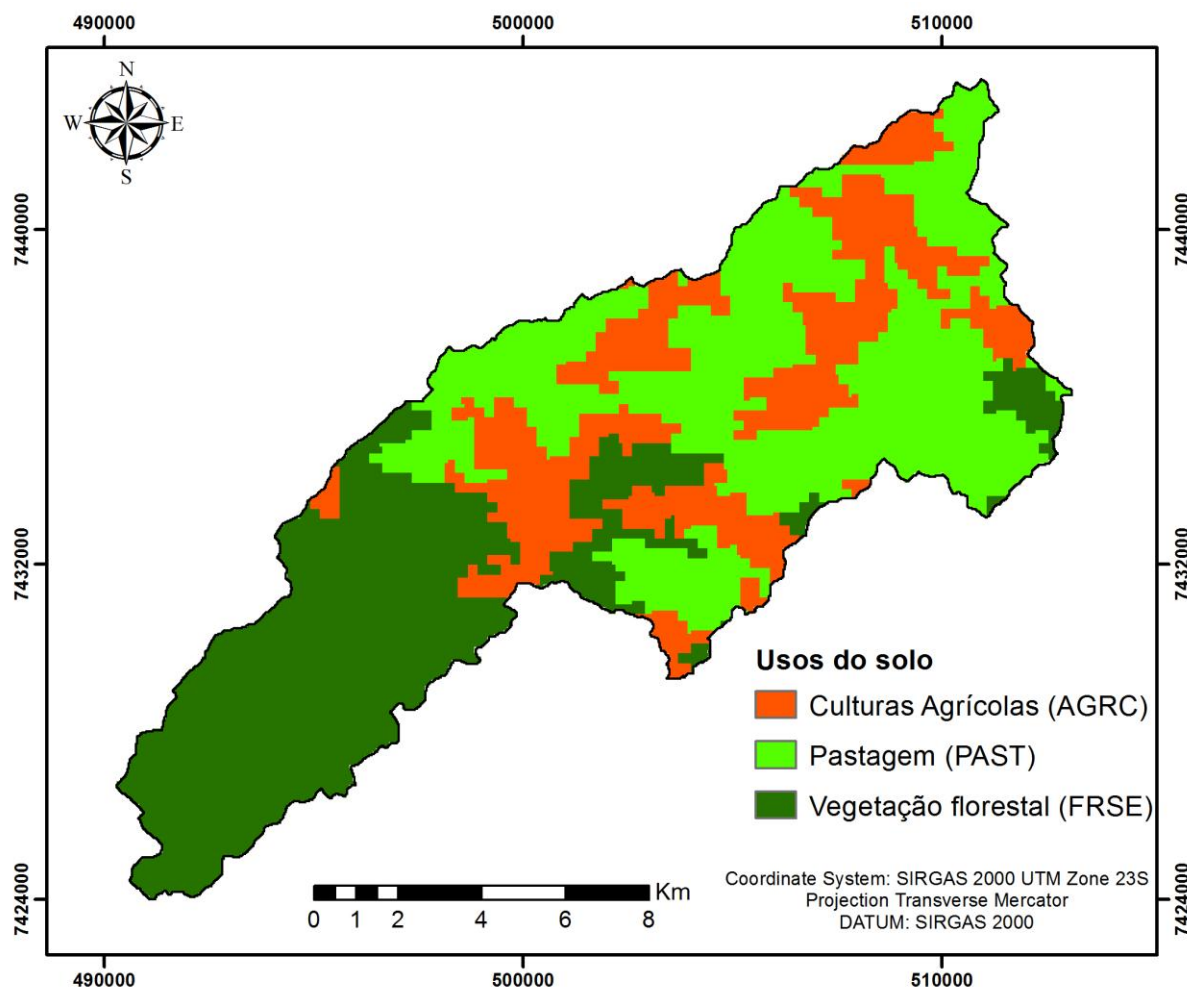
Quadro 4 - Parâmetros físico-hídricos dos cinco tipos de solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, empregados pelo modelo SWAT
(conclusão)

Parâmetro	Descrição	Unidade de medida	Solos				
			CH3	CX16	CX22	CX23	RL26
SNAM	Nome do solo	-					
SOL_Z4	Profundidade do horizonte 4	mm	1100	1500	1100	1500	800
SOL_BD4	Densidade do solo seco ou aparente ou global 4	g.cm ⁻¹	1,8	1,6	1,8	1,6	1,3
SOL_AWC4	Capacidade de armazenamento da água 4	mm.mm ⁻¹	0,18	0,4	0,18	0,4	0,18
SOL_K4	Condutividade hidráulica saturada 4	mm.hr ⁻¹	12,5	12,5	40	12,5	12,5
SOL_CBN4	Carbono orgânico 4	% peso do solo	0,4	0,4	0,4	0,4	0,76
CLAY4	Percentual de argila 4	%	26,8	35,6	26,8	35,6	32
SILT4	Percentual de silte 4	%	43,7	15,9	43,7	15,9	35
SAND4	Percentual de areia 4	%	29,5	48,5	29,5	48,5	33
ROCK4	Percentual de pedra 4	%	0	0	0	0	0
SOL_ALB4	Albedo de solo em condições saturadas 4	decimal	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
USLE_K4	Fator erodibilidade do solo 4	-	0,18	0,14	0,18	0,14	0,16
SOL_EC4	Condutividade elétrica 4	mm.hr ⁻¹	0	-	0	-	-
SOL_Z5	Profundidade do horizonte 5	mm	1170	-	1170	-	-
SOL_BD5	Densidade do solo seco ou aparente ou global 5	g.cm ⁻¹	1,4	-	1,4	-	-
SOL_AWC5	Capacidade de armazenamento da água 5	mm.mm ⁻¹	0,18	-	0,18	-	-
SOL_K5	Condutividade hidráulica saturada 5	mm.hr ⁻¹	12,5	-	12,5	-	-
SOL_CBN5	Carbono orgânico 5	% peso do solo	0,3	-	0,3	-	-
CLAY5	Percentual de argila 5	%	27	-	27	-	-
SILT5	Percentual de silte 5	%	39,3	-	39,3	-	-
SAND5	Percentual de areia 5	%	33,7	-	33,7	-	-

Fonte: adaptado de BALDISSERRA (2005); MERCURI et al. (2009).

Para a classificação de uso do solo, foi utilizado o mapa de uso da terra do Brasil, com a base de dados de acordo com IBGE (2014). As ocorrências e distribuições foram classificadas em vegetação florestal (FRSE), pastagem (PAST) e culturas agrícolas (AGRC) (Figura 9).

Figura 9 - Usos do solo no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



O uso do solo em suas cabeceiras e terço médio caracteriza-se por ser agropastoril de pequeno porte, com pequenos fragmentos de vegetação florestal. A jusante é protegida pelo PESH-NC, no qual é composta de vegetação florestal, ou seja, cobertura de floresta natural secundária pelos resultados de exploração madeireira ocorrida aproximadamente há 60 anos e sua vegetação florestal é Mata Atlântica (IF, 2006) - Floresta Ombrófila Densa Alto Montana (LEITÃO FILHO, 1982).

A pastagem possui a maior área, seguido da vegetação florestal e a que teve a menor área foram as culturas agrícolas (Quadro 5).

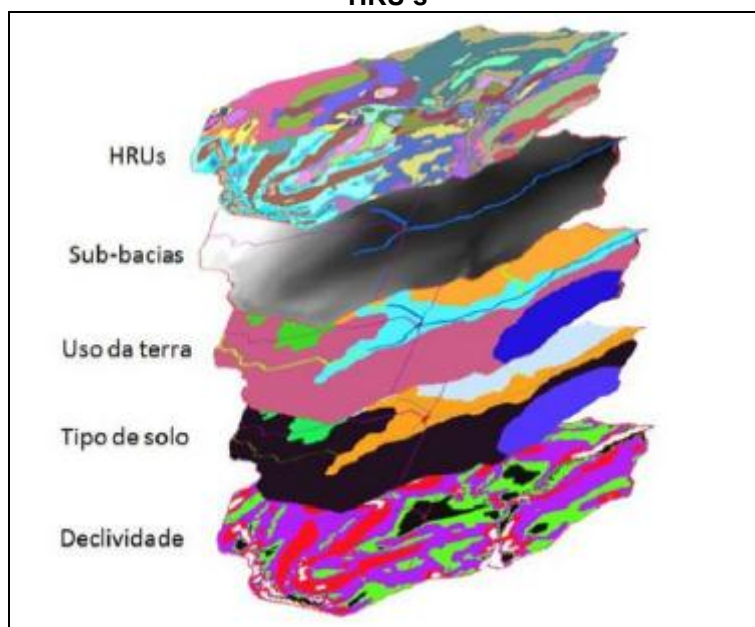
Quadro 5 - Classes de uso do solo e as respectivas áreas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Classes de uso do solo	Área (ha)	Área (%)
Culturas agrícolas (AGRC)	3784,9	24,2
Pastagem (PAST)	6146,5	39,3
Vegetação florestal (FRSE)	5708,6	36,5
Total	15640	100

Após a preparação dos mapas temáticos no programa ArcGIS, migrou-se para o ArcSWAT, uma interface do próprio programa. Primeiramente criou-se um novo diretório de projeto para iniciar o modelo hidrológico. Na ferramenta *Watershed Delineator > Automatic Watershed Delineation* foi necessário inserir o mapa de MDE em formato raster, extraíndo a rede de drenagem, marcando o ponto de exutório e delineando a bacia e foram calculados os parâmetros físicos da bacia, gerando suas respectivas tabelas.

Em seguida, foram inseridos os mapas temáticos de uso do solo no ArcSWAT, na ferramenta *HRU Analysis (Land Slope/Soil/Slope Definition)* para criar as *Hydrologic Response Units (HRU's)* (Figura 10).

Figura 10 - Sobreposição dos mapas temáticos utilizados no modelo SWAT para gerar as HRU's



Fonte: Fukunaga (2012, p. 17).

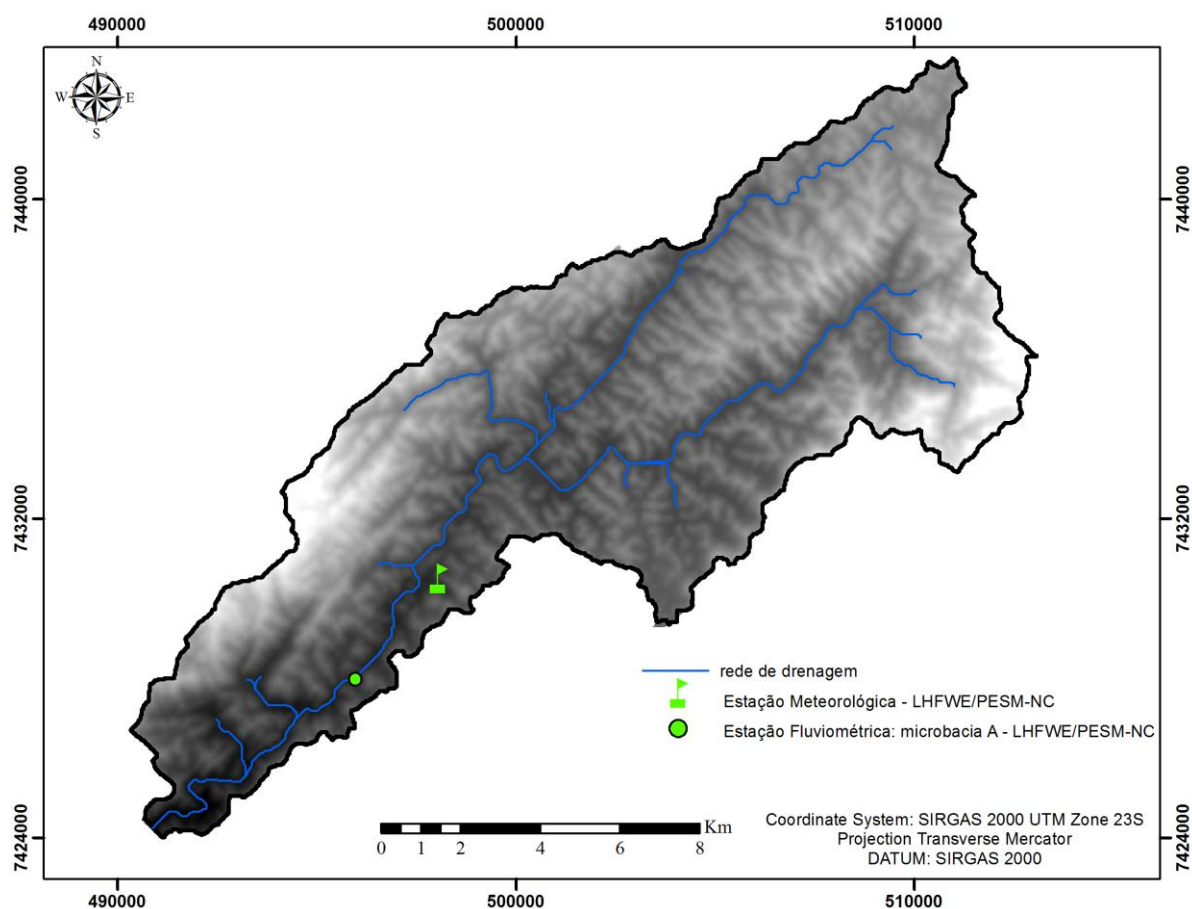
Os mapas temáticos foram sobrepostos e cruzados, sendo então correlacionados para modelar a bacia hidrográfica no que tange a produção de vazão. No processamento de dados das HRU's (*HRU Analysis < HRU Definition*), foi

estabelecida a opção *Dominant Land Use, Soils, Slope* para evitar a perda ou alteração das informações reais relacionadas as características dos mapas da área em cada sub-bacia (PISSARRA, 2014).

Os dados climáticos diários necessários para o modelo foram: temperatura (máxima e mínima), umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, obtidos a partir do equipamento meteorológico (HOBO U30-NRC) junto à Estação Meteorológica do LHFWE no PESH/NC.

Os dados de precipitação e vazão, foram obtidos junto à Estação Fluviométrica da microbacia A instalada no LHFWE no PESH-NC. As precipitações foram obtidas a partir do intermédio de dois pluviógrafos do tipo caçamba (modelo W11-00-60, da NAKAASA Instruments Company Ltd. Japão), com precisão igual a 0,5 mm; um localizado na saída e outro localizado no interior da microbacia A (Figura 11).

Figura 11 - Localização das estações meteorológica e fluviométrica no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



A série histórica dos dados das estações meteorológica e fluviométrica abrangeram 22 anos (Quadro 6).

Quadro 6 - Localização das estações meteorológica e fluviométrica no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

ID	Local	Coordenadas		Altitude (m)	Início	Fim
EM	PESM-NC	23°14'05"S	45°01'16"W	1050	01/01/1993	31/12/2014
EF-MA	PESM-NC	23°15'27"S	45°02'22"W	1042	01/01/1993	31/12/2014

As vazões foram obtidas a partir de dois tanques de sedimentação e um vertedor triangular de ferro de 5 m de largura por 1,5 m de altura e um ângulo de 120° de abertura, equipada com um linígrafo do tipo flutuador (modelo WR-11Z da NAKAASA Instruments Company Ltd. Japão) que registra as cotas da altura da lâmina de água no vertedor numa carta de duração mensal e transformada em vazão utilizando uma curva-chave, apurada empiricamente (CICCO et al., 1987). A estação fluviométrica apresenta alta integridade de vazão diária, mas as falhas que ocorrerem foram preenchidas através de regressão linear múltipla, a partir de dados da estação auxiliar próxima (microbacia B).

As estações meteorológica e fluviométrica não caracterizam bem todo o trecho da bacia hidrográfica, pois ela apresenta condições distintas, no entanto, é a única estação disponibilizada ao acesso da série de dados histórico, necessários em relação aos dados climáticos e a vazão que abrangesse a área de estudo.

Os dados climatológicos foram organizados na escala diária em planilha eletrônica e posteriormente foram inseridos no gerador climático *Weather Data Base* para a aplicação da análise estatística mensal calculada a partir da série histórica e também para o preenchimento de falhas no registro dos dados. A partir disso, foi gerado os parâmetros necessários para empregar no banco de dados do modelo SWAT (Quadro 7).

A estruturação do banco de dados do SWAT envolveu a localização do gerador climático (*Edit Swat Input > Databases > User Weather Stations*) e da estação meteorológica por meio da ferramenta (*Write Input Tables > Wheather Station > Weather Generator Data*).

Com os dados climatológicos inseridos no gerador do tempo e a aplicação de uma análise estatística, o modelo organiza as variáveis e simula o caminho percorrido pelas águas das chuvas nas bacias hidrográficas (ARNOLD et al. 1998; NEITSCH et al., 2011).

Quadro 7 - Parâmetros climáticos a serem empregados no modelo SWAT

Parâmetro	Descrição	Unidade de medida
TMPMX	Temperatura máxima	°C
TMPMN	Temperatura mínima	°C
TMPSTDMX	Desvio padrão da temperatura máxima	°C
TMPSTDMN	Desvio padrão da temperatura mínima	°C
PCPMM	Precipitação média	mm
PCPSTD	Desvio padrão para precipitação	mm
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para precipitação máxima	-
PR_W1	Probabilidade de dias úmidos após dias secos	%
PR_W2	Probabilidade de dias úmidos após dias úmidos	%
PCPD	Número de dias de precipitação	dias
RAINHMX	Precipitação máxima de 0,5 horas	mm
SOLARRAV	Radiação solar	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹
DEWPT	Temperatura no ponto de orvalho	°C
WINDAV	Velocidade do vento	m.s ⁻¹

Fonte: Adaptado de Arnold et al. (2012a, p. 165-178).

Para iniciar a avaliação da aplicabilidade do modelo hidrológico utilizou-se a ferramenta *SWAT Simulation > Run SWAT > Setup SWAT Run*, informando a data inicial e final para o período da simulação e o respectivo período de aquecimento (NYSKIP), no qual foi considerado os três primeiros anos, ou seja, no período entre 01/01/1993 a 31/12/1995. Este período é para garantir que o ciclo hidrológico seja simulado adequadamente antes de, uma possível comparação entre os dados observados e calculados pelo modelo, de acordo com a metodologia proposta por Neitsch et al. (2005).

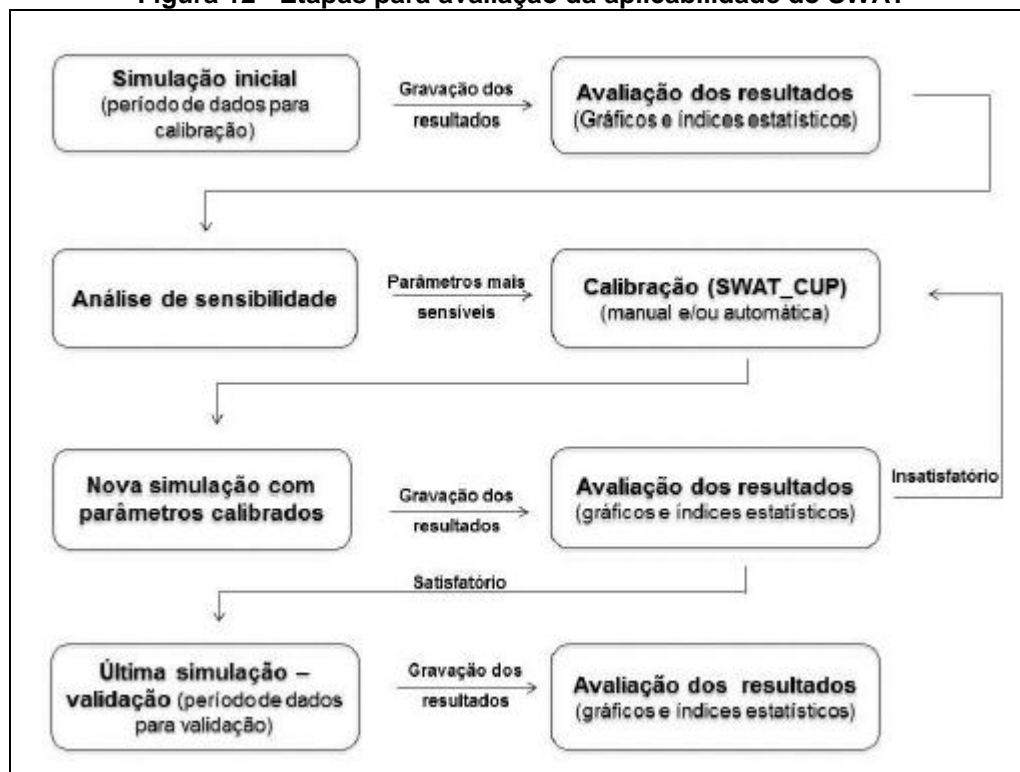
Após os dados configurados, selecionou a opção *Run SWAT* para a execução da simulação dos dados. A ferramenta *SWAT Simulation > Read SWAT Output* fornece a opção da importação de diversos resultados gerados pelo modelo hidrológico SWAT, inclusive dados para a comparação dos dados observados no *software* SWAT-CUP.

3.3.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação no SWAT-CUP

Após a aquisição, parametrização da base de dados, entrada de dados e execução, a metodologia envolveu a análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo, que foi realizada no SWAT-CUP.

Antes do processo de calibração e validação, foi realizado a análise de sensibilidade dos parâmetros, que teve como base as três etapas descritas por Fukunaga (2012) (Figura 12).

Figura 12 - Etapas para avaliação da aplicabilidade do SWAT



Fonte: Fukunaga (2012, p. 56).

O período de análise de sensibilidade incluiu o período de 01/01/1996 a 31/12/2005 (10 anos). A escolha dos parâmetros para a análise de sensibilidade a serem alterados no processo de calibração semi-automática no SWAT-CUP, baseou-se em Durães (2010), Arnold et al. (2012a), Lelis et al. (2012), Andrade et al. (2013), Oliveira (2014) e Pereira et al. (2016). Com a seleção dos parâmetros concluídos, atribuiu-se um intervalo para cada parâmetro (Quadro 8).

Quadro 8 - Parâmetros, métodos e limites utilizados para a análise de sensibilidade

Parâmetros	Descrição	Unidade de medida	LI	LS	Método de variação
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo	dias	-30	60	Adição
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo	fração	0	0,5	Substituição
CN2	Número da curva na condição II de umidade	adimensional	-0,2	0,2	Multiplicação (%)
GW_REVAP	Coeficiente de retorno de água do aquífero raso para a zona radicular	adimensional	0,02	0,2	Substituição
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo	adimensional	0,5	0,95	Substituição
GWQMN	Limite entre a profundidade de água no aquífero raso para o escoamento de base	mm	-1000	1000	Adição
CANMX	Armazenamento máximo do dossel	mm	0	30	Substituição
SOL_K	Condutividade hidráulica no solo saturado	mm.h ⁻¹	-0,05	0,05	Multiplicação (%)
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta	adimensional	0,01	1	Substituição
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal	mm.h ⁻¹	0	10	Substituição
REVAPMN	Profundidade limite de água no aquífero raso para o ocorrer o "revap"	mm	-1000	1000	Adição
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo	mm H ₂ O mm.solo ⁻¹	-0,05	0,05	Multiplicação (%)
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	dias	0	1	Substituição
SURLAG	Coeficiente de retardo do escoamento superficial	adimensional	0,01	24	Substituição
CH_N2	Coeficiente de rugosidade de Manning (n) para o canal principal	adimensional	-0,01	0,2	Substituição

LI = limite inferior; LS = limite superior

A análise de sensibilidade foi realizada pela metodologia SUFI-2 do tipo global, sendo que o primeiro passo foi aplicá-lo para definir a função objetivo, onde cada uma mostra um resultado diferente, ou seja, a definição dos limites dos parâmetros finais é sempre dependente da função escolhida (ABBASPOUR, et al., 2007). O procedimento é um processo de ajuste iterativo, e exige uma regra de permanência quando o valor crítico é alcançado (OLIVEIRA, 2014).

A amostragem através do *Latin hypercube* (LH) é utilizada para traçar o parâmetro independente fixo (ABBASPOUR, 2012). A aplicação de um sistema de regressão múltipla, em que os parâmetros gerados pela amostragem LH são relacionados com os valores das funções objetivas (ANDRADE et al., 2017). Neste método, o parâmetro de incerteza é descrito com uma variabilidade na distribuição uniforme do parâmetro *hypercube* (ABBASPOUR et al., 2015).

Em seguida, foi definido os limites físicos aceitáveis dos parâmetros a serem otimizados, no qual os parâmetros foram mantidos dentro da faixa dos valores. Os limites inferiores e superiores foram estabelecidos a partir de um valor inicial para cada parâmetro, considerando as características dos mesmos no modelo SWAT, e após definidos os limites para cada parâmetro, foi estabelecido que os parâmetros escolhidos deveriam variar em todos os tipos de sub-bacias, uso do solo, solo e declividade. Foram realizadas aproximadamente 500 iterações, sendo no mínimo 20 simulações cada iteração e a iteração final teve 500 simulações.

O *t-stat* é utilizado para identificar a significância de cada parâmetro, e quanto maior o valor ele possuir, mais sensível será, enquanto o *p-value* determina a significância da sensibilidade e valores próximos de zero indicam parâmetros mais significantes a sensibilidade (ABBASPOUR et al., 2015). Essa metodologia contabiliza as incertezas, que é o percentual de dados observados dentro de 95% de previsão de incerteza (ABBASPOUR, 2012). Conforme os valores aumentam da incerteza dos parâmetros, conseqüentemente os valores de saída também aumentam (NEITSCH et al., 2011).

Após o término da análise de sensibilidade, iniciou-se a calibração do modelo, considerada a primeira parte da série temporal do modelo, e incluiu o mesmo período da análise de sensibilidade, ou seja, entre 01/01/1996 a 31/12/2005 (10 anos). Os dados mensais de vazão foram inseridos manualmente no banco de dados do SWAT-CUP (*Observation < Observed_rch_txt*), para realizar a comparação dos valores observados com os simulados pelo modelo.

Foram avaliados a qualidade dos resultados entre os dados observados e simulados por meio da avaliação dos gráficos-visuais de dispersão, hidrograma e os índices estatísticos realizado pelo SWAT-CUP.

Os índices estatísticos de qualidade do resultado utilizados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), percentual de tendência (PBIAS), razão entre o erro padrão médio e o desvio padrão das observações (RSR) e o coeficiente de determinação (R^2) (Quadro 9), propostos por Nash e Sutcliffe (1970), Moriasi et al. (2007) e Abbaspour (2012).

Quadro 9 - Classificação dos índices estatísticos de qualidade da simulação da vazão média diária mensal no SWAT-CUP

Classificação	NS	PBIAS (%)	RSR	R²
Muito bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < R^2 \leq 1,00$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0,50 \leq RSR \leq 0,60$	$0,65 < R^2 \leq 0,75$
Satisfatório	$0,50 < NS \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0,60 \leq RSR \leq 0,70$	$0,50 < R^2 \leq 0,65$
Insatisfatório	$NS \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR \geq 0,70$	$R^2 \leq 0,50$

Fonte: adaptado de MORIASI et al. (2007, p. 891)

O cálculo do NS é um dos principais parâmetros para verificar a qualidade da simulação do modelo, que pode variar de infinito negativo até um, sendo o valor um, indica um ajuste perfeito da simulação (NASH; SUTCLIFFE, 1970; ABBASPOUR, 2012).

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (7)$$

Onde NS é o valor de Nash & Sutcliffe, Q_m é o evento observado, Q_s é o evento simulado pelo modelo e $Q_{m,i}$ é a média do evento observado no período simulado.

Outro cálculo de avaliação da qualidade dos resultados utilizado foi o PBIAS, sendo que quanto mais próximo de zero, melhores são os resultados. Os valores positivos indicam a subestimação do modelo e os valores negativos indicam a superestimação do modelo (ABBASPOUR, 2012).

$$PBIAS = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i}{\sum_{i=1}^n Q_{m,i}} \quad (8)$$

Onde PBIAS é o percentual de tendência (%), n é o número de eventos, Q_m é o evento observado, Q_s é o evento simulado pelo modelo, e $Q_{m,i}$ é a média do evento observado no período simulado.

O RSR é um índice que varia de 0 a grandes valores positivo e quanto menor seu valor, melhor será o ajuste do modelo (ABBASPOUR, 2012).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}} \quad (9)$$

Onde RSR é o erro padrão médio normalizado, n é o número de eventos, Q_m é o evento observado, Q_s é o evento simulado pelo modelo e $Q_{m,i}$ é a média do evento observado no período simulado.

O R^2 mostra o nível de colinearidade entre os valores observados e simulados, que varia entre 0 e 1, sempre positivo, sendo que quanto maior o valor do R^2 , melhor será o poder de explicação da reta de regressão (LAPPONI, 2005).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (10)$$

Onde R^2 é o coeficiente de determinação, Q_m é o evento observado, Q_s é o evento simulado pelo modelo, $Q_{m,i}$ é a média do evento observado no período simulado e $Q_{s,i}$ é a média do evento simulado no período simulado.

Concluída a calibração, utilizou-se a segunda parte da série temporal de dados, no qual consistiu na validação do modelo, que foi utilizado o período entre 01/01/2006 a 31/12/2014 (9 anos). A qualidade dos resultados da validação dos dados observados e simulados foram avaliados pelos mesmos da calibração, ou seja, gráficos-visuais de dispersão, hidrograma e índices estatísticos de NS, PBIAS, RSR e R^2 no SWATCUP, propostos por Nash e Sutcliffe (1970), Moriasi et al. (2007) e Abbaspour (2012).

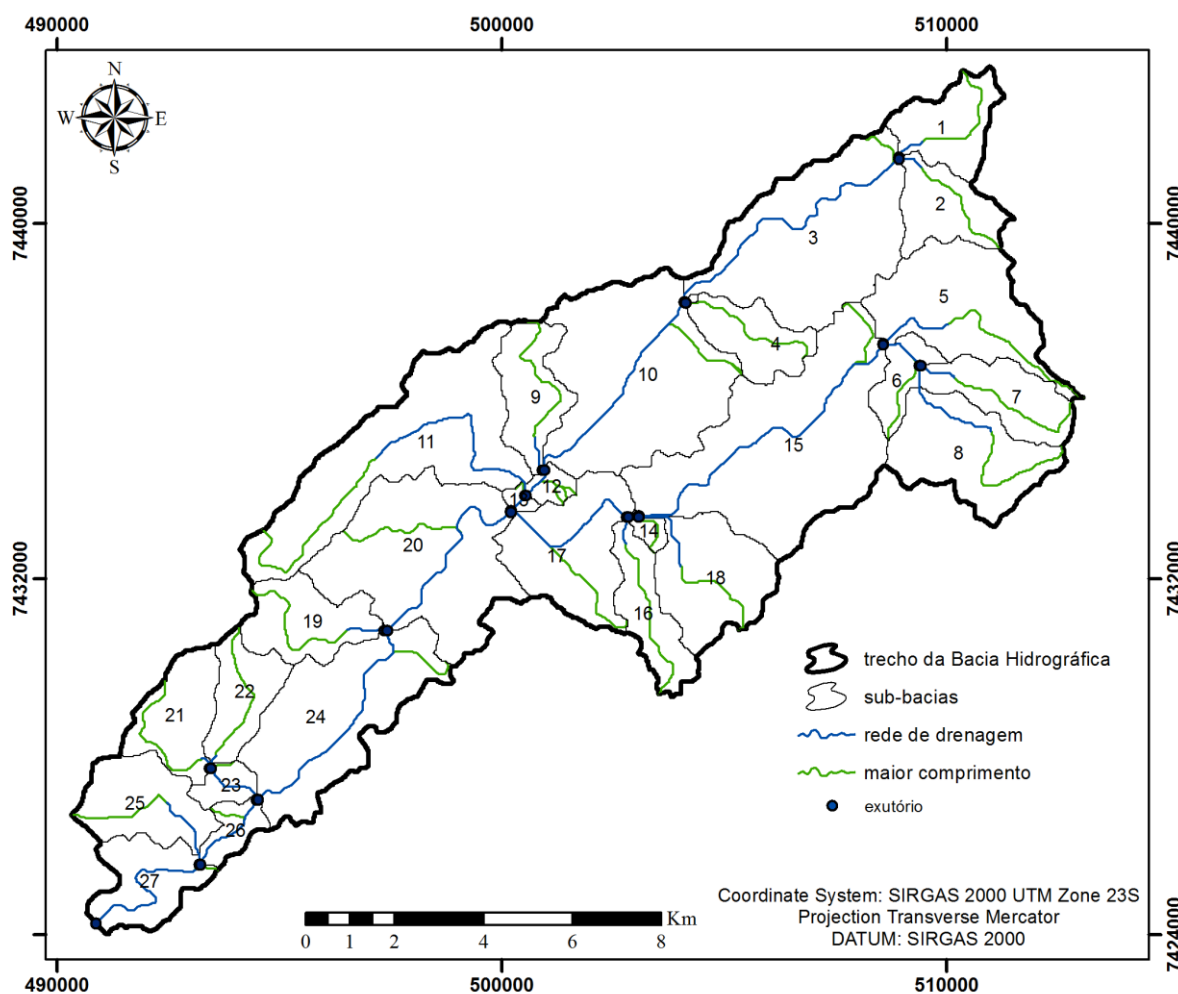
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção é dedicada a apresentação dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa e a respectiva discussão, mostrando as características fisiográficas e a aplicação do modelo SWAT, necessários para realizar a modelagem hidrológica e alcançar o objetivo proposto neste estudo.

4.1 Características fisiográficas

Na aplicação do modelo SWAT no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba foram geradas 27 sub-bacias (compartimentos) e 27 HRU's, que corresponde a 27 combinações diferentes entre uso do solo, tipo de solo e classe de declividade (Figura 13).

Figura 13 - Características fisiográficas no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



Para cada uma das 27 sub-bacias há sua respectiva longitude, latitude, área (hectares), maior comprimento, largura da rede de drenagem e o espaço tridimensional da rede de drenagem (Quadro 10).

Quadro 10 - Características fisiográficas das 27 sub-bacias no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Sub-bacia	Longitude (X)	Latitude (Y)	Área (ha)	Maior comprimento da sub-bacia (m)	Largura da rede de drenagem (m)	Espaço tridimensional da rede de drenagem (m)
1	508931	7441481	370,33	3706,55	2,83	0,22
2	508931	7441452	353,85	3492,87	2,75	0,22
3	504108	7438237	1311,08	7944,10	6,04	0,36
4	504136	7438209	332,75	3627,40	2,65	0,21
5	508586	7437290	803,21	6073,08	4,50	0,30
6	508586	7437261	179,32	2971,05	1,83	0,16
7	509390	7436802	392,42	4548,22	2,93	0,22
8	509419	7436802	677,55	6295,42	4,07	0,28
9	500922	7434447	379,48	4687,85	2,87	0,22
10	500951	7434447	1433,3	6861,84	6,37	0,37
11	500520	7433874	1339,02	10617,22	6,12	0,37
12	500549	7433874	73,26	1386,07	1,07	0,11
13	500204	7433529	33,29	994,03	0,67	0,08
14	500204	7433500	48,79	1447,39	0,84	0,10
15	503075	7433414	1686,45	9079,80	7,03	0,40
16	502816	7433385	340,17	4681,73	2,69	0,21
17	502845	7433385	678,29	4169,27	4,07	0,28
18	503075	7433385	601,73	4474,66	3,79	0,27
19	497362	7430830	427,94	4609,54	3,09	0,23
20	497420	7430830	1264,20	6203,70	5,91	0,36
21	493429	7427730	413,02	3867,08	3,02	0,23
22	493458	7427730	325,18	3897,82	2,61	0,21
23	494492	7427041	111,25	1901,77	1,37	0,14
24	494520	7427041	1060,16	6824,55	5,32	0,33
25	493200	7425577	470,05	4257,07	3,27	0,24
26	493229	7425577	138,20	2471,15	1,57	0,15
27	490875	7424257	395,56	4517,47	2,94	0,22

As características fisiográficas desempenham um papel fundamental no conhecimento dos processos hidrológicos, escoamento superficial, subsuperficial e na relação infiltração e deflúvio das águas das chuvas (HORTON, 1945; PISSARRA, 2002).

A morfometria é diferenciada entre as sub-bacias designadas pelo SWAT, principalmente em sua área e no comprimento da rede de drenagem, ou seja, ocorre um comportamento hidrológico diferenciado, corroborando pelos trabalhos realizados por Pissarra (2004).

Para cada uma das 27 sub-bacias há sua respectiva declividade, declividade da vertente, declividade da rede de drenagem, amplitude altimétrica, altitude média, mínima e máxima (Quadro 11).

Quadro 11 - Características da declividade das 27 sub-bacias no trecho da bacia hidrográfica rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Sub-bacia	Declividade (%)	Declividade da vertente (%)	Declividade da rede de drenagem (%)	Altitude (m)	Altitude mínima (m)	Altitude máxima (m)	H (m)
1	17,02	18,29	1,30	1271,19	1225	1335	110
2	20,76	15,24	2,88	1294	1230	1417	187
3	23,02	15,24	1,34	1256,84	1127	1389	262
4	24,89	15,24	2,32	1253,11	1132	1352	220
5	26,41	15,24	3,09	1307,38	1155	1660	505
6	23,00	15,24	1,33	1216,20	1157	1360	203
7	26,57	15,24	17,08	1401,83	1168	1660	492
8	29,48	15,24	4,60	1371,11	1169	1552	383
9	23,37	15,24	0,71	1226,89	1097	1371	274
10	24,35	15,24	0,41	1210,08	1102	1347	245
11	27,04	15,24	2,67	1316,86	1093	1638	545
12	25,56	15,24	2,01	1144,43	1093	1219	126
13	23,34	15,24	1,03	1126,49	1088	1185	97
14	24,31	15,24	2,90	1149,76	1110	1216	106
15	27,87	15,24	0,44	1215,07	1105	1438	333
16	19,95	18,29	2,78	1179	1115	1269	154
17	25,62	15,24	0,43	1156,03	1090	1247	157
18	24,26	15,24	0,31	1178,76	1107	1318	211
19	22,95	15,24	4,92	1321,73	1094	1563	469
20	24,65	15,24	0,13	1201,93	1083	1493	410
21	24,31	15,24	2,71	1295,36	1049	1484	435
22	31,14	15,24	0,26	1238,02	1046	1522	476
23	27,52	15,24	0,77	1097	1021	1208	187
24	24,31	15,24	0,89	1128,14	1022	1309	287
25	26,01	15,24	1,67	1140,18	1011	1361	350
26	27,81	15,24	1,35	1086,11	1010	1195	185
27	27,80	15,24	0,87	1061,02	974	1231	257

H = amplitude altimétrica.

A temperatura máxima do ar mostra que os meses de dezembro a abril foram os mais quentes, variando de 23,2 a 26,5 °C e a partir de maio ocorreu uma diminuição gradativa da temperatura mínima até o mês de agosto e a partir de setembro as temperaturas aumentam gradativamente até novembro, com uma temperatura mínima variando de 7 a 12,2 °C e a temperatura média anual foi de 17,5 °C (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores da estatística descritiva calculadas a partir dos dados climáticos do LHFWE/PESMN-NC no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil

Parâmetros	meses											
	janeiro	fevereiro	março	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro
TMPMX	26,37	26,48	25,15	23,29	21,1	20,79	21,1	21,92	22,55	23,07	23,19	25,49
TMPMN	15,91	15,82	14,94	12,15	9,12	7,58	7,41	6,98	10,24	12,21	12,97	14,85
TMPSTDMX	3,33	3,23	3,37	3,55	3,76	3,57	4,33	4,76	5,4	5,36	4,64	3,9
TMPSTDMN	2,5	2,04	2,19	3,43	3,45	3,91	3,64	3,68	3,71	3,15	3,08	2,92
PCPMM	274,57	221,97	239,7	117,4	79,8	52,22	67,4	44,1	112,71	155,22	191,17	249,93
PCPSTD	14,95	13,49	15,21	10,32	6,29	4,94	5,53	4,02	7,25	9,14	10,08	13,57
PCPPSKW	4,02	3,08	4,63	9	4,86	3,96	3,44	4,3	2,78	3,12	2,28	3,52
PR_W1	0,5	0,34	0,4	0,28	0,24	0,19	0,2	0,19	0,33	0,41	0,45	0,51
PR_W2	0,84	0,81	0,78	0,71	0,65	0,58	0,59	0,62	0,72	0,76	0,8	0,81
PCPD	23,45	18,23	19,86	14,73	12,8	9,14	10,4	10,23	16,23	19,5	20,82	22,59
RAINHHMX	19,86	16,3	19,81	11,17	8,52	6,54	6,46	4,87	8,63	11,47	13,02	16,68
SOLARAV	14,97	13,88	13,18	12,05	9,94	9,17	9,09	11,36	10,84	11,3	12,35	14,04
DEWPT	14,32	14,24	13,74	11,06	8,21	6,75	6,45	6,07	9,01	10,99	11,41	13,37
WNDVAV	0,9	0,85	0,87	0,87	0,82	0,77	0,86	0,96	0,92	0,99	0,89	0,91

TMPMX = temperatura máxima (°C); TMPMN = temperatura mínima (°C); TMPSTDMX = desvio padrão da temperatura máxima (°C); TMPSTDMN = desvio padrão da temperatura mínima (°C); PCPMM = precipitação média (mm); PCPSTD = desvio padrão para precipitação (mm); PCPPSKW = coeficiente de assimetria para precipitação máxima; PR_W1 = probabilidade de dias úmidos após dias secos (%); PR_W2 = probabilidade de dias úmidos após dias úmidos (%); PCPD = números de dias de precipitação; RAINHHMX = precipitação máxima de 0,5 horas (mm); SOLARRAV = radiação solar (MJ/m².dia⁻¹); DEWPT: temperatura no ponto do orvalho (°C); WNDVAV = velocidade do vento (m.s⁻¹).

Arcova e Cicco (1999) resultaram nas microbacias florestadas do PESH-NC a temperatura média anual de 16,5 °C. No estudo de Armani (2004) na microbacia B do PESH-NC concluiu os meses de janeiro a março como os mais quentes (20 a 23 °C) e partir de abril ocorreu uma diminuição progressiva da temperatura média até o mês de julho, do qual os meses de maio a julho foram considerados os mais frios (14 a 17 °C) e a partir de agosto as temperaturas aumentaram gradualmente até dezembro.

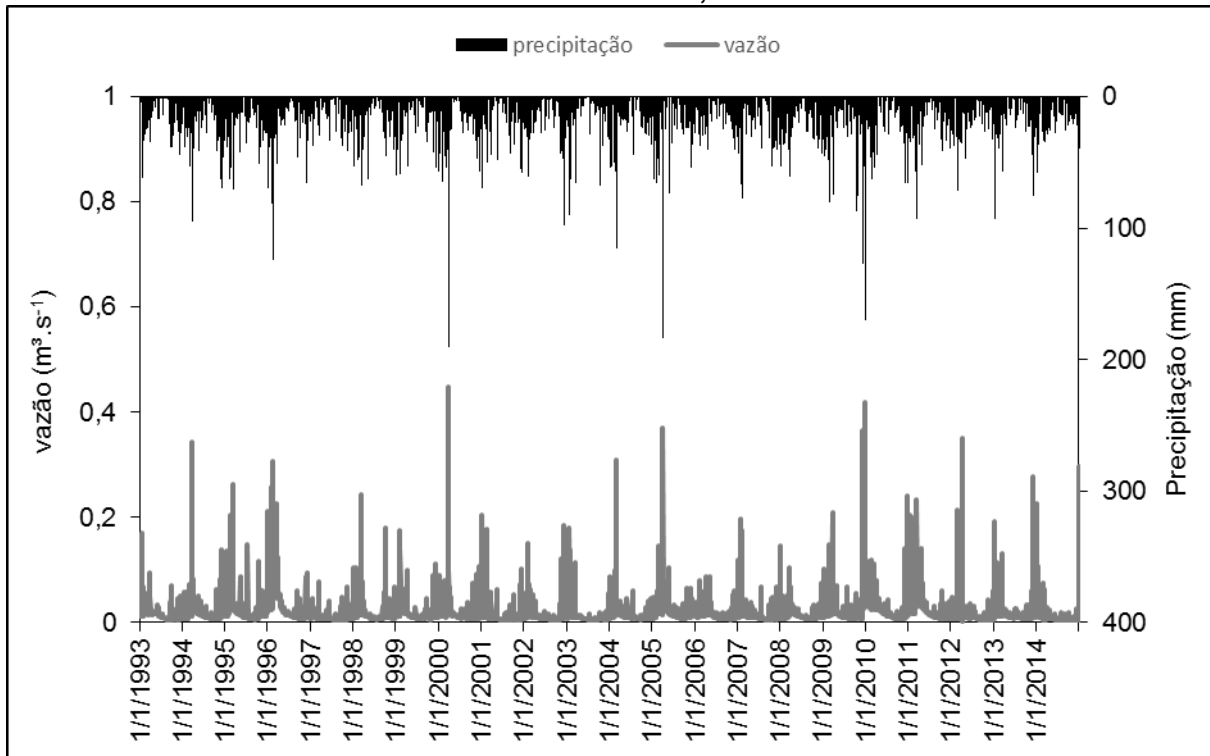
A precipitação média anual durante a série histórica de 22 anos foi de 1806,1 mm, com chuvas mais elevadas no período considerado úmido (outubro a março), enquanto no período pouco úmido (abril a setembro) possui menores precipitações. Luiz (2008) a partir da série histórica estimada no período de 1981 a 2005 na estação meteorológica do PESH-NC obteve uma precipitação média anual de 1998,7 mm. Arcova et al. (2012) afirma que as chuvas geralmente têm elevada intensidade no período úmido (outubro a março), enquanto no período pouco úmido (abril a setembro), apresentam chuvas mais uniformes, que podem se estender durante o dia.

Na probabilidade de dias úmidos após dias secos e dias úmidos após dias úmidos no período considerado úmido teve as maiores probabilidades e o período considerado menos úmido teve as menores probabilidades. O número de dias de precipitação teve no período considerado úmido a maior quantidade de dias, enquanto no período considerado menos úmido houve uma menor quantidade de dias.

A radiação solar e a temperatura do ponto de orvalho tiveram a tendência dos maiores valores serem no período considerado úmido, enquanto os menores valores a tendência de serem no período considerado menos úmido. A velocidade do vento teve os maiores valores de agosto a janeiro e os menores valores foram de fevereiro a julho.

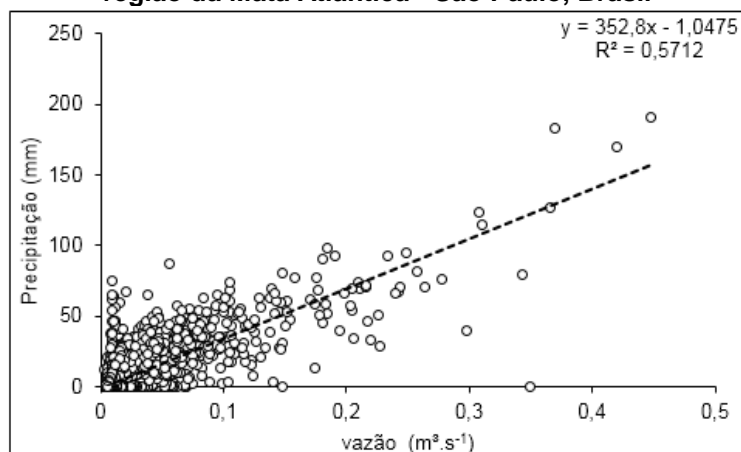
Foi notado que os maiores eventos de precipitação tiveram a tendência em refletir os picos de vazão e também é bem representada quando o volume pluviométrico diminuiu (Figura 14).

Figura 14 - Série de dados da precipitação média diária e vazão média diária da MA/LHFWE no PESH-NC do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



A correlação de chuva-vazão se mostrou moderada, apresentando um R^2 de 0,57 (Figura 15).

Figura 15 - Correlação dos dados de precipitação média diária e vazão média diária da MA/LHFWE no PESH-NC do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraíba - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



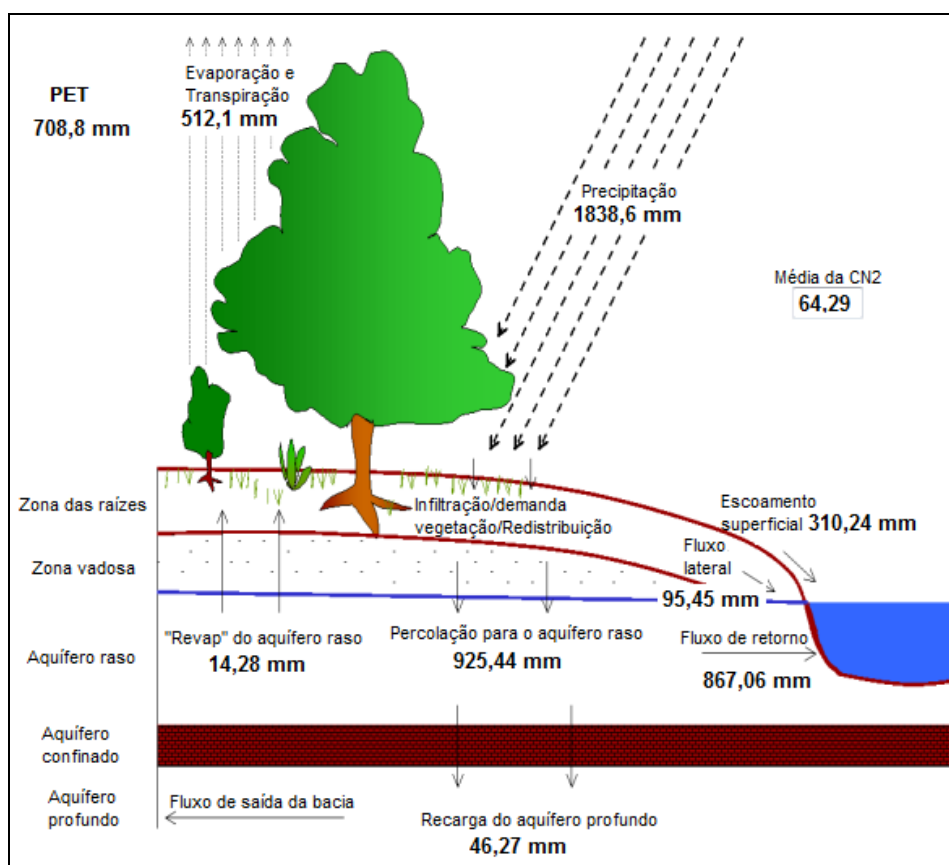
4.2 Modelo SWAT

Nesta subseção mostram-se os resultados e discussão obtidos nas fases da modelagem hidrológica SWAT, que inclui sem calibração, análise de sensibilidade, calibração e validação.

4.2.1 Sem calibração

O balanço hídrico antes da calibração teve a precipitação de 1838,6 mm, evapotranspiração de 512,1 mm (27,9%), evapotranspiração potencial de 708,8 mm, o escoamento superficial de 310,24 mm, o fluxo lateral de 95,45 mm, a percolação de 925,44 mm, o fluxo de base de 867,06 mm, a recarga para o aquífero profundo de 46,27 mm e ascensão capilar do aquífero raso de 14,28 mm. O CN média foi de 64,29 (Figura 16).

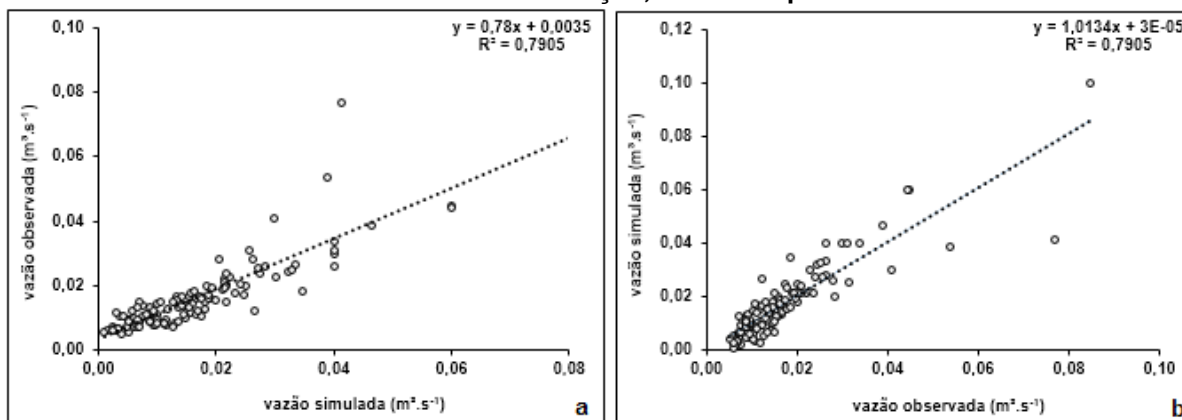
Figura 16 - Balanço hídrico sem calibração, simulado pelo SWAT



No gráfico de dispersão a correlação linear sem calibração (a e b), mostrou que a maioria dos dados ficou mais concentrado próximo a reta de tendência e a minoria

ficou distante, mostrando correlação de $R^2 = 0,79$, entre a vazão média diária mensal simulada e a vazão média diária mensal observada (Figura 17).

Figura 17 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas sem calibração, durante o período de 1996 até 2005

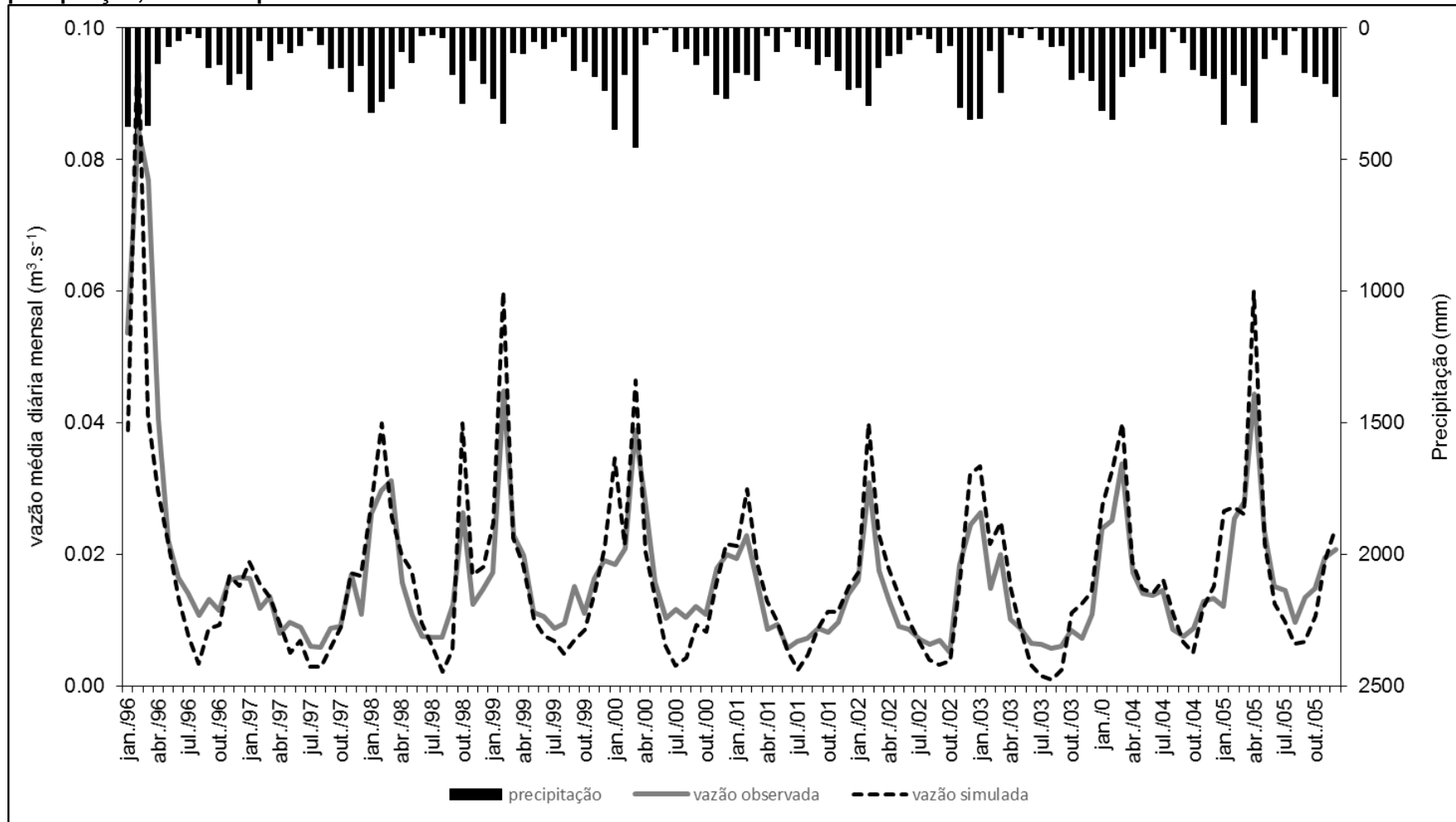


O valor médio após a calibração dos dados observados e simulados foram semelhantes ($0,017 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), com o valor mínimo registrado para a vazão simulada de $0,001 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,005 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto para o valor máximo registrado da vazão simulada foi de $0,09 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,085 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Os valores simulados responderam de forma superestimada para os picos de vazões e subestimada para as recessões de vazões, porém verifica-se que ocorreu uma boa aderência entre os dados simulados e observados, ou seja, os valores simulados reconhecem os picos e recessões de vazões dos dados observados.

Ocorreu superestimação dos valores simulados em fevereiro de 1996/1998/1999/2003, outubro de 1998, janeiro e março de 2000, fevereiro de 2001/2002, dezembro de 2002, março de 2004 e abril de 2005. A subestimação ocorreu nos valores simulados em agosto de 1996/1997/1998/1999, julho de 2000/2001, setembro de 2002, agosto de 2003 e setembro de 2005 (Figura 18).

Figura 18 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais, vazões médias diárias mensais simuladas sem calibração pelo modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005



Baldissera (2005), Salles (2012), Fukunaga (2012) e Oliveira (2014) também observaram em seus estudos a superestimativa das vazões na primeira simulação realizada sem calibração. De acordo com Uzeika (2009) o modelo não calcula adequadamente a umidade do solo, conseqüentemente os valores simulados podem ser superestimados ou subestimados.

No estudo de Oliveira (2014) a simulação tendeu a superestimar as vazões mínimas, e quando iniciou o período chuvoso, os valores foram subestimados, ou seja, o modelo não conseguiu acompanhar as maiores vazões. O estudo de Govender e Everson (2005) em uma pequena bacia hidrográfica (0,68 Km²) na África do Sul, apresentou melhores resultados em anos secos do que em anos úmidos e isso pode estar vinculado à dificuldade do modelo simular a água disponível no solo durante os períodos úmidos.

A superestimação da vazão pode estar vinculada à utilização de parâmetros padrões do modelo SWAT, principalmente os parâmetros que conduzem a movimentação da água nos aquíferos e aqueles que definem as rotinas entre as células de drenagem (GASSMAN, et al., 2007). Um dos parâmetros que pode estar relacionado é o CN2, no qual esse valor depende das características do solo e condições de umidade antecedentes, tendo a necessidade de um maior controle do parâmetro na calibração (OLIVEIRA, 2014).

Já o fato de subestimação pode ter relação com o armazenamento de água disponível no solo, ou seja, as águas que irão abastecer o aquífero profundo são consideradas perdida e não tem mais participação para o sistema (LESSA, 2011).

A variação de picos de vazão entre o observado e o simulado pode estar relacionada com a representatividade espacial e temporal dos padrões de chuva (PEREIRA et al., 2016). A dificuldade de ajustar o pico de vazão é devida a resposta mais rápida da microbacia a eventos consecutivos de precipitação e em contrapartida, picos de vazão. Verifica-se que é necessário um aprimoramento do modelo, buscando melhorar a representatividade das vazões mínimas e máximas (FALCO et al., 2015).

Os valores da análise estatística da qualidade dos resultados gerados antes da calibração tiveram um desempenho classificado como “muito bom” para o parâmetro R² (0,79), “bom” para NS (0,73) e satisfatório para RSR (0,52) e PBIAS (-15,1%), que indica que a simulação está superestimada em 15,1% em relação aos dados observados (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados sem calibração, durante o período de 1996 até 2005

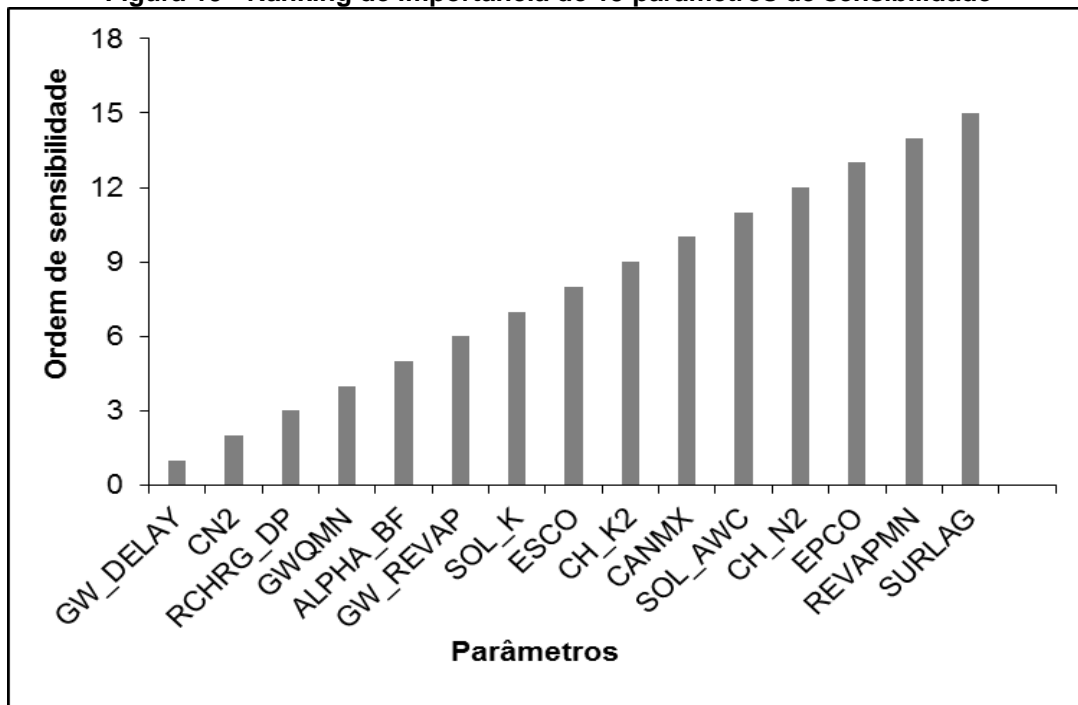
Parâmetros	Não calibrado	
	Resultado	Classificação
NS	0,73	Bom
PBIAS (%)	-15,1	Satisfatório
RSR	0,52	Satisfatório
R ²	0,79	Muito Bom

Diante da superestimação, subestimação e do valor estatístico de PBIAS, verificou-se a necessidade de submeter esta modelagem aos procedimentos de análise de sensibilidade, calibração e validação para poder representar os dados observados de maneira mais satisfatória, buscando alcançar os valores simulados mais similares aos observados.

4.2.2 Análise de sensibilidade

Os parâmetros mais sensíveis em ordem decrescente foram: tempo de retardo da água subterrânea (GW_DELAY), curva-número para a condição II (CN2), fração de água percolada para o aquífero profundo (RCHRG_DP), limite entre a profundidade de água em aquífero raso e a superfície (GWQMN), constante de recessão do escoamento de base (dias) (ALPHA_BF), coeficiente “revap” de água subterrânea (GW_REVAP), condutividade hidráulica saturada do solo (SOL_K), fator de compensação de evaporação do solo (ESCO), condutividade hidráulica efetiva do canal para a condição II (CH_K2), armazenamento de água no dossel (CANMX), capacidade de água disponível do solo (SOL_AWC), coeficiente de rugosidade de Manning para a condição II (CH_N2), fator de compensação de água pelas plantas (EPCO), profundidade limite de água no aquífero raso para o ocorrer o "revap", (REVAPMN), coeficiente de retardo do escoamento superficial (SURLAG) (Figura 19).

Figura 19 - Ranking de importância de 15 parâmetros de sensibilidade



Os parâmetros mais sensíveis estão relacionados com a água subterrânea, escoamento superficial e a evapotranspiração. Os valores de calibração dos parâmetros relacionados com o fluxo subterrâneo foram próximos aos utilizados por Salles (2012), Oliveira (2014) e Villela (2015).

Arnold et al. (2012a) a partir de uma análise na literatura, relacionaram os parâmetros mais utilizados na calibração de processos de escoamento superficial e fluxo base: CN2, SOL_AWC, ESCO, EPCO, SURLAG, GW_ALPHA, GW_REVAP, GW_DELAY, GWQMN, REVAPMIN e RCHARG_DP.

De acordo com Schmalz e Fohrer (2009), a sensibilidade dos parâmetros é influenciada principalmente, pelo uso e ocupação do solo, relevo, outros parâmetros físicos e climáticos. Lelis et al. (2012) concluíram que os parâmetros mais sensíveis ao modelo foram relacionados à capacidade de água disponível, propriedades físicas do solo e o manejo.

O parâmetro CN2 está relacionado à quantidade de escoamento superficial com base no solo, uso do solo, permeabilidade e uso do solo, e é um dos parâmetros mais utilizados na calibração de modelos hidrológicos (ARNOLD et al., 2012a). O CN2 representa o valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II, a qual ocorre quando o solo não está totalmente saturado e seu valor influencia na quantidade do deflúvio gerado na bacia hidrográfica (SALLES, 2012).

O aumento dos valores do CN2 conseqüentemente aumenta o escoamento superficial, e sua variação causa a sensibilidade na vazão simulada, principalmente nas vazões máximas (OLIVEIRA, 2014). O motivo do CN2 se tornar um dos parâmetros mais sensíveis está ligado ao agrupamento dos dados diários em médias mensais, no qual diminui a importância relativa dos demais parâmetros físicos (ANTUNES, 2015).

Os parâmetros GW_DELAY, RCHRG_DP, GW_REVAP, GWQMN apresentaram alta sensibilidade e são processos que fazem parte do fluxo base. O parâmetro ESCO foi um dos parâmetros mais sensíveis, e é utilizado na calibração pelo fato de não ser medido diretamente e está ligado a evapotranspiração (OLIVEIRA, 2014).

Os parâmetros classificados como altos nesse estudo, também são confirmados em outros estudos que avaliaram a aplicabilidade do modelo SWAT em bacias hidrográficas na região sudeste (Quadro 12).

Quadro 12 - Parâmetros mais sensíveis para a simulação do SWAT na região sudeste

Parâmetros mais sensíveis	Região	Autores
ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z, GW_QMN, GW_DELAY, SOL_AWC, REVAPMN, SURLAG, GW_REVAP, CN2	Sudeste	DURÃES, 2010
ESCO, SOL_AWC, CN2, SOL_Z, GWQMN, SOL_K, SLOPE, CANMX, ALPHA_BF		FUKUNAGA, 2012
ESCO, ALPHA_BF, EPCO, SOL_Z, CANMX, CH_K2, SOL_AWC, SOL_K, CN2		LELIS et al., 2012
CN2, ALPHA_BF, RCHRG_DP, ESCO, SOL_Z, SOL_AWC, SOL_K		ANDRADE et al., 2013
CN2, ALPHA_BF, RCHRG_DP, ESCO, SOL_Z, SOL_AWC, CH_N2, BLAI, CANXM, GW_REVAP		MELO NETO et al., 2014
CN2, CANMX, CH_K2, CNCOEF, ALPHA_BF, ESCO		OLIVEIRA, 2014

Isso mostra que os parâmetros mais sensíveis são poucos diferenciados de uma bacia para outra bacia, ou seja, os parâmetros mais sensíveis que se repetem nos estudos ocasionam maior significância no impacto da estimativa da vazão no processo de modelagem (OLIVEIRA, 2014). Lelis et al. (2012) concluíram que a análise de sensibilidade não é influenciada pela maior ou menor discretização da bacia.

4.2.3 Calibração

Após a realização da análise de sensibilidade, foi gerado os valores calibrados dos parâmetros (Quadro 13).

Quadro 13 - Valores dos parâmetros utilizados na calibração semi-automática pelo SWAT-CUP, com seus respectivos valores iniciais, limites (inferiores e superiores) e os valores calibrados

Parâmetro	Unidade de medida	Limites	Valor inicial	Valor calibrado
GW_DELAY	dias	-30 a 60	31	52,35
RCHRG_DP	fração	0 a 0,5	0,05	0,26
CN2	adimensional	± 20%	55 a 73	-15%
GW_REVAP	adimensional	0,02 a 0,2	0,02	0,1
ESCO	adimensional	0,5 a 0,95	0,95	0,89
GWQMN	mm	-1000 a 1000	1000	-882
CANMX	mm	0 a 30	0	11,31
SOL_K	mm.h ⁻¹	± 5%	12,5 a 40	-5%
EPCO	adimensional	0,01 a 1	1	0,95
CH_K2	mm.h ⁻¹	0 a 10	0	6,21
REVAPMN	mm	-1000 a 1000	750	-978
SOL_AWC	mm H ₂ O mm.solo ⁻¹	± 5%	0,15 a 0,3	-1%
ALPHA_BF	dias	0 a 1	0,048	0,05
SURLAG	adimensional	1 a 24	4	13,52
CH_N2	adimensional	-0,01 a 0,2	0,014	0,18

A redução da CN2 em 10% mostrou que o uso do solo foi bem representativo, mesmo os parâmetros do uso do solo sendo padrão do modelo SWAT. Com a diminuição dos valores de CN2, diminuiu o escoamento superficial e aumentou a infiltração.

Oliveira (2014) destaca que a redução dos valores de CN2 pode ser devido as propriedades físicas do solo e na capacidade de infiltração e manejo que não são refletidas nos valores iniciais do CN2. Santos et al. (2013) mostraram que o CN2 superestima potencialmente o escoamento superficial e conseqüentemente as vazões em bacias hidrográficas, ou seja, com a redução dos valores de CN2, ocorre maior proximidade dos valores observados.

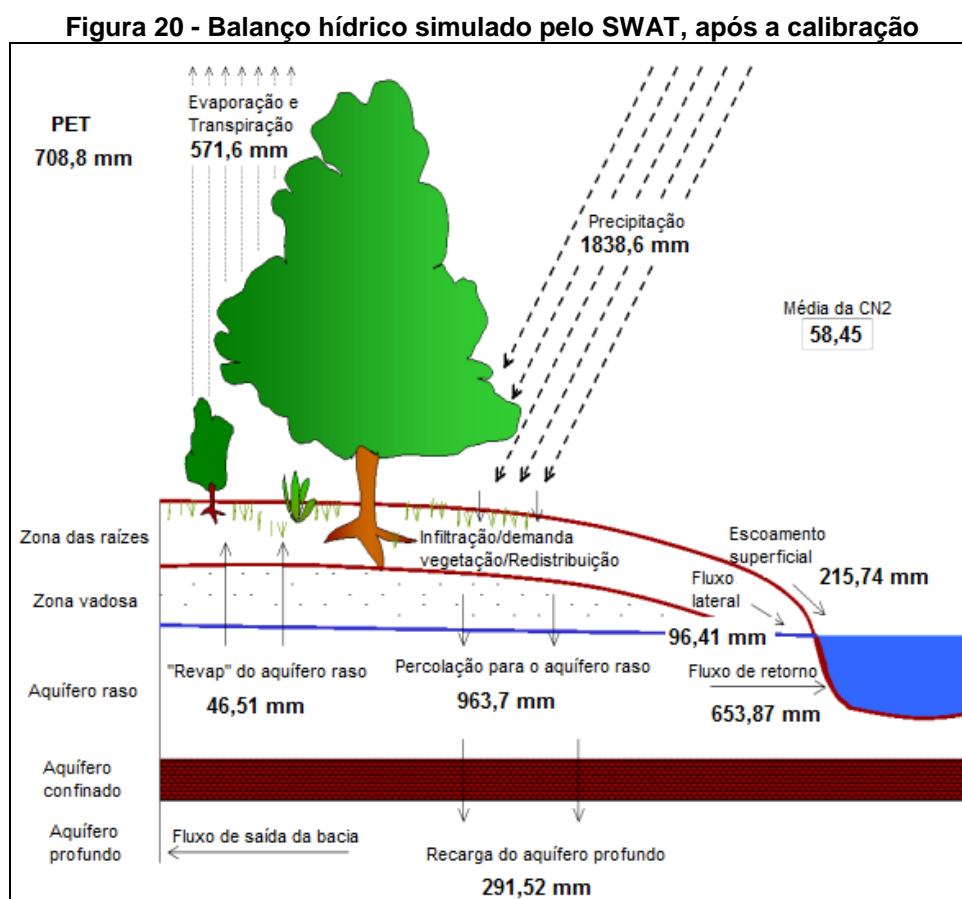
Alterou-se o parâmetro SURLAG, do qual a bacia possui um tempo de resposta rápido para o escoamento superficial. O SOL_K teve também o seu valor alterado, visando um aumento da água para as camadas mais baixas do perfil do solo, aumentando a água nas camadas mais profundas do solo. O valor de ESCO teve intuito de alterar o seu valor para aumentar a demanda evaporativa do solo pelas camadas inferiores. O aumento dos valores de GWQMN, resulta em um atraso do fluxo de base e seu armazenamento (KANNAN et al., 2007).

O GWQMN foi modificado para ajustar a profundidade da água entre o aquífero raso e a superfície, o GW-DELAY foi para ter uma resposta mais lenta da água subterrânea para a descarga no rio e o ALPHA-BF para aumentar o volume de água

no fluxo de base e o RCHRG-DP, foi modificado para menos água do fluxo de base ficasse disponível para a recarga do aquífero (CASTRO, 2013).

Buscou-se adequar os valores de evapotranspiração, para isso alterou-se o parâmetro CANMX, que controla a retirada da água do sistema por interceptação pelas plantas, buscando aumentar o valor de evapotranspiração.

O balanço hídrico após a calibração (em comparação aos valores sem calibração) teve o mesmo valor de precipitação (1838,6 mm) e evapotranspiração potencial (708,8 mm), enquanto o escoamento superficial (215,74 mm), fluxo de retorno (653,87 mm) e a CN média (58,45) tiveram valores reduzidos. A evapotranspiração (571,6 mm = 31,09%), fluxo lateral (96,41 mm), percolação (963,7 mm), recarga para o aquífero profundo (291,52 mm) e a ascensão capilar do aquífero raso, tiveram os valores aumentados (Figura 20).



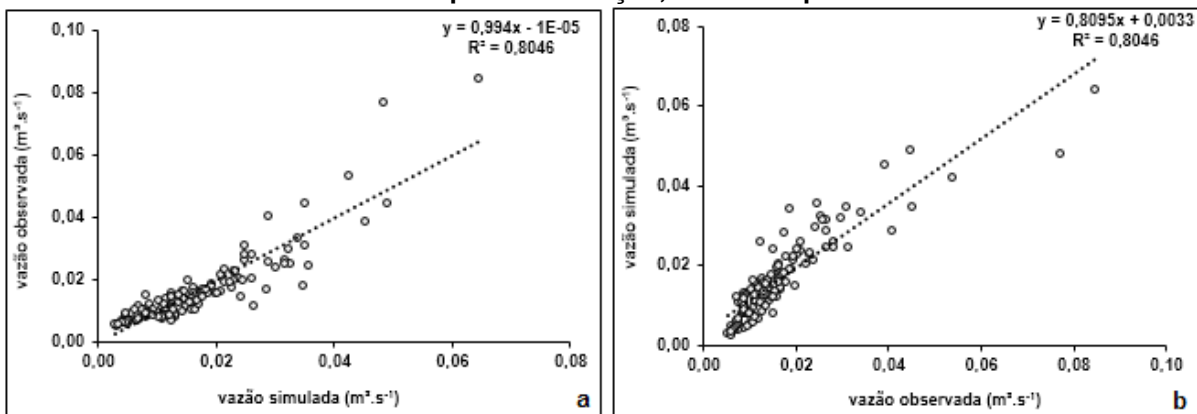
Com a calibração os valores de escoamento superficial foram inferiores e conseqüentemente ocorreu maior infiltração. Lima (2008) afirma que a infiltração é um processo de importância para o crescimento da vegetação, abastecimentos dos

aquíferos, armazenamento da água que mantém o fluxo durante as secas (deflúvio), redução das cheias e da erosão.

A precipitação e a evapotranspiração anual média calculada pelo modelo, ficou bastante próximo aos valores de Cicco et al. (2007), respectivamente, 1814 mm e 609 mm (32%), entre os anos de 1993 a 1996 e 2001 a 2006. Também ficaram próximos ao de Anido (2002), ou seja, 1832 mm de precipitação e 553 mm (32%) de evapotranspiração, dos anos de 1992 a 2001, sendo os estudos realizados no rio Paraibuna na MA/LHFWE do PESH-NC. Com isso, mostra que os dados gerados pelo SWAT após a calibração foram valores próximos, condizendo com a realidade, do qual mostra que o modelo hidrológico foi representativo no balanço hídrico.

No gráfico de dispersão a correlação linear após a calibração (a e b), mostrou que a maioria dos dados ficou mais concentrado próximo a reta de tendência e a minoria ficou distante, mostrando correlação de $R^2 = 0,8$ (Figura 21), na qual houve uma melhora no ajuste das vazões simuladas e observadas após a calibração do modelo.

Figura 21 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas após a calibração, durante o período de 1996 até 2005



A qualidade dos dados do estudo é extremamente confiável e é um fator muito importante para obter o sucesso da modelagem. Fukunaga (2012) trabalhou com uma série de dados com uma alta porcentagem de falhas, aproximadamente 45% e não encontrou boa correlação entre os dados observados no monitoramento e os dados estimados pelo modelo SWAT. Lelis et al. (2012) tiveram sucesso na calibração do modelo SWAT na simulação de vazão, sem relatar problemas de falhas na série de dados.

O valor médio após a calibração dos dados observados e simulados foram semelhantes ($0,017 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), o valor mínimo registrado para a vazão simulada foi de $0,002 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,005 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto para o valor máximo registrado da vazão simulada foi de $0,068 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,085 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ (Figura 22).

Ocorreu superestimação nos picos simulados em março de 1996, janeiro de 1997 e 2000, março de 2000, dezembro de 2002, janeiro de 2003 e abril de 2005. A subestimação nas recessões dos valores simulados ocorreu em agosto de 1997/1998/1999/2000/2003 e julho de 2001.

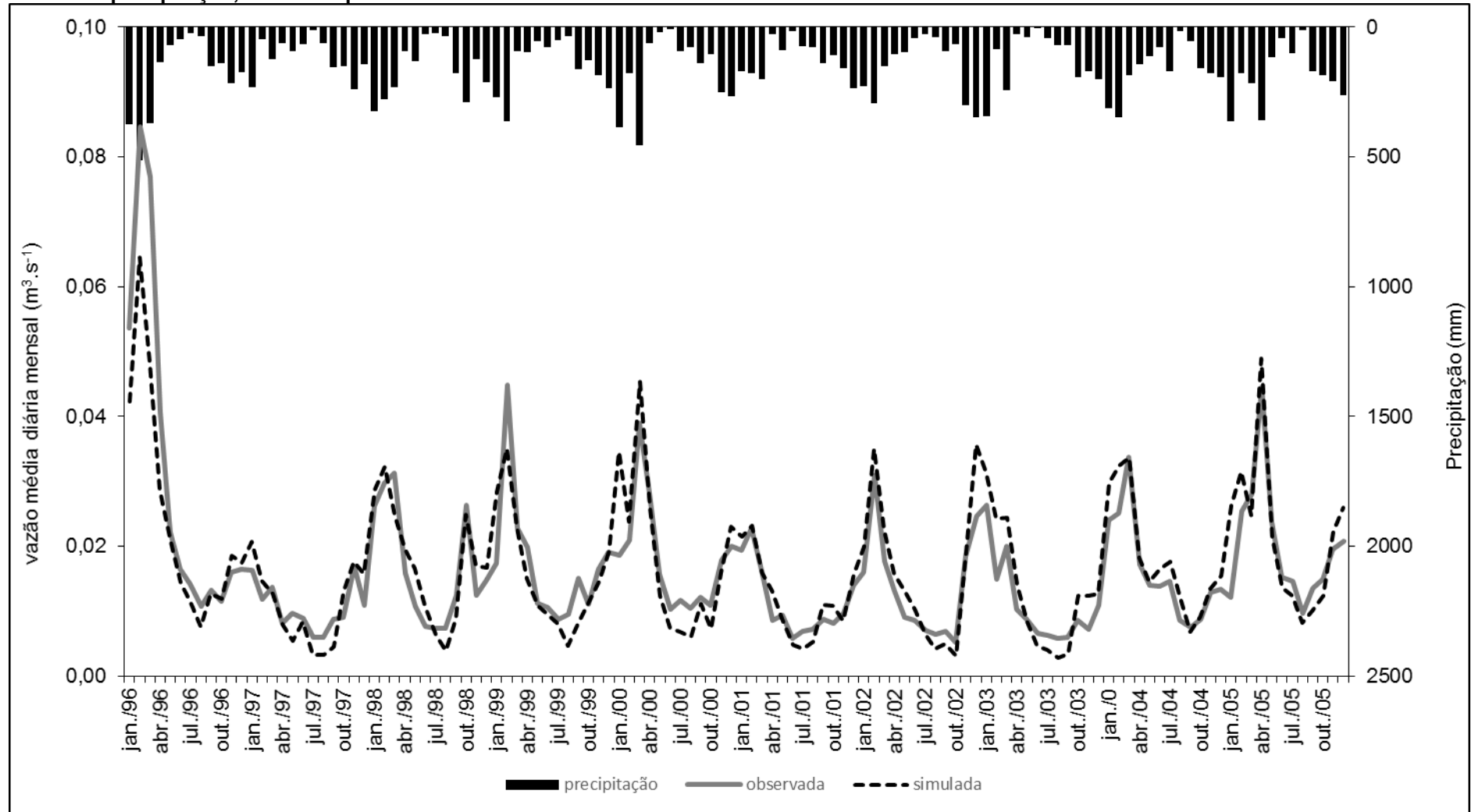
Após calibrado o modelo, é notável um melhor ajuste dos dados simulados, principalmente, os valores de picos, que tiveram uma redução considerável dos eventos extremos simulados quando comparados a simulação sem calibração, enquanto nos períodos de recessão, observou-se grande proximidade entre os valores observados e simulados.

O ajuste não conseguiu representar todos os dados com a mesma eficiência, ou seja, alguns minimizaram a superestimação e outros passaram a ser subestimados. A alteração do comportamento antes por estar superestimando e, após a calibração, passando a subestimar os valores, pode ser explicado principalmente pela alteração dos valores de CN2, SOL_AWC e SOL_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo (FUKUNAGA, 2012).

É possível notar que no início do período da simulação para calibração (janeiro e fevereiro de 1996) não houve boa correspondência entre os dados observados e simulados e a partir da época chuvosa subsequente, percebe-se uma melhora na resposta hidrológica do SWAT. Fukunaga (2012) informa que as simulações teriam maior capacidade de resposta hidrológica se iniciassem no período seco.

O modelo SWAT tem dificuldades em conciliar as estações de seca e chuva, ou seja, quando os dados de inverno e verão são usados separadamente para calibrar o modelo, o desempenho do modelo ainda é melhor para a temporada de inverno, onde predomina as vazões mais baixas, do que para o verão com maiores vazões (FUKUNAGA, 2012; OLIVEIRA, 2014).

Figura 22 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas, vazões médias diárias mensais simuladas após a calibração do modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 1996 até 2005



Os valores da análise estatística da qualidade dos resultados gerados na calibração tiveram um desempenho classificado como “muito bom”, para os quatro parâmetros: NS (0,8), PBIAS (-6,7%), RSR (0,44), R^2 (0,8), demonstrando o progresso da simulação em relação aos valores não calibrados (Tabela 3).

Tabela 3 - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados após a calibração, durante o período de 1996 até 2005

Parâmetros	Calibração	
	Resultado	Classificação
NS	0,8	Muito bom
PBIAS (%)	-6,7	Muito bom
RSR	0,44	Muito bom
R^2	0,8	Muito bom

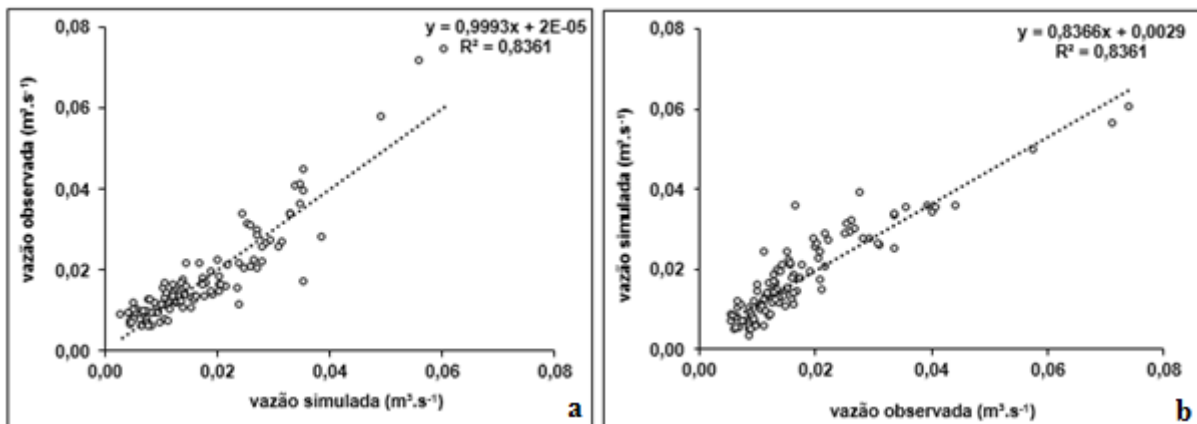
Os procedimentos de análise de sensibilidade e da calibração semi-automática foram suficientes para simular a vazão adequadamente. De acordo com Pereira et al. (2016) muitos estudos com os valores NS relacionados ao SWAT variaram de 0,3 a 0,9, dependendo da área de drenagem da bacia, do intervalo de tempo da simulação e da base de dados disponível.

Machado (2002) teve bons resultados antes mesmo de calibrar, mas com a calibração do SWAT para a simulação do fluxo médio mensal da bacia tiveram os resultados estatísticos alterados para “muito bom”. Rosa (2016) mencionou dificuldades no ajuste da calibração, devido a qualidade dos dados de entrada que o modelo requer, no qual muitas vezes não estão disponíveis, sendo necessários utilizar informações da literatura ou *default* do modelo SWAT.

4.2.4 Validação

No gráfico de dispersão a correlação linear após a validação (a e b), mostrou que a maioria dos dados ficou mais concentrado próximo a reta de tendência e a minoria ficou distante, mostrando correlação de $R^2 = 0,84$ (Figura 23), na qual é notável uma melhor distribuição dos dados em comparação ao período calibrado.

Figura 23 - Correlação entre as vazões médias diárias mensais observadas e as vazões médias diárias mensais simuladas após a validação, durante o período de 2006 até 2014

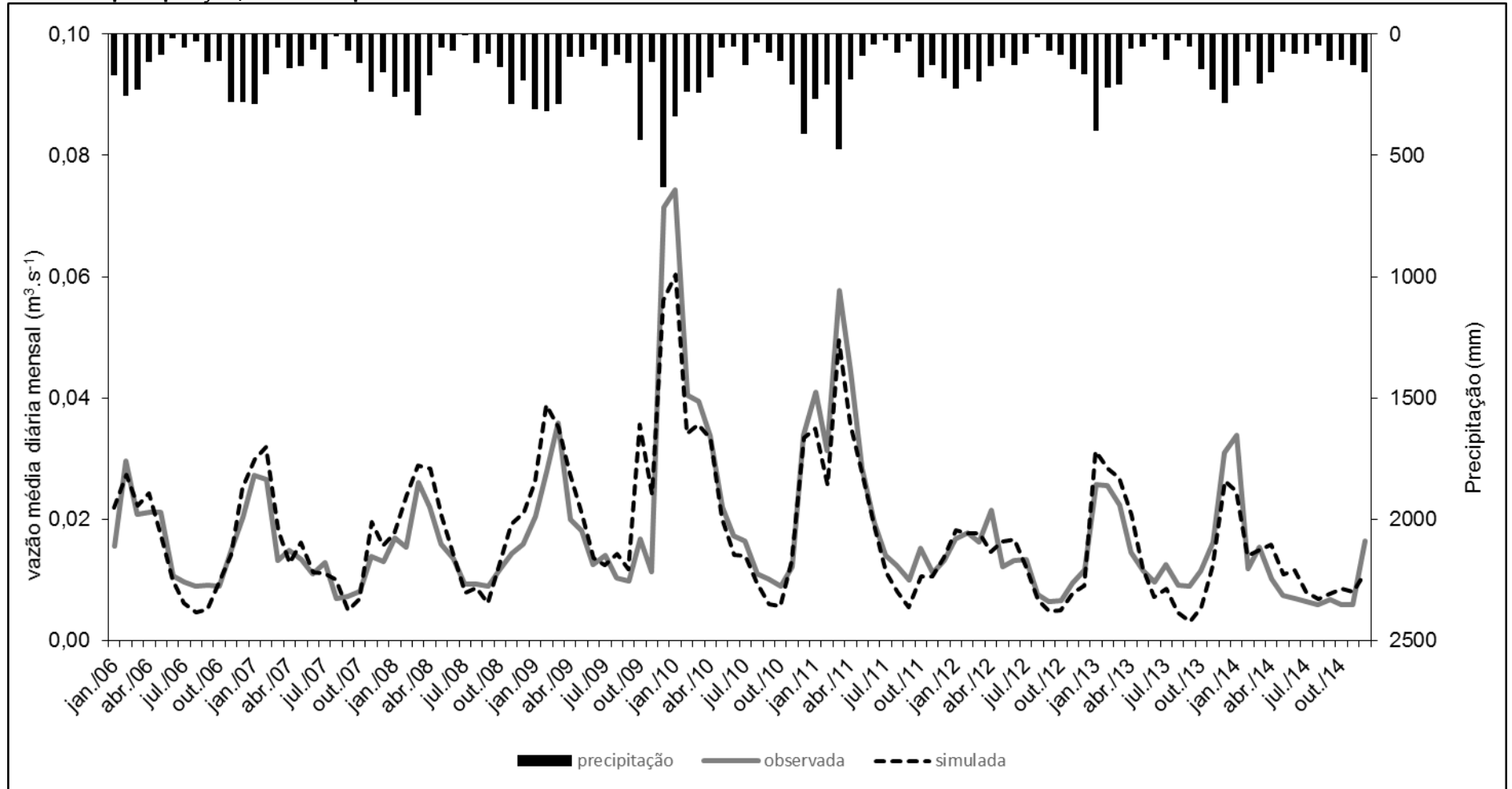


O valor médio após a validação dos dados observados e simulados foram semelhantes ($0,018 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), com valor mínimo de $0,004 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ da vazão simulada e para a vazão observada foi de $0,006 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, enquanto para o valor máximo registrado da vazão simulada foi de $0,065 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e para a vazão observada foi de $0,074 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Ocorreu superestimação nos picos simulados em fevereiro de 2007/2009, outubro de 2009 e janeiro de 2013 e a subestimação nas recessões simuladas em agosto de 2006, outubro de 2010, setembro de 2011 e setembro de 2013 (Figura 24).

Na validação os valores simulados acompanharam o padrão geral dos dados observados, identificando de forma adequada os picos e recessões da vazão, no entanto, observou-se que em alguns períodos a vazão observada esteve acima do simulados, ocorrendo dessa forma, uma subestimação, podendo ser explicado pela alteração dos valores de CN2, SOL_AWC e SOL_K, favorecendo o aumento da infiltração e armazenamento de água no solo (FUKUNAGA, 2012).

Figura 24 - Hidrograma das vazões médias diárias mensais observadas, vazões médias diárias mensais simuladas após a validação do modelo SWAT e a precipitação, durante o período de 2006 até 2014



Os valores da análise estatística da qualidade dos resultados gerados na validação tiveram um desempenho classificado como “muito bom”, para os quatro parâmetros, NS (0,84), PBIAS (3,9%), RSR (0,4) e R² (0,84) (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise estatística da qualidade dos resultados simulados após a validação, durante o período de 2006 até 2014

Parâmetros	Validação	
	Resultado	Classificação
NS	0,84	Muito bom
PBIAS (%)	3,9	Muito bom
RSR	0,4	Muito bom
R ²	0,84	Muito bom

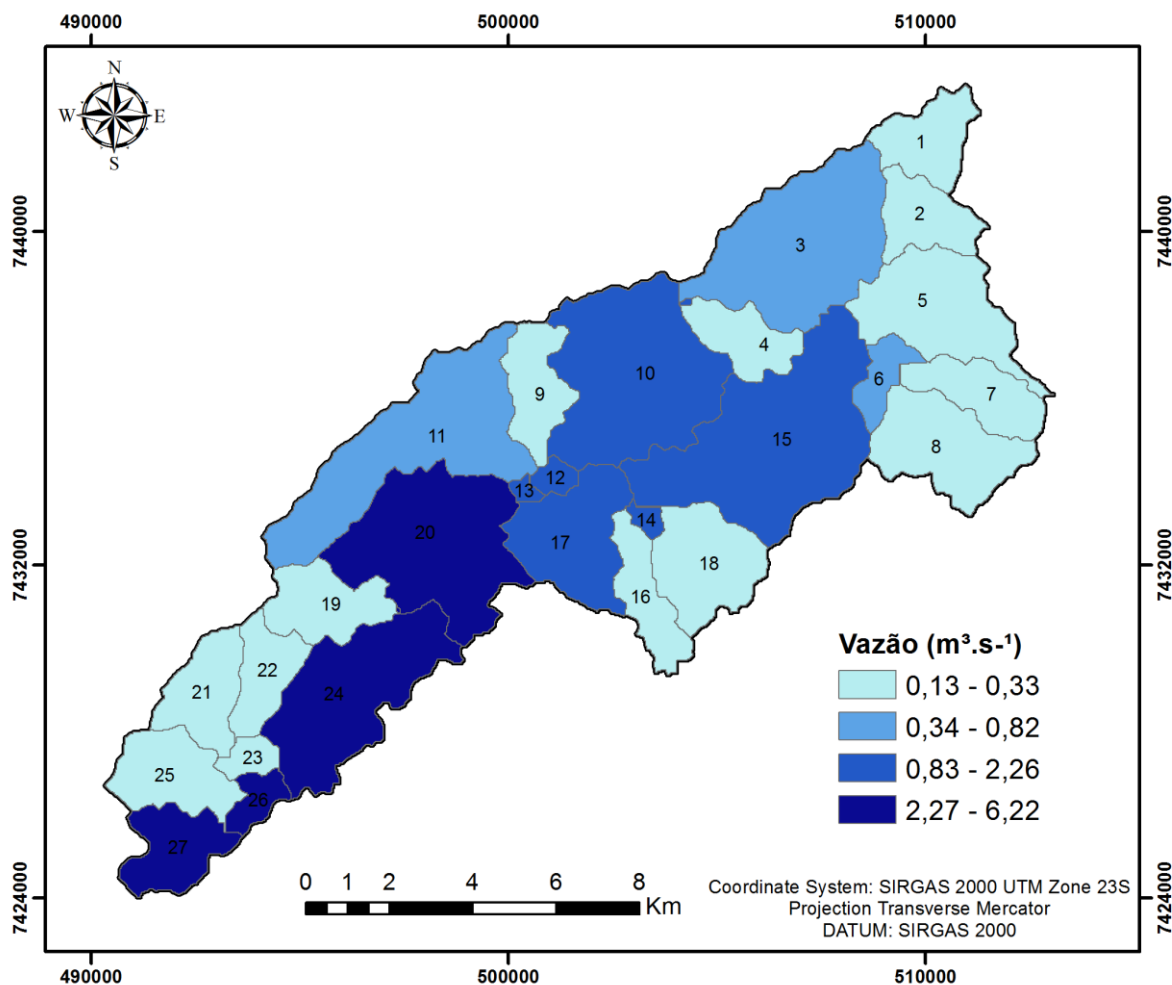
Após a análise da estatística do período de validação, pôde-se confirmar a eficiência dos ajustes no período de calibração, tanto a vazão observada nos períodos de calibração como a de validação. Uma característica notável no período após a validação foi que os índices estatísticos foi superior quando comparado ao do período sem calibração e após a calibração.

Alguns autores, como, Salles (2012), Andrade et al. (2013), Oliveira (2014) e Silva (2015) também encontraram períodos de validação com eficiência superior ao período de calibração. Enquanto Villela (2015) e Dias (2017) tiveram resultados diferentes deste estudo, no qual a melhor eficiência estatística foi no período calibrado ao invés da validação da vazão média mensal.

A comparação de resultados de modelagem hidrológica utilizando o SWAT com outros estudos deve ser realizada com prudência, pois a alteração das entradas utilizadas no modelo resulta em saídas diferentes (ABBASPOUR et al., 2015).

Após a calibração e validação do modelo, foi realizado a simulação da distribuição espacial da vazão média diária mensal, referente aos 19 anos (1996 a 2014) e observou-se que em termo quantitativo do recurso hídrico, a contribuição do trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna foi de 6,22 m³.s⁻¹. As partes mais elevadas contribuíram com os menores valores de vazão (0,13 até 0,33 m³.s⁻¹), enquanto as partes mais baixas contribuíram com os maiores valores de vazão (2,27 até 6,22 m³.s⁻¹), no qual fazem parte do canal principal, ocasionando o acúmulo de água, ou seja, toda a água escoada das áreas mais elevadas é concentrada na área mais baixa da bacia. (Figura 25).

Figura 25 - Distribuição espacial da média diária mensal de vazão no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna - Vale do Paraíba, região da Mata Atlântica - São Paulo, Brasil



Os resultados obtidos com os valores de vazão no trecho da bacia do rio Paraibuna, estão próximos aos encontrados na literatura. Villanova (2014) estudando vazão no mesmo trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna, durante os anos de 1967 até 2011, encontrou valores médios do exutório de $8 \pm 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi observado no estudo, que por mais eficiente que seja o modelo hidrológico SWAT, as estimativas sempre tenderão a certa discrepância em relação aos dados observados, porque além dos erros inerentes do próprio modelo, podem existir erros de equipamentos e leitura dos dados.

Outro fator de limitação foi em relação a série histórica para o banco de dados exigido pelo modelo SWAT, do qual foi difícil encontrar registros que poderiam servir de base para estudos científicos, confiáveis e com qualidade. No Brasil há necessidade de uma qualidade e centralização do banco de dados em relação as informações de um monitoramento ambiental, as quais possam ser disponibilizadas pelos órgãos governamentais brasileiros.

Há também necessidade de um banco de dados específico aos parâmetros do uso do solo e do solo para a não utilização dos parâmetros americano, sendo assim, ganharia versatilidade, maior eficácia e rapidez nas análises ambientais para auxiliar os gestores ambientais e políticos para a tomada de decisão.

Apesar das limitações expostas acima, o desempenho do modelo SWAT e SWAT-CUP, demonstrou potencial e representar todo o processo envolvido no ciclo hidrológico e a subdivisão da bacia hidrográfica.

6 CONCLUSÕES

Os resultados confirmaram a aplicabilidade do modelo, dessa forma, pode servir como ferramenta para planejamento e gestão de políticas públicas dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, na região da Mata Atlântica.

O modelo hidrológico SWAT mostrou-se muito bom e apto para estimação de vazões e do balanço hídrico no trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna.

O modelo SWAT foi calibrado e validado de forma adequada para uma CN média de 58,45.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual**. 2012. 103 p. Disponível em: <<http://www.neprashtechology.ca/Downloads.aspx>>. Acesso em: 08 de out. 2017.
- ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, 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**, Amsterdam, v. 524, p. 733–752. maio 2015.
- ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, fev. 2007.
- AGUIAR, O. T.; PASTORE, J. A.; ROCHA, F. T.; BAITELLO, J. B. Flora fanerogâmica de um trecho da Floresta Densa Secundária no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha/Indaiá (SP). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 1-18, jun. 2001.
- ANDRADE, C. W. L.; MONTENEGRO, S. M. G.; LIMA, J. R. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SRINIVASAN, R. Análise de sensibilidade de parâmetros do modelo SWAT em uma sub-bacia da região nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 2, p. 440-453. 2017.
- 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**, Campina Grande-PB, v. 17, n. 1, p. 69-76, jan. 2013.
- ANIDO, N. M. R. **Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental**. 2002. 69 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais/Conservação de Ecossistemas Florestais)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- ANTUNES, T. A. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Alto Canoas através do modelo SWAT**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade Federal do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.
- ARCOVA, F. C. S. **Avaliação do potencial hidrológico dos nevoeiros e da precipitação oculta em ambiente de Floresta Ombrófila Densa Montana na Serra do Mar, Cunha, SP**. 2013. 155 f. Doutorado (Doutorado em Ciências/Geografia Física)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. Qualidade da água de microbacia com diferentes usos do solo na região de Cunha, Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 56, p. 125-134, dez. 1999.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 2, p. 257-262, mar./abr. 2003.

ARCOVA, F. C. S.; GALVANI, E.; CICCIO, V.; RANZINI, M. Captação de água de nevoeiros por coletores cilíndricos instalados na Serra do Mar, Cunha, SP. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 1, n. 5, p. 1218-1229, nov. 2012.

ARMANI, G. **Interações entre a atmosfera e a superfície terrestre: variações da temperatura e umidade na bacia B do Núcleo Cunha (IF) – SP**. 2004. 198 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 176, n. 1-4, p. 57-77, mar. 1996.

ARNOLD, J. G.; FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 3, p. 563-572. fev. 2005.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. **Soil and Water Assessment Tool - Input/Output Documentation: Version 2012**. Texas: Texas Water Resources Institute, 2012a. 650 p. Disponível em: <<http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; GRIENSVEN, A.; LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: model use, calibration, and validation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 55, n. 4, p. 1-18, jul./ago. 2012b.

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**, Hoboken, v. 34, n. 1, p. 73-89, fev. 1998.

BAKER, T. J.; MILLER, S. N. Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 486, p. 100-111, abr. 2013.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIA, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, Guarapuava-PR, v. 4, n. 1, p. 131-149, jan./abr. 2008.

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 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente)-Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

BALTOKOSKI, V. TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 34, n. 1, jan./fev. 2010.

BENAMAN, J.; SHOEMAKER, C. A.; HAITH, D. A. Calibration and validation of Soil and Water Assessment Tool an Agricultural Watershed in Upstate New York. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 10, n. 5, p. 363-374. set. 2005.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer.** 2 ed. Chichester: Wiley Blackwell, 2012. 457 p.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; PAIVA, E. M. C. D. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, St. Joseph, v. 29, n. 2, p. 189-200, 2013.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal Agriculture and Biological Engineering**, Chaoyang District, v. 8, n. 3, p. 9-35, jun. 2015.

BRITO, E. **Estimativa da produção de sedimentos da bacia do rio Santa Maria da Vitória – Espírito Santo através do modelo matemático Soil and Water Assessment Tool (SWAT).** 2015. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental/Recursos Hídricos)-Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.

BRUIJNZEEL, L. A.; PROCTOR, J. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? In: _____. **Tropical montane cloud forests.** New York: Springer Verlag, v. 110, 1995, p. 38-78.

CALIJURI, M. L. MEIRA, A. D.; PRUSK, F. F. Geoprocessamento Aplicado aos Recursos Hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento: anais...** Lavras: UFLA, SBEA, 1998, p. 200-225.

CARVALHO, W. A.; PANOSO, L. A.; ROSSI, M. Levantamento de reconhecimento detalhado dos solos do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP (Bacia "D"). **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 127-155, dez. 1990.

CASTRO, K. B. **Avaliação do modelo SWAT na simulação da vazão em bacia agrícola do cerrado intensamente monitorada**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas/Geoprocessamento e Análise Ambiental)– Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2013.

CICCO, V. **Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP**. 2009. 138 f. Tese (Doutorado em Geografia Física)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CICCO, V.; ARCOVOCA, F. C. S.; RANZINI, M.; SANTOS, J. B. A.; FORTI, M. C. Recursos hídricos na Mata Atlântica: estudo de caso do Laboratório de Hidrologia Florestal Emmerich, Cunha - SP. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL, I., 2007, Taubaté, SP. **O eucalipto e o ciclo hidrológico**, anais...Taubaté: IPABHi, 2007. p. 25-33.

CICCO, V.; EMMERICH, W.; FUJIEDA, M. Determinação da curva-chave do vertedouro da bacia hidrográfica experimental “D” no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 79-96, mar. 1987.

COLÂNGELO, A. C. **Movimentos de massa e evolução geomorfológica das vertentes marginais no lago da barragem de Paraibuna, Mun. De Paraibuna – SP**.1990. 250 f. Dissertação (Mestrado em Geomorfologia)-Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

DIAS, V. S. **Simulação de vazão aplicada ao reservatório da UHE Furnas utilizando modelo SWAT**. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas)-Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2017.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do Rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)-Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010.

DURÃES, M. F.; MELLO, C. R.; NAGHETTINI, M. Applicability of the SWAT model for Hydrologic simulation in Paraopeba river basin, MG. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 481-488, out./dez. 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI. 2006. 306 p.

FALCO, A. L.; IDE, C. N.; ALMEIDA, I. K.; RIBEIRO, M. L.; IDE, W. R. Disponibilidade hídrica para outorga: influência da sazonalidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XXI, 2015, Brasília, DF. **Segurança hídrica e desenvolvimento sustentável: desafios do conhecimento e da gestão.** anais... Brasília, DF: ABRH, 2015. p. 1-7.

FALKENBERG, D. B.; VOLTOLINI, J. C. The montane cloud forest in southern Brazil. In: HAMILTON, L. S.; JUVIK, J. O.; SCATENA, F. N. (Eds.). **Tropical montane cloud forests.** New York: Springer Verlag, 1995. p. 138-149.

FOHRER, N.; ECKHARDT, K. HAVERKAMP, S.; FREDE, H. G. Applying the SWAT model as a decision support tool for land use concepts ins peripheral regions in Germany. In: STOTT, D. E.; MOHTAR, R. H.; STEINHARDT (Eds.) **Sustaining the Global Farm.** West Lafayette: ISCO/USDA-ARS, 2001, chap. IX, p. 994-999.

FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo.** 2012. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

FURIAN, S. M. **Estudo geomorfológico do escoamento superficial em parcelas experimentais no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha/SP.** 1987. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

GALINDO-LEAL, C. Putting the pieces back together: fragmentation and landscape conservation. In:_____. **The Atlantic Forest of South America: biodiversity status, threats, and outlook.** Washington, DC: Center for Applied Biodiversity Science e Island Press, 2003 p. 372-380.

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I. G. Status do hotspot Mata Atlântica: uma síntese. In:_____. **Mata Atlântica: biodiversidade, ameaças e perspectivas.** São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2005. p. 3-11.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assesment Tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers,** Saint Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, jul./ago. 2007.

GEORGE, C.; LEON, L. F. WaterBase: SWAT in an open source GIS. **The Open Hydrology Journal,** Sharjah, v. 1, p. 19-24. 2007.

GOMES, J. A. M. A.; BERNACCI, L. C.; JOLY, C. A. Diferenças florísticas e estruturais entre duas cotas atitudinais da Floresta Ombrófila Densa Submontana Atlântica, do Parque Estadual da Serra do Mar, município de Ubatuba/SP, Brasil. **Biota Neotropica,** Campinas, v. 11, n. 2, p. 123-137, maio 2011.

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. fev. 2005.

GREEN, C. H.; GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT 2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling Software**, Kidlington, v. 23, n. 4, p. 422–434, abr. 2008.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos**: conceitos, temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 340 p.

GUPTA, H. V.; SOOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and no commensurable measures of information. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 34, n. 4, p. 751-763. abr. 1998.

HAMILTON, L. S.; JUVIK, J. O.; SCATENA, F. N. The Puerto Rico tropical cloud forest symposium: introduction and workshop synthesis. In: HAMILTON, L. S.; JUVIK, J. O.; SCATENA, F. N. **Tropical montane cloud forests**. New York: Springer Verlag, v. 110, 1995, p. 1-18.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America**, Boulder, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil - 2014**. 2014. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/cobertura_e_uso_da_terra/mudancas/vetores>. Acesso em: 29 set. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE-Diretoria de Geociências, 2012. 276 p.

INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - IF. **Plano de manejo do Parque Estadual da Serra do Mar**. São Paulo: IF, 2006. 18 p.

JAIN, S. K.; JAIVIR, T.; VISHAL, S. Simulation of Runoff and Sediment Yield for a Himalayan Watershed Using SWAT Model. **Journal Water Resource and Protection**, Irvine, v. 2, n. 3, p. 267–281, mar. 2010.

JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY - JICA. **Report of implementation design survey on the Japanese technical cooperation project for the forestry research in São Paulo, Brazil**. São Paulo: Japan International Cooperation Agency, 1980. 284 p.

KANNAN, N. WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 332, n.3-4, p. 456-466. jan. 2007.

KOBIYAMA, M. Ruralização na gestão de recursos hídricos em área urbana. **Revista OESP Construção**, São Paulo, v. 5, n. 32, p. 112-117, set./out. 2000.

KÖPPEN, W. **Climatologia**: com um estúdio de los climas de la tierra. Pánuco: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 479 p.

KRYSSANOVA, V.; ARNOLD, J. G. Advances in ecohydrological modelling with SWAT - a review. **Hydrological Sciences Journal**, Abingdon, v. 53, n. 5, p. 939-947, out. 2008.

LAPPONI, J. C. **Estatística usando Excel**. 4 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 476 p.

LEITÃO FILHO, H. F. Aspectos taxonômicos das florestas do Estado de São Paulo. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 197-206, 1982.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. 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**, Viçosa-MG, v. 36, n. 2, p. 623-634. mar./abr. 2012.

LESSA, L. G. F. **Simulação da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Pardo – Botucatu/SP, por modelagem hidrológica**. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

LIMA, W. P. **Hidrologia Florestal aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 245 p.

LLOYD, C. R.; MARQUES FILHO, A. O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 63-73, jan. 1988.

LUIZ, R. A. F. **Classificação climática do núcleo Cunha do Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha, SP**. 2008. 103 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Geografia)-Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrografia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S.; WILLMS, W. D. Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the Soil and Water Assessment Tool model (Alberta, Canada). **Hydrological Processes**, Chichester, v. 18, n. 15, p. 2787-2800, out. 2004.

McCUEN, R. H.; SNYDER, W. M. Sensitivity analysis and probabilistic modeling. In:_____. **Hydrologic modeling**: statistical methods and applications. New York: Prentice Hall, 1986. 550 p.

- MEAURIO, M.; ZABALETA, A.; URIARTE, J. A.; SRINIVASAN, R.; ANTIGÜEDAD, I. Evaluation of SWAT models performance to simulate streamflow spatial origin. The case of a small forested watershed. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 525, p. 326-334, jun. 2015.
- MELO, H. A.; NOBREGA, R. L. B.; CUNHA, J. E. B. L.; RUFINO, I. A. A. Modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica (SIG): integração possível. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, IX., 2008, Salvador, BA. **Articulação das Políticas Públicas e Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos: anais...** Salvador: ABRH, UFBA, INGÁ, 2008. 1 CD-ROM.
- 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**, Porto Alegre-RS, v. 19, n. 1, p. 177-188, jan./mar. 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV., 2009, Natal-RN. **Anais...**São José dos Campos: MCT/INPE, 2009. p. 4773-4780.
- MINOTI, R. **Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e área alagáveis de um compartimento do Médio Mogi Superior/SP**. 2006. 231 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V.; SILVA, D. F. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos. **Geo**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p. 109-119. jan./jun. 2010.
- MOLDAN, B.; CERNY, J. Small Catchments Research. In:_____. **Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research**. Chicester: John Wiley, 1994. p. 1-29.
- MOREIRA, A. A. N.; CAMELIER, C. Relevô. In: GALVÃO, M. G. (coord.). **Geografia do Brasil, Região Sudeste**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1977. p. 1-50.
- MORELLATO, L. P. C.; HADDAD, C. F. B. Introduction: The Brazilian Atlantic Forest. **Biotropica**, Hoboken, v. 32, n. 4b, p. 786-792. dez. 2000.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. V.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulation. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, Saint Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, maio/jun. 2007.
- MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Decision support for watershed management using evolutionary algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, Reston, v. 131, n. 1, p. 35-44. jan./fev. 2005.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, London, v. 403, p. 853-845. fev. 2000.

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

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation**: Version 2005. Texas: Agricultural Research Service, Texas Agricultural Experiment Station. 2005. 476 p.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation**. Version 2009. Texas: Grassland, Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Experiment Station. Texas: Water Resources Institute. 2011. 618p.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma Bacia Hidrográfica em Aracruz, ES**. 2014. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; DIAS, H. C. T.; Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 29, n. 1, jan./fev. 2005.

PACHECO, M. G. **Aplicação do modelo hidrológico SWAT para a bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu (SC, Brasil)**. 2011. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia)-Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2011.

PEREIRA, D. R.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil Using the SWAT model part I: calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdam, v. 7, p. 14-37, set. 2016.

PINTO, J. E. S. S.; AGUIAR NETTO, A. O. **Clima, geografia e agrometeorologia**: uma abordagem interdisciplinar. São Cristóvão: UFS, 2008. 221 p.

PISSARRA, T. C. T. **Análise da bacia hidrográfica do Córrego Rico na sub-região de Jaboticabal, SP: comparação entre imagens TM-LANDSAT 5 e fotografias aéreas verticais**. 2002. 132 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2002.

- PISSARRA, T. C. T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na bacia hidrográfica do Córrego Rico – SP**. 2014. 96 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.
- PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 28, n. 2, p. 297-305, mar./abr. 2004.
- PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, maio/ago. 2008.
- RANZINI, M. **Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar, SP, com o modelo TOPMODEL - simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso**. 2002. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- RANZINI, M.; RIGHETTO, A. M.; LIMA, W. P.; GUANDIQUE, M. E. G.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p.108-119, dez. 2004.
- RIZZINI, C. T.; COIMBRA FILHO, A. F; HONAISS, A. **Ecosistemas brasileiros**. Rio de Janeiro: INDEX/ENGE-RIO-Engenharia e Consultoria S. A., 1988. 200 p.
- RODRIGUES, V. A. Análise dos processos hidrológicos em modelo didático de microbacias. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça. v. 17. n. 1, p. 1-15, fev. 2011.
- RODRIGUES, V. A. Interceptação da precipitação pelas copas em *Pinus halepensis*. In: _____. **Estudos sobre microbacias: “fábricas de água” – jubileu de prata**. Botucatu: FEPAF, 2017. cap. III. p. 46.
- RODRIGUES, V. A. **Avaliação dos processos hidrológicos em microbacias hidrográficas**. 2014. 125 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.
- ROSA, D. R. Q. **Modelagem Hidrossedimentológica na bacia hidrográfica do rio Pomba utilizando o SWAT**. 2016. 127 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.
- ROSSI, M. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, v, 1, 2017, 118 p.
- SALLES, L. A. **Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau**. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2012.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372 p.

SANTOS, J. **Como preparar o MDE Topodata para delimitação de bacias hidrográficas**. Processamento Digital, Geotecnologia e Software livre. 2015. 15 p. Disponível em: <<http://www.processamentodigital.com.br/2015/09/21/qgis28-preparar-o-mde-topodata/>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

SANTOS, L. N. S.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Aplicação do modelo Hidrobacia na microbacia do córrego Jaqueira, Espírito Santo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2103-2116, set./out. 2013.

SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. **Advances in Geosciences**, Goettingen, v. 21, p. 91-98. ago. 2009.

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

SILVA, A. M.; RANZINI, M.; GUANDIQUE, M. E. G.; AROVA, F. C. S.; CICCIO, V. Estudo integrado do processo erosivo numa microbacia experimental localizada no município de Cunha – SP. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 1, p. 43-53, mar. 2005.

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília, DF: Secretaria de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.

SILVA, L. R. S. **Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas**. 2010. 223 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)-Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SILVA, M. A. **Modelagem hidrológica e das perdas de solo: suas relações com as formas de relevo e uso do solo na bacia do rio Taperoá-PB**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia)-Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

SILVA, N. D. M.; CHRISTÓFARO, C. Calibração do modelo hidrológico SWAT para estimativa da vazão em sub-bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha. In: SIMPÓSIO MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS E GESTÃO DA PAISAGEM, II., 2016, Belo Horizonte. **anais...** Belo Horizonte: IG-UFMG, 2016, 31-39.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. p. 35-51.

SINGH, V. P. WOOLHISER, D. A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. **Journal of Hydrological Engineering**, Reston, v. 7. n. 4, p. 270-292. jul. 2002.

- SOS MATA ATLÂNTICA. **Relatório Anual de atividades**. ed. 2015. São Paulo: SOSMA, 2015. 83 p.. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2016/08/RA_SOSMA_2015-Web.pdf>. Acesso em: 08 maio 2018.
- SOUZA, R. C.; SOUZA, F. M.; ESTEVES, R.; IVANAUSKAS, N. M.; FRANCO, G. A. D. C. Flora arbustivo-arbórea do Parque Estadual do Jaraguá, São Paulo – SP. **Instituto Florestal Série Registros**, São Paulo, n. 36, p. 97-101, jul. 2008.
- SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, nov./dez. 2000.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of the basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, Hoboken, v. 30, n. 3, p. 453-462. jun. 1994.
- STACKELBERG, N. O.; CHESCHEIR, G. M.; SKAGGS, R. W.; AMATYA, D. M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó river basin, Uruguay. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 50, n. 2, p. 455-468, mar./abr. 2007.
- TIM, U. S.; JOLLY, R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hidrology/water quality model. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 23, n. 1, p. 25-35, jan./fev. 1994.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 1998. 652p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Natural Resources Conservation Service (NRCS). Hydrologic Soil Groups. In: _____. **Hydrology National Engineering Handbook**. Washington, DC. 2007. chap. 7, p. 1-5. Disponível em: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=22526.wba>>. Acesso em: 08 jan. 2015.
- UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)-Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- VARJABEDIAN, R. Lei da Mata Atlântica: retrocesso ambiental. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p. 147-160, jan./abr. 2010.
- VELOSO, H. P., RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1991. 124 p.

- VENEZIANI, Y.; CICCIO, V.; CÂMARA, C. D.; RANZINI, M.; ARCOVA, F. C. S. Análise das precipitações e das vazões de um trecho da bacia hidrográfica do rio Paraibuna-SP. **Instituto Florestal Série Registros**, São Paulo, n. 40, p. 197-202, jul. 2009.
- VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS**. 2 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289 p.
- VILANOVA, M. R. M. Tendências hidrológicas anuais e sazonais na bacia do rio Paraibuna, Parque Estadual da Serra do Mar (SP). **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 2, n. 2, p. 301-316, maio/ago. 2014.
- VILAS BOAS, S.; PFEIFER, R. M.; CARVALHO, W. A. Relações entre parâmetros dimensionais de bacias hidrográficas e solos do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v. 20/22, p. 57-67, 1986/88.
- VILLELA, J. M. **Avaliação da influência da expansão da cana-de-açúcar no regime hidrossedimentológico na microbacia do córrego cana do Reino, Votuporanga-SP**. 2015. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental)-Escola de Engenharia de São Carlos/Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 245 p.
- WALTER, H. W. **Vegetação e zonas climáticas**. São Paulo: Itatiaia-EPU, 1986. 325 p.
- WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. **Journal of the American Water Resources Association**, Saint Joseph, v. 41, n. 5, p. 1077-1089, set./out. 2005.
- WHITEAKER, T. L.; **Geographically Integrated Hydrologic Modeling Systems**. 2004. 206 f. Dissertation (PhD of Science in Engineering)-Center for Research in Water Resources, University of Texas, Austin, 2004. Disponível em: <<http://www.crrw.utexas.edu/reports/pdf/2004/rtp04-04.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2015.
- WILLIAMS, J. R.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R. GASSMAN, P. W.; GREEN, C. H. History of model development at Temple, Texas. **Hydrological Science Journal**, Abingdon, v. 53, n. 5, p. 948-960. jan. 2008.
- YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 5-18, abr./jun. 1993.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; ZHAO, K.; LIEW, M. V. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 23, p. 430-441, nov. 2009.