



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/10.19.19.03-TDI

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO  
PARAITINGA PARA ANÁLISE DAS POTENCIAIS  
CAUSAS DO EVENTO EXTREMO DE CHEIA E  
DESASTRE OCORRIDO NA PASSAGEM DE ANO DE  
2009/2010**

Fernanda Viana Paiva Arguello

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Laura de Simone Borma,  
aprovada em 30 de agosto de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3ML4LJ2>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

## **COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):**

### **Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

### **Membros:**

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/10.19.19.03-TDI

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO  
PARAITINGA PARA ANÁLISE DAS POTENCIAIS  
CAUSAS DO EVENTO EXTREMO DE CHEIA E  
DESASTRE OCORRIDO NA PASSAGEM DE ANO DE  
2009/2010**

Fernanda Viana Paiva Arguello

Tese de Doutorado do Curso  
de Pós-Graduação em Ciência do  
Sistema Terrestre, orientada pela  
Dra. Laura de Simone Borma,  
aprovada em 30 de agosto de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3ML4LJ2>>

INPE  
São José dos Campos  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Arguello, Fernanda Viana Paiva.

Ar38s      Simulação hidrológica da bacia do Rio Paraitinga para análise das potenciais causas do evento extremo de cheia e desastre ocorrido na passagem de ano de 2009/2010 / Fernanda Viana Paiva Arguello. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxvi + 106 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/10.19.19.03-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadora : Dra. Laura de Simone Borma.

1. Inundação. 2. Modelo SWAT. 3. Mudança de uso e cobertura da terra. I.Título.

CDU 556.166:502.2

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).


This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Fernanda Viana Paiva Arguello**

Título: "SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAITINGA PARA ANÁLISE DAS POTENCIAIS CAUSAS DO EVENTO EXTREMO DE CHEIA E DESASTRE OCORRIDO NA PASSAGEM DE ANO DE 2009/2010"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Ciência do Sistema Terrestre**

Dra. Ana Paula Dutra de Aguiar



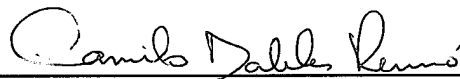
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Laura de Simone Borma



Orientadora / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



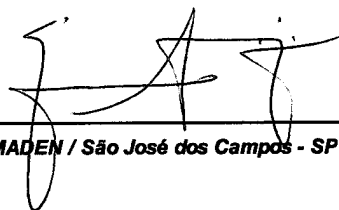
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Mario Valério Filho



Convidado(a) / UNIVAP / SJC Campos - SP

Dr. Eduardo Mario Mendiondo



Convidado(a) / CEMADEN / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 30 de agosto de 2016



## DEDICO

*A meus queridos pais, Claudinez e Isabel; a meu amor, Marcelo; a meus amigos, em especial a minha querida amiga Grasiela e a meu filhão de quatro patas que passou muitos dias comigo, mas que infelizmente não pode esperar o fim para mais momentos de felicidade.*





## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha querida orientadora Laura De Simone Borma por toda a sua atenção, compreensão, amizade, aprendizado e principalmente por todas as horas extras de trabalho.

Agradeço as minhas queridas amigas Grasiela, Wanja e Carla pela amizade e contribuição na finalização do trabalho.

Agradeço em especial a meu amigo Alex Ovando por sua contribuição direta no conhecimento adquirido para o desenvolvimento deste estudo e aos meus amigos Pedro Ivo, Pedro Belle e Luciana Soler.

Agradeço aos meus amigos Fernando, Gilnei, Karine, Graciela, Lucía, Camille e Karinne pelos momentos de atenção nas horas difíceis.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante o período de Doutorado: Alan, Fernanda, Janaina, Taise, Jussara, Adriana, Leandro, Chica, Mayumi, Raquel e muitos outros que ficaram para sempre em meus pensamentos.

Agradeço ao coordenador Plínio e às secretárias do curso: Ângela e Mariana.

Agradeço à Pós-Graduação do curso de Ciência do Sistema Terrestre.

Agradeço ao INPE-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

Agradeço à oportunidade oferecida pela CAPES.



# **SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAITINGA PARA ANÁLISE DAS POTENCIAIS CAUSAS DO EVENTO EXTREMO DE CHEIA E DESASTRE OCORRIDO NA PASSAGEM DO ANO 2009/2010**

## **RESUMO**

Devido aos enormes prejuízos econômicos, sociais e ambientais causados pelos eventos climáticos extremos, o presente trabalho teve por objetivo buscar, através do uso de um modelo hidrológico de base física, um melhor entendimento acerca do fenômeno de cheia extrema ocorrido no Município de São Luiz do Paraitinga, Estado de São Paulo, na passagem do ano de 2009/2010. Para tanto, foi utilizado o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), com o intuito de *i)* avaliar a capacidade do modelo em simular o evento extremo em questão e, *ii)* testar a hipótese de que as mudanças no uso e cobertura da terra ocorridos na região teriam potencializado os impactos dos episódios de chuva intensa ocorridos na região de estudo no período chuvoso de 2009. Em termos metodológicos, a pesquisa foi dividida em duas etapas: *i)* caracterização do evento extremo de chuva com relação à intensidade ocorrido na passagem de ano (2009/2010) em São Luiz do Paraitinga através da análise de série histórica de dados de precipitação e vazão; *ii)* aplicação do modelo SWAT para analisar a potencial influência das mudanças de uso e cobertura da terra sobre o padrão das descargas hídricas no Rio Paraitinga. Os resultados mostraram que o modelo SWAT reproduziu de forma satisfatória a vazão histórica de 01/01/1984 a 31/12/2011 e para o dia do evento. Ainda, de acordo com resultados do modelo, mudanças no uso e cobertura da terra de pasto para floresta (cenário 1 – C1) e de pasto para eucalipto (cenário 2 - C2) não poderiam ter evitado a ocorrência do evento extremo de cheia em questão, pois se verificou ligeira diminuição das vazões simuladas dos cenários para o mês de dezembro de 2009 e especificamente para o dia do evento.

**Palavras-chave:** inundação, modelo SWAT, mudança de uso e cobertura da terra.



# **HIDROLOGIC SIMULATION OF THE PARAITINGA RIVER BASIN FOR THE POTENTIAL CAUSES EXAMINATION OF THE 2010 NEW YEAR'S EVE EXTREME EVENT OF FLOOD AND DISASTER**

## **ABSTRACT**

Due to the large economic, social and environmental damage caused by extreme weather events, the focus of this research is to understand the extreme flood phenomenon occurred in São Luiz do Paraitinga (Sao Paulo State, Brazil) 2010 New Year's Eve. Therefore, SWAT model (a physically base hydrological model) was used in order to test the hypothesis that land use cover change that have occurred since the beginning of the occupation period in the region would have exacerbated the heavy rainfall effect in the basin. Methodologically, the research was divided into two steps: i) characterization of extreme rain event with respect to the intensity occurred in the 2010 New Year's Even São Luiz do Paraitinga through the analysis of the rainfall and flow time series; ii) application of the SWAT model to analyze the potential impact of land use cover change on the Paraitinga River water discharges pattern. The results showed that the SWAT to simulate the extreme event of flood occurred in the passage of the years 2009/2010 reproduced satisfactorily the flow rate for the day of the event and for the period January 1<sup>st</sup>, 1984 to December 31<sup>st</sup>, 2011 (historical series). The SWAT model also enabled to understand that the change pasture to forest (scenario 1 - C1) and pasture to eucalyptus (scenario 2 - C2) could not have prevented the occurrence of this extreme flood event, considering the slight decrease in the scenarios simulated flow for the month of December 2009 and specifically to the day of the event. However, the simulation allowed to know the water balance of the scenarios (C1 and C2) for comparison with the baseline scenario.

**Keywords:** flood, SWAT model, land use cover changes



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 3.1 - Bacia hidrográfica do rio Paraitinga e Bacia hidrográfica do rio Paraibuna.....	28
Figura 3.2 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas nas Bacias Hidrográficas do Rio Paraitinga e Paraibuna.....	31
Figura 3.3 - Fluxograma metodológico geral do modelo SWAT.....	35
Figura 3.4 – Mosaico MDE da área de estudo.....	39
Figura 3.5 - Mapa de uso e cobertura da terra para Bacia do Rio Hidrográfica do Rio Paraitinga.....	41
Figura 3.6 - Mapa pedológico do Estado de São Paulo.....	44
Figura 3.7 - Classes de solo presentes na área de estudo.....	45
Figura 3.8 - Sub-bacias obtidas via SWAT.....	50
Figura 4.1 - Média mensal histórica da precipitação nas estações pluviométricas da BHRP comparadas com a média mensal registrada no ano hidrológico de 2009/2010.....	55
Figura 4.2 - Relação entre cota e precipitação diária para as estações Estrada de Cunha, São Luiz do Paraitinga e Ponte Alta para o período chuvoso de 2009/2010 (setembro de 2009 a março de 2010).....	55
Figura 4.3 - Série histórica de vazão (médias mensais) para as estações fluviométricas de Estrada de Cunha (azul sólido), São Luiz do Paraitinga (vermelho sólido) e Ponte Alta (verde sólido) e respectivas linhas de tendência (tracejada na cor de cada estação).....	57
Figura 4.4 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de Campos de Cunha (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação nas estações de Campos de Cunha (laranja), Estrada de Cunha (verde) e São Luiz do Paraitinga (azul) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015.....	59
Figura 4.5 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação nas estações de Campos de Cunha (laranja), Estrada de Cunha (verde), São Luiz do Paraitinga (azul) e Altos da Serra do Mar (roxo) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015.....	60
Figura 4.6 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de Ponte Alta (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação	

nas estações de Campos de Ponte Alta (cinza) e Altos da Serra do Mar (roxo) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015 .....	61
Figura 4.7 - Comparação entre a vazão média mensal observada ( $Q_{obs}$ ), em preto e a vazão média mensal simulada ( $Q_{sim}$ ), em cinza .....	65
Figura 4.8 - Comparação entre a vazão diária observada e a vazão diária simulada para o dia do evento extremo de cheia 2009/2010. ....	67
Figura 4.9 - Balanço hídrico médio anual dos resultados da simulação.....	68
Figura 4.10 - Valores de mensais simulados de a) evapotranspiração potencial (ETP), b) evapotranspiração real (ET), água armazenada no solo (SW), percolação (PERC), escoamento superficial (SURQ), produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período compreendido entre 1984 e 2011. ....	70
Figura 4.11 - Valores do acumulado mensal simulado da precipitação (PPT) para linha base, em mm, para o período compreendido entre 1984 e 2011 .....	71
Figura 4.12 - Médias mensais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1984-2011 para a estação Campos de Jordão (83714) .....	73
Figura 4.13 - Médias mensais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1984-2011 para a estação Resende (83738) .....	74
Figura 4.14 - Médias mensais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1992-2011 para a estação Taubaté (83784) .....	75
Figura 4.15 - Vazão média mensal simulada referente à linha de base ( $Q_{sim\_LB}$ ) ao Cenário 1 ( $Q_{sim\_C1}$ ) e ao Cenário 2 ( $Q_{sim\_C2}$ ). 79	
Figura 4.16 - Vazão diária simulada referente à linha de base ( $Q_{sim\_LB}$ ), ao Cenário 1 ( $Q_{sim\_C1}$ ) e ao Cenário 2 ( $Q_{sim\_C2}$ ).....	79
Figura 4.17 - Média mensal simulada para a) evapotranspiração potencial (ETP); b) evapotranspiração real (ET); c) água armazenada no solo (SW); d) percolação (PERC); e) escoamento superficial (SURQ); e f) produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período 1984-2011 para o cenário C1 (pasto para floresta) comparado com LB .....	81
Figura 4.18 - Média mensal simulada para a) evapotranspiração potencial (ETP); b) evapotranspiração real (ET); c) água armazenada no solo (SW); d) percolação (PERC); e) escoamento superficial (SURQ); e f) produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período 1984-2011 para o cenário C2 (pasto para eucalipto) comparado com LB .....	82



Figura A. 1 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para a sequência das 10 últimas simulações apresentadas na tabela 4.1.....	104
Figura A. 2 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para simulação 11 no período de calibração (01/01/1988-01/01/1999).....	105
Figura A. 3 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para simulação 11 no período de validação. ....	106



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Nomenclatura para as classes de uso e cobertura da terra utilizadas pelo modelo SWAT presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga.....	42
Tabela 3.2 - Parâmetros da vegetação obtidos do banco de dados do modelo SWAT.....	52
Tabela A. 1 - Resultados dos testes estatísticos para avaliação das simulações do modelo SWAT.....	103



## LISTA DE QUADROS

	<u>Pág.</u>
Quadro 3.1 - Estações pluviométricas.....	32
Quadro 3.2 - Estações fluviométricas.....	32
Quadro 3.3 - Valores de referência para análise dos testes estatísticos NSE, PBIAS e RSR.....	37
Quadro 3.4 - Resumo dos dados físicos e químicos para cada tipo de solo para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga .....	46
Quadro 3.5 - Estações meteorológicas .....	48
Quadro 3.6 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade. ....	49



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
AVA	Argissolos Vermelho-Amarelo
AVADAN	Módulo Avaliação de Danos
BHRP	Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2
CEIVAP	Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CRED	Centre for Research on Epidemiology of Disasters
CX	Cambissolos
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DLG	DeustchesZentrumfür Luft-undRaumfahrt
DoD	Departamento de Defesa dos Estados Unidos
EM_DAT	Emergency Events Database – The International Disaster Database
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET	Evapotranspiração real
ETP	Evapotranspiração potencial
EUCA	Eucalipto
FRST	Forest Mixed
HIDROWEB	Sistema de Informações Hidrológicas
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Unit)
IAC	Instituto Agrônômico
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, duração e frequência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LB	Linha Base
LUP.DAT	Land Use Update
LVA	Latossolos Vermelho-Amarelo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno

NASA	Agência Espacial Norte-americana (National Aeronautics and Space Administration)
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PAST	Pasture
PBIAS	Percent bias
PERC	Percolação
PM SLP	Prefeitura Municipal de São Luiz do Paraitinga
PMP	Precipitação máxima provável
PRECIP	Precipitação
Proveg	Projeto Vegetação
PTF	Pedotransferência
RADAM BRASIL	Projeto Radar na Amazônia
RMSE	Observations Standard Deviation Ratio
RSR	Standard Deviation Ratio
SINDEC	Sistema Nacional de Defesa Civil
SLP	São Luiz do Paraitinga
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Geográficas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSiB	Modelo de superfície acoplado aos modelos meteorológicos
STDEV <sub>obs</sub>	Desvio padrão dos dados observados
SURQ	Escoamento superficial
SW	Água no solo
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
TM	Thematic Mapper
UNISDR	United Nations International Strategy Disaster Reduction
UPPH/ CONDEPHAAT	Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico
URLD	Urban residential low density
WATR	Water
WYLD	Produtividade hídrica



## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem ou declividade (depende do contexto)
'	minuto
''	segundo
°	grau
cm	centímetro
h	hora
ha	hectare
km	quilômetro
km <sup>2</sup>	quilômetro quadrado
m	metro
m <sup>3</sup>	metro cúbico
mm	milímetro
n	número total de observações
Q <sub>obs</sub>	vazão observada
Q <sub>sim</sub>	vazão simulada
s	segundo
T <sub>máx</sub>	temperatura máxima
T <sub>mín</sub>	temperatura mínima
$\sum_i^{obs}$	Somatório dos dados observados
$\sum_i^{sim}$	Somatório dos dados simulados
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.2.	Objetivos .....	7
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
2.1	Desastres Naturais .....	10
2.2	Eventos extremos de cheia em bacias hidrográficas .....	12
2.3	Modelagem hidrológica .....	14
2.4	O modelo SWAT ( <i>Soil And Water Assessment Tool</i> ) .....	15
2.5	O evento extremo de cheia em São Luiz do Paraitinga .....	19
2.6	Mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do rio Paraíba do Sul .....	21
2.7	Mudanças no uso e cobertura da terra e influência na resposta hidrológica .....	23
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>27</b>
3.1	Material.....	27
3.1.1	Área de estudo .....	27
3.1.2	Dados observados in situ .....	30
3.2	Métodos .....	32
3.2.1	Descrição dos passos envolvidos na preparação do banco de dados do modelo SWAT .....	33
3.2.2	Descrição geral dos passos envolvidos na calibração, validação e simulação da mudança de uso e cobertura da terra.....	34
3.2.2.1	Calibração .....	35
3.2.2.2	Validação.....	37
3.2.2.3	Mudanças no uso da terra .....	37
3.2.3	Descrição dos processos realizados do banco de dados até a simulação hidrológica no modelo SWAT .....	38
3.2.3.1	Definição do período de simulação e passo de tempo .....	38
3.2.3.2	Máscara da Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga .....	38
3.2.3.3	Modelo Digital de Elevação (MDE) .....	39
3.2.3.4	Dados de uso da terra .....	40
3.2.3.5	Tipos de solos .....	43
3.2.3.6	Declividade .....	47
3.2.3.7	Dados de clima .....	47
3.2.3.8	Calibração e validação .....	49
3.2.3.9	Mudanças no uso da terra .....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1	Tendências de precipitação e vazão: caracterização do evento com base em séries históricas observadas .....	53
4.1.1	Análise do evento extremo de cheia de 2009/2010 com base em dados observados de precipitação .....	54
4.1.2	Série histórica de vazão e precipitação .....	56
4.1.3	Análise e discussão dos resultados das séries históricas de precipitação e vazão.....	62

<b>4.2</b>	<b>Simulação da descarga na bacia do rio Paraitinga com o modelo SWAT .....</b>	<b>63</b>
4.2.1	Simulação da série histórica .....	64
4.2.1.1	Simulação da descarga ocorrida no dia do evento .....	66
4.2.2	Análise das tendências de comportamento da evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, armazenamento de água no solo, produtividade hídrica) simuladas por meio do SWAT .....	68
<b>4.3</b>	<b>Resposta hidrológica em função de cenários de mudanças no uso e cobertura da terra na BHRP.....</b>	<b>78</b>
<b>4.4</b>	<b>Principais conclusões do capítulo .....</b>	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>
	<b>APÊNDICE A - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>102</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado um aumento na frequência e intensidade dos desastres naturais em nível global (UNISDR, 2016). Dentre as possíveis causas dessa tendência citam-se, além de um possível aumento na frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos (IPCC, 2014), o aumento no número de pessoas que habitam as áreas consideradas como áreas de risco (HANDMER et al., 2012). Um evento extremo passa a ser considerado um desastre natural quando ele afeta pessoas, estruturas ou ecossistemas, bem como os serviços por eles fornecidos. Assim, esses eventos são responsáveis por perturbações (desequilíbrios) ao ambiente (ADRIANTO, MATSUDA, 2002; CHINO et al., 2011), à sociedade (GUHA-SAPIR et al., 2012; TAKAHASHI et al., 2012) e à economia (DAVIS et al., 2012).

O Brasil é um país suscetível às manifestações climáticas, as quais, por vezes, resultam em enchentes/inundações e deslizamentos. Segundo o relatório do *The International Disaster Database* (EM-DAT), que considera o número de óbitos devido a desastres provocados por inundações nos últimos 10 anos (2001-2011), o Brasil aparece no ranking de 10º lugar com 806 mortes decorridas por desastres naturais (GUHA-SAPIR et al., 2012). No ranking de ocorrência de eventos extremos no Brasil, entre 1991 e 2010, as estiagens e secas (54%) estiveram em primeiro lugar, seguidos das inundações bruscas e alagamentos (21%) e, em terceiro, as Inundações graduais (12%) (UFSC/CEPED, 2012).

Diante da perspectiva de aumento da ocorrência de eventos extremos e desastres naturais, principalmente em vista das mudanças climáticas (IPCC, 2013), a Terceira Conferência Mundial sobre a redução de riscos de desastres, realizada em Sendai no Japão, entre 14 e 18 de março de 2012 discutiu o desenvolvimento de uma política global para a redução de riscos de desastres mais efetiva. Representantes da comunidade científica de diversos países se reuniram nesse encontro para elaborar um protocolo que definiu algumas

diretrizes para redução de risco de desastre no período de 2015 a 2030 (UNISDR, 2015).

Diante do contexto mundial e nacional, o Brasil tem avançado com uma política nacional de redução de riscos de desastres, desenvolvendo ações de prevenção e mitigação. Atualmente, a Lei Federal nº 12.608 regulamenta as ações preventivas para redução de riscos de desastres, com o desenvolvimento da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), a aprovação do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e do Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC), além de incentivar o sistema de alerta e monitoramento de desastres (BRASIL, 2012).

No Brasil, uma das ações da política nacional para redução de riscos de desastres é o levantamento e identificação das áreas e regiões com maior suscetibilidade de ocorrência de desastres naturais. As regiões sul e sudeste do país figuram entre as mais vulneráveis em termos de inundações bruscas, devido à associação de fatores tais como condicionantes climáticas, relevo, concentração populacional e urbanização. É na região sudeste que se encontram as duas maiores metrópoles (Rio de Janeiro e São Paulo), onde a intensificação do processo de urbanização inviabiliza a absorção da água pelo solo impermeabilizado (pavimentado), inundando mais rapidamente as elevações mais baixas durante um evento de precipitação extrema.

Das ocorrências de inundações no Brasil, um dos registros mais antigos está na região sul. Desde os primeiros anos da colonização europeia (século XIX), esses episódios já eram recorrentes na bacia do rio Itajaí em Santa Catarina (FRAGA, KÖHLER, 1999; SANTOS, 2010). Até 2002, foram registradas aproximadamente 68 ocorrências em Blumenau, sendo que a média do tempo de recorrência das inundações foi estimada em 2,5 anos (Frank, 2003). No evento de 2008— talvez um dos mais impressionantes da história deste estado - a cheia atingiu várias cidades, causando a morte de 151 pessoas e afetando cerca de 1.500.000 pessoas, com prejuízos econômicos estimados em U\$750 milhões (EM-DAT, 2011).

Na região sudeste do país, os eventos extremos de cheia e alagamento concentram-se no "período das chuvas", em geral associados à maior

variabilidade sazonal da Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ) e do Jato de Baixos Níveis da América do Sul (SALLJ) (CARVALHO et al., 2004). Além disso, a persistência de zonas de baixa pressão atmosférica também tem sido considerada como responsável por enormes volumes de precipitação concentrada (ALGARVE, 2013). No entanto, outros fatores ambientais também podem influenciar a magnitude destes processos, quais sejam: topografia da região, gradiente da encosta, tipo de rede fluvial, tamanho e forma da bacia, regime pluviométrico, geologia local, os tipos de solos e cobertura vegetal (DÍEZ-HERRERO et al., 2009).

De acordo com Medeiros (2013), o ano de 2010 foi um ano particularmente chuvoso na região sudeste do país, com destaque para a cidade de São Paulo, onde, entre dezembro de 2009 e fevereiro de 2010, foram registrados aproximadamente 46 dias seguidos de chuva. Como resultados foram registrados fortes alagamentos em diversos pontos da cidade. Nesse ano, na região do Vale do Paraíba, entre os estados de São Paulo e do Rio de Janeiro, muitos municípios foram acometidos por chuvas intensas que causaram vários episódios de deslizamentos de encostas e inundações. É o caso, por exemplo, da cheia extrema ocorrida no Rio Paraitinga, objeto de estudo do presente trabalho.

Cabe considerar que a ocorrência de um desastre natural está condicionada à associação de fatores físicos e antrópicos. Precipitação intensa e prolongada pode provocar a saturação de água no solo, que, se associada a uma declividade acentuada e a falta da cobertura vegetal, pode desencadear o deslizamento de uma encosta. Os fatores físicos tais como chuvas intensas e contínuas, elevada declividade da encosta e baixo índice de cobertura vegetal, se associados a um tipo de uso e cobertura que impermeabiliza o solo, tendem a reduzir a infiltração, facilitando a ocorrência de episódios de cheia extrema.

Assim, dos fatores de origem antrópica por intervenções diretas ou indiretas que aumentam a probabilidade de ocorrência desses eventos, pode-se citar as modificações na rede de drenagem, o uso e ocupação de áreas marginais aos rios, mudanças no uso e cobertura da terra e o adensamento urbano que

formam 'ilhas de calor', aumentando o potencial de chuva nestas áreas contribuindo para mudanças climáticas (SOUZA, 2009).

A importância dessas inter-relações é responsável pelo crescente interesse em estudos hidrológicos envolvendo o entendimento do regime de chuvas em uma dada região e das possíveis alterações nesse regime decorrentes das mudanças climáticas e das mudanças no uso e cobertura da terra.

O aumento do conhecimento sobre como as interações entre fatores físicos e antrópicos influenciam as componentes do ciclo hidrológico, e, em particular, a resposta hidrológica em termos de vazão, é um dos principais propósitos do desenvolvimento dos modelos hidrológicos de base física. Atualmente a modelagem hidrológica tem sido considerada como uma alternativa para os estudos de produção hídrica em grandes e médias bacias hidrográficas, frente aos cenários de mudanças climáticas e mudanças no uso e cobertura da terra.

O estudo de caso aqui apresentado envolveu diversas questões acerca da interação entre os fatores físicos e antrópicos de uma bacia em associação a um episódio de chuva extrema. Na passagem do ano de 2009/2010, o município de São Luiz do Paraitinga passou a integrar a lista de ocorrência de desastres naturais no Brasil, devido à ocorrência de um evento extremo de cheia. O rio Paraitinga transbordou em consequência do volume de precipitação sobre a bacia, inundando por cerca de 4 dias o famoso centro histórico da cidade. A inundação não provocou perdas humanas, mas causou uma enorme perda econ mica, devido aos inúmeros danos materiais provocados em edifica es que datam do século XVIII, dentre esses, o desabamento de parte da igreja Matriz de São Luiz de Tolosa e da igreja mais antiga da cidade, a capela da Nossa Senhora das Mercês (MARRA, 2010).

Em vista dos grandes danos causados ao patrim nio histórico de uma das cidades mais turísticas do trecho paulista do Vale do Paraíba, o evento extremo de cheia ocorrido no município de São Luiz do Paraitinga deu origem a uma série de discussões acerca das possíveis causas para a ocorrência desse desastre e alguns poucos trabalhos foram publicados sobre o assunto.



De acordo com Soares e Soares (2010) e Medeiros e Barros (2013), a principal causa do evento extremo ocorrido na passagem de ano em São Luiz do Paraitinga teria sido aumento excepcional das chuvas observado em toda a região sudeste no ano hidrológico de 2009/2010. Segundo Soares e Soares (2010), o aumento das chuvas na bacia do rio Paraitinga começou a se intensificar no período chuvoso do ano hidrológico de 2009/2010, com vários episódios de chuvas excepcionalmente fortes ocorrendo ao longo desse período. Em dezembro de 2009, foi registrada uma média mensal de 410 mm, em comparação com uma média climatológica de 195 mm para a estação pluviométrica de São Luiz do Paraitinga. Segundo os referidos autores, a principal causa desse excesso de chuva do período chuvoso teria sido um sistema de baixa pressão que atingiu a região sudeste do Brasil no período de 25 de dezembro de 2009 a 3 de janeiro de 2010. Ainda, para complicar o cenário, um ciclone teria atingido a região costeira entre os estados de São Paulo e Rio de Janeiro no dia 31 de dezembro de 2009, o que pode ter contribuído fortemente para o evento de cheia ocorrido na madrugada do dia 31/12/2009. Por meio de análise estatística de ajuste da distribuição de probabilidade de Gumbel, Medeiros e Barros (2013) identificaram um índice de chuva com período de recorrência da ordem de 74 a 127 anos. De acordo com Dias et al. (2011), informações ainda em caráter informal de técnicos do DAEE apontavam para uma possível chuva com tempo de retorno de 300 anos, a qual teria resultado em vazões acima de 1000 m<sup>3</sup>/s no dia 1º de janeiro de 2010.

Associado às chuvas intensas e ao correspondente aumento na vazão do rio Paraitinga, outro fator cogitado como tendo exercido influência na magnitude do evento teria sido o barramento hidráulico promovido pelo ribeirão do Chapéu. De acordo com o Plano Diretor da Bacia do Rio Paraitinga o remanso no ribeirão do Chapéu tem sido uma das principais causas das inundações— em muito menor escala — ocorridas no centro histórico de São Luiz do Paraitinga nas últimas décadas. De acordo com DAEE (2012) o ribeirão do Chapéu é um dos afluentes da margem esquerda do rio Paraitinga, corre por um curso de cerca de 30 km de comprimento e, deságua há acerca 4 km do centro histórico. Pouco antes de desaguar no Paraitinga, o ribeirão do Chapéu

faz uma curva e despeja suas águas em um sentido parcialmente contrário ao da vazão do rio Paraitinga. O remanso promove a perda de carga em ambos os rios com conseqüentemente aumento da cota do rio Paraitinga, que transborda na altura do centro histórico. Estudos realizados pelo DAEE (2012) concluíram que o nível que as águas atingiram na passagem de ano de 2009/2010 foi tão elevado que a influência do ribeirão do Chapéu, nesse caso, poderia ser considerada como pouco significativo.

Por fim, além das chuvas intensas, uma questão frequentemente citada como uma possível causa da magnitude do evento em estudo teria sido o processo de mudança do uso e cobertura da terra pelo qual a região do Vale do Paraíba vem passando nos últimos séculos, desde o início da economia do café (DIAS et. al., 2011). De acordo com Soares e Soares (2010), o solo compactado pelas pastagens e o uso regular de queimadas teriam provocado o empobrecimento dos solos, com subsequente erosão e contínuo assoreamento do rio. Soma-se a isso a pouca proteção natural do rio devido à existência de uma escassa mata ciliar. Segundo Dias et. al. (2011) a cobertura da terra na bacia do rio Paraitinga é composta por 66% de área total por pastagens e regeneração/cultivo, além de um percentual de 26% para mata fragmentada por toda extensão da bacia.

Dessa forma, as principais hipóteses para a ocorrência do evento extremo de cheia ocorrido em São Luiz do Paraitinga na passagem de ano de 2009/2010 podem ser sumarizadas como:

Hipótese 1: chuvas intensas ocorridas em período relativamente prolongado de tempo (período chuvoso de 2009) seguidas de uma chuva torrencial no dia 31/12/2009 – essa é a condição mais desfavorável possível, uma vez que além da chuva intensa, tem-se a saturação prévia do solo que favorece o escoamento superficial em detrimento da infiltração da água no solo;

Hipótese 2: associação das fortes chuvas aos fatores antrópicos, tais como desflorestamento, erosão e mudanças no uso e ocupação do solo, teriam favorecido a ocorrência do alagamento;

Em função do exposto, o presente trabalho teve por objetivo considerar a hipótese conjunta – aumento nos índices de chuva associados a possíveis padrões de mudança no uso e cobertura da terra na bacia – através do uso de um modelo hidrológico de base física, com vistas à melhor entender as causas do evento. Espera-se que o conhecimento aqui adquirido auxilie na busca e identificação de alternativas para minimização e mitigação de impactos dos eventos extremos de cheia.

## **1.2. Objetivos**

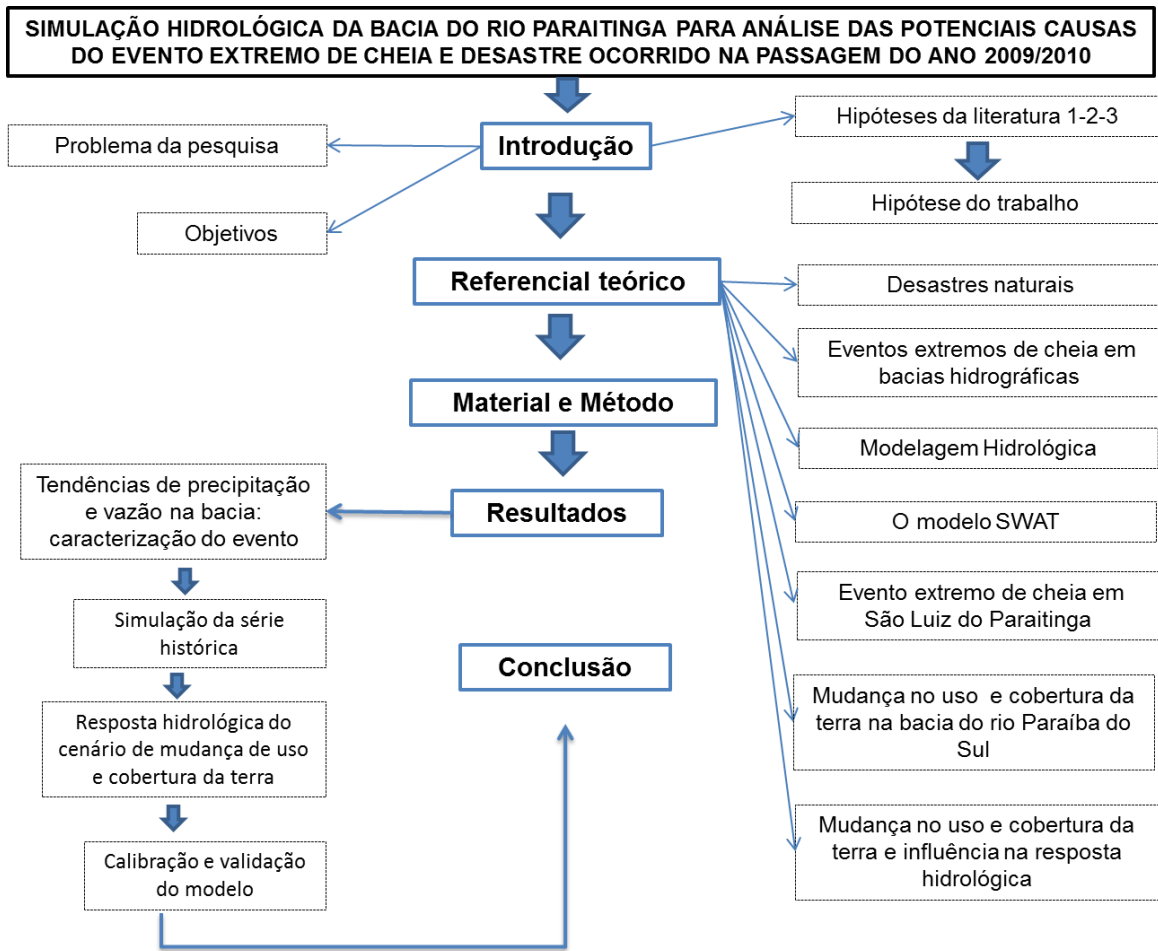
O presente trabalho teve por objetivos principais:

- Conhecer o comportamento da série histórica dos dados observados de precipitação e vazão;
- Simular, por meio do uso de um modelo hidrológico de base física (SWAT), o evento extremo de cheia ocorrido na passagem de ano 2009/2010 no município de São Luiz do Paraitinga com o intuito de:
  - i) avaliar o potencial do modelo em reproduzir a vazão no dia do evento extremo analisado;
  - ii) avaliar se a substituição dos atuais usos de pastagens para florestas ou plantações de eucalipto poderiam exercer alguma influência no volume de água descarregado no dia do evento;
  - iii) identificar tendências históricas das demais variáveis do balanço hídrico, tais como, evapotranspiração, percolação, armazenamento de água no solo, escoamento superficial e produtividade hídrica.

### **1.3 Estrutura da tese**

A tese está dividida em cinco capítulos. Após a Introdução e possíveis hipóteses para a severidade do evento, tem-se, no Capítulo 2, o Referencial Teórico que serviu de base para o presente estudo. Esse referencial aborda algumas questões relativas aos desastres naturais e eventos extremos; modelagem hidrológica; uma descrição das mudanças no uso e cobertura da terra na bacia do Paraíba do Sul e, em especial, na bacia do rio Paraitinga; descrição do evento de cheia ocorrido em São Luiz do Paraitinga na passagem do ano de 2009/2010. Nesse capítulo é apresentada ainda uma descrição do modelo hidrológico adotado no presente trabalho (SWAT) e uma revisão sobre potenciais influências das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a resposta hidrológica de bacias hidrográficas. A figura 1.2 ilustra de forma simplificada como os capítulos 3- Material e Método, 4- Resultados e 5- Conclusão, estão relacionados com a meta e ressalta o caráter interdisciplinar da pesquisa.

Figura 1.2. Estrutura geral da tese.



Fonte: Organização do autor (2016).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Desastres Naturais

Vários autores apresentam definições para o termo Desastres Naturais, mas em sua maioria, essas definições parecem convergir para um significado análogo. Por exemplo, a menção à “ocorrência de uma situação inesperada seguida de perigo iminente” aparece em muitas definições assim como: “um evento súbito ou não previsto que causa grande prejuízo” (CRED, 2012); “eventos adversos conceituados como hostis, os quais podem ser de ordem natural ou antrópica” (Castro, 1999); “acontecimentos físicos perigosos” (IPCC, 2012). O termo natural é usado para descrever um acidente que não é puramente de origem humana. Dessa forma, as diversas acepções do termo desastres naturais se referem a um fenômeno natural, em geral de complicada previsibilidade, com potencial de causar perdas materiais e/ou humanas. (CASTRO, 2007; CRED, 2012; IPCC, 2012).

Outra característica recorrente nas definições da magnitude dos fenômenos a que se refere o termo Desastres Natural envolve a necessidade de um auxílio externo à comunidade local em função dos elevados prejuízos materiais, econômicos e humanos. Portanto, o termo ‘desastre’ está ligado ao possível prejuízo que possa ser causado pelo fenômeno, enquanto que o termo ‘natural’ é usado para descrever um acidente ou fenômeno que não é decorrente de causas humanas, porém este pode ser potencializado por fatores humanos como ocupação adensada, fragilidade de áreas construídas e intervenções geotécnicas que aumentam a vulnerabilidade física e humana (CASTRO, 2007; CRED, 2012; IPCC, 2012).

Em geral, a classificação dos Desastres Naturais envolve parâmetros relacionados à sua intensidade ou magnitude (desde desastres de pequeno porte até desastres com impactos muito significativos e prejuízos vultosos); à sua evolução temporal a exemplo de desastres súbitos ou com evolução

aguda, desastres graduais ou com evolução crônica ou, ainda desastres por somação de efeitos e, por fim, à sua origem (geofísica, meteorológica, climatológica, hidrológica, biológica) e frequência de ocorrência, tais como os eventos episódicos ou crônicos (CASTRO et al., 1999, 2007; SIDLE et. al., 2004; KOBIYAMA et. al., 2006; CRED, 2012).

Assim a política nacional para redução de riscos de desastres, desenvolveu uma Lei Federal que orienta a conduta da política nacional sobre as incertezas que abrangem a gestão de riscos de desastres. A Lei nº12.608, de 10 de abril de 2012, estabelece a criação da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC) e aprova o desenvolvimento de sistemas de informações e monitoramento de desastres (FELTRIN, JUNIOR, 2012; DA SILVA VALENCIO, 2014). Essa lei, também, regulamenta as ações preventivas para a política redução de riscos de desastre, por parte da União, Estados, Distrito Federal e Municípios, além de designar o monitoramento dos eventos meteorológicos, hidrológicos, geológicos, biológicos, nucleares, químicos e outros possíveis determinantes potenciais para origem de desastres, tal como a produção de alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência (GANEM, 2012).

A regulamentação dessa política nacional de redução de riscos de desastres foi corroborada pelo protocolo de Sendai assinado na Terceira Conferência Mundial sobre a Redução de Riscos de Desastres, que orienta os países a: a) seguirem como o marco de pós-2015 a redução de riscos de desastres para o presente e futuro; b) concluírem a implementação do marco de ação de Hyogo (Japão) 2005-2015, a qual estabeleceu a resiliência dos estados nacionais diante dos desastres; c) considerarem as experiências e recomendações das nações que desenvolveram ações regionais e nacionais para a redução do risco de desastre na esfera do marco de 2005; d) criarem condições para um quadro cooperativo pós-2015 com base nos compromissos para redução do risco de desastres; e) implementarem formas de revisão periódica para as ações de redução pós-2015 (UNISDR, 2015).

O protocolo de SENDAI foi baseado em algumas premissas já discutidas em Hyogo, as quais deveriam ser utilizadas como norteadores das políticas nacionais para redução de riscos de desastre, dentre elas: um melhor entendimento sobre o risco, o investimento no gerenciamento e elaboração de políticas de prevenção mais ativas com a implementação de ações mais diretas na recuperação, reabilitação e reconstrução dos lugares atingidos por desastres (CEMADEM, 2016).

No Brasil ainda que os eventos de Estiagem e seca tenham apresentado o maior número de ocorrências em território nacional, resultando no maior índice de pessoas afetadas, foram as Inundações bruscas que causaram o maior número de mortes no período de 1990 a 2000(UFSC/CEPED, 2012).

O atlas brasileiro de desastres naturais - volume São Paulo, relatou que as Inundações bruscas registraram 452 ocorrências nas últimas duas décadas em todo o estado, apresentando o maior número de registros de desastres, equivalente a 54% do total estadual, com destaque para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (UFSC/CEPED, 2011).

Assim, corroborando a política nacional de redução de riscos de desastres e o protocolo de Sendai, se faz necessário conceituar os eventos extremos de cheia para entender a ocorrência desse tipo de evento.

## **2.2 Eventos extremos de cheia em bacias hidrográficas**

Os eventos extremos, de uma forma geral, são normalmente definidos como ocorrências que apresentam uma incidência relativamente rara e distante da média histórica (LOUCKS, VAN BEEK; 2005). Como exemplo, os eventos extremos de cheia são fenômenos hidroclimatológicos que alteram a distribuição das quantidades hídricas das bacias hidrográficas, influenciando nas respostas de vazão dos canais de drenagem (rios) aumentando os riscos de inundações (OLIVEIRA, CUNHA, 2014).



Em estudos de bacias hidrográficas, duas variáveis chave são normalmente utilizadas na regionalização hidrológica: a precipitação e a vazão. A precipitação é uma variável climatológica de ocorrência (espacial e temporal) irregular ao passo que a vazão pode ser considerada, em linhas gerais, como uma variável mais estável e que concentra os episódios de chuva em uma bacia (TUCCI, 1993). Assim sendo, essa variável tem sido utilizada no entendimento dos eventos extremos de cheia, planejamento e gestão de barragens, canais, sistemas de drenagens, no controle de inundações e dimensionamento de obras hidráulicas (TUCCI, 2002) e também em estudos de disponibilidade hídrica.

No entanto, estudos baseados somente nessas duas variáveis (precipitação e vazão) podem não capturar corretamente mudanças ocorridas na bacia ao longo do tempo, tais como, por exemplo, barramentos em rios, retirada de água para abastecimento e irrigação e mudanças no uso e cobertura da terra (KWON et al., 2008). Ainda, planejamentos de obras hidráulicas baseados na hipótese de que as séries históricas de precipitação/vazão são estacionárias podem resultar em erros devido à influência de ações humanas na bacia (OLSEN et al., 1999; CLARKE, 2002)

Atualmente, é amplamente reconhecido que a resposta hidrológica em uma dada bacia resulta da conexão entre as características biogeofísicas (geralmente altamente heterogêneas) do terreno e da paisagem, da geometria e declividade da rede de drenagem e do padrão climático da região onde está se localiza. As condições climáticas predominantes juntamente com outras variáveis do meio físico atuam, em longo prazo, no sentido de conformar as características predominantes do solo, do relevo e da vegetação (RODRIGUEZ et al., 2010). Em outras palavras, a associação, por exemplo, de relevos acidentados e chuvas torrenciais constantes pode favorecer a ocorrência de um solo raso e a predominância de cobertura natural adaptada à essas condições.

Outro tema de crescente interesse na comunidade científica é a potencial influência das mudanças climáticas na resposta hidrológica (geralmente a vazão) bem como nas variáveis do balanço hídrico (evapotranspiração,

escoamento superficial, armazenamento de água no solo, etc.) de uma dada bacia.

Em ambos os casos, a modelagem hidrológica tem se destacado como ferramenta útil para obtenção de um conhecimento mais aprofundado acerca dos fenômenos físicos envolvidos na produção de descarga bem como na previsão de cenários (Moraes, 2003).

### **2.3 Modelagem hidrológica**

A hidrologia envolve o estudo de fenômenos naturais ligados ao ciclo hidrológico (precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento), os quais dependem de fatores, tais como as características biogeofísicas da área de estudo (relevo, solo, vegetação) e processos atmosféricos atuantes, além da influência causada pela ação do homem sobre o ambiente físico. Esses parâmetros são altamente variáveis no espaço e no tempo, fazendo dessa análise um processo altamente complexo. Dessa forma, a compreensão do funcionamento do ciclo hidrológico por meio de modelos hidrológicos, é uma prática cada vez mais utilizada no meio científico. Os modelos hidrológicos são representações simplificadas para caracterizar e avaliar o funcionamento dos processos hidrológicos, o comportamento e a magnitude da água, além de prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados (BEVEN et al., 1994).

A modelagem hidrológica trabalha em escala de bacia hidrográfica, as quais podem ser divididas em bacias de macro, meso e pequena escala. As grandes bacias (milhões de km<sup>2</sup>) são utilizadas para simulações em escalas globais; as bacias medianas (~10.000 km<sup>2</sup>) apoiam a compreensão de fenômenos e processos em escalas regionais (meso-escala) e as bacias pequenas (< 500 km<sup>2</sup>) subsidiam estudos locais (TUCCI, 2005).

O grande número de modelos hidrológicos atualmente existentes reflete o grande interesse nesse tema por parte da comunidade científica. Como

exemplo citam-se ANSWER (BEASLEY, 1977); *Terrain Analysis Hydrologic Model* – TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986); *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* - HEC-RAS (USA Army corps of engineers, 2010); Modelo de Grandes Bacias – MGB-IPH (VIOLA et al., 2009) e o *Soil And Water Assessment Tool* – SWAT (ARNOLD et al., 2012; LELIS et al., 2012; SCHMAIZ e FOHRER; 2009; JHA et. al., 2006). Dentre esses, o SWAT foi selecionado para realização do presente estudo, visto se tratar de um modelo que permite considerar mudanças no uso e cobertura da terra e potenciais influências sobre as diversas componentes do balanço hídrico. Além disso, trata-se de um modelo de distribuição gratuita, já consagrado na comunidade científica (contando com mais de 30 anos de desenvolvimento científico), cuja documentação está organizada e disponibilizada em sítios de fácil acesso.

#### **2.4 O modelo SWAT (*Soil And Water Assessment Tool*)**

O modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é uma ferramenta para avaliação, análise e quantificação dos impactos decorrentes do manejo do solo sobre a água (ARNOLD et. al., 1998), com foco nos processos físicos e químicos ocorridos em uma bacia hidrográfica. Através do uso do SWAT pode-se avaliar a produtividade hídrica, a contaminação por produtos químicos agrícolas, e ainda, a produção de sedimentos (NEITSCH et. al., 2009; ZHANG et al., 2009; BALTOKOSKI et al., 2010) decorrente de várias alternativas de gestão de uma bacia hidrográfica.

O modelo foi desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold no *Agricultural Research Service* (ARS) (ARNOLD et. al., 1998) a partir da junção de diversos componentes estruturais de outros modelos desenvolvidos ao longo de 30 anos por pesquisadores do mesmo instituto (MELO NETO, 2013).

O primeiro modelo a ser utilizado para formulação de base do modelo SWAT foi SWRRB, o qual já era resultado do aperfeiçoamento de alguns componentes estruturais em outros modelos: propagação de pesticidas do

modelo GLEAMS, análise de precipitações diárias do modelo CREAMS e simulação do crescimento de culturas do modelo EPIC (ARNOLD&FOHRER, 2005; GASSMAN et al., 2007). Na construção do modelo SWAT, a função de simulação do escoamento superficial em sub-bacias foi baseada no modelo SWRRB e os modelos QUALE2 e ROTO embasaram os componentes da cinética de fluxos e estrutura de propagação (MELO NETO, 2013).

O modelo SWAT é uma ferramenta semi-automatizada que permite reunir em uma base física uma série de parâmetros (tipos de solos, uso e cobertura da terra, declividade e dados climáticos) capaz de avaliar a dinâmica dos processos hidrológicos na simulação de diversos cenários atuais e futuros plausíveis de ocorrência na bacia hidrográfica, seja por processos naturais ou desencadeados pela intervenção humana (NEITSCH et. al., 2009; RODRIGUES et.al., 2015).

Trata-se de um modelo semi-distribuído que funciona em passo de tempo contínuo, desenvolvido para simular os processos hidrológicos que ocorrem em escala espacial e temporal nas bacias hidrográficas. O SWAT possui interface gráfica (*ArcSWAT*) integrado ao Sistema de Informação Geográfica – SIG *ArcGis* onde foram implementadas as equações matemáticas descritivas dos processos hidrológicos que ocorrem na escala de bacia, permitindo que o modelo seja alimentado de maneira fácil e intuitiva, possibilitando uma melhor compreensão dos resultados obtidos com as simulações (ARNOLD et al, 2012a).

Em termos metodológicos, a modelagem hidrológica do SWAT se utiliza de uma compartimentação da bacia hidrográfica a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), que permite a descrição das condições topográficas relacionadas às informações pedológicas e, de uso e cobertura da terra (LÉLIS et al., 2012). É a partir do MDT que são geradas as sub-bacias hidrográficas, as quais são redistribuídas em áreas de Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) definidas por uma combinação da declividade, tipo de solos e, uso e cobertura da terra para uma única área (NEITSCH et. al., 2009; ARNOLD et. al., 2012).

É nas HRUs, unidades espaciais, que estão armazenadas as respostas do balanço hídrico para os diferentes tipos de classes de solo, declividade e usos da terra. Assim, a estrutura do modelo SWAT é o diferencial nos estudos da variabilidade do comportamento físico-químico das bacias hidrográficas, considerando diferentes partes do sistema que refletem os fluxos de energia e as interações que governam os processos hidrológicos (ARNOLD et al., 1996; ARNOLD; FOHRER, 2005).

O modelo SWAT utiliza o balanço hídrico (Equação 2.1) para simular o processo físico ocorrido na bacia hidrográfica, prevendo o movimento da água, dos sedimentos, nutrientes e pesticidas ao longo dos canais até a jusante (ARNOLD et. al., 1998; NEITSCH et. al., 2009).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (2.1)$$

Onde:  $SW_t$  é o conteúdo final de água no solo (mm H<sub>2</sub>O);  $SW_0$  é o conteúdo inicial da água no solo no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $t$  é o tempo (dias);  $R_{day}$  é a quantidade de precipitação no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $Q_{surf}$  é a quantidade de escoamento superficial por unidade de área no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $E_a$  é a quantidade de evaporação no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $W_{seep}$  é a quantidade de água que entra na zona vadosa a partir do perfil do solo no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);  $Q_{gw}$  é a quantidade de fluxo de retorno no dia  $i$  (mm H<sub>2</sub>O);

A equação do balanço hídrico utilizada pelo modelo SWAT representa o comportamento da água no ciclo hidrológico: a água precipitada cai sobre a superfície, sendo interceptada pelo dossel (retida nas folhas) ou, escorre pelos troncos até o solo, ou ainda, se não interceptada, cai direto na superfície do solo. A água sobre a superfície também pode infiltrar nas camadas do solo ou escorrer sobre a superfície em forma de escoamento superficial ou lateral, movendo-se em direção ao canal principal e contribuindo rapidamente para resposta hidrológica. A parcela da água que infiltra pode ser retida no solo para posterior transpiração pelas plantas ou evaporação a partir de solo nu (evapotranspiração). A parcela infiltrada pode, ainda, percolar através do solo

até atingir o lençol freático ou depósitos de água subterrânea, alimentando o chamado fluxo de base.

No modelo SWAT o cálculo do escoamento do superficial pode utilizar o método da Curva-Número, o qual primeiramente contabiliza a evaporação da armazenada no dossel. O valor máximo de armazenamento de água no dossel em qualquer período do ciclo crescimento da vegetação é feito a partir do Índice de Área Foliar (IAF). Em seguida, o modelo calcula, por meio de passo diário, a infiltração da parcela de água que efetivamente atingiu a superfície do terreno – precipitação efetiva. A taxa de infiltração inicial é dependente do teor de umidade no solo e a taxa final da infiltração é equivalente a condutividade hidráulica saturada no solo. O escoamento superficial é computado como sendo a quantidade de água que atingiu o solo menos a quantidade de água que infiltrou.

A redistribuição da água infiltrada no perfil do solo é realizada através do roteamento de armazenamento que prevê o fluxo para cada camada do solo na zona das raízes. Assim, todas as vezes que a capacidade de campo de cada camada for excedida e a camada inferior não estiver saturada, ocorrerá a percolação. Dessa forma, a taxa de fluxo é uma função da condutividade hidráulica saturada de cada camada do solo.

A evaporação do solo e das plantas é calculada separadamente no modelo SWAT. O cálculo da evaporação potencial de água no solo é uma função da evapotranspiração potencial e do índice da área foliar. E o cálculo da evaporação real da água no solo é realizado a partir de funções exponenciais da profundidade do solo e o teor de umidade. O índice de área foliar e a evapotranspiração potencial são utilizados como uma função linear para simulação da transpiração da planta. Em geral, para estimativa da evapotranspiração, o modelo SWAT pode utilizar a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965).

O fluxo subsuperficial lateral também é simulado pelo modelo SWAT, levando em consideração variações na condutividade hidráulica, declividade do terreno e teor de umidade do solo. O SWAT também simula volumes de escoamento superficial e picos máximos de vazão para cada HRUs. Para computar o

volume do escoamento superficial o modelo utiliza uma modificação do método SCS da Curva-Número (USDA, 1972), ou seja, a Curva-Número diminui seus valores conforme o solo se aproxima do ponto de murcha e pode aumentar para 100 se o solo se aproximar da saturação.

O volume do fluxo de retorno ou fluxo de base é dividido em dois aquíferos: a) aquífero raso (não confinado) que alimenta o fluxo de retorno até se unir ao canal principal dentro da bacia hidrográfica; b) aquífero profundo confinado ajuda o fluxo de retorno a cair no córrego.

É importante destacar que a captura das condições reais de uma bacia hidrográfica no modelo SWAT é muito sensível aos parâmetros físicos e climáticos da área em estudo (RODRIGUES et. al., 2015; LÉLIS et al., 2012). No entanto, devido ao número elevado de dados de entrada, não é possível avaliar as incertezas embutidas em todas as variáveis. A opção é identificar, por meio de uma análise de sensibilidade, os parâmetros que mais influenciam os resultados, diminuindo as suas incertezas e aumentando a garantia de uma simulação mais próxima da realidade (JHA, 2009).

O SWAT é amplamente difundido no Brasil, com maior utilização da ferramenta para estudos na hidrologia, principalmente nas regiões sul e sudeste. Entretanto, se faz necessário ampliar a utilização para investigar cenários da mudança de uso da terra combinados com mudanças climáticas, além da avaliação de cenários de risco para secas e inundações (BRESSIANI ET. AL., 2015).

Particularmente, no presente estudo, o modelo SWAT foi utilizado para auxiliar na compreensão o evento extremo de cheia ocorrido na passagem de ano 2009/2010 na cidade de São Luiz do Paraitinga localizada no Estado de São Paulo, na região do Vale do Paraíba Paulista.

## **2.5 O evento extremo de cheia em São Luiz do Paraitinga**

O município de São Luiz do Paraitinga está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga (BHRP) no estado de São Paulo é uma área serrana com morros e vales encaixados, onde o terreno mais plano corresponde à área de ocupação antrópica. A cidade se desenvolveu as margens do Rio Paraitinga. Historicamente, o crescimento da cidade esteve fortemente ligado ao plantio do café e algodão (PM SLP, 2016a). Atualmente a atividade econômica do município está vinculada ao turismo, ao comércio local e a agropecuária de leite, milho, feijão e hortaliças (PM SLP, 2016b). A cidade de SLP é conhecida por possuir um dos maiores patrimônios históricos culturais do estado de São Paulo, contando com aproximadamente 426 construções tombadas, datadas dos séculos XVIII e XIX (UPPH/CONDEPHAAT, 2010). Devido ao ciclo de ascensão e declínio do café, algodão, seguidos da ausência de atividades econômicas de importância significativa na atualidade, a cidade conseguiu conservar grande parte do seu patrimônio histórico ao longo dos séculos. No entanto, grande parte desse patrimônio acabou sendo destruída por um desastre natural.

O município de São Luiz do Paraitinga sofreu uma inundação de grandes proporções, na madrugada de 31 de dezembro de 2009 para 01 de janeiro de 2010, o centro histórico da cidade foi completamente atingido, provocando muitas perdas materiais, sem registro de vítimas fatais. O evento extremo de cheia que atingiu o município de São Luiz do Paraitinga foi associado a um aumento significativo de precipitação que teria ampliado a vazão do Rio Paraitinga, a qual segundo estimativa do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) teria atingido 1000 m<sup>3</sup>/s (Dias et al., 2011). Esse evento causou muitos danos materiais e deixou milhares de pessoas desabrigadas e desalojadas. De acordo com dados do AVADAN, o relatório de avaliação de danos do SINDEC – Sistema Nacional de Defesa Civil, cerca de 11.000 pessoas foram afetadas pelo desastre, ficando desalojadas ou desabrigadas. Uma expressiva parte do patrimônio histórico foi perdida pela inundação, com aproximadamente 90 edificações no centro histórico tendo sido invadidas pela água, dentre as quais a igreja matriz de São Luiz de Tolosa, que desabou, e a igreja mais antiga da cidade, a capela da Mercê (Marra, 2010).



Segundo informações apresentadas no Plano Diretor do Rio Paraitinga, a inundação começou na madrugada de 31 de dezembro de 2009 e permaneceu até o dia 4 de janeiro de 2010 (DAEE, 2012).

Do ponto de vista climático, a cheia do Rio Paraitinga não foi um evento isolado. Segundo o INPE, os primeiros sinais de aumento das chuvas começaram no inverno de 2009 que, ao contrário dos anos anteriores, foi muito chuvoso, tanto que nesse período foram registradas poucas queimadas na região (Jornal da Reconstrução, 2010). No período chuvoso do ano hidrológico de 2009/2010, foram registrados elevados níveis de precipitação em diversos municípios do estado de São Paulo e Rio de Janeiro. No início de 2010, a forte precipitação sob a Serra do Mar causou inundações e escorregamentos, nos municípios de Angra dos Reis, Ilha Grande, São Luiz do Paraitinga e Cunha (MEDEIROS E BARROS, 2013)

O episódio do evento extremo de cheia causou principalmente danos materiais, mas, devido à expressiva perda do patrimônio histórico, despertou interesse de vários pesquisadores de forma que alguns estudos foram formulados para explicar o evento. Dias et al. (2011) e Medeiros e Barros (2013) sugeriram, como possível causa, a associação de chuvas intensas por um período prolongado, que teriam saturado o solo e provocado o forte escoamento superficial que resultou no transbordamento da calha do Rio Paraitinga. A segunda possível explicação seria resultado da associação das fortes chuvas aos fatores antrópicos tais como desflorestamento e mudanças no uso e ocupação da terra, os quais teriam favorecido a ocorrência do alagamento (Soares e Soares, 2010; Dias et al., 2011 e Rodrigues, 2012). E a terceira causa possível, seria a ocorrência de um remanso (efeito de barragem hidráulica) no encontro entre o ribeirão do Chapéu e o Rio Paraitinga, que teria promovido um acúmulo de águas na região próxima à área central do município (DAEE, 2012).

## **2.6 Mudanças de uso e cobertura da terra na bacia do rio Paraíba do Sul**

Em meados do século XVII com a atuação dos bandeirantes que se instalaram no planalto brasileiro, surgiram às primeiras vilas (ABREU, 2011). A atividade mineradora em Minas Gerais intensificou o processo de ocupação, aparecendo às primeiras estradas e outras atividades comerciais.

Com a expansão dos cultivos de cana de açúcar e posteriormente café, a região consolidou-se definitivamente no cenário econômico, promovendo ainda mais mudanças em termos de cobertura vegetal e uso da terra, tais como: ampliação do processo de urbanização, crescimento populacional, criação de vilas e cidades na região. A população aumentou consideravelmente de 1840 a 1920 (IBGE, 2010).

A estagnação do Café na década de 1930 passou a direcionar os investimentos para a criação de gado leiteiro e o excedente da mão de obra conseguiu ser absorvida por outras atividades econômicas ocasionando uma forte migração para as áreas urbanas. Este cenário socioeconômico favoreceu a expansão das atividades industriais, principalmente no Estado de São Paulo, havendo assim, uma transição do rural para o urbano na região, no qual mais de 90% da população passou a viver e áreas urbanas (SEADE, 2010).

Em 1995, aproximadamente 57,6% do uso da terra eram para pastagens, 25,3% para florestas nativas, 12,3% para vegetação secundária em diferentes estágios, os demais usos não ultrapassavam 5% (CEIVAP, 2006). Decorridos aproximadamente seis anos, a maior parte das áreas de fragmentos florestais significativos foram restritos especialmente às regiões mais altas da Serras do Mar e da Mantiqueira, uma vez que as áreas mais baixas (planícies) foram excessivamente alteradas em decorrência das mudanças de uso e cobertura da terra causada pela intensa urbanização e industrialização na região (CAMARINHA et al., 2013).

A industrialização, a urbanização e a expansão da produção agrícola e pecuária ocorridas na região do Vale do Paraíba desencadearam intensa ocupação e transformação da paisagem. Mais recentemente, dentre as atividades de maior potencial de impacto sobre os recursos naturais da Bacia do Paraíba do Sul, destaca-se a agroindústria de celulose e papel, cuja principal interferência com a região está vinculada aos plantios de eucalipto (SATO, AVELAR e NETTO, 2007).

De 2001 a 2007, aumentaram as áreas plantadas com eucalipto no trecho paulista do Vale do Paraíba, dos 76.200 hectares em 2001 passaram a 100.742 ha em 2007, revelando um incremento de aproximadamente 32,2% destes cultivos (ARGUELLO, 2010). A expansão destas áreas está associada à demanda por matéria prima e energia principalmente para a indústria. A alta produtividade dada pelo rápido crescimento rápido com colheita em 7 anos e capacidade de até 3 cortes em um período de 21 anos, além da demanda por madeira, celulose, carvão vegetal, óleos, medicamentos e energia tem contribuído para a expansão destas áreas.

Para o município de São Luiz do Paraitinga, a expansão do plantio de eucalipto apresentou um aumento de apenas 8,2% na área cultivada para o período de 2001 a 2007, o que representava aproximadamente 8,9% da área do município, estimada em 61.715ha (ARGUELLO, 2010). Entre 2008 e 2010, houve um incremento na área plantada com eucalipto (CANTINHO et. al., 2011)

Segundo ARGUELLO (2010), as áreas de eucalipto também estão cultivadas em áreas de Área de Preservação Permanente (APP), mostrando que muitos dos plantios foram estabelecidos sem respeitar a legislação vigente e comprometendo os recursos naturais da região.

Diante das diferentes mudanças de uso e cobertura para a região do Vale do Paraíba, onde está inserido o município de São Luiz do Paraitinga, o qual sofreu com o evento extremo de cheia na passagem de 2009/2010, fez-se necessário o conhecimento dos estudos sobre a existência de uma influência ou não, da mudança de uso e cobertura na resposta hidrológica.

## **2.7 Mudanças no uso e cobertura da terra e influência na resposta hidrológica**

Mudanças no uso e cobertura da terra vêm ocorrendo de forma generalizada em todo o globo direcionando o campo da pesquisa científica para uma

investigação sobre as potenciais influências no funcionamento dos sistemas naturais e os serviços ambientais por eles prestados. Há muito tempo se pesquisa o papel da floresta sobre as variáveis do balanço hídrico em uma dada bacia. Desde que Hillel (1919) começou a investigar os potenciais mecanismos pelos quais a floresta interceptava a água de chuva, retornando-a para a atmosfera sob a forma de vapor começaram a aparecer as hipóteses acerca da influência da cobertura florestal sobre a descarga hídrica.

De acordo com Bosh e Hewlett (1982), estudos revisados de 94 experimentos (a maior parte deles em bacias pareadas) demonstraram que a remoção da floresta se tornou quase uma causa evidente para o aumento do fluxo de vazão e, ainda, que o reflorestamento em áreas abertas, ao inverso da remoção da floresta, reduziu o fluxo total de vazão. Também, Cheng (1989); Cornish (1993); Gustard e Wesselink (1993); Hornbeck et. al. (1993); Jayasuriya et. al. (1993); Stoneman (1993) constataram em seus estudos que podem ocorrer aumento da resposta hidrológica em função de desmatamento no entorno, aumentando assim a vazão dos corpos d'água/rios.

Bosh e Hewlett (1982) teriam sido os primeiros a observar a relação entre aumento/diminuição da descarga hídrica como função da diminuição/aumento da cobertura florestal. Em geral, a hipótese mais comumente aceita é de que a retirada da cobertura florestal tenderia a promover um aumento nas descargas. Além desse comportamento ter sido verificado em alguns experimentos in situ em bacias de pequena área (<100 km<sup>2</sup>), ele baseia-se na premissa da evaporação das florestas, por meio da evapotranspiração (incluindo-se aqui a evaporação da água interceptada no dossel) (BRUIJNZEEL, 2004). No entanto, esse processo é altamente dependente da escala da mudança de uso e cobertura da terra visto que, grandes desmatamentos têm o potencial de alterar o regime de chuvas, promovendo, eventualmente, uma diminuição das chuvas, as quais, por sua vez, resultariam em diminuição das descargas (COSTA; COE; SAMPAIO et al., 2007).

Em linhas gerais, os estudos dos impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a resposta hídrica se dividiram em duas correntes: estudos observacionais e estudos de modelagem. Em geral, os estudos observacionais

se concentram na comparação de bacias pareadas de pequena área (< 100km<sup>2</sup> – Liebscher, 1993) através das quais eram investigadas possíveis alterações na descarga em função de diferentes tipos de cobertura vegetal, supondo-se constantes os demais parâmetros. Os estudos de modelagem, por sua vez, destinam-se, prioritariamente, à avaliação da resposta hidrológica de bacias de maior área (meso e macro > 100 km<sup>2</sup> (Liebscher, 1993), visto que, para esses casos, não é viável o experimento de bacias pareadas (Lorup et al., 1998; Vanshaar et al., 2002; Bathurst et al., 2004; Li et al., 2007; Coe et al., 2009; Rodriguez e Tomasella, 2014).

Outro aspecto que facilita o entendimento da influência das mudanças de uso e cobertura da terra sobre as bacias de menor área é o fato de que nelas, as variáveis que mais influenciam na descarga são as características geomorfológicas e a rede de canais. Por outro lado, nas bacias maiores, outros processos passam a assumir importância no regime de descargas: clima, vegetação, geologia, geomorfologia, fragmentação da paisagem, etc. (BRUIJNZEEL, 2004).

No que se refere à resposta hidrológica, em linhas gerais, os estudos na pequena área tendem a confirmar a hipótese de aumento das descargas em bacias desmatadas (BRUIJNZEEL, 2004). No entanto, em áreas maiores, a influência conjunta de vários processos não permite que se tenha uma confirmação clara da real tendência da resposta hidrológica como resultado das mudanças no uso e cobertura da terra. Além da influência da heterogeneidade espacial, outros aspectos também corroboram para essas incertezas. Em especial destaca-se o fator tempo que, conforme colocado por BRUIJNZEEL (2004), a resposta da vazão como resultado da mudança no uso e cobertura da terra pode não ser imediata, ou seja, após o distúrbio de desflorestamento (que, por vezes, também não é imediato), haveria a necessidade de um tempo (regime transitório) até que as vazões passassem a responder a um regime estacionário. Esse tempo depende fundamentalmente das características de cada bacia: clima, geologia, geomorfologia, geologia, vegetação e o próprio uso da terra. Assim sendo, esses fatores, se não completamente considerados nos modelos, constituem-se em fontes de incertezas nos resultados das simulações.

Apesar dos estudos de mudanças no uso e cobertura da terra se concentrar na descarga como principal resposta hidrológica, é amplamente aceito que a variável hidrológica mais amplamente impactada com essa mudança é a evapotranspiração (incluindo-se aqui a evaporação da água interceptada pelo dossel e a transpiração das plantas). De fato, medidas de fluxo de seiva em florestas têm apontado para um possível efeito da abertura das clareiras sobre as taxas de evapotranspiração (Giambelluca et al, 2003). Esse comportamento foi atribuído a um aumento de calor nas áreas de clareiras, o qual atuaria, junto com as variáveis meteorológicas no sentido de aumentar as taxas de evapotranspiração. Ainda, as florestas secundárias que se desenvolvem em áreas desflorestadas abandonadas mostram taxas de evapotranspiração que excedem àquelas das florestas pristinas (Giambelluca, 2002; Shuttleworth, 1988; Von Randow, 2010). Em função do exposto, no presente trabalho investigou-se não somente o regime de comportamento das descargas, mas também a evapotranspiração como resultado dos cenários propostos de mudança no uso e cobertura da bacia do rio Paraitinga.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O presente trabalho está dividido em duas partes no que se refere à metodologia. A primeira delas refere-se à caracterização do evento extremo de chuva ocorrido na passagem de ano (2009/2010) em São Luiz do Paraitinga, através da análise de série histórica de dados de precipitação e vazão, visando caracterizar o evento em termos de intensidade. A segunda parte refere-se ao uso do modelo SWAT, descrito no item 2.4, para estudo da potencial influência das mudanças de uso e cobertura da terra sobre o padrão das descargas hídricas no Rio Paraitinga. Os materiais e métodos utilizados nessas duas etapas estão apresentados nos itens a seguir. Cabe colocar que, para a análise de dados observados *in situ* foram utilizadas as bacias dos rios Paraitinga e Paraibuna. No entanto, para a simulação hidrológica do evento ocorrido no município de São Luiz do Paraitinga na passagem de ano de 2009/2010 trabalhou-se apenas com a Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga (BHRP).

#### **3.1 Material**

A área de estudo e os dados observados *in situ* de vazão e precipitação para a bacia do rio Paraitinga e bacia do rio Paraibuna foram considerados pelo presente estudo como parte do item “Material”, dado que foi o passo inicial para a caracterização do evento.

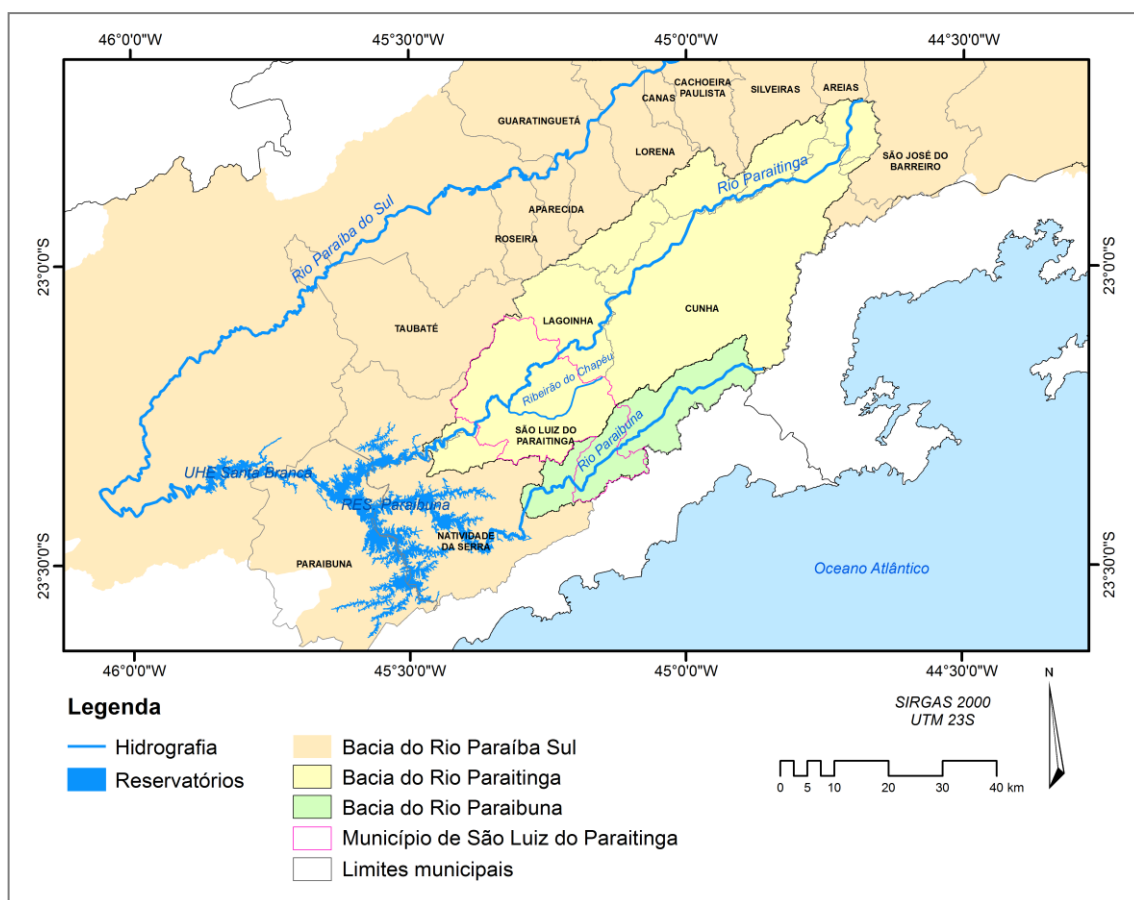
##### **3.1.1 Área de estudo**

A BHRP pertence ao trecho paulista da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, classificada pela Agência Nacional das Águas (ANA) como parte da região hidrográfica do Atlântico Sudeste (ANA, 2016). O rio Paraíba do Sul é considerado um dos mais importantes dessa bacia e possui uma abrangência de terras com aproximadamente 62.074 km<sup>2</sup> disposta dentre três estados brasileiros: São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (CEIVAP, 2016).

O trecho paulista da bacia do rio Paraíba do Sul tem uma área aproximada de 14.510 km<sup>2</sup>, que abrange as nascentes dos rios Paraitinga e Paraibuna. A nascente do rio Paraitinga está localizada na Serra da Bocaina, no município de Areias, estado de São Paulo, a cerca de 1800m de altitude. A nascente do rio Paraibuna está localizada a cerca de 1200m de altitude, na Serra do Mar, município de Cunha, São Paulo.

A Bacia do Rio Paraitinga abrange uma área de 2.380 km<sup>2</sup>, situada entre as coordenadas 22°43' e 23°22' de latitude Sul e 44°39' e 45°29' de longitude oeste, onde está localizada a maior parte do município de São Luiz do Paraitinga. A Bacia do rio Paraibuna está situada entre os paralelos 23°7' e 23°26' de latitude sul e os meridianos 44° 53' e 45° 18' de longitude oeste, com uma área equivalente à 440,6 km<sup>2</sup> (Figura 3.1).

Figura 3.1- Bacia hidrográfica do rio Paraitinga e Bacia hidrográfica do rio Paraibuna



Fonte: Organização do autor com base no IBGE e ANA (2016).



O rio Paraitinga em junção com rio Paraibuna é formador do rio Paraíba do Sul, principal rio da região do Vale do Paraíba. Na confluência entre esses dois rios, na década de 70, foi construída a Usina Hidrelétrica de Paraibuna. Operada pela CESP, essa usina é constituída por 2 reservatórios: o reservatório de Paraitinga, com 47km<sup>2</sup> de superfície e o de Paraibuna, com 177km<sup>2</sup> de superfície. Juntos, estes reservatórios fornecem uma potência instalada de 85MW. Além do fornecimento de energia elétrica, esses reservatórios têm por objetivo regular o abastecimento hídrico e minimizar o risco de enchentes nas áreas a jusante do barramento, que compõem uma parte expressiva da região do Vale do Paraíba (CESP, 2016).

Em termos climáticos, a região do Vale do Paraíba apresenta clima subtropical quente, com temperatura média anual entre 18°C e 24°C, onde os meses de verão são os mais chuvosos, com precipitação acumulada de 200 a 250 mm/mês<sup>-1</sup> para os meses de dezembro e janeiro, e invernos secos de maio a agosto, com precipitação acumulada abaixo de 50 mm/mês<sup>-1</sup> (MARENGO e ALVES, 2005). Uma grande variabilidade nos índices pluviométricos é verificada nas bacias do rio Paraitinga e do rio Paraibuna em decorrência da influência da orografia. Um estudo acerca do efeito orográfico na distribuição espacial das precipitações para o Alto e Médio Vale do Paraíba mostrou que nas áreas próximas à Serra da Mantiqueira, os índices pluviométricos médios anuais estiveram entre 1300 e 2200 mm; nas áreas próximas à Serra do Mar, os índices variaram entre 1300 e 2800 mm e, nas áreas mais planas, os índices estiveram entre 1200 a 1300 mm ano<sup>-1</sup> (SOARES et al., 2008).

Em termos de relevo, a bacia do rio Paraitinga está inserida em uma região que é em parte constituída por serras de altitudes muito elevadas, acima de 1300m nas áreas de nascente do rio Paraitinga popularmente conhecida como Serra do Quebra-Cangalha e em localizações escarpadas com cerca de 1700m próximas a Serra do Mar, ou nas áreas centrais de baixo relevo (com até 500m) entre as várzeas do rio Paraitinga e Paraibuna (CAMARINHA et al., 2013). A bacia do rio Paraitinga pertence ao Planalto Atlântico (entre o Planalto do Paraitinga e o Médio Vale do Paraitinga) e em parte, a porção costeira ao sul da Serra do mar (ALMEIDA et al., 1964).

Com relação à hidrografia, a bacia é constituída por 38 afluentes do seu rio principal, o rio Paraitinga, com 166 km de extensão e que, ao longo do seu percurso, atravessa 9 municípios: Areias, Silveiras, Lorena, Cunha, Lagoinha, Natividade da Serra, Redenção da Serra, Paraibuna e São Luiz do Paraitinga. Os municípios de Guaratinguetá e São José do Barreiro estão inseridos na bacia do rio Paraitinga, mas este não os atravessa.

Os solos que compõe a bacia do rio Paraitinga são: Podzolicos Vermelho Amarelo (PVA), que apresenta baixa capacidade de infiltração, constituído de camadas impermeáveis; Cambissolos Háplicos (CX), que possuem capacidade de infiltração moderada, profundidades rasas e textura variável e Latossolos Vermelho Amarelo (LVA), caracterizado por alta capacidade de infiltração, camadas profundas e boa capacidade de drenagem (SOARES et al., 2008).

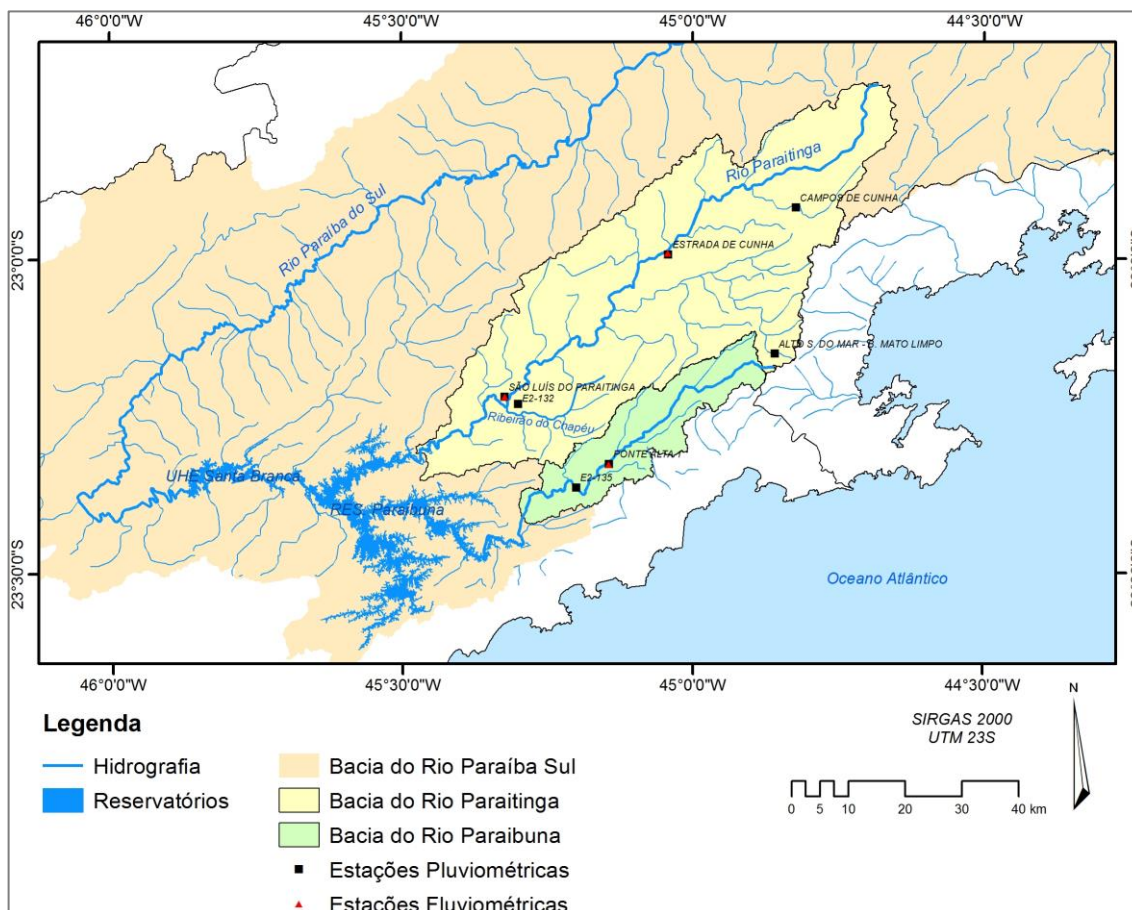
Conforme apresentado anteriormente, a vegetação predominante na bacia é composta de alguns fragmentos de remanescentes da Mata Atlântica, áreas de pastagem (em grande parte abandonadas) e pequenas áreas cobertas com eucalipto (DAEE, 2012). As principais mudanças no uso e cobertura da terra para bacia do rio Paraitinga ocorreram com o cultivo da cana-de-açúcar, seguido pelo plantio de café (século XIX e início do século XX) e como surgimento de pastos para pecuária leiteira em transição para o cultivo de eucalipto na segunda metade do século XX (TOLEDO, 2007; ARGUELLO e SAUSEN; 2007).

### **3.1.2 Dados observados in situ**

Para caracterizar o evento de cheia ocorrido na passagem do ano de 2009/2010 em São Luiz do Paraitinga optou-se por analisar dados de vazão e precipitação nas bacias dos rios Paraitinga e Paraibuna acima descritas. A razão para esse procedimento surgiu em decorrência do interesse em caracterizar de forma mais abrangente a distribuição espacial da chuva que ocasionou o evento extremo no município de São Luiz do Paraitinga na passagem de 2009/2010. Para tanto, foram utilizadas séries climatológicas de

dados observados de precipitação e vazão provenientes de estações fluviométricas e pluviométricas da ANA, as quais são distribuídas em ambas as bacias, conforme apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Localização das estações pluviométricas e fluviométricas nas Bacias Hidrográficas do Rio Paraitinga e Paraibuna.



Fonte: Organização do autor com base no IBGE e ANA (2016).

Os dados de precipitação foram obtidos a partir de 7 estações pluviométricas, cujos dados foram adquiridos no Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) disponível no site da ANA. No Quadro 3.1, apresentam-se informações gerais sobre essas estações bem como o período de dados disponibilizado.

Quadro 3.1 - Estações pluviométricas.

Código	2244048	2245055	2344009	2345065	2345067	2345017	2345175
Bacia	Paraitinga	Paraitinga	Paraitinga	Paraitinga	Paraibuna	Paraitinga	Paraibuna
Estação	Campos de Cunha	Estrada de Cunha	Alto da Serra do Mar	São Luiz do Paraitinga	Ponte Alta I	SLP_E2-132	Briet_E2-135
Latitude	22°55'16" S	22°59'45" S	23°09'8" S	23°13'19" S	23°19'45" S	23°13'60" S	23°22'00" S
Longitude	44°49'20" O	45°02'30" O	44°51'35" O	45°19'24" O	45°08'25" O	45°18'00" O	45°12'00" O
Altitude (m)	750	790	1239	760	888	740	815
Município	Cunha	Cunha	Cunha	S.L. Paraitinga	S.L. Paraitinga	S.L. Paraitinga	S.L. Paraitinga
Período de dados	Ago/67 a Dez/2015	Nov/35 a Dez/2015	Set/67 a Dez/2015	Nov/35 a Dez/2015	Out/36 a Dez/2015	Abr/71 a Dez/2015	Out/72 a Dez/2015

Fonte: ANA (2016)

Para análise das descargas, foram utilizados dados de vazão provenientes das estações fluviométricas também disponibilizadas no sistema HIDROWEB (disponível em [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)). As características dessas estações, bem como o período de dados disponibilizado se apresentam a seguir no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Estações fluviométricas.

Código	58030000	58040000	58060000
Nome	Estrada de Cunha	S.L. Paraitinga	Ponte Alta
Sub-bacia	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul	Paraíba do Sul
Rio	Paraitinga	Paraitinga	Paraibuna
Latitude	-22°59'48" S	-23°14'19" S	-23°19'48" S
Longitude	-45°2'33" O	-45°18'24" O	-45°8'37" O
Altitude (m)	780	730	888
Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	796	1950	277
Município	Cunha	S.L. Paraitinga	S.L. Paraitinga
Período de dados	1935-2015	1979-2015	1935-2015

Fonte: ANA (2016)

### 3.2 Métodos

Os métodos aqui utilizados compreendem basicamente a utilização do modelo SWAT, versão 2012 do ArcSWAT 10\_1.15 para o software ArcGIS versão 10.1

(ESRI, 2014), e os passos necessários para entrada de dados no modelo, calibração, validação e simulação. As características gerais do modelo SWAT foram apresentadas no item 2.4 do referencial teórico. Nos itens a seguir, é apresentada uma descrição dos dados de entrada utilizados e a forma pela qual esses dados foram obtidos. São apresentados também os passos para realização de calibração, validação, simulação da descarga no dia do evento e simulação dos cenários de mudanças no uso e cobertura da terra.

### **3.2.1 Descrição dos passos envolvidos na preparação do banco de dados do modelo SWAT**

Conforme apresentado na seção 2.4, o modelo SWAT se utiliza do balanço hídrico para simular os processos hidrológicos ocorridos na bacia hidrográfica e sua funcionalidade, como um modelo de base física e semi-distribuído, permite que a simulação ocorra de forma contínua no tempo e espaço (Bonumá et al., 2013; Arnold et al. 2012a). Para tanto, o modelo requer dois tipos de dados: dados espaciais e dados tabulares.

Os dados espaciais compreendem o Modelo Digital de Elevação (MDE), a máscara com o limite da bacia, os mapas de uso e cobertura da terra e o mapa de tipos de solos. Já os dados tabulares correspondem aos dados quantitativos das informações meteorológicas (precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa) e as informações físicas e químicas para cada tipo de solo.

Para iniciar um projeto no modelo SWAT, o primeiro dado requerido é o topográfico (MDE), seguido por uma máscara com um limite prévio para circunscrever a área a ser estudada no dado topográfico e em seguida, ser delimitada a bacia hidrográfica e as sub-bacias. No SWAT, a delimitação de bacias hidrográficas pode ser realizada de duas formas: i) utilizando um MDE para extrair a rede de drenagem e, posteriormente, delinear a bacia hidrográfica e as sub-bacias; ii) utilizar uma rede de drenagem já delimitada e, em seguida, delimitar a bacia hidrográfica e as sub-bacias. Conforme apresentado a seguir, no presente estudo, a Bacia Hidrográfica do Rio

Paraitinga foi delimitada a partir dos dados topográficos, conforme descrito no item 3.3.1.

A partir da delimitação da bacia e respectivo relevo, é construída uma rede de drenagem, para delimitação das sub-bacias. Em seguida, como parte dos dados de entrada no modelo é identificado e inserido o mapa de uso e cobertura da terra e o mapa de solos da área de estudo, além da tabela com as informações numéricas dos solos da região. As bases de dados selecionadas para alimentação do modelo, bem como os passos seguidos para inserção das mesmas se apresentam nos itens a seguir.

Após terem sido determinados os planos de informações de uso e cobertura da terra, de tipos de solos e de declividade derivado também a partir do MDE, os dados dessas camadas são sobrepostos para obter combinações únicas desses atributos para cada sub-bacia e definir, assim, as chamadas Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Unit -HRU*) para cada sub-bacia.

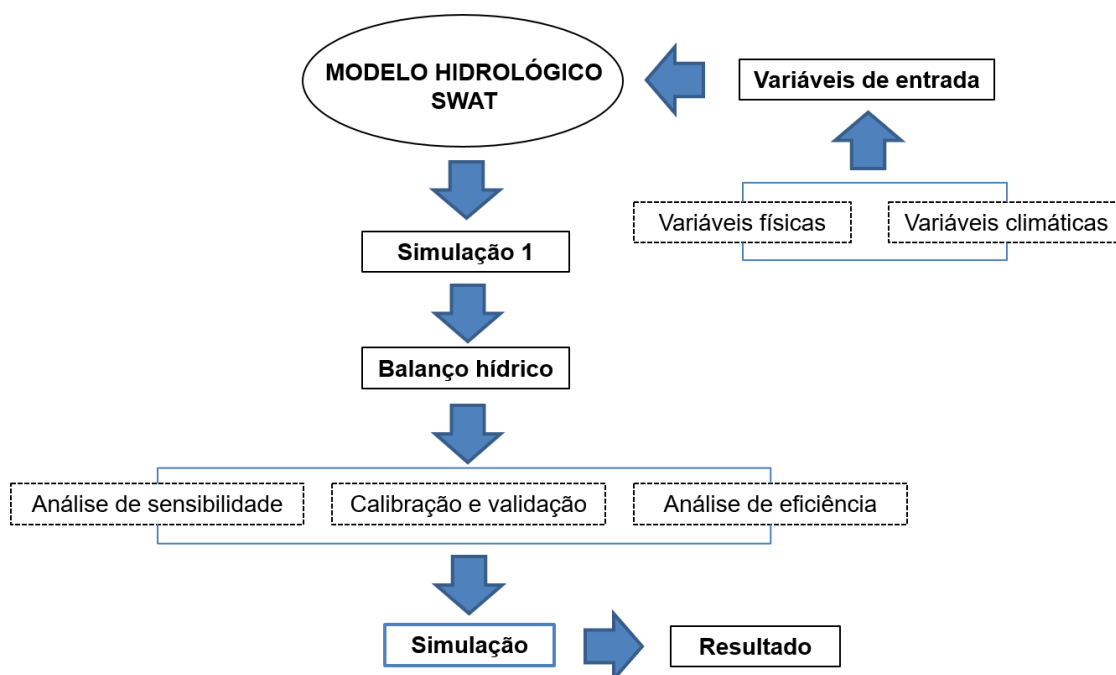
Para finalizar a criação do banco de dados (etapa que antecede a simulação inicial) são fornecidos os dados climáticos, quais seja precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa.

Finalizada as etapas de entrada com os dados, todas as tabelas do banco de dados (*SWAT Database Tables*) são selecionadas e escritas na base de dados do modelo, qualificando-os para o processo de simulação realizado em sequência.

### **3.2.2 Descrição geral dos passos envolvidos na calibração, validação e simulação da mudança de uso e cobertura da terra**

De forma geral, as etapas que envolvem o emprego do modelo hidrológico SWAT são apresentadas na Figura 3.3. A calibração e validação são processos definidos a partir da escolha dos parâmetros com maior sensibilidade para a bacia hidrográfica ou uma sub-bacia (Arnold et al., 2012b).

Figura 3.3- Fluxograma metodológico geral do modelo SWAT



### 3.2.2.1 Calibração

Após a simulação 1 (default) e inspeção visual dos resultados, procede-se ao passo de calibração do modelo. Para tanto, faz-se necessário a identificação prévia, através de uma ‘análise de sensibilidade’ dos parâmetros, para os quais o modelo se apresenta mais sensível. Essa análise de sensibilidade, por sua vez, utiliza os parâmetros mais sensíveis indicados pela literatura e apresentados no Quadro 3.6 (item 3.2.3.8), os quais podem ser alterados manualmente nas tabelas da base de dados do modelo ou por meio do uso da ferramenta *manual helper calibration*. Essa ferramenta possibilita ao usuário modificar os valores para cada parâmetro utilizando uma das três operações (multiplicar, adicionar ou substituir) em todas ou em cada sub-bacia, para um ou todos os usos da terra, em um ou todos os tipos de solos, para uma ou todas as faixas de declividade da bacia.

Após a entrada de cada conjunto de dados selecionados, são realizadas 3 métricas estatísticas para a análise de eficiência, descritos abaixo, como forma de avaliar a qualidade dos resultados do modelo.

- (1) *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*: “...uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual (“ruído”) comparado a variação de dados observados (“informação”) ...” (Nash e Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \right] \quad (3.1)$$

Onde  $Y_i^{obs}$  é o valor inicial dos dados observados a serem avaliados, o  $Y_i^{sim}$  é o valor inicial dos dados simulados a serem avaliados, o  $\bar{Y}$  é a média dos dados observados a serem avaliados e  $n$  é o número total de observações.

- (2) *Percent Bias (PBIAS)* “...a tendência média medida dos dados simulados para ser maior ou menor do que seus correspondentes observados...”; O PBIAS é o desvio dos dados a serem avaliados, expresso em porcentagem (Gupta et al., 1999):

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (3.2)$$

- (3) *RMSE (Root Mean Square Error) - Observations Standard Deviation Ratio* (Singh et. al, 2004) “...RSR é calculado como a razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados observados...” (MORIASI et al., 2007):

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y})^2} \right]} \quad (3.3)$$

*RSR* é razão entre o *RMSE* que é a taxa observada do desvio padrão entre os dados observados e simulados e o *STDEV<sub>obs</sub>* que é desvio padrão dos dados observados.



A avaliação dos testes estatísticos é feita por meio da comparação com valores previamente estabelecidos, apresentados na literatura e reproduzidos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3- Valores de referência para análise dos testes estatísticos NSE, PBIAS e RSR.

Teste Estatístico	Muito bom	Bom	Satisfatório	Insatisfatório
NSE	$0,75 < NSE \leq 1,0$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$NSE \leq 0,50$
PBIAS	$!PBIAS! < 10$	$10 \leq !PBIAS! < 30$	$30 \leq !PBIAS! < 55$	$!PBIAS! \geq 70$
RSR	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$RSR > 0,70$

Fonte: Moriasi et al. (2007)

Assim que a simulação atinge o valor de referência satisfatório mostrado no Quadro 3.3 acima, tem-se então o modelo calibrado. Entretanto essa etapa somente ocorre após terem sido realizadas inúmeras simulações com a calibração manual dos parâmetros.

### 3.2.2.2 Validação

A partir do modelo calibrado, segue-se então ao processo de validação. Para tanto, seleciona-se uma parte do período de dados e procede-se uma nova simulação para esse período com os parâmetros já calibrados. Para esse período, calculam-se novamente as métricas estatísticas descritas acima e, se os valores forem considerados satisfatórios, o modelo estará então calibrado e validado. Caso contrário, repete-se a calibração.

### 3.2.2.3 Mudanças no uso da terra

As simulações de mudanças no uso e cobertura da terra no modelo SWAT podem ser feitas das seguintes formas: i) utilizar diferentes mapas de uso e cobertura da terra para diferentes cenários, ii) alterar na tabela de dados de uso da terra, do modelo, todos os parâmetros referentes ao uso da terra necessários à criação de cenários e iii) utilizar a ferramenta do Land Use Update (LUP.DAT) e, a partir de uma determinada data, trocar o uso desejado

para uma ou mais sub-bacias inseridas na bacia principal do estudo. Conforme será detalhado mais adiante, no presente trabalho foi adotada a opção 3.

### **3.2.3 Descrição dos processos realizados do banco de dados até a simulação hidrológica no modelo SWAT**

O modelo SWAT compreende diversos processos desde a construção do banco de dados até a simulação hidrológica, os quais estão descritos nas seções seguir.

#### **3.2.3.1 Definição do período de simulação e passo de tempo**

A simulação hidrológica compreendeu o período de 01/01/1981 a 31/12/2011, perfazendo um período de 31 anos dos quais os 3 primeiros anos (1981 a 1983) foram utilizados para 'aquecimento' do modelo (*warm-up*). O período de calibração foi realizado entre 02/1988 até 12/1999 e o período de validação de 01/2000 até 12/2011.

A simulação foi realizada em dois passos de tempo. Para construção da série histórica de 01/01/1984 a 31/12/2011 e, também para as etapas de calibração, validação e análise de sensibilidade foi utilizado o passo de tempo mensal. Para análise do evento de cheia na passagem de ano de 2009/2010 foi realizada uma simulação com passo de tempo diário para o mesmo período de dados.

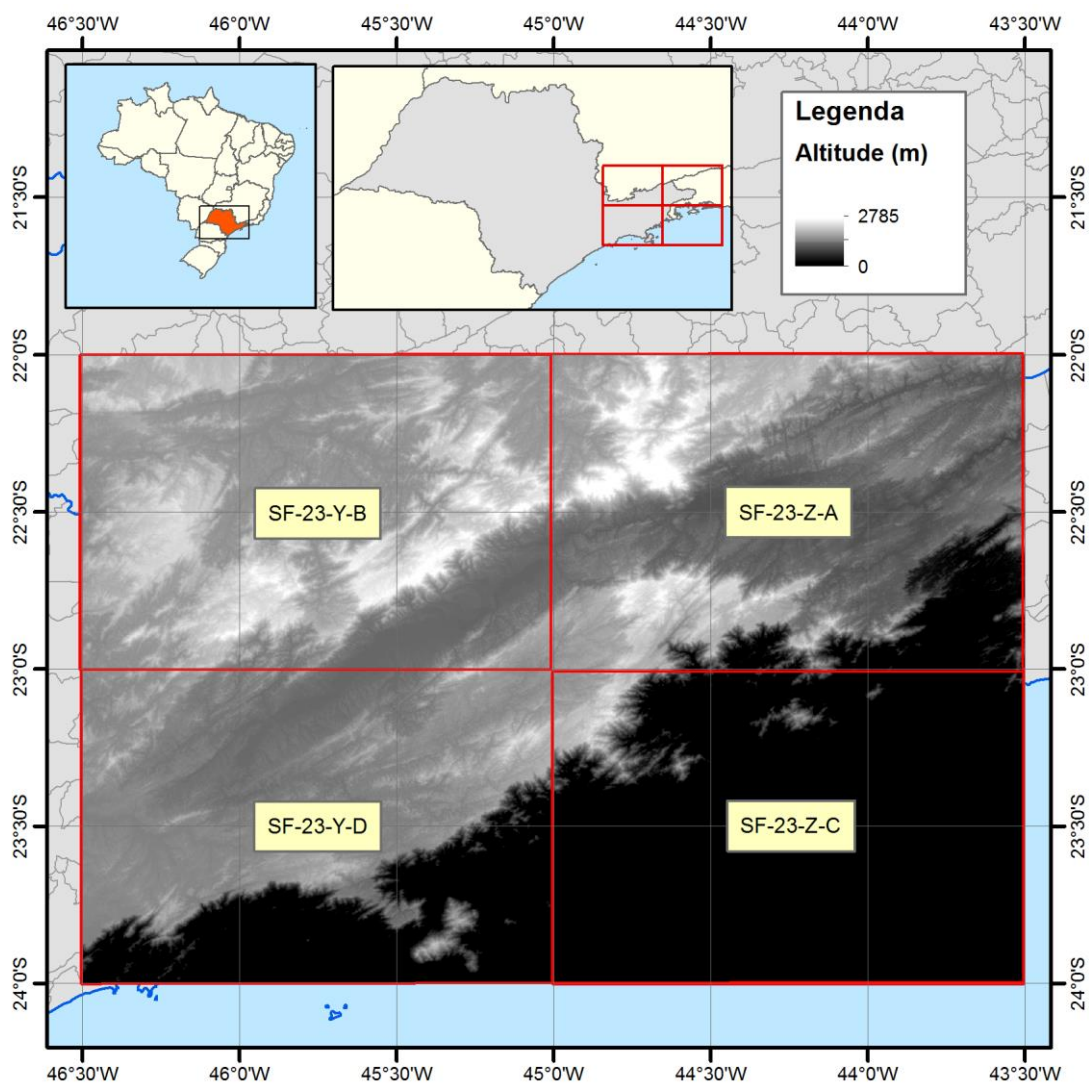
#### **3.2.3.2 Máscara da Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga**

Para determinação do limite de área a ser utilizada na delimitação da bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga sobre o MDE, foi utilizada uma máscara proveniente do plano diretor de macrodrenagem da bacia (DAEE, 2012), transformada do formato ".dwg" para o formato *raster* com uso do *software* ArcGIS 10.1.

### 3.2.3.3 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Para definição do relevo da bacia do Rio Paraitinga foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido do projeto *Brasil em Relevo*, desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) na divisão Monitoramento por Satélite (disponível em [www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download](http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download)). Trata-se de uma base de dados com informações sobre relevo do território brasileiro dispostos em quadrículas cuja divisão corresponde à das cartas do IBGE na escala de 1:250.000, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4- Mosaico MDE da área de estudo.



Fonte: Organização do autor (2016).

Os dados utilizados no referido projeto correspondem às informações obtidas pelo radar acoplado ao ônibus espacial *Endeavour*, como parte da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) compreende, atualmente, o mais completo conjunto de dados de elevação em uma escala quase global (cobertura de 80% da superfície da Terra) obtido por interferometria (RODRIGUEZ et al., 2005) e realizada em conjunto com a Agência Espacial Norte-americana (*National Aeronautics and Space Administration*- NASA), a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD) e as agências espaciais alemã (*Deustches Zentrumfür Luft-und Raumfahrt* - DLG) e italiana (*Agenzia Spaziale Italiana* - ASI). Tratou-se de uma única missão realizada em fevereiro de 2000 (GROHMANN et al., 2008).

Assim, os dados utilizados correspondem aos dados SRTM cuja resolução disponibilizada para o território brasileiro, na ocasião da utilização nesse estudo, foi de 90m<sup>1</sup>. A correção e uniformização do MDE para supressão de falhas ("*skins*"), sombras e distorções foi realizada pela equipe técnica da EMBRAPA Monitoramento por Satélite (DE MIRANDA, 2016).

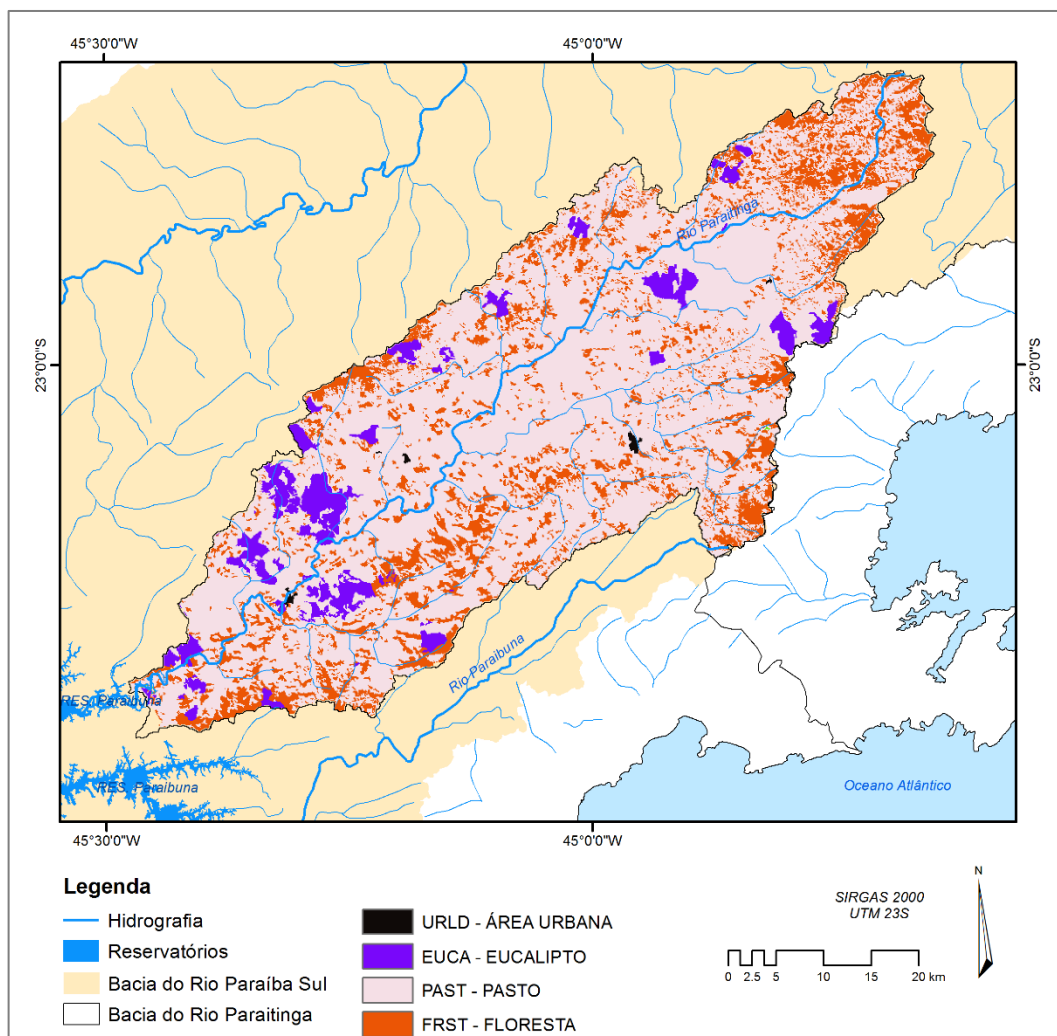
#### **3.2.3.4 Dados de uso da terra**

O passo seguinte para compor o banco de dados no modelo SWAT foi a entrada de um mapa do uso e cobertura da terra para Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga, resultado do recorte do mapeamento dos usos da terra e da cobertura vegetal do Estado de São Paulo elaborado por Vieira et al. (2010). O mapeamento na bacia do Rio Paraitinga indicou cinco classes: pasto, floresta, eucalipto, área urbana e água como mostra a Figura 3.5.

---

<sup>1</sup> Sabe-se que atualmente são disponibilizados, para a extensão do território brasileiro, dados SRTM na resolução espacial de 30m. Originalmente estes dados foram obtidos, porém não disponibilizados, na resolução de 12,5 m.

Figura 3.5 - Mapa de uso e cobertura da terra para Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga.



Fonte: Adaptada de Vieira et al. (2010)

A utilização dos dados disponíveis no mapa de uso e cobertura da terra da bacia pelo modelo SWAT foi associada a uma tabela no formato “.txt” onde cada classe correspondeu a uma nomenclatura específica SWAT, conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nomenclatura para as classes de uso e cobertura da terra utilizadas pelo modelo SWAT presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga

<b>Classes</b>	<b>Nomenclatura SWAT</b>	<b>Descrição</b>
<b>Pasto</b>	PAST- <i>Pasture</i>	<i>Pasto</i>
<b>Floresta</b>	FRST- <i>Forest Mixed</i>	<i>Floresta</i>
<b>Eucalipto</b>	EUCA- <i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalipto</i>
<b>Área Urbana</b>	<i>Urban residential low density</i>	<i>Área Urbana com baixa densidade demográfica</i>
<b>Água</b>	WATR- <i>Water</i>	<i>Corpos Hídricos</i>

Fonte: Arnold et al. (2012a)

O mapa de uso e cobertura da terra para Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga foi obtido a partir de um recorte feito no mapeamento dos usos da terra e da cobertura vegetal do Estado de São Paulo (VIEIRA et al., 2010). Esse mapeamento é parte dos resultados constantes da atualização do Projeto Vegetação (Proveg) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cuja finalidade era a construção de mapas do uso e cobertura para todo o território brasileiro que estivesse ajustado às classes do SSiB (modelo de superfície acoplado aos modelos meteorológicos) (VIEIRA et al., 2013). O Proveg foi iniciado em 2001 com o mapeamento do uso e cobertura da terra na região da Amazônia Legal, seguido do nordeste brasileiro (SESTINI et al., 2002; ALVALÁ, 2006; VIEIRA et al., 2013) e posteriormente realizado para estado de São Paulo em 2005.

Para esse mapeamento do estado de São Paulo, foram utilizadas 19 imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite *Land Remote Sensing Satellite* (LANDSAT) 5, datadas do ano de 2005, as quais foram registradas e posteriormente classificadas por um processo digital supervisionado com finalização por edição gráfica utilizando o aplicativo SPRING - Sistema de Processamento de Informações Geográficas desenvolvido pelo INPE (CANAVESI et al., 2012; VIEIRA et al., 2013).

O mapeamento utilizado neste trabalho apresenta resolução espacial de 30 m, escala de 1:250.000 e foi elaborado para o ano de 2005. As classes apresentadas foram: *floresta*, obtida a partir do levantamento dos remanescentes florestais da Mata Atlântica cedidos pelo projeto da Fundação SOS Mata Atlântica em parceria com o INPE (SOS Mata Atlântica, 2005); *eucalipto*, atualização das áreas plantadas com a cultura baseada na metodologia de Kronka et al. (2002) e apresentada no mapeamento elaborado por Canavesi et al. (2012); *área urbana*, *água*, *pasto* obtidas via classificação de dados de Sensoriamento Remoto.

### **3.2.3.5 Tipos de solos**

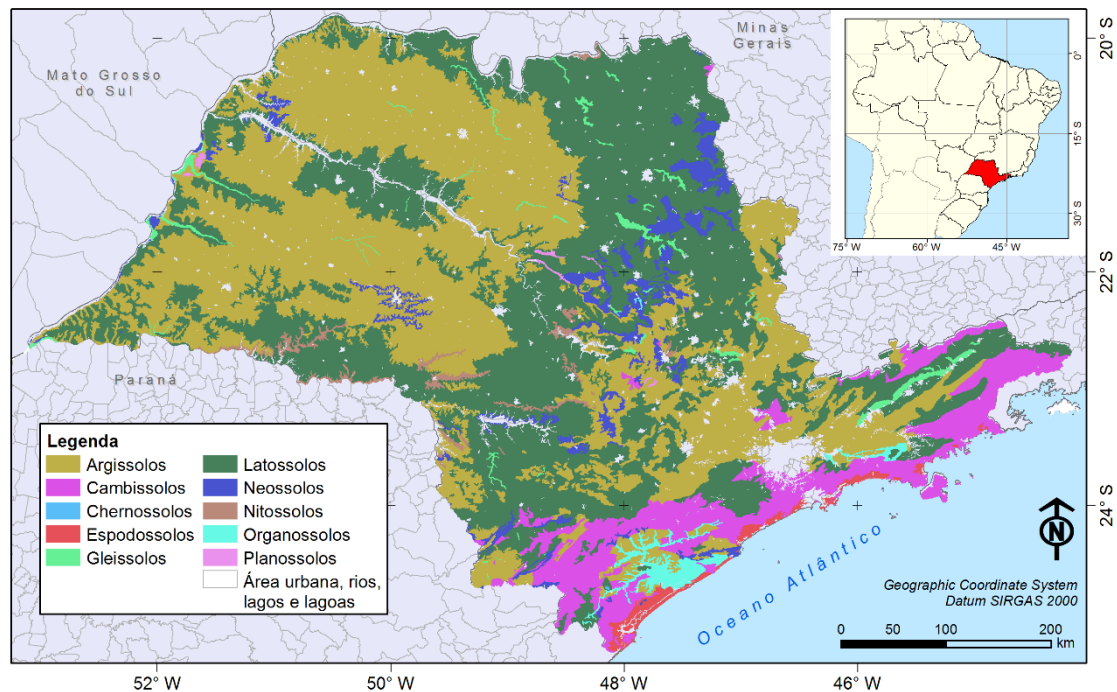
Outro dado de entrada requerido pelo modelo foi o mapa referente aos tipos de solos para área de estudo, também associado a um quadro com informações numéricas sobre as características físicas e químicas de cada classe.

Os dados de entrada referentes aos tipos de solo foram obtidos de um recorte do mapa pedológico do Estado de São Paulo do Instituto Agrônomo (IAC) (OLIVEIRA et al., 1999a). Esse mapa foi desenvolvido em uma parceria entre a EMBRAPA-SOLOS e o IAC, sendo um projeto de atualização do mapa de solos do Estado de São Paulo publicado em 1960, com ajuste de 8 mapas do Projeto RADAM BRASIL e 15 mapas do IAC. O Mapa pedológico do Estado de São Paulo (Figura 3.6) possui uma escala 1:500.000 (1cm=2.500 ha), com 387 pontos de amostragem representativos dos principais tipos de solos do território paulista (OLIVEIRA et al., 1999b).

Os tipos de solo presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga foram identificados a partir do recorte do mapa pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999a), Figura 3.6, conforme caracterizado no parágrafo, utilizando o limite da bacia hidrográfica.

Assim, foram identificadas três classes de solo, a saber: Podzólicos Vermelho-Amarelo (PVA) ou Argissolos Vermelho Amarelo (AVA), Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolos (CX) conforme apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.6- Mapa pedológico do Estado de São Paulo



Fonte: Oliveira et al. (1999a)

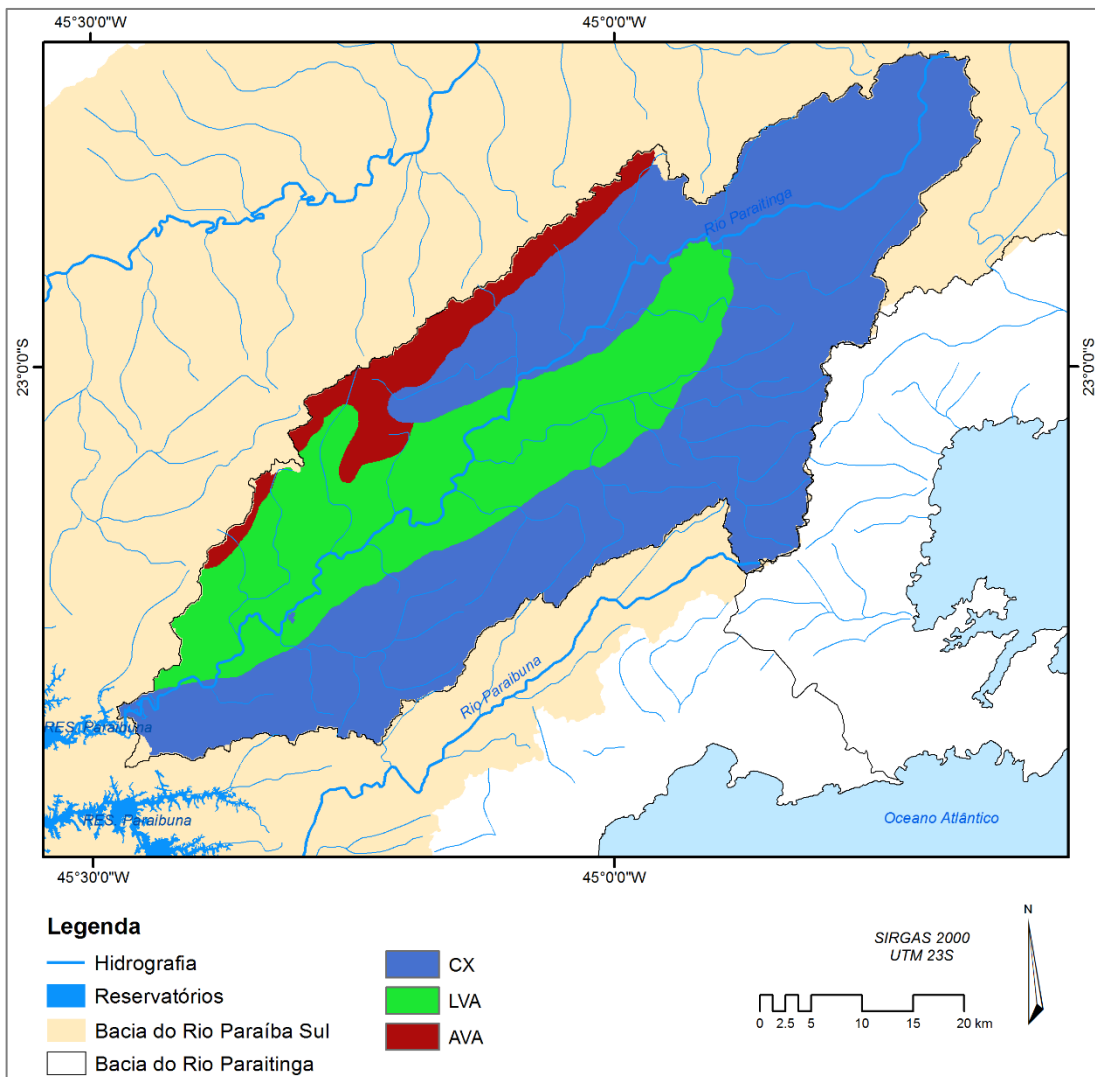
As características físicas e químicas para cada um dos três tipos de solos identificados na Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga, foram obtidas no Sistema de Informação de Solos Brasileiros disponibilizado no site da EMBRAPA-SOLOS (<https://www.sisolos.cnptia.embrapa.br/>).

O Sistema de Informação de Solos Brasileiros é um projeto desenvolvido pela EMBRAPA Informática Agropecuária cuja ideia reuniu em um banco de dados informações coletadas e analisadas dos solos brasileiros, por pesquisadores da própria EMBRAPA e de outras instituições. Estas informações foram armazenadas em um banco de dados e foram disponibilizadas gratuitamente.

O levantamento das características físicas e químicas dos três tipos de solos (AVA, LVA e CX) foi realizado a partir da seleção de informações relativas a quatro dos onze municípios pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga: Areias, Cunha, Guaratinguetá e São José do Barreiro (ver Quadro 3.4). Para os demais municípios não houve dados disponíveis.



Figura 3.7 - Classes de solo presentes na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (1999a)

Essas informações foram utilizadas para o cálculo para os parâmetros do modelo SWAT, utilizando equações de pedotransferência (PTF) desenvolvidas por Saxton e Rawls (2006).

Quadro 3.4 - Resumo dos dados físicos e químicos para cada tipo de solo para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga

Nome da variável do SWAT	Definição	Uso	Unidade	Argissolo Vermelho-Amarelo						Latossolo Vermelho-Amarelo		Cambissolos		
				AVA1	AVA2	AVA3	AVA4	AVA5	AVA6	LVA1	LVA2	CX1	CX2	CX3
SNAM	Nome do solo	opcional												
NLAYERS	Número de camadas para cada tipo de solo	requerida		6						2		3		
HYDGRP	Grupo Hidrológico dos solos (NRCS)	opcional	Letra	A						B		A		
SOL_ZMX	Profundidade máxima para enraizamento no solo	requerida	mm	430						150		100		
ANION_EXCL	Fração de porosidade (espaço vazio) a partir do qual os ânions são excluídos	opcional		0.50						0.50		0.50		
SOL_CRK	Potencial ou de volume máximo fissura do perfil do solo expressa como uma fração do volume total do solo	requerida		0.50	0.50					0.50		0.50		
TEXTURE	Textura da camada de solo	opcional												
SOL_Z1	Profundidade da superfície do solo até ao fim da camada	requerida	mm	20	50	160	290	380	430	120	150	30	60	100
SOL_BD1	Densidade aparente úmida	requerida	Mg/m <sup>3</sup> ou g/cm <sup>3</sup>	0.98	1.38	1.35	1.33	1.46	1.59	0.47	1.37	0.19	1.48	1.53
SOL_AWC1	Capacidade de água disponível na camada de solo	requerida	mm H <sub>2</sub> O/mm solo	0.16	0.12	0.09	0.10	0.12	0.08	0.21	0.11	0.25	0.10	0.12
SOL_K1	Condutividade hidráulica saturada	requerida	mm/hr	16.76	2.75	0.01	0.01	0.71	27.40	86.97	0.23	117.30	8.37	18.96
SOL_CBN1	Teor de carbono orgânico	requerida	%peso do solo	16.80	6.80	4.20	3.10	1.40	0.80	20.30	3.30	24.30	3.10	1.40
CLAY1	Conteúdo de argila, partículas de solo <0.002mm	requerida	%peso do solo	30.80	38.20	65.40	66.10	44.20	15.80	20.00	55.00	18.00	28.00	16.00
SILT1	Conteúdo de silte, partículas de solo entre 0.05 e 0.002mm	requerida	%peso do solo	8.00	8.60	5.60	3.90	12.60	13.70	13.00	12.00	10.00	11.00	36.00
SAND1	Conteúdo de areia, partículas de solo entre 2.0 e 0.05mm	requerida	%peso do solo	61.20	53.20	29.00	30.00	43.20	70.50	67.00	33.00	72.00	61.00	48.00
ROCK1	Conteúdo de fragmentos de rocha	requerida	% do peso total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SOL_ALB1	Albedo do solo úmido	requerida		0	0.01	0.03	0.07	0.23	0.35	0.00	0.06	0.00	0.07	0.23
USLE_K1	Equação de erodibilidade do solo USLE fator (k)	requerida	(0.013 tonelada métrica m <sup>2</sup> hr)/( m <sup>3</sup> tonelada métrica cm)	0.09	0.09	0.07	0.06	0.11	0.14	0.11	0.09	0.10	0.10	0.15
SOL_EC1	Condutividade elétrica	N	ds/m	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0

Fonte: Adaptado de Arnold et al. (2012a)

### **3.2.3.6 Declividade**

Na sequência, foi definido o valor da porcentagem da declividade utilizada para determinar o movimento da água na bacia hidrográfica. O modelo SWAT permite a escolha de duas opções para definir a declividade na bacia, a saber: i) uma única declividade (*single slope*) que determina um valor médio de declividade a ser utilizado em toda a bacia; ii) múltiplas declividades (*multiple slope*) que permitem a classificação de declividades em níveis diferenciados.

Para a BHRP, foi utilizada a opção de múltiplas declividades divididas em 3 categorias: 0 a 10%, 10 a 30% e >30% (a última classe deve utilizar o valor default máximo de 9999). Essa opção foi utilizada considerando a condição real da declividade na bacia em questão. Assim, as áreas de planícies ficaram na faixa com declividade entre 0 a 10%, as áreas medianas entre 10 a 30% e áreas próximas as serras consideradas com elevada declividade ficaram acima de 30%.

### **3.2.3.7 Dados de clima**

Os dados que compõe a base de clima foram obtidos de três fontes de dados diferentes: série histórica de precipitação proveniente das estações pluviométricas da ANA e DAEE apresentadas no Quadro 3.1; série histórica de vazão das estações fluviométricas da ANA apresentadas no Quadro 3.2 e demais dados clima necessários aos modelos, tais como temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar. Esses dados foram obtidos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Quadro 3.5), por meio de um cadastro e consulta no site do instituto, o qual possui dados atualizados para todo o país.

Quadro 3.5- Estações meteorológicas

<b>Código</b>	83714	83738	83784
<b>Estação</b>	Campos de Jordão/SP	Resende/RJ	Taubaté/SP
<b>Latitude</b>	-22,75	-22,45	-23,03
<b>Longitude</b>	-45,6	-44,44	-45,55
<b>Altitude (m)</b>	1642	440	577
<b>Município</b>	Campos de Jordão-SP	Resende-RJ	Taubaté-SP
<b>Período de dados</b>	1983-2014	1983-2014	1983-2014

Fonte: INMET (2016)

A implementação dos dados climáticos no modelo SWAT exigiu uma preparação antecipada, os dados tiveram que ser dispostos em uma tabela no formato “.txt” cujo cabeçalho foi a data inicial da série de dados com os quatro dígitos do ano, dois dígitos do mês e os dois dígitos do dia (p.ex. 19720101) e por encadeamento, foi inserido o valor do dado seguindo a ordem das datas diárias até o final da série de dados.

Além da tabela de dados, o modelo também requer a entrada de outra tabela com a localização das estações utilizadas no estudo, no caso da bacia do Rio Paraitinga foram utilizadas: sete estações pluviométricas e três estações meteorológicas, descritas anteriormente no item 3.3.5.

Cabe colocar que o modelo SWAT utiliza os dados climáticos das estações para recriar as condições de clima no centroide de cada sub-bacia. Assim sendo, ele não realiza nenhuma interpolação dos dados, apenas utiliza a estação mais próxima do centroide da sub-bacia para extrair os dados a serem utilizados no cálculo da evapotranspiração.

Em caso de falhas no banco de dados (descontinuidades), estas podem ser preenchidas utilizando o gerador de condições climáticas (*weather generator*) disponível na base de dados do próprio modelo. Este procedimento não foi necessário porque o banco de dados climáticos utilizado nesse trabalho não apresentou falhas.

### 3.2.3.8 Calibração e validação

No presente trabalho, anteriormente ao processo de calibração e validação foi feita uma análise de sensibilidade dos principais parâmetros necessários à simulação da Bacia Hidrográfica do Rio Paraitinga, obtidos a partir da literatura. Os parâmetros selecionados bem como as operações com eles realizadas estão apresentados no Quadro 3.6.

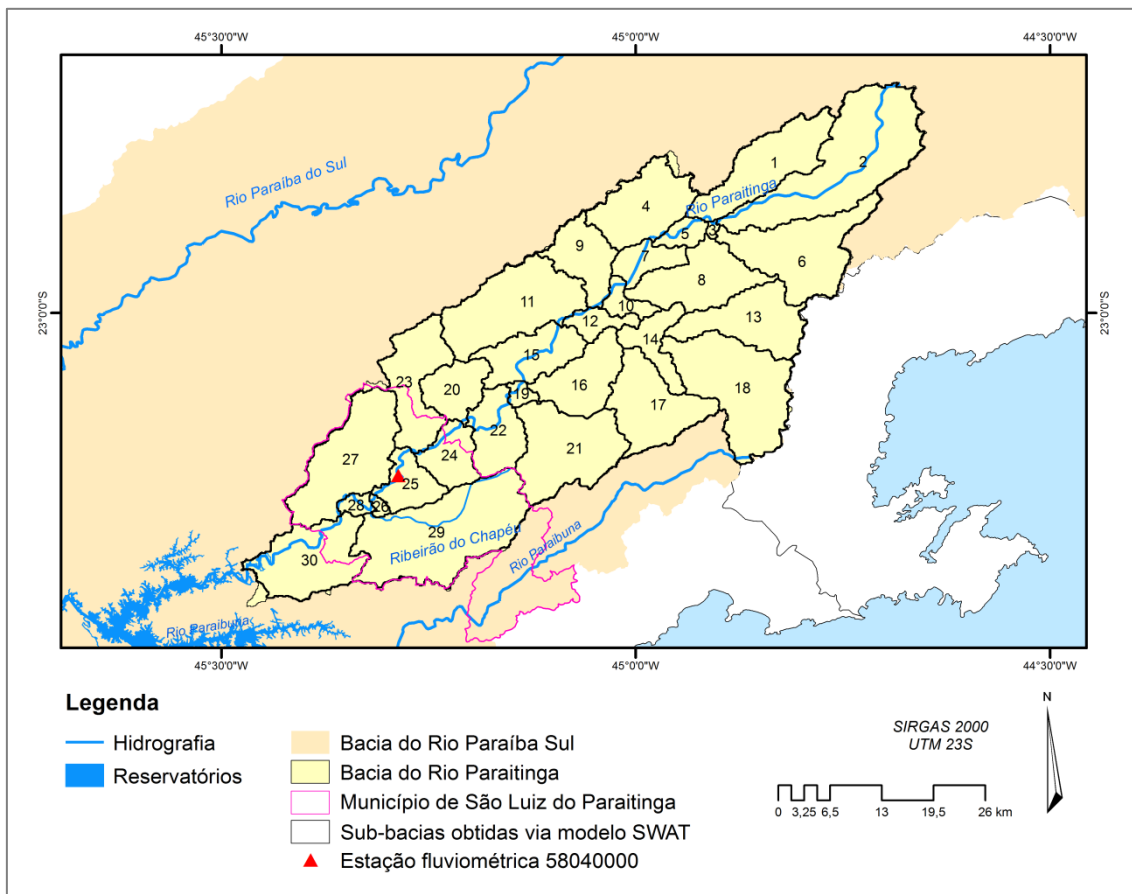
Quadro 3.6 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade.

Parâmetro	Definição	Unidade	Mínimo	Máximo	Tipo de alteração
CN2	Curva Número para escoamento inicial na condição de umidade II	Adimensional	35	98	Substituído para cada uso e cobertura
CANMX	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação	mm	0	10	Substituído para cada uso e cobertura
ESCO	Fator de compensação da evaporação de água no solo	Adimensional	0	1	Substituído
CH K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal	mm h <sup>-1</sup>	0	150	Substituído
ALPHA-BF	Coefficiente de recessão do escoamento de base	dias	0	1	Substituído
GWQMN	Limiar de profundidade da água no solo no aquífero raso requerido para ocorrer o fluxo de base	mm	0	5000	Substituído
GW-REVAP	Coefficiente de ascensão da água para zona de saturação	Adimensional	0.02	0.2	Substituído
REVAPMN	Limiar profundidade da água no aquífero raso para ocorrência da ascensão da água para zona de saturação	mm	0	500	Substituído
GW-DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero	dias	0	50	Substituído
RCHRG-DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo	mm	0	1	Substituído
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	Adimensional	0	10	Substituído

O processo de análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo SWAT requer a comparação entre os dados observados e simulados de vazão em diferentes períodos de tempo, para o ponto onde se localiza a estação fluviométrica de controle.

Para a calibração e validação do modelo SWAT na bacia hidrográfica do rio Paraitinga foram utilizados os dados da estação de São Luiz do Paraitinga (58040000) como estação fluviométrica de controle, tendo em vista tratar-se da estação mais a jusante na bacia (Figura 3.8).

Figura 3.8- Sub-bacias obtidas via SWAT



Fonte: Organização do autor (2016).

Cabe colocar que o período de coleta de dados observados da estação de controle (58040000-São Luiz do Paraitinga) iniciou-se em 01/02/1988 (ver Quadro 3.2) e que em comparação a dados simulados diferem em 4 anos, afinal o presente trabalho, utilizou o período compreendido entre 01/01/84 e

31/12/2011 para a simulação total (devido à disponibilidade de dados de precipitação para esse período). Assim, o período para calibração só foi iniciado a partir de 01/02/1988 até 31/12/1999 e o período 01/01/2000 a 31/12/2011 compreendeu o tempo necessário para validação dos resultados.

Durante a análise de sensibilidade, calibração e validação, os resultados foram avaliados por meio de uma análise de eficiência, a qual se utilizou as 3 métricas estatísticas descritas no item 3.2.3.

### **3.2.3.9 Mudanças no uso da terra**

Para a simulação da resposta hidrológica da BHRP decorrente das mudanças no uso e cobertura da terra, foi adotada a estratégia 3 descrita no item 3.2.2.3. Ou seja, na ferramenta *Land Use Update- LUP.DAT* foram elaborados 2 cenários:

Cenário 1 (C1): conversão do uso 'pastagem' em 'floresta';

Cenário 2 (C2): conversão do uso 'pastagem' em 'eucalipto'.

É importante mencionar que a área de floresta não corresponde necessariamente à floresta nativa da área de estudo, mas à categoria de floresta indicada pelo modelo.

Os cenários de uso e cobertura da terra foram obtidos com a ferramenta *Land Use Update-LUP.DAT* do modelo SWAT. A utilização dessa ferramenta possibilitou alterar a fração das HRU's com o tipo do uso e cobertura da terra escolhido (conforme C1 e C2) para as sub-bacias no mesmo período de análise da linha de base.

A utilização da ferramenta *LUP.dat* altera a fração da HRU com o uso e cobertura da terra proposto, porém não modifica os valores dos parâmetros da vegetação apresentados na Tabela 4.2, utilizados nas simulações. Dessa forma, para a simulação dos cenários, nas HRU's o uso 'pastagem' foi convertido para floresta e eucalipto, conforme cenários C1 e C2, respectivamente, apenas pela substituição dos parâmetros apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros da vegetação obtidos do banco de dados do modelo SWAT.

Parâmetro	Definição	Pasto	Floresta	Eucalipto
ICNUM	Código da planta	12	6	119
CPNM	Código de 4 letras que representa o nome do uso da terra	PAST	FRST	EUCA
IDC	Classificação da planta: 6 (perene); 7 (árvore);	6	7	7
CROPNAME	Nome do uso da terra	Pasto	Floresta Mista	Eucalipto
BIO_E	Eficiência do uso da radiação ou taxa de energia da biomassa	35	15	15
BLAI	Índice de área foliar potencial máximo	4	5	2,5
FRGRW1	Fração da estação de crescimento da planta no 1º ponto	0,05	0,05	0,15
LAIMX1	Fração do índice de área foliar máximo no 1º ponto	0,05	0,05	0,15
FRGRW2	Fração da estação de crescimento da planta no 2º ponto	0,49	0,4	0,5
LAIMX2	Fração do índice de área foliar máximo no 2º ponto	0,95	0,95	0,75
DLAI	Fração da estação quando área foliar começa a declinar	0,99	0,99	0,99
T_OPT	Temperatura ideal para crescimento da planta	25	30	20
T_BASE	Temperatura base mínima para crescimento da planta	12	10	7
USLE_C	Valor mínimo do fator USLE C para erosão da água aplicado para cobertura da planta ou terra	0,003	0,001	0,001
GSI	Condutância estomática máxima em alta radiação solar e déficit baixo de pressão de vapor	0,005	0,002	0,007
VPDFR	Variável que define o impacto do déficit pressão de vapor na condutância estomática	4	4	4
FRGMAX	Variável que define o impacto do déficit pressão de vapor na condutância estomática	0,75	0,75	0,75
WAVP	Taxa de declínio na eficiência do uso da radiação por unidade de aumento no déficit de pressão do vapor	10	8	3
BIOEHI	Taxa de energia da biomassa	36	16	20
RSDCO_PL	Coeficiente de decomposição do resíduo da planta	0,05	0,05	0,05
OV_N	Valores "n" Manning's para fluxo superficial	0,15	0,1	0,14
CN2A	Curva Número para o grupo hidrológico A	49	36	45
CN2B	Curva Número para o grupo hidrológico B	69	60	66
ALAI_MIN	Índice de área foliar mínimo para planta durante período dormente	0	0,75	0,75
BIO_LEAF	Fração da biomassa acumulada para cada ano que é convertido para resíduo durante a dormência	0	0,3	0,3
BMX_TREES	Máxima biomassa para uma floresta	0	1000	500
Categoria	Classificação do tipo de uso da terra	PAST	FRST	AGR

Fonte: Adaptada de Arnold et al. (2012a)



## **4 RESULTADOS**

Conforme exposto anteriormente, o evento extremo de chuva ocorrido em São Luiz do Paraitinga na passagem do ano de 2009/2010 foi atribuído, principalmente, a uma intensa e ampla chuva distribuída ocorrida no trecho paulista do Vale do Paraíba a qual, na bacia do rio Paraitinga, teria atingido o seu ápice na madrugada do dia 01/01/2010. No entanto, a despeito da grande intensidade de chuva registrada nesse dia, outros fatores foram também apontados como potenciais responsáveis pela severidade do evento de cheia no centro histórico da cidade são eles: i) eventos de chuva precedentes teriam saturado o solo local fazendo com que praticamente toda a água precipitada incidente na bacia no dia do evento se transformasse imediatamente em escoamento superficial (SOARES e SOARES, 2010; DIAS et al. 2011; MEDEIROS e BARROS, 2013); ii) alterações no uso e cobertura da terra na bacia, resultantes do processo de desmatamento ocorrido nas últimas décadas, teriam contribuído para o expressivo aumento das descargas no dia do evento (SOARES e SOARES, 2010; DIAS et al., 2011 e RODRIGUES, 2012).

No presente capítulo, algumas das hipóteses acima foram testadas e avaliadas a partir de análise da série histórica observada de dados de precipitação e vazão, como apresentado a seguir no item 4.1, ou através de simulações de descargas a partir do uso do modelo SWAT (item 4.2).

### **4.1 Tendências de precipitação e vazão: caracterização do evento com base em séries históricas observadas**

Na presente seção é feita uma análise das séries temporais dos dados de vazão para as estações fluviométricas localizadas nas bacias dos rios Paraitinga e Paraibuna. Esta análise teve como objetivo verificar a existência de alguma tendência no regime de descargas capaz de fornecer indícios de eventual resposta hidrológica (aumento ou diminuição nas vazões) em decorrência de mudanças no uso e cobertura da terra ocorrida na região no último século ou de alterações no regime de chuvas na região. Para tanto, os

dados de descarga foram comparados com séries históricas de precipitação nas bacias do rio Paraitinga e Paraibuna como é apresentado na seção a seguir.

#### **4.1.1 Análise do evento extremo de cheia de 2009/2010 com base em dados observados de precipitação**

Para avaliar a distribuição da precipitação ocorrida na passagem de ano de 2009/2010 a partir de dados observados foram feitas análises dos dados mensais para o ano hidrológico (setembro a agosto) (Figura 4.1) e da precipitação diária em função da cota para o período chuvoso (setembro a março) do ano hidrológico de 2009/2010 (Figura 4.2).

Conforme a Figura 4.1, a precipitação média mensal do ano hidrológico foi comparada com a precipitação média mensal histórica disponível em cada estação (Quadro 3.1). Foram consideradas, para essa análise, as estações pluviométricas localizadas na bacia do rio Paraitinga, ou seja, as estações de Campos de Cunha, Estrada de Cunha, São Luiz do Paraitinga e Altos da Serra do mar.

De acordo com os dados apresentados na Figura 4.1, todas as estações pluviométricas consideradas no presente estudo registraram precipitação mensal nos meses de dezembro de 2009 e janeiro de 2010 muito acima da média mensal histórica dos mesmos. Observa-se ainda que as estações de Campos de Cunha e Altos da Serra do Mar, localizadas nas cabeceiras, haviam registrado altos índices de chuva nos meses anteriores (Figuras 4.1 e 4.2). A Estação de Campos de Cunha exibiu uma anomalia positiva na precipitação em relação à média em outubro de 2009 e as estações de Altos da Serra do Mar, Campos de Cunha e Estrada de Cunha apontaram anomalias positivas de precipitação em relação à média em novembro de 2009. Assim sendo, era de se esperar que em dezembro o solo se encontrasse encharcado, o que teria favorecido, segundo Dias et al. (2011), o processo de escoamento superficial em detrimento à infiltração da água no solo.

Figura 4.1 - Média mensal histórica da precipitação nas estações pluviométricas da BHRP comparadas com a média mensal registrada no ano hidrológico de 2009/2010

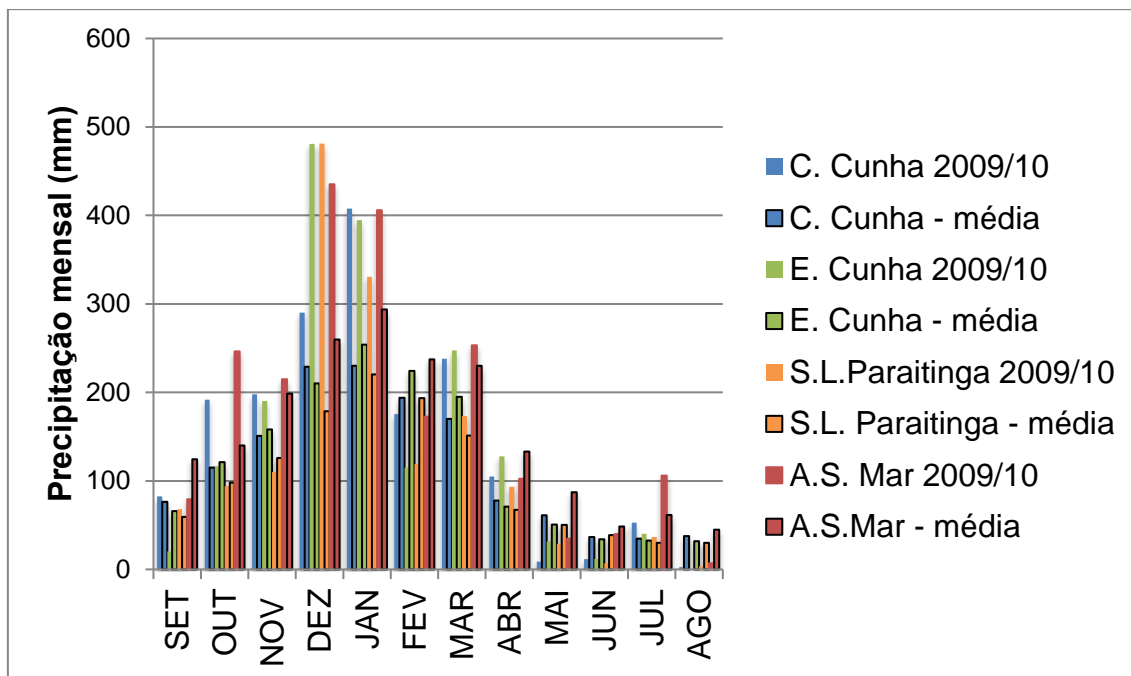
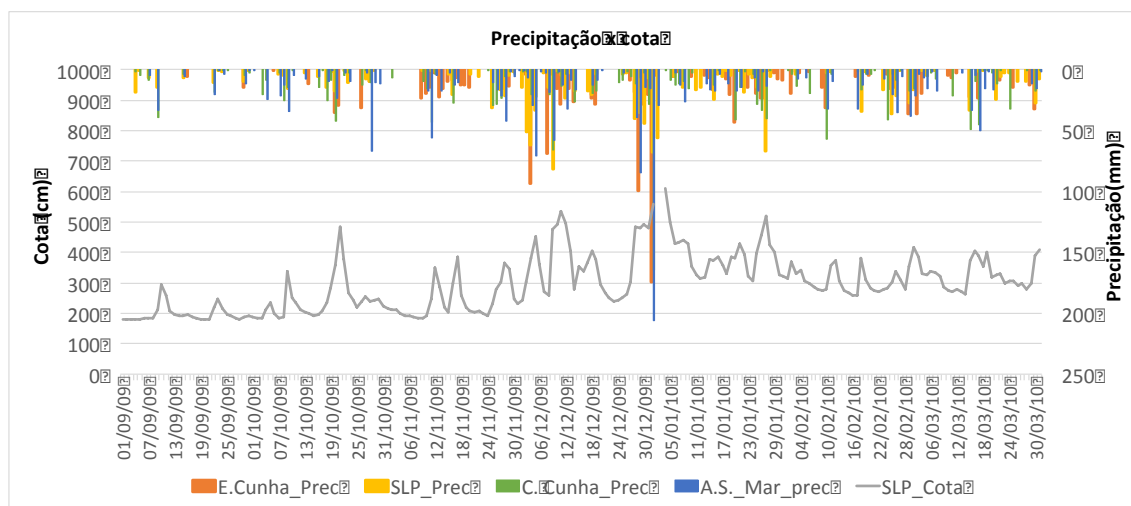


Figura 4.2 - Relação entre cota da estação de SLP e precipitação diária para as estações Estrada de Cunha, Campos de Cunha, Altos da Serra do mar e São Luiz do Paraitinga para o período chuvoso de 2009/2010 (setembro de 2009 a março de 2010)



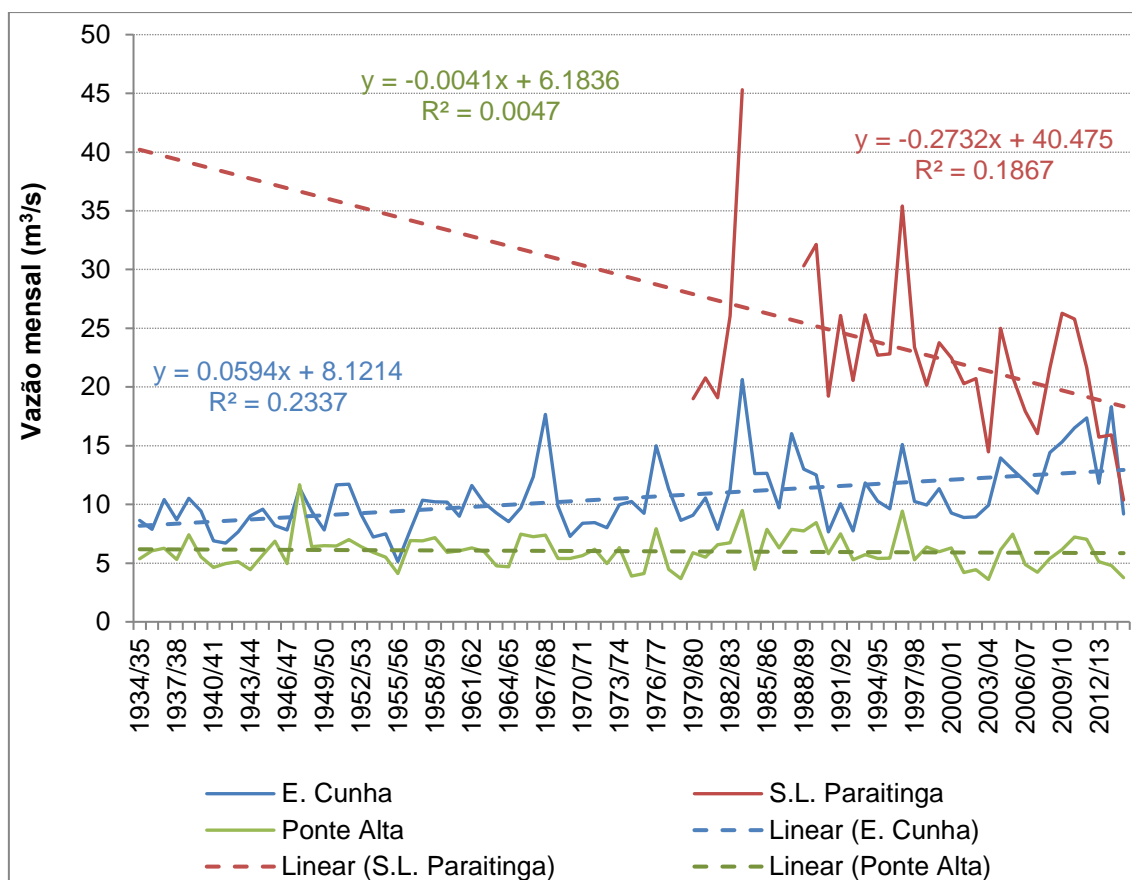
No entanto, anomalias positivas na precipitação ainda mais pronunciadas foram observadas em dezembro de 2009 e janeiro de 2010, as quais, de acordo com a Figura 4.2, teriam ocorrido de forma concentrada nos dias 31/12/2009 e 01/01/2010. Assim sendo, ainda que a hipótese de saturação do solo possa ser mantida, por si só ela não seria capaz de explicar as dimensões da inundação ocorrida no centro histórico do município de São Luiz do Paraitinga.

#### **4.1.2 Série histórica de vazão e precipitação**

Para considerar alguma mudança no padrão de descargas como resposta às alterações no uso e cobertura da terra ou no regime de precipitação foi analisada séries históricas de dados observados de precipitação e de vazão para as estações localizadas nas bacias dos rios Paraitinga e Paraibuna, apresentadas nos Quadros 3.1 e 3.2 e na Figura 3.2.

A Figura 4.3 apresenta a série histórica das médias mensais de vazão para cada ano hidrológico (setembro a agosto) e respectivas linhas de tendência (regressão linear) para as 3 estações fluviométricas consideradas: São Luiz do Paraitinga, Estrada de Cunha e Ponte Alta.

Figura 4.3 - Série histórica de vazão (médias mensais) para as estações fluviométricas de Estrada de Cunha (azul sólido), São Luiz do Paraitinga (vermelho sólido) e Ponte Alta (verde sólido) e respectivas linhas de tendência (tracejada na cor de cada estação)



Analisando-se a Figura 4.3, são verificadas tendências distintas nos regimes de vazão das três estações consideradas. Na estação de Ponte Alta, localizada na bacia do rio Paraibuna, observa-se a tendência de estacionariedade no regime de descarga, ou seja, não há tendência pronunciada de variação das vazões com o tempo. Nas estações localizadas na bacia do rio Paraitinga (Estrada de Cunha e São Luiz do Paraitinga), um comportamento aparentemente antagônico pode ser observado a partir das linhas de tendência: enquanto os registros da estação de Estrada de Cunha apontam para uma tendência de aumento nas vazões médias mensais com o tempo, os dados provenientes da estação de São Luiz do Paraitinga apontam para um comportamento oposto, ou seja, uma tendência de diminuição das descargas médias mensais com o tempo.

Cabe ressaltar, no entanto, que o período de dados analisados difere para as 3 estações: as estações à montante, Estrada de Cunha e Ponte Alta, apresentam registros iniciados em 1936 e a estação de São Luiz do Paraitinga iniciou os registros a partir de 1979. Ainda assim, nessa estação, a linha de tendência foi gerada considerando um período de 36 anos de dados, o que pode ser considerado satisfatório para uma análise climatológica.

Buscando investigar a ocorrência de fatores que potencialmente teriam contribuído para as tendências das vazões observadas em cada uma das estações consideradas, as séries históricas das vazões foram analisadas à luz das tendências das séries históricas de precipitação. Para tanto, nas Figuras 4.4 a 4.6, são apresentadas as séries históricas de vazão para cada uma das 3 estações fluviométricas consideradas, Ponte Alta, Estrada de Cunha e Campos de Cunha, bem como as tendências de cada uma dessas séries, além das séries históricas de precipitação de cada uma das estações pluviométricas potencialmente contribuintes para as descargas de cada estação fluviométrica em análise. Desse modo, para a estação fluviométrica de Estrada de Cunha, foram consideradas as contribuições das estações pluviométricas de Campos de Cunha, Estrada de Cunha e São Luiz do Paraitinga (Figura 4.4), para a estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga foram consideradas as estações pluviométricas de Campos de Cunha, Estrada de Cunha, Altos da Serra do Mar e São Luiz do Paraitinga (Figura 4.5) e para a estação fluviométrica de Ponte Alta foram consideradas as estações pluviométricas de Ponte Alta e Altos da Serra do Mar (Figura 4.6). A seleção das estações pluviométricas que potencialmente contribuem para cada estação fluviométrica foi feita com base na localização das estações apresentadas na Figura 3.2 (ver seção 3.1.2).

A partir da localização das estações apresentadas na Figura 3.2 (seção 3.1.2), foi admitida a hipótese de que as chuvas registradas nas estações de Campos de Cunha, Estrada de Cunha e São Luiz do Paraitinga seriam as que mais contribuiriam para as descargas registradas na estação de São Luiz do Paraitinga, localizada à jusante e relativamente mais próxima do exultório da BHRP. Por outro lado, para as descargas registradas na estação fluviométrica de Estrada de Cunha, localizada à montante e mais próxima do exultório, as

estações pluviométricas potencialmente contribuintes seriam as de Campos de Cunha, Estrada de Cunha e, em menor proporção, a estação de Altos da Serra do Mar. Na BHRP, a única estação fluviométrica com dados históricos suficientemente longos foi a de Ponte Alta. Para esta estação, as chuvas registradas através das estações de Altos da Serra do Mar e a própria estação Ponte Alta são as potenciais contribuintes.

Figura 4.4 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de Campos de Cunha (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação nas estações de Campos de Cunha (laranja), Estrada de Cunha (verde) e São Luiz do Paraitinga (azul) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015

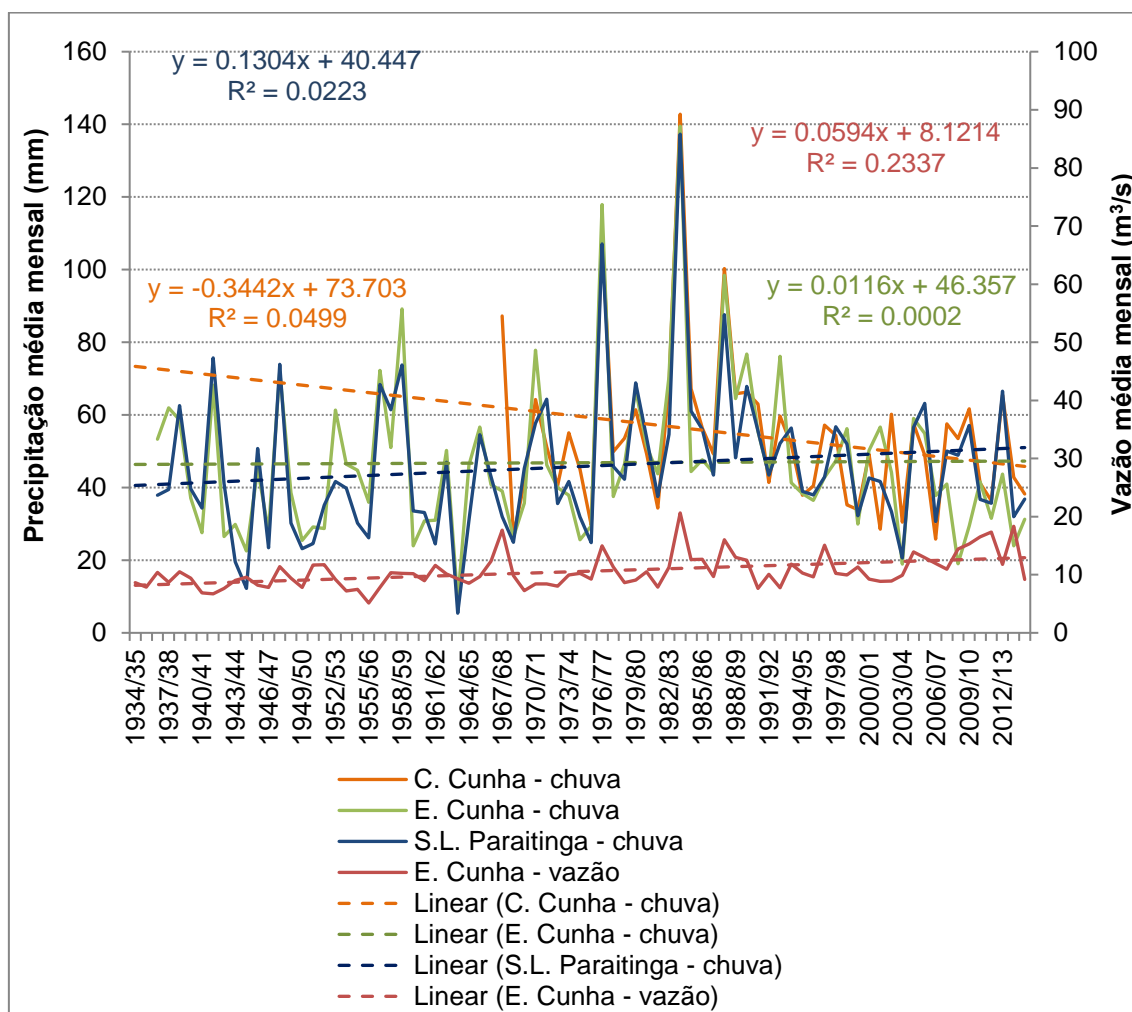


Figura 4.5 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação nas estações de Campos de Cunha (laranja), Estrada de Cunha (verde), São Luiz do Paraitinga (azul) e Altos da Serra do Mar (roxo) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015

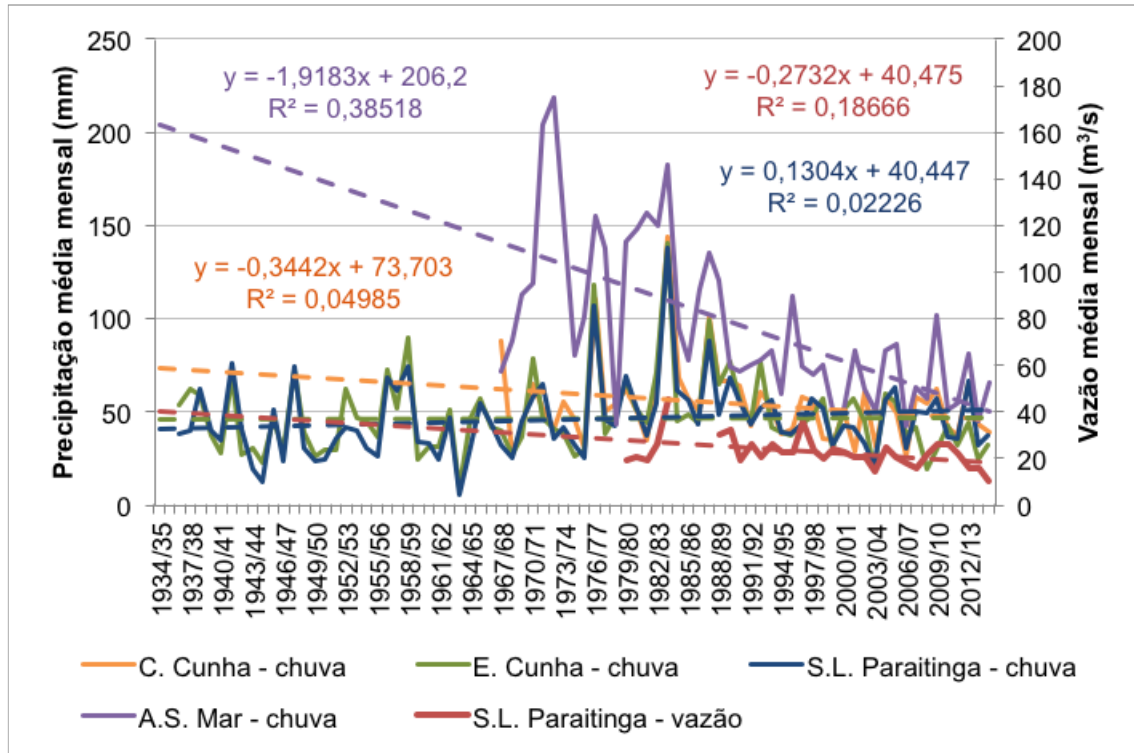
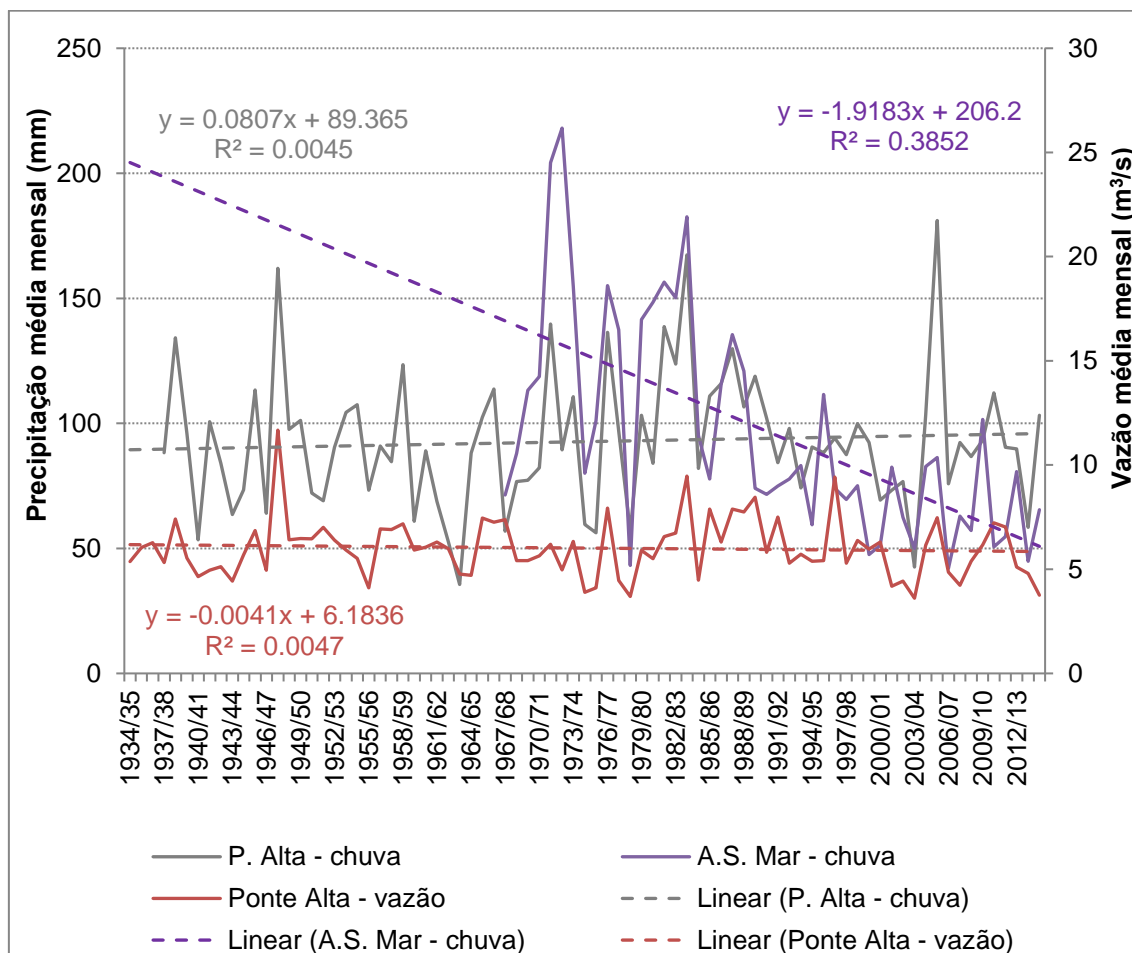




Figura 4.6 - Série histórica da vazão na estação fluviométrica de Ponte Alta (vermelho sólido) e respectiva linha de tendência (vermelho tracejado) em comparação com a série histórica de precipitação nas estações de Campos de Ponte Alta (cinza) e Altos da Serra do Mar (roxo) e respectivas linhas de tendência (tracejadas) para o período de 1934 a 2015



Conforme observa-se na Figura 4.4, para a estação fluviométrica de Estrada de Cunha, a tendência de aumento das vazões ao longo do tempo acompanha a tendência de aumento da precipitação observada nas estações pluviométricas de Estrada de Cunha e também de São Luiz do Paraitinga. Porém, é contrária à tendência de precipitação decrescente no período observado na estação de Campos de Cunha. Cabe colocar, no entanto, que a série histórica de precipitação em Campos de Cunha é aproximadamente 30 anos mais curta que a série histórica das demais estações analisadas (Quadro 3.1).

Seguindo a mesma linha de raciocínio, a tendência de diminuição das vazões com o tempo observada na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga (Figura 4.5) poderia ser explicada, em parte, pela diminuição das chuvas observadas nas estações de Campos de Cunha e, em maior escala, na estação de Altos da Serra do mar.

Para a estação fluviométrica de Ponte Alta localizada na BHRP, a tendência de estacionariedade das vazões possivelmente seja melhor explicada pela tendência histórica das chuvas observadas na estação de Ponte Alta<sup>1</sup> do que pela forte tendência de diminuição observada na estação de Altos da Serra do Mar (Figura 4.6).

#### **4.1.3 Análise e discussão dos resultados das séries históricas de precipitação e vazão**

No que se refere à climatologia das vazões, observam-se tendências temporais distintas em cada uma das três estações fluviométricas analisadas. Enquanto, ao longo do rio Paraitinga, a estação de Estrada de Cunha, a montante da bacia, apresentou uma leve tendência de aumento das descargas ao longo do tempo, a estação de São Luiz do Paraitinga, a jusante, mostrou tendência de diminuição das descargas com o tempo. Uma vez que ambas as estações estão localizadas ao longo de um mesmo rio, essa diferença no comportamento da vazão, em um primeiro momento, é difícil de ser compreendida com base em variações naturais no regime de descargas. Por outro lado, também não se tem registro de captação de água na bacia no trecho compreendido entre Cunha e São Luiz do Paraitinga que possa ter promovido uma alteração no regime de descarga em pontos a jusante.

Uma possível explicação para esse comportamento poderia ser a ocorrência de falhas na série histórica em uma das duas estações consideradas. Enquanto a série histórica da estação de Estrada de Cunha abrange um período de cerca de 80 anos (1936 a 2012), a estação de São Luiz do Paraitinga abrange um período de cerca de somente 30 anos (1979 a 2012) e ainda apresenta falhas nos dados entre 1985 e 1989. Dessa forma, é possível que a série histórica de

dados da estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga não seja suficientemente satisfatória para inferir alguma tendência de mudança na descarga hídrica ao longo do tempo.

Por outro lado, não se pode deixar de observar a concordância entre a diminuição da chuva ao longo do tempo na estação de Altos da Serra do Mar e a diminuição das descargas ao longo do tempo observada na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga. A julgar pela localização dessas estações e levando-se em conta que a estação de Altos da Serra do Mar é, dentre as estações analisadas, a que registra maiores índices pluviométricos, não é difícil supor que ela deva exercer alguma influência sobre o regime de descarga registrado em São Luiz do Paraitinga.

No que se refere ao evento extremo de cheia ocorrido na passagem de ano de 2009/2010, confirma-se, a partir dos dados observados, a forte influência de uma chuva excepcional ocorrida na região de estudo – e não somente na bacia do rio Paraitinga – e que teria elevado em muitos metros o nível do rio na altura do centro histórico do município de São Luiz do Paraitinga.

#### **4.2 Simulação da descarga na bacia do rio Paraitinga com o modelo SWAT**

Conforme exposto no item 2.5, as mudanças mais expressivas no uso e cobertura da terra ocorridas na região de estudo se deram especialmente nos séculos XIX e XX. Assim sendo, ainda que a região possua registros de chuva e vazão relativamente longos em comparação com outras regiões do país – da ordem de 80 anos, esses dados, conforme discutidos anteriormente muito provavelmente não capturaram nenhuma mudança muito expressiva nos usos e ocupações da terra na região.

Portanto, para uma análise da potencial influência de mudanças no uso e cobertura da terra ocorridas na bacia do rio Paraitinga antes do início dos registros de precipitação e vazão, optou-se pelo uso do modelo SWAT. Como relatado nesse trabalho, a proposta de uso do modelo foi simular descargas que poderiam ser esperadas considerando os dados observados de

precipitação nas estações pluviométricas acima descritas considerando-se três situações distintas: i) uso e cobertura atual na bacia (dados de 2005 – linha de base, LB); ii) substituição dos atuais usos de pastagem por usos de floresta (cenário C1) e iii) substituição dos atuais usos de pastagem por eucalipto (cenário C2).

A criação dos cenários, como mencionado, foi feita por meio do uso da ferramenta LUP.dat que reescreve, para os usos selecionados, os parâmetros da vegetação do novo uso. No caso do Cenário 1, a mudança de pastagem para floresta simplesmente expandiu os parâmetros adotados para floresta para as novas áreas de floresta da BHRP. Procedimento semelhante foi realizado para o Cenário 2, com a alteração das áreas de pastagem para eucalipto.

Este método com o qual foram construídos os cenários C1 e C2, embora não seja o ideal, visto que seria mais adequado o emprego de mapeamentos pretéritos de uso e cobertura da terra, possibilita considerar (simular) a configuração de cobertura do solo no início do século XIX onde a região da BHRP era recoberta por floresta nativa (Mata Atlântica) como mencionado no Capítulo 2. Dessa maneira, foi possível avaliar se havendo cobertura florestal densa na BHRP (floresta nativa) os valores de vazão ocorridos no dia do evento seriam alterados expressivamente.

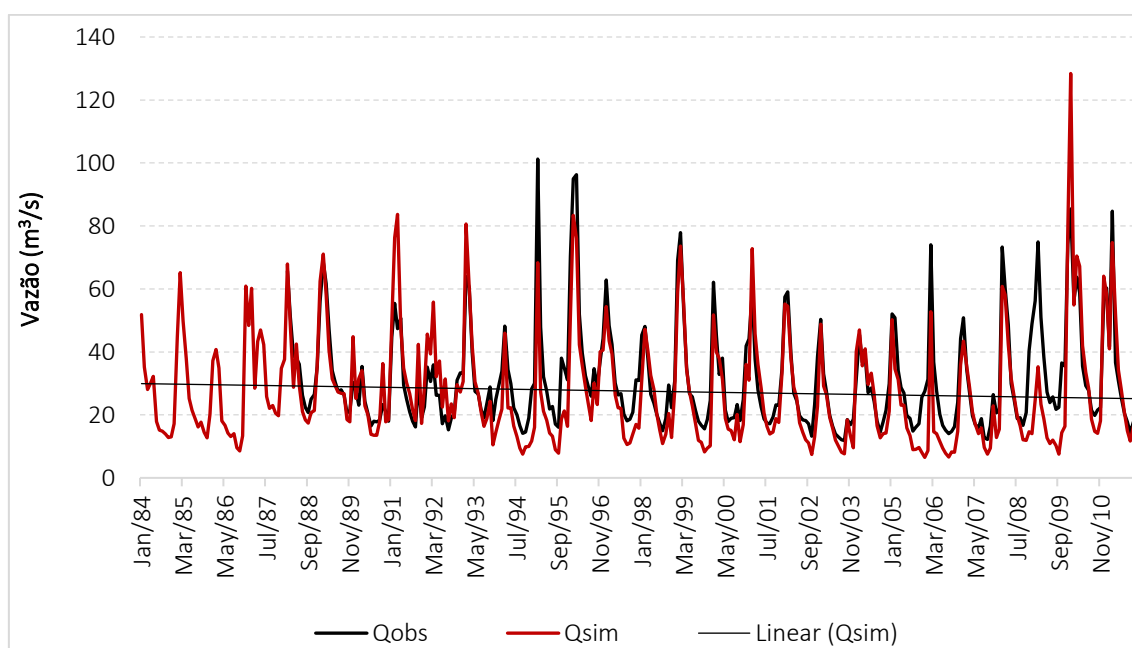
No contexto da aplicação neste trabalho, uma saída importante gerada pelo modelo SWAT foi a vazão ocorrida no dia do evento. Conforme apresentado na Figura 4.2, para os dias do evento (31/12/09 e 01/01/10) foram registrados valores de cota através da régua presente no local. No entanto, o sistema Hidroweb da ANA não disponibilizou os respectivos dados de vazão. Esse é um comportamento esperado visto que, com o extravasamento da calha do rio, a curva chave não é válida.

#### **4.2.1 Simulação da série histórica**

A simulação das vazões médias mensais para o período 1984-2011 envolveu as etapas descritas no item 3.2.3, a saber: i) extração da rede de drenagem; ii) delimitação da bacia; iii) delimitação das sub-bacias; iv) entrada dos dados de uso e cobertura da terra, tipos de solo, vegetação e dados de clima. A execução dessas etapas deu origem a 30 sub-bacias (ver Figura 3.8), das quais, a de maior interesse para o presente estudo é a 25 pois abrange o centro histórico do município de São Luiz do Paraitinga, região na qual ocorreu o evento extremo de cheia. Além disso, as simulações das descargas médias mensais foram calibradas e validadas conforme procedimento descrito no item 3.2.3.8 do Capítulo 3 cujos resultados estão apresentados no Apêndice A.

Para avaliar a qualidade dos resultados da simulação na série histórica simulada foi realizada uma comparação entre a vazão média mensal observada e a vazão média mensal simulada, conforme apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Comparação entre a vazão média mensal observada ( $Q_{obs}$ ), em preto e a vazão média mensal simulada ( $Q_{sim}$ ), em vermelho



Observa-se que após a realização da série de etapas necessárias à calibração do modelo, obteve-se um comportamento bastante satisfatório, principalmente no que se refere à sazonalidade. Ou seja, o modelo representa adequadamente os períodos de máxima e mínima descarga. Porém, em geral,

observa-se que nos eventos extremos de cheia o modelo tende a subestimar a vazão máxima e mínima. Isso foi observado, por exemplo, nos anos de 1995, 2006, 2007, 2008 e 2009 como mostrado na Figura 4.7. No entanto, para o evento extremo de cheia ocorrido em 2009/2010, o modelo retornou uma vazão média mensal de 128,4 m<sup>3</sup>/s para o mês de janeiro de 2010, valor este expressivamente superior às vazões médias máximas para os meses de janeiro no período analisado. Esse valor também foi superior à vazão média mensal registrada na estação São Luiz do Paraitinga, que foi de 85,4 m<sup>3</sup>/s para o mesmo mês (janeiro de 2010). Avalia-se que a diferença de cerca de 50% para mais na vazão média simulada em relação à vazão média observada para o mês de janeiro de 2010 tenha sido devido ao forte extravasamento da calha do rio no dia do evento. Este fato implicou que a média mensal da descarga registrada na estação para o período do evento não foi estimada corretamente devido à ausência de dados de vazão para o dia do evento e para os 5 dias subsequentes.

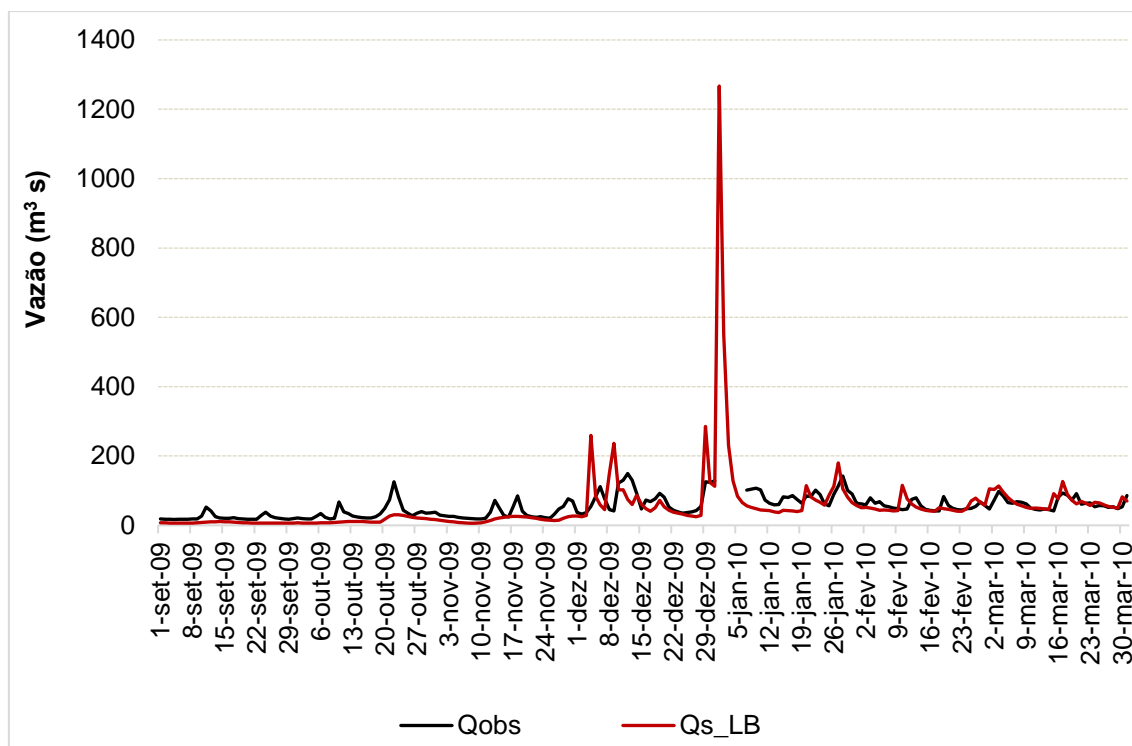
Um aspecto interessante pode ser ainda observado na Figura 4.7: houve uma tendência de diminuição não muito significativa das descargas observada na estação de São Luiz do Paraitinga (ver item 4.1.2.). Além de simular de forma satisfatória o evento extremo ocorrido na passagem de ano de 2009/2010, o modelo também captou a tendência de diminuição das vazões médias mensais verificadas nessa estação para o período de tempo compreendido entre 1984 e 2011. Uma maior discussão sobre esse comportamento é apresentada a seguir.

#### **4.2.1.1 Simulação da descarga ocorrida no dia do evento**

A Figura 4.8 apresenta a vazão diária simulada para o período chuvoso do ano hidrológico de 2009/2010, ou seja, de setembro de 2009 a março de 2010. Apesar do modelo ter sido calibrado utilizando-se as vazões mensais, observa-se uma boa concordância entre as vazões diárias simuladas e observadas para o período em análise. Observa-se ainda que, de acordo com o modelo, o valor

de vazão simulada para o dia do evento foi de 1.267 m<sup>3</sup>/s no dia 1 de janeiro de 2010, seguido do valor de 550 m<sup>3</sup>/s para o dia 2 e 230m<sup>3</sup>/s para o dia 3/01/2010.

Figura 4.8 - Comparação entre a vazão diária observada e a vazão diária simulada para o dia do evento extremo de cheia 2009/2010.



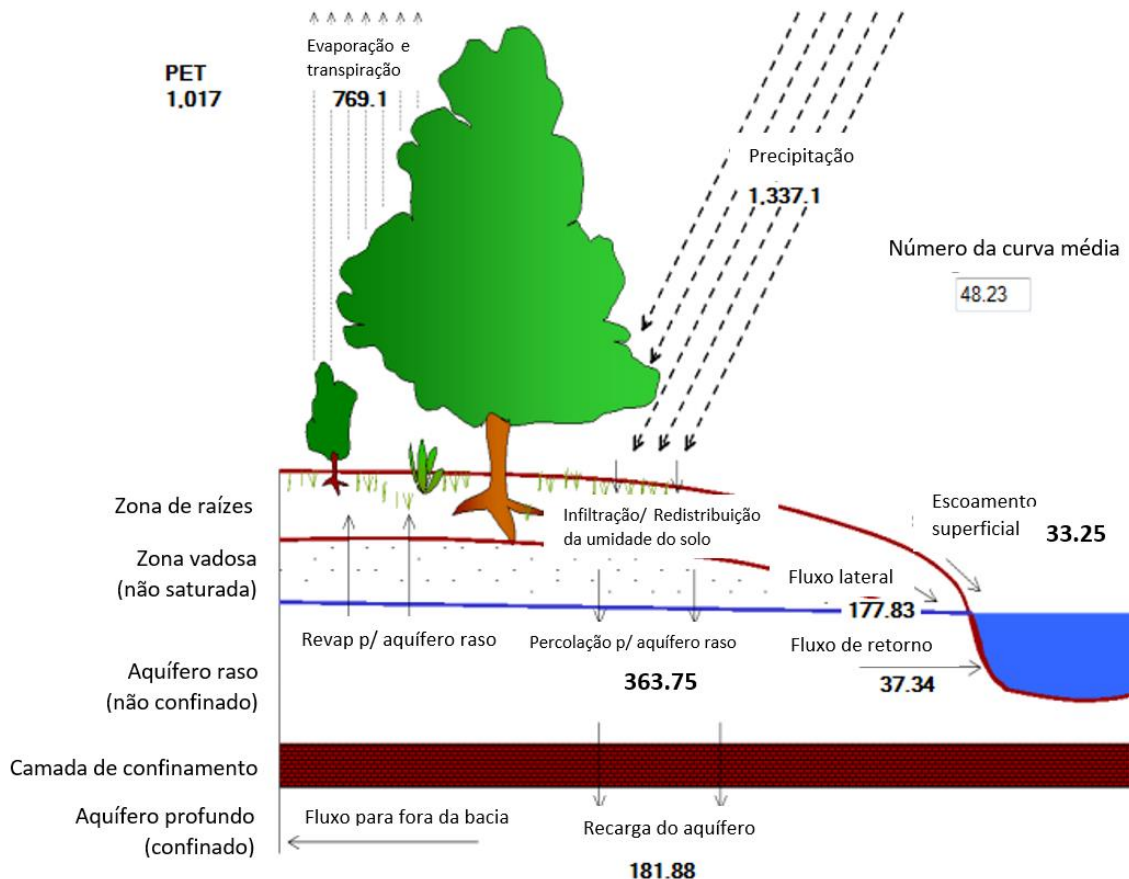
\*LB é a Linha de Base

Além de permitir a simulação das descargas médias diárias com o objetivo de completar os dados faltantes da série histórica de vazões para o dia do evento, o modelo SWAT também fornece informações acerca das demais variáveis do balanço hídrico, tais como: evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, armazenamento de água no solo e produtividade hídrica. Apresenta-se, a seguir, uma análise do comportamento dessas variáveis com vistas a um melhor entendimento dos processos que atuam na bacia do rio Paraitinga e que teriam atuado no dia do evento em questão.

#### 4.2.2 Análise das tendências de comportamento da evapotranspiração, escoamento superficial, percolação, armazenamento de água no solo, produtividade hídrica simuladas por meio do SWAT

A partir da simulação da descarga média mensal que deu origem à Figura 4.7 foram computadas as demais variáveis do balanço hídrico, evapotranspiração potencial e real, escoamento superficial, percolação de água para o interior do solo, armazenamento de água no solo e produtividade hídrica. A Figura 4.9 apresenta um resumo do balanço hídrico médio anual para o período de tempo considerado nas simulações, ou seja, 1984 a 2011.

Figura 4.9 - Balanço hídrico médio anual dos resultados da simulação.



A partir da Figura 4.9 observa-se que, dos aproximados 1340 mm anuais de precipitação que incidem na bacia, aproximadamente metade (~769 mm) retornam para a atmosfera sob a forma de evapotranspiração. Em segundo

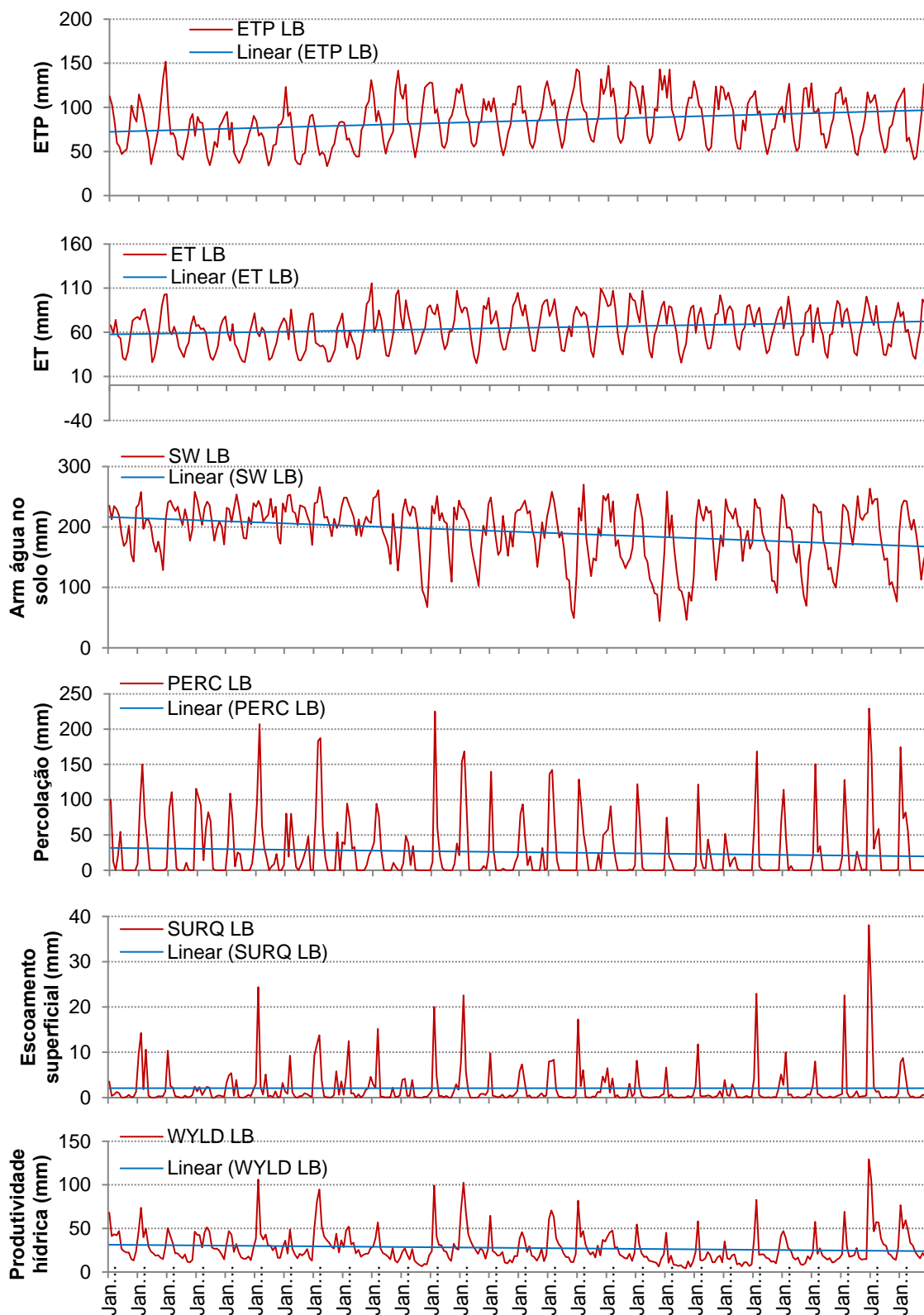


lugar, em termos de quantidade de água, tem-se o processo de infiltração e percolação da água no solo, por meio dos quais infiltram cerca de 360 mm de água anualmente. Em adição a isso e como consequência das elevadas taxas de evaporação e infiltração, tem-se um valor relativamente baixo do escoamento superficial rápido, composto pelos fluxos de superfície e sub-superfície (~210 mm).

Apesar da predominância de pastagem na região, a associação dos fatores declividade, tipo e espessura da camada de solo (descritos no item 3.2.3) possivelmente favoreceram os processos de evapotranspiração e infiltração em detrimento ao escoamento superficial. As taxas de evapotranspiração relativamente altas, por sua vez, estão relacionadas não somente às características do solo e da vegetação, mas também às forçantes atmosféricas que atuam na bacia que são discutidas em maior detalhe ao longo desse item.

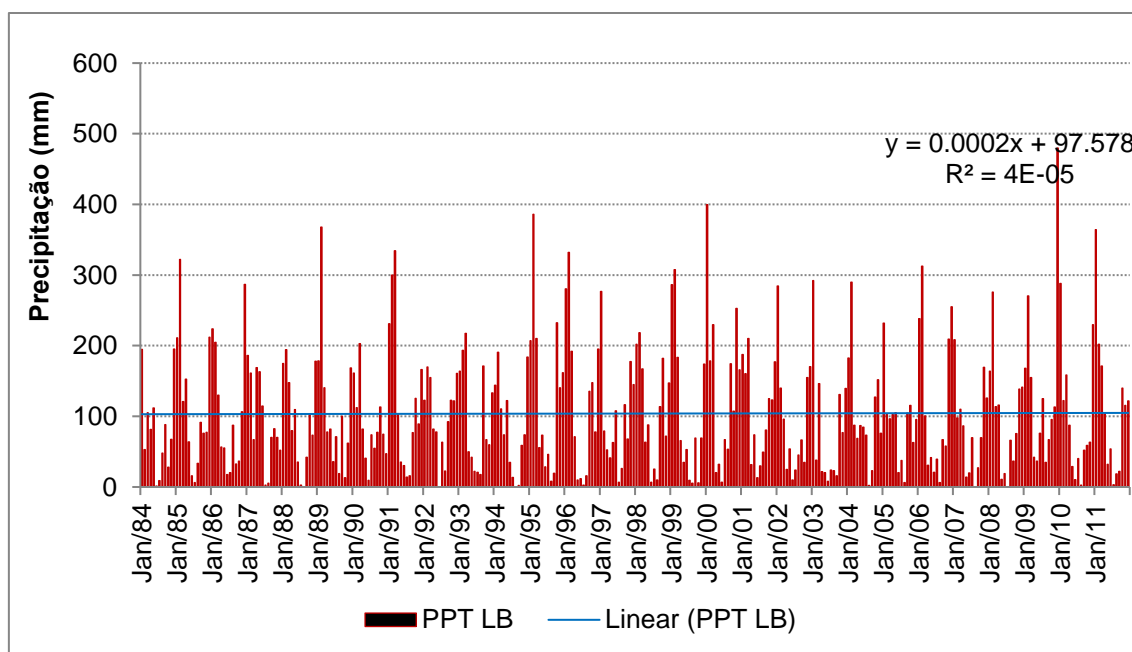
O resumo dos valores obtidos (média anual do período todo) para cada componente do balanço hídrico apresentado na Figura 4.9 pode ser visualizado sob a forma de série histórica. Assim, na Figura 4.10 apresentam-se, respectivamente, os valores mensais de evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ET), armazenamento de água no solo (SW), percolação (PERC), escoamento superficial (SURQ), produtividade hídrica (WYLD) e na Figura 4.11 está apresentada a precipitação (PRECIP). Por se tratarem de componentes do balanço hídrico, essas variáveis estão expressas em mm de água.

Figura 4.10 - Valores mensais simulados de a) evapotranspiração potencial (ETP), b) evapotranspiração real (ET), água armazenada no solo (SW), percolação (PERC), escoamento superficial (SURQ), produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período compreendido entre 1984 e 2011.



Observa-se através da Figura 4.10 que a evapotranspiração potencial e, em menor escala, a evapotranspiração real apresentaram uma tendência de aumento com o tempo. Por outro lado, a água armazenada no solo, a percolação para o interior do solo e a produtividade hídrica apresentaram uma tendência de diminuição com o tempo. Dessas três, a água armazenada no solo foi a que apresentou uma tendência mais pronunciada de diminuição ao longo do período de tempo analisado. No que se refere à percolação, não se observou nenhuma tendência pronunciada de variação ao longo do tempo, o mesmo tendo ocorrido com a precipitação, cujas médias mensais e tendências temporais estão apresentadas na Figura 4.11

Figura 4.11 - Valores do acumulado mensal simulado da precipitação (PPT) para linha base, em mm, para o período compreendido entre 1984 e 2011



Conforme já havia sido observado nos dados *in situ* (item 4.1), na região próxima ao centro histórico de São Luiz do Paraitinga (sub-bacia 25), a precipitação praticamente não apresentou tendência de aumento ou diminuição ao longo do período considerado. Dentre as componentes do balanço hídrico anteriormente apresentado, apenas o escoamento superficial seguiu uma tendência semelhante à da precipitação, permanecendo praticamente estacionária ao longo de todo o período considerado. Ainda, corroborando o

comportamento observado das vazões na estação de São Luiz do Paraitinga, a produtividade hídrica simulada apresentou tendência de diminuição nesse período. Associado a esse fato foi detectada a tendência de diminuição da água armazenada no solo, e de forma menos aparente, também na percolação da água no solo, concomitante a um aumento da evapotranspiração potencial e real nesse mesmo período.

Assim sendo, considerando-se que: i) a precipitação e o escoamento superficial permaneceram inalterados; ii) a infiltração e a umidade do solo diminuíram e iii) houve um concomitante aumento da evapotranspiração (potencial e real), poderia-se inferir, a partir dos resultados da simulação, que a tendência de diminuição, ao longo do tempo, nas descargas observadas na estação de São Luiz do Paraitinga poderia ter sido devido ao aumento nas taxas de evaporação e concomitante diminuição da água armazenada no solo.

No entanto, tendo em vista que o modelo é calibrado somente com dados de vazão, não se pode deixar de considerar as incertezas associadas aos dados simulados das demais variáveis do balanço hídrico. Assim sendo, para um melhor entendimento do comportamento dessas variáveis, em particular, da evapotranspiração, optou-se por analisar as tendências observadas nos dados meteorológicos obtidos das estações do INMET (Quadro 3.5 do item 3.2.3.7) que, juntamente com os dados das estações pluviométricas da ANA serviram como dados de entrada do modelo. Através da análise desses dados, buscou-se investigar o comportamento das forçantes atmosféricas que poderiam ter influenciado os dados de evapotranspiração potencial e real simulados no SWAT. Buscou-se, com isso, uma maior confiabilidade nas tendências de aumento dessa variável ao longo do tempo, apontada pelos resultados das simulações.

As Figuras de 4.12 a 4.14 apresentam, respectivamente, séries históricas dos dados de temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e evaporação para as estações de Campos do Jordão, Resende e Taubaté apresentados na Tabela 3.5 (do item 3.2.3.5). O período de análise dos dados é 1984-2011.

Figura 4.12 - Médias anuais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1984-2011 para a estação Campos de Jordão (83714)

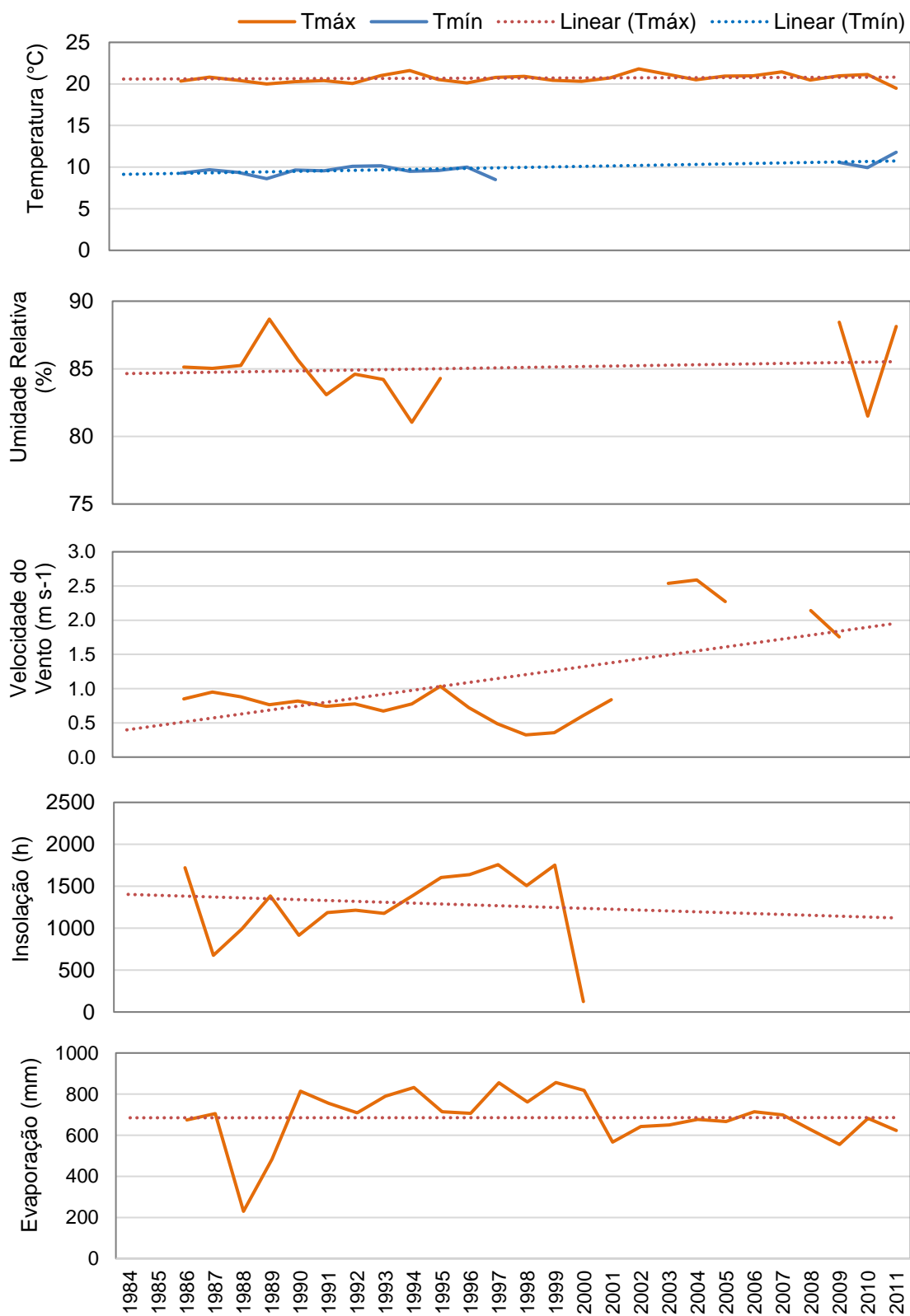


Figura 4.13 - Médias anuais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1984-2011 para a estação Resende (83738)

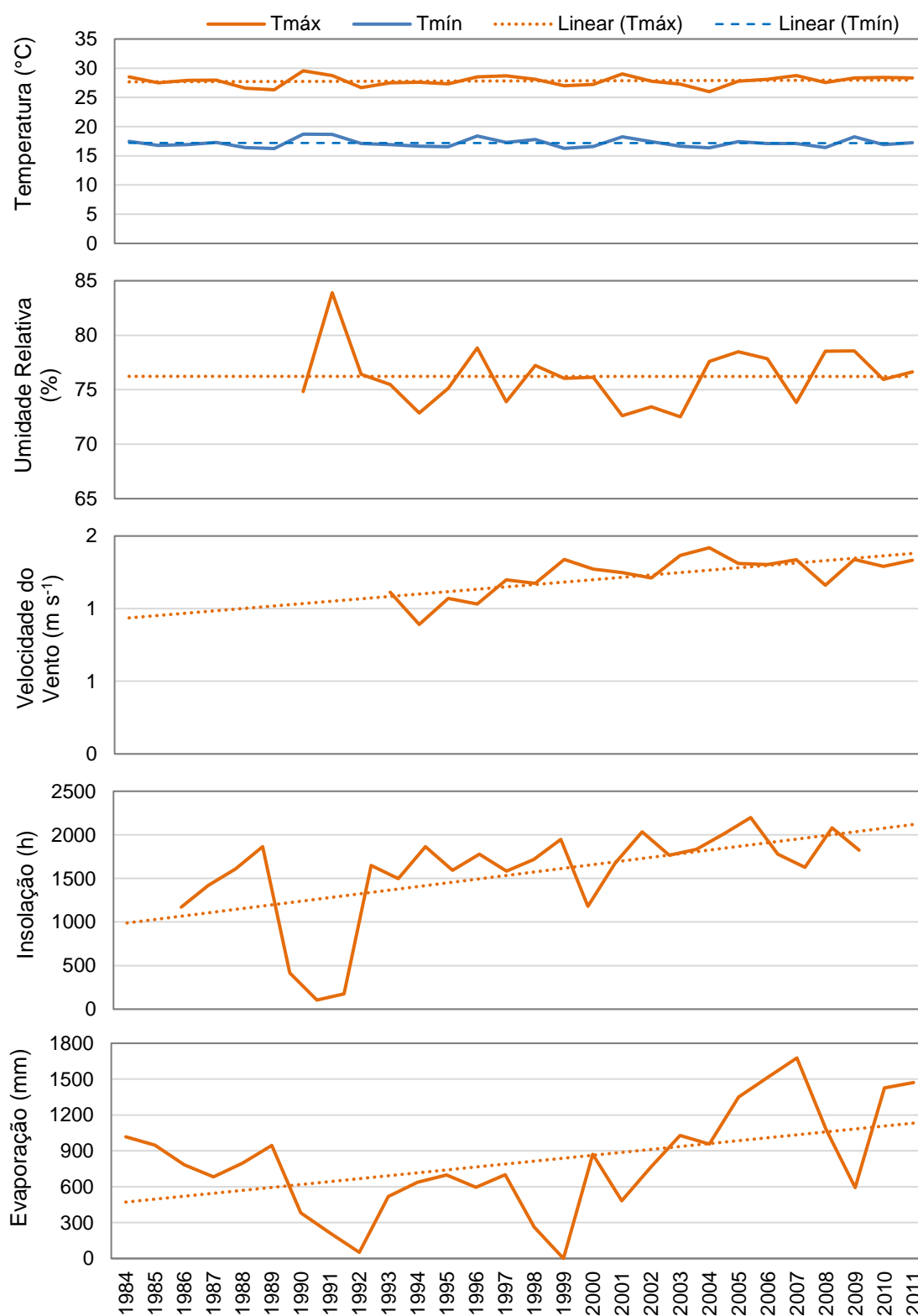
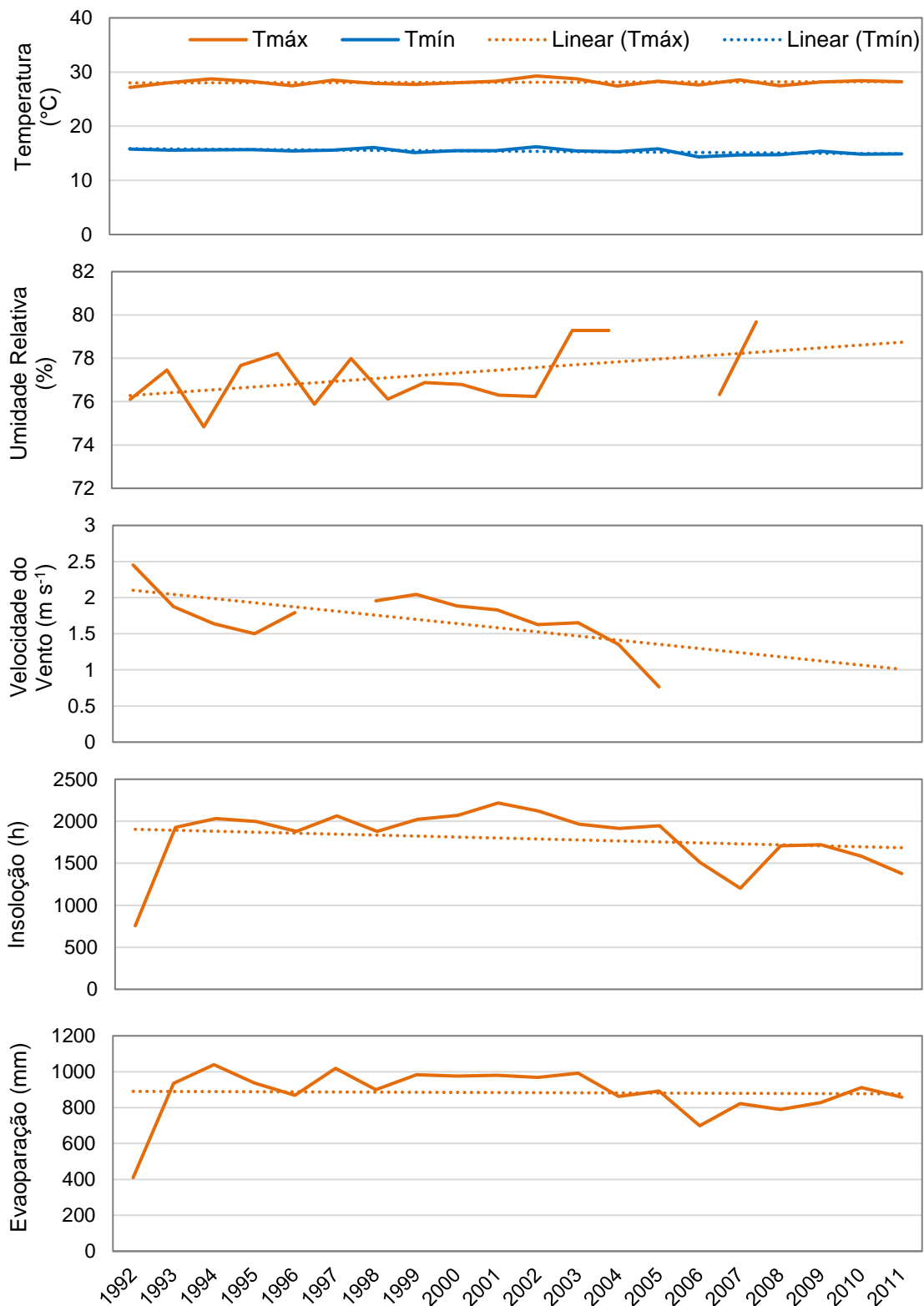


Figura 4.14 - Médias anuais dos dados observados de: a) temperatura máxima e mínima; b) umidade relativa; c) velocidade do vento; d) insolação e e) evaporação para o período 1992-2011 para a estação Taubaté (83784)



Analisando-se os dados das 3 estações em termos de tendências de variação ao longo do tempo, vemos, em linhas gerais que:

- a) Em termos de temperatura do ar máxima e mínima, nenhuma das 3 estações apresentou tendência definida de aumento ou diminuição no período de tempo considerado. Cabe colocar que essa é uma das variáveis que apresenta maior regularidade dos dados no período considerado;
- b) Em termos de umidade relativa do ar, pode-se observar uma pronunciada tendência de aumento para a estação de Taubaté, e uma levíssima tendência de aumento na estação de Campos do Jordão, ao passo que em Resende essa variável permaneceu estacionária. É importante colocar aqui que as grandes lacunas de dados dessa variável para todas as estações no período de tempo considerado não permitem que essa observação seja conclusiva;
- c) A velocidade do vento, outra variável controladora da evapotranspiração, apresentou tendência pronunciada de aumento nas estações de Campo do Jordão e Resende. Em Taubaté o comportamento foi oposto, exibindo uma tendência de diminuição ao longo do tempo durante o período considerado;
- d) A insolação só pode ser observada para as estações de Campos do Jordão e Resende que apresentaram tendências opostas. Enquanto em Campos do Jordão foi detectada tendência de diminuição dos valores com o tempo, em Resende foi observada uma pronunciada tendência de aumento. Cabe colocar ainda que a estação de Campos do Jordão apresenta um período imenso de falhas de dados, enquanto a estação de Resende tem dados que cobrem praticamente todo o período de análise;
- e) Além das variáveis descritas acima, que serviram como dados de entrada para o SWAT, as estações do INMET também apresentam dados de evaporação medidos in situ. Para as estações de Taubaté e Campos do Jordão, essa variável não apresentou nenhuma tendência



pronunciada de variação com o tempo. No entanto, para a estação de Rezende foi registrada uma pronunciada tendência de aumento ao longo do período de tempo considerado.

Conforme exposto anteriormente, a análise dos dados meteorológicos observados foi realizada com o intuito de melhor compreender a tendência de aumento da evapotranspiração ao longo do tempo, simulada pelo modelo. Entretanto, a grande lacuna nos dados observados in situ não permitiu uma análise precisa que corroborasse essas tendências. As tendências observadas para a estação de Campos de Jordão são altamente questionáveis, devido à enorme falta de dados para a maior parte das variáveis.

A estação de Resende, além do maior número de dados, apresentou tendências de aumento em variáveis que poderiam ter uma possível relação com o aumento da evapotranspiração, apontando, em seus resultados, tendências de aumento para a velocidade do vento e insolação. Adicionalmente, foi nessa estação que os dados de evaporação observados também apontaram para uma forte tendência de aumento ao longo do tempo.

Para estação de Taubaté verificou-se a leve tendência de aumento da umidade relativa, porém houve uma grande falha de dados para essa variável nessa estação, o que poderia ter influenciado esse resultado.

No entanto, apesar das incertezas, dois aspectos importantes podem ser realçados em relação à tendência de aumento da evapotranspiração simulada pelo modelo: i) o fato de, no modelo, essa tendência de aumento ser mais pronunciada para a evapotranspiração potencial do que para a evapotranspiração real leva a crer que os fatores que mais teriam influenciado nesses resultados teriam sido os fatores meteorológicos; ii) as medidas de evaporação em uma das estações confirmou uma leve tendência de aumento com o tempo. Assim sendo, em função do exposto, avalia-se que, pelos cálculos do modelo e – em parte, também na situação de campo – a conjunção dessas variáveis meteorológicas teria atuado no sentido de favorecer um aumento das taxas de evaporação ao longo do tempo.

Por fim, cabe salientar que a tendência de diminuição da descarga ao longo do tempo na estação de São Luiz do Paraitinga, quando analisada com base

somente nos dados observados de precipitação e descarga hídrica (item 4.1), revelou que uma tendência de mudança na descarga teria sido resultado da diminuição da precipitação observada à montante da bacia do Paraitinga, mais especificamente na área próxima à estação pluviométrica de Altos da Serra do Mar. No entanto, os resultados da simulação levantam questionamentos acerca da influência de outros fatores, também de ordem meteorológica, os quais poderiam ter influenciado nesse comportamento. Em outras palavras, o aumento da evapotranspiração poderia ter influenciado as tendências observadas na descarga simulada.

#### **4.3 Resposta hidrológica em função de cenários de mudanças no uso e cobertura da terra na BHRP**

Para análise dos potenciais efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a resposta hidrológica da BHRP nas proximidades do centro histórico (sub-bacia 25) foram analisadas as descargas médias mensais para o período compreendido entre 01/01/1984 e 31/12/2011 considerando-se 2 diferentes cenários:

- Cenário 1 (C1) – Conversão de pastagem para floresta
- Cenário 2 (C2) – Conversão de pastagem para eucalipto

Os valores da vazão e dos componentes do balanço hídrico, para esses cenários, foram comparados com os valores simulados que foram apresentados anteriormente, os quais são referidos nessa seção como valores da Linha de Base (LB).

Um dos principais objetivos da conversão do uso 'pastagem' para 'floresta' e de 'pastagem' para 'eucalipto' na BHRP foi testar a hipótese de que alterações no uso e cobertura da terra ocorridos na região nas últimas décadas teriam aumentado o impacto das chuvas extremas resultando no alagamento e destruição de parte do centro histórico do município de São Luiz do Paraitinga. Assim sendo, as primeiras análises feitas com esses cenários foram acerca da influência dessas mudanças na vazão considerando a série histórica das

médias mensais (Figura 4.15) e as séries históricas das médias diárias para o período chuvoso do ano hidrológico de 2009/2010 (Figura 4.16).

Figura 4.15 - Vazão média mensal simulada referente à linha de base (Qsim\_LB) ao Cenário 1 (Qsim\_C1) e ao Cenário 2 (Qsim\_C2)

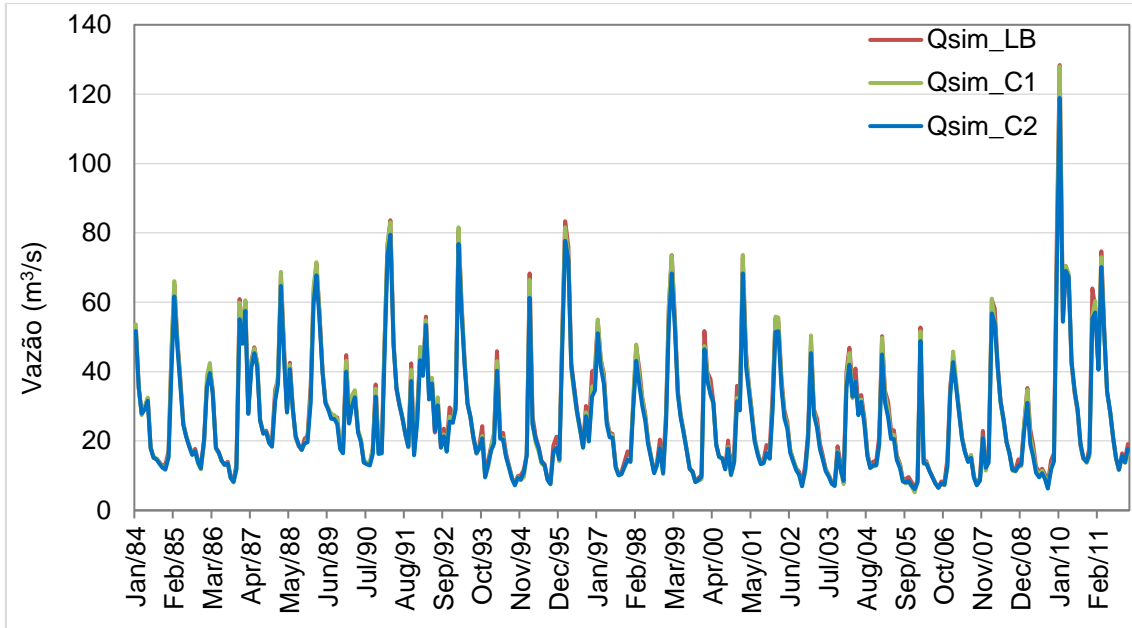
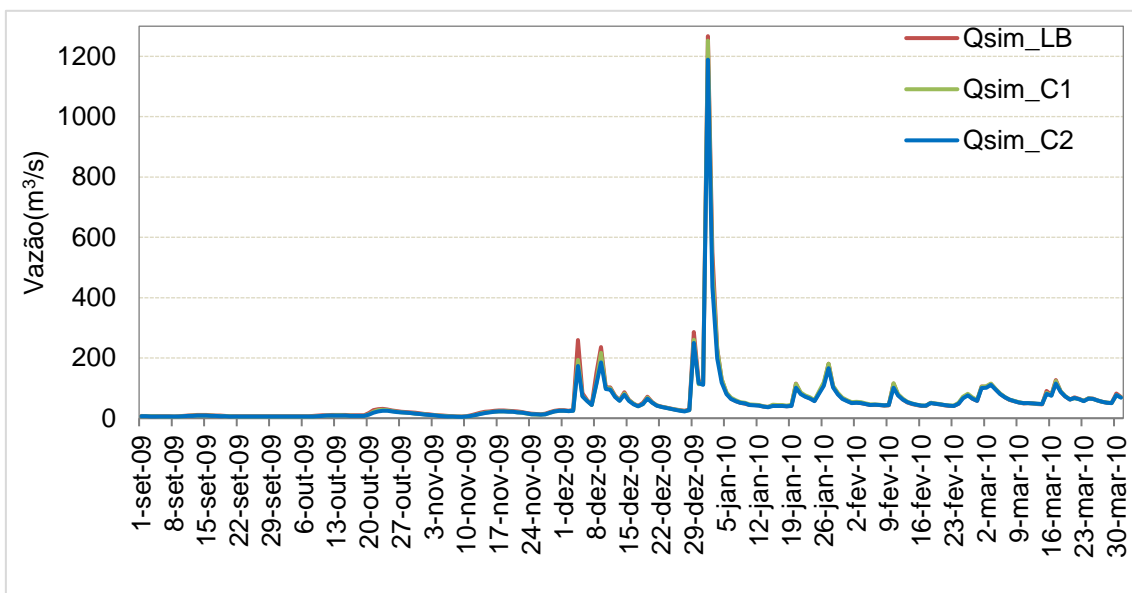


Figura 4.16 - Vazão diária simulada referente à linha de base (Qsim\_LB), ao Cenário 1 (Qsim\_C1) e ao Cenário 2 (Qsim\_C2).



Analisando-se a Figura 4.15, observa-se uma leve diminuição das vazões médias mensais para o mês de dezembro de 2009 para os cenários C1 e C2 quando estes são comparados à linha de base (LB). No entanto, essa redução parece não ter sido significativa ao ponto de ter evitado o desastre. Esse comportamento é evidenciado através da análise das vazões diárias apresentada na Figura 4.16, na qual observa-se que nenhuma redução significativa da descarga ocorrida no dia do evento foi verificada com a mudança dos cenários de uso e ocupação da terra.

Além das análises dos efeitos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre as descargas também foi avaliada a influência sobre os demais processos hidrológicos do balanço hídrico. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 4.17 e 4.18 onde encontram-se as médias mensais de evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ET), armazenamento de água no solo (SW), percolação (PERC), escoamento superficial (SURQ) e produtividade hídrica (WYLD) para os cenários C1 e C2 também comparados à linha de base (LB).

Figura 4.17 - Média mensal simulada para a) evapotranspiração potencial (ETP); b) evapotranspiração real (ET); c) água armazenada no solo (SW); d) percolação (PERC); e) escoamento superficial (SURQ); e f) produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período 1984-2011 para o cenário C1 (pasto para floresta) comparado com LB

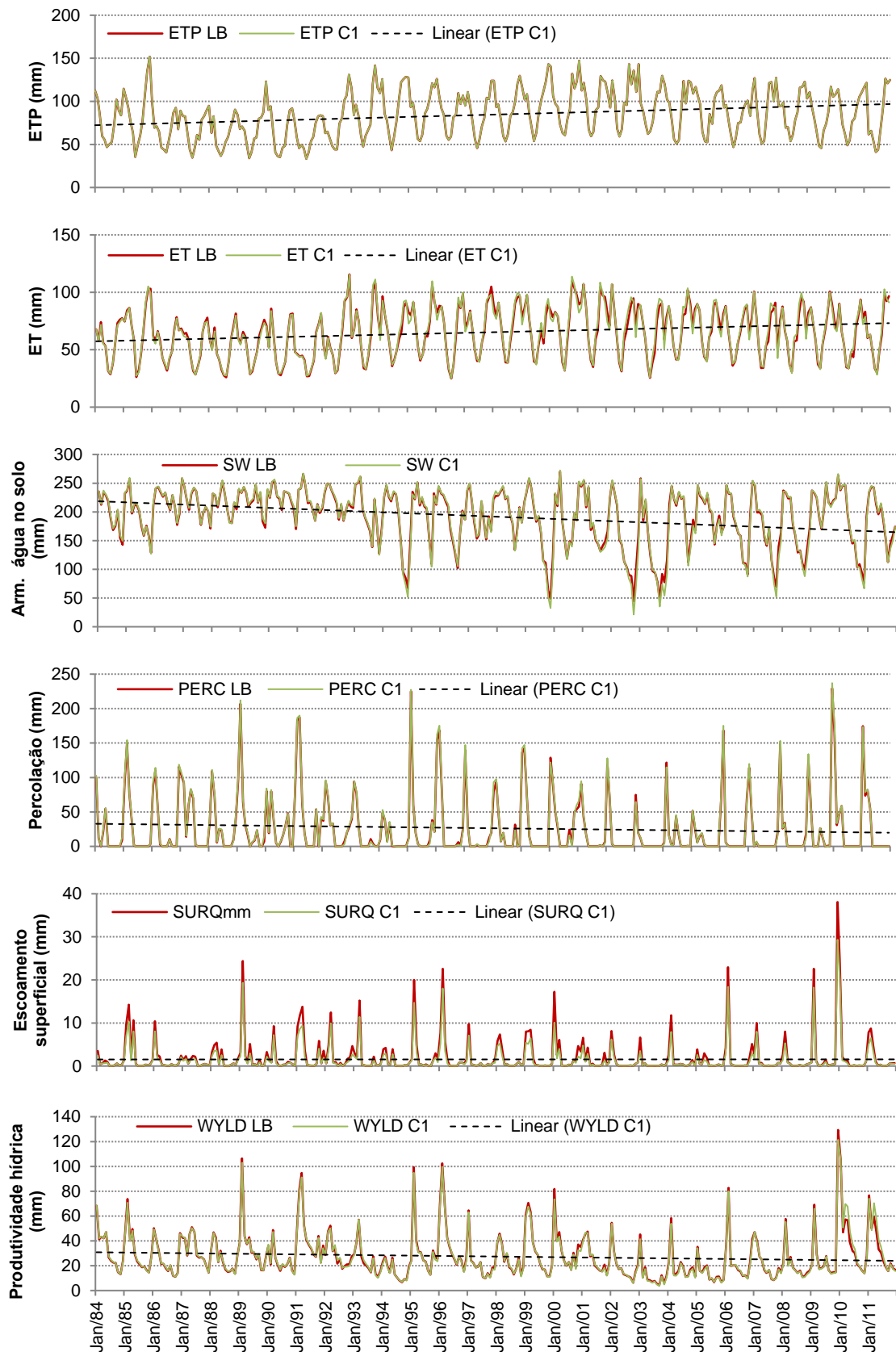
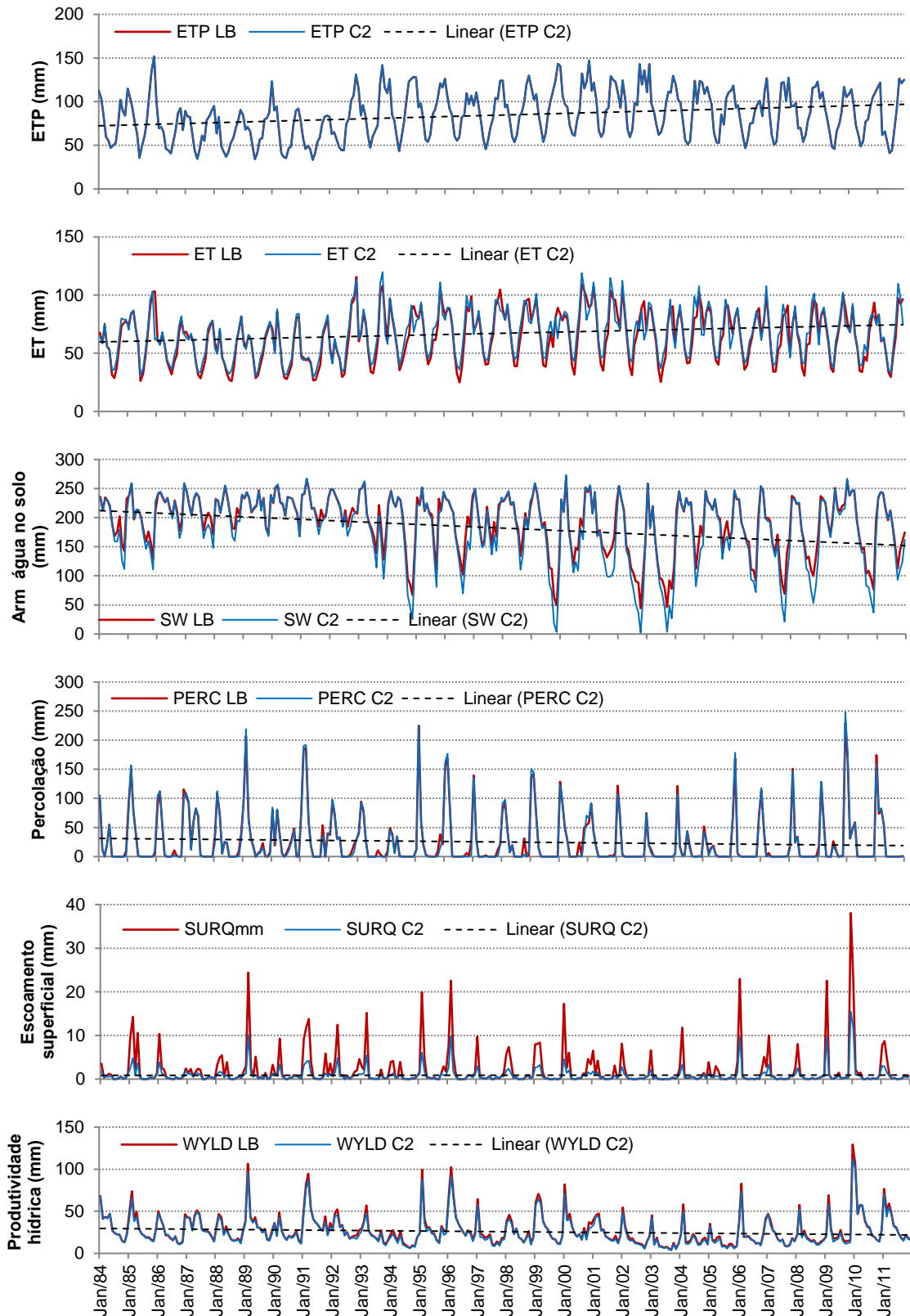


Figura 4.18 - Média mensal simulada para a) evapotranspiração potencial (ETP); b) evapotranspiração real (ET); c) água armazenada no solo (SW); d) percolação (PERC); e) escoamento superficial (SURQ); e f) produtividade hídrica (WYLD), em mm, para o período 1984-2011 para o cenário C2 (pasto para eucalipto) comparado com LB



As Figuras 4.17 e 4.18 não apontam diferença significativa na ETP para os cenários C1 e C2 em comparação com LB. Esse resultado está dentro do esperado visto que a ETP, por definição, depende apenas das variáveis atmosféricas e não poderia ter sido influenciada por mudanças no uso e cobertura da terra.

No entanto, a evapotranspiração real (ET) apresentou variabilidade entre os cenários. Os valores das médias mensais simulada da evapotranspiração real apresentados nas Figuras 4.17b e 4.18b revelaram um pequeno aumento nos valores máximos dessa variável para o cenário C2 e uma diminuição para o cenário C1. O aumento dos valores máximos da ET para o cenário C2, no qual tem-se a conversão do uso de pastagem para eucalipto, indica o maior potencial desse tipo de vegetação – pelo menos nos parâmetros do modelo – de retirar água do solo quando essa está em maior quantidade (período chuvoso). Já no cenário C1, onde o uso de pastagem foi substituído por floresta, houve uma diminuição da ET mínima em comparação com a linha de base.

Ao mesmo tempo, em coerência com o padrão de comportamento observado para a ET, através das Figuras 4.17c e 4.18c observa-se uma diminuição da água armazenada no solo (SW) em ambos os cenários.

Não foram registradas diferenças expressivas nos valores médios mensais de percolação (PERC) simulada para os cenários comparados a linha base (Figura 4.17d e 4.18d), mas o escoamento superficial se mostrou sensível à mudança de cenários de uso e ocupação da terra. Os valores médios mensais do escoamento superficial (SURQ) simulado apresentaram diferenças para ambos os cenários quando comparados à linha base. Conforme se observa nas Figuras 4.17e e 4.18e, o cenário C1 exibiu picos de escoamento superficial inferiores aos picos da linha base e o cenário C2 se mostrou ainda menos expressivo para formação desses picos que o cenário C1 e a linha base.

Para a produtividade hídrica apresentada nas Figuras 4.17f e 4.18f, observam-se valores médios mensais inferiores para o cenário C2 quando comparados aos valores resultantes das simulações do cenário C1. Porém ambos se encontram abaixo da linha de base.

Conforme exposto no item 2.7 acerca da revisão do uso de modelos hidrológicos para simulações da resposta hidrológica em função das mudanças no uso e cobertura da terra, o atual estado do conhecimento levanta uma série de dúvidas a respeito da capacidade desses modelos de representar essas mudanças. De acordo com LORUP et al., 1998; VANSHAAR et al., 2002; BATHURST et al., 2004; LI et al., 2007; MUELLER et al., 2009; COE et al., 2009; RODRIGUES e TOMASELLA, 2015) as maiores incertezas relacionam-se a questão da escala:

- a) em estudos de bacias de pequena área ( $< 100 \text{ km}^2$ ) foram indicados aumento da descarga hídrica, o que foi explicado devido a influência que a mudança de uso e cobertura da terra tem em assumir um maior domínio sobre características geomorfológicas e a rede de canais. Enquanto que, nas bacias de meso e macro área ( $> 100 \text{ km}^2$ ) ((Liebscher, 1993))
- b) a incerteza para essa influência é recorrente na pesquisa atual, devido a heterogeneidade dos outros processos que, também, passam a assumir importância no regime de descargas, tais como: clima, vegetação, geologia, fragmentação da paisagem, etc e tendem a diluir esses efeitos para essa escala de bacia;
- c) Outra questão a ser discutida por BRUIJNZEEL (2004) é o tempo da resposta da vazão como resultado da mudança no uso e cobertura da terra que pode não ser imediata, devido à necessidade de um tempo (regime transitório) até que as vazões passem a responder a um regime estacionário, associado diretamente as características de cada bacia: clima, geologia, geomorfologia, geologia, vegetação e o próprio uso da terra, os quais se não completamente considerados nos modelos, surgem como incertezas para os resultados das simulações;
- d) e ainda que a resposta hidrológica seja a principal fonte de pesquisa para esse tema, a variável evapotranspiração está diretamente relacionada a questão, identificada como um aumento da evapotranspiração simulada no presente trabalho, de forma que para outros estudos com diferentes metodologias, também houveram



indicações de um aumento dessa variável (Shuttleworth, 1988; Giambelluca, 2002; Von Randow, 2010).

#### **4.4 Principais conclusões do capítulo**

Pode-se concluir a partir do exposto, que:

- a) A partir da série histórica dos dados observados de precipitação e vazão nas bacias do rio Paraitinga e Paraibuna observam-se uma tendência de diminuição das descargas médias mensais na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga. No entanto, essa tendência não foi acompanhada por uma tendência generalizada de diminuição das chuvas na região, exceto pelas estações Campos de Cunha e Altos da Serra do mar. Essa análise, baseada somente em observações dessas duas variáveis, conduziu à suposição que as referidas estações pluviométricas, em especial a estação de Altos da Serra do Mar, poderiam estar exercendo alguma influência significativa do comportamento das vazões observadas em São Luiz do Paraitinga;
- b) No que se refere à simulação, o modelo teve um desempenho satisfatório na reprodução da série histórica de descargas, tanto na escala mensal quanto na diária. O modelo foi capaz de reproduzir a sazonalidade das vazões e os picos de vazão máxima (muito importante para o presente trabalho), além disso também representou a vazão mínima mensal. Porém, no que se refere aos picos de cheia, ele apresentou tendência de subestimar as vazões máximas nos anos de extremos. No entanto, isso não foi verificado para o evento extremo em questão, visto que as vazões médias mensais simuladas pelo modelo foram superiores às vazões médias observadas (meses de dezembro de 2009 e janeiro de 2010). Em linhas gerais, avalia-se que o modelo representou de forma satisfatória o evento extremo de cheia ocorrido em São Luiz do Paraitinga, visto que os valores de descarga média mensal e diária foram muito acima dos valores registrados ao longo de toda a série histórica;

- c) Balanço hídrico simulado mostrou um aumento da evapotranspiração com o tempo, um leve aumento da infiltração e uma diminuição do escoamento superficial. Esses resultados levantam outro questionamento sobre potenciais fatores que teriam influenciado a tendência de diminuição da vazão com o tempo na estação fluviométrica de São Luiz do Paraitinga, a qual poderia estar relacionada a mudança no uso e cobertura da terra. Ainda que os dados observados tenham mostrado uma possível influência das estações pluviométricas de Campos de Cunha, e, especialmente, Altos da Serra do Mar, os resultados das simulações mostram a possibilidade de ocorrência de um aumento da evapotranspiração com o tempo. Embora esse aumento não possa ser explicado completamente pelas tendências nas principais variáveis atmosféricas, os dados observados também não permitem descartar essa hipótese;
- d) No que se refere aos Cenários (C1 de pastagem para floresta e C2 de pastagem para eucalipto), a simulação mostrou uma pequena influência dessas mudanças na série histórica, devido a uma leve diminuição das médias mensais e também nas vazões diárias para o período chuvoso do ano hidrológico 2009/2010, ao ponto de não terem sido significativas para impedir a ocorrência do evento extremo de cheia no município.
- e) Balanço hídrico simulado para os cenários (C1 e C2) comparado a linha base (LB). Os valores da média mensal simulada da evapotranspiração real apresentaram um leve aumento nos valores máximos dessa variável para o cenário C2 e uma diminuição dos valores mínimos para o cenário C1. Também houve uma diminuição da água armazenada no solo em ambos os cenários. Para o escoamento superficial, houve uma diminuição dos picos em ambos os cenários, considerando que o cenário C2 se mostrou ainda menos expressivo para formação desses picos que o cenário C1. A produtividade hídrica simulada foi inferior a linha base em ambos os cenários.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho concluiu que a utilização do modelo SWAT para simular o evento extremo de cheia ocorrido na passagem o ano de 2009/2010 reproduziu de forma satisfatória a vazão para o dia do evento e para série histórica de 01/01/1984 a 31/12/2011.

O modelo SWAT também permitiu entender que a mudança de uso e cobertura da terra de pastagem para floresta (C1) e de pastagem para eucalipto (C2) não poderia ter evitado a ocorrência do evento extremo de cheia ocorrido na passagem de 2009/2010, considerando a leve diminuição nas vazões simuladas dos cenários para o mês de dezembro de 2009 e especificamente para o dia do evento. Entretanto, a simulação permitiu conhecer o balanço hídrico dos cenários (C1 e C2) para uma comparação com o cenário de linha de base.

A comparação entre os cenários não revela a influência na resposta hidrológica em consequências da mudança no uso e cobertura da terra para bacia do rio Paraitinga, considerando que não houve significativas alterações na vazão para ambos os cenários. Esses resultados corroboram com os estudos citados no item 2.7, os quais identificaram uma forte influência da heterogeneidade dos processos envolvidos em uma bacia de meso-escala ( $> 100 \text{ km}^2$ ) cujas possíveis alterações na resposta hidrológica dessas bacias estão associadas aos inúmeros fatores (clima, vegetação, geologia, fragmentação da paisagem, geomorfologia etc.) atuando sobre o regime de descargas hídricas.

O resultado final ainda identificou tendências históricas para o balanço hídrico em todas as simulações geradas pelo modelo SWAT (linha base, C1 e C2) através de um aumento da evapotranspiração, uma diminuição da infiltração (armazenamento de água no solo, percolação) e diminuição na tendência histórica de escoamento superficial e produtividade hídrica. Contudo, se faz necessário uma investigação pontual sobre os resultados apresentados nas tendências históricas do balanço hídrico simulado, principalmente relacionado ao aumento da evapotranspiração real para ambos os cenários, considerando

os novos estudos de base na literatura para influência da mudança de uso e cobertura da terra na evapotranspiração e demais variáveis do balanço hídrico.

Entretanto o presente trabalho respondeu a hipótese formulada, com a associação das 2 hipóteses discutidas para tentar explicar as possíveis causas para o evento extremo de cheia de São Luiz do Paraitinga ocorrido na passagem de 2009/2010. Os resultados do presente trabalho comprovaram a hipótese 1, revelando um período prolongado de precipitação intensa na bacia associado a saturação do solo, com a distribuição da precipitação em todas as estações da bacia (escala espacial) e durante todo o mês de dezembro considerando a escala temporal. Sobre a hipótese 2 concluiu-se que a mudança de uso e cobertura da terra na bacia não teria influenciado diretamente a resposta hidrológica, ou seja, aumentando ou diminuindo a vazão, a qual poderia contribuir ou evitar a ocorrência de um evento extremo de cheia, devido aos inúmeros fatores físicos que atuam no ciclo hidrológico e sofrem influência da heterogeneidade dos outros processos que atuam sobre o regime de vazão, principalmente em bacias de médias ou grande escala espacial. Contudo, associação de todos os fatores físicos e antrópicos que atuaram na formulação das duas hipóteses, se complementados entre si, tal como proposto na hipótese desse trabalho, podem inferir sobre as potenciais causas desse evento, ainda que a incerteza sobre qualquer afirmação seja sempre presente quando tratamos do assunto.

Assim, o presente estudo ainda permite a formulação de futuros trabalhos sobre a interação desses processos, principalmente sobre estudos que avaliem a influência da mudança de uso e cobertura em outros processos hidrológicos, ou que contemplem novos procedimentos metodológicos para avaliar essa influência da ação antrópica na hidrologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. de A. A apropriação do território no Brasil colonial. **Cidades - Revista Científica**: São Paulo. v. 8, n. 14, 2011.
- AB'SABER, A. N. A propósito da periodicidade climato-hidrológica que vem provocando grandes crises em Santa Catarina. **Estudos Avançados**. São Paulo: v.23, n.67. pp. 299-306, 2009.
- ADRIANTO, L., MATSUDA, Y. Developing Economic Vulnerability Indices of Environmental Disasters in Smalls land Regions. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 22, p. 393-414, 2002.
- ALMEIDA, F.F.M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1964. 99p. (Série Teses e Monografias)
- ALVALÁ, R.C.S.; NOBRE, C.A.; CHOU, S.C.; VALERIANO, D.M.; MELLO, E.K.; CORREIA, F.W.S.; TOMASELLA, J.; CÂNDIDO, L.A.; SESTINI, M.F.; CARVALHO, V.C. **Melhorias da descrição de parâmetros de superfície e de vegetação da região Nordeste do Brasil para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: Inpe, 2006. Projeto de Pesquisa financiado pela FAPESP (Processo 03/000142-8). Relatório de Pesquisa.
- ANA-AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2016. **Região hidrográfica Atlântico Sudeste**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/AtlanticoSudeste.aspx>>. Acesso em 17 de Jul 2016.
- ARGUELLO, F. V. P. **Expansão do eucalipto no trecho paulista da bacia hidrográfica Paraíba do Sul**. 2010. 79 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de Taubaté, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Taubaté. 2010.
- ARGUELLO, F. V. P.; SAUSEN, T. M. Geografia: localização e aspectos físicos. In: FERREIRA, P. C. (Org.). **A biologia e a geografia do Vale do Paraíba: trecho paulista**. São José dos Campos: IEPA- Instituto Ecológico e de Proteção aos Animais, 2007. cap. 1, p. 9-34.
- Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah, and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1): 73-89. Doi: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.
- ARNOLD, J.G. FOHRER, N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. **Hydrological Processes**.v.19, n.3, p. 563-572, 2005.DoI: 10.1002/hyp.5611.

ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J. R.; HANEY, E. B.; NEITSCH, S. L. Soil & water assessment tool: input/output documentation. version 2012. **Texas Water Resources Institute, TR-439**, p. 650, 2012a.

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

ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D.; van GRIENSVEN, A.; Van LIEW, M.W.; KANNAN, N; JHA, M.K. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**. v. 55, n.4, p. 1491-1508, 2012b. Doi: 10.13031/2013.42256.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, E.; OLIVEIRA, M. P. de, 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**, v.34, p.253-261, 2010.

BATHURST, J. C. et al. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses. **Journal of Hydrology**, v. 287, n. 1, p. 74-94, 2004.

BEASLEY, D.B. **ANSWERS: A mathematical model for simulating the effects of land use and management on water quality**. Thesis (PhD Engineering, Agricultural Energy), Purdue University, West Lafayette, 266p, 1977.

BEVEN, K. A discussion of distributed hydrological modelling. In: ABBOTT, M.B.; REFGAARD, J.C. (Eds.). **Distributed Hydrological Modelling**. Kluwer Academic, p. 255–278, 1996.

BONUMÁ, N. B.; CORSEUIL, C. W.; KOBAYAMA, M.; ZANIN, P. R.; CORRÊA, F. Estimativa do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica com o modelo SWAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, 17-22 nov., Bento Gonçalves-RS. **Anais...** 2013. p. 1–8. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/8a2f570962214c9f1022617b83b9d9b6\\_2df006042c1b2e94d624b38242c95f07.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/8a2f570962214c9f1022617b83b9d9b6_2df006042c1b2e94d624b38242c95f07.pdf)> Acesso em: 20 jul. 2015.

BÖRJESON, L., HÖJER, M., DREBORG, K., EKVALL, T.; FINNVEDEN, G. Scenario types and techniques: towards a user's guide. **Futures**, n. 38, v.7, p. 723-739, 2006.

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

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

BRASIL. LEI n°. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção de Defesa Civil. **Casa Civil. Subchefia para assuntos jurídicos**.

Disponível em < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm)>. Acesso em: 28 mai. 2012.

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

BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 104, n. 1, p. 185-228, 2004.

CAMARINHA, P. I. M.; ESCADA, M. I. S.; RENNÓ, C. D. Padrões espaciais dos remanescentes da Mata Atlântica e elementos que compõem a paisagem da Serra Do Mar no Vale Do Paraíba - Microrregião do Paraibuna-Paraitinga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 7663-7670. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GKF6>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

CAMARINHA, P. I. M.; FERREIRA, C. C.; FERREIRA, M. C.; SOARES, P. V.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C. B. Proposta metodológica para a definição de corredor ecológico com base em modelagem cartográfica – a bacia do rio Paraíba do Sul, porção paulista. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR). 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1989-1996. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A54R3E>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

CANAVESI, V. et al. Análise da susceptibilidade a deslizamentos de terra: estudo de caso de Paraibuna, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 16., 2013. Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 5251-5258. DVD. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW34M/3E7GCN5>>. Acesso em: 24 out. 2016.

CANTINHO, R. Z.; SALGADO, M. P. G.; BATISTA, G. T. Análise da expansão do eucalipto no município de São Luiz do Paraitinga, SP, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 2083-2090. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A497LP>>. Acesso em: 24 out. 2016.

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C. Zona de Convergência do Atlântico Sul. In: CAVALCANTI, I. F. A. et al. (orgs.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. Cap. 6, p. 95-109.

CASTRO, A.L.C. **Manual de planejamento em defesa civil**. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa. Brasília – DF, v. 1, 1999. 69p.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres** - desastres naturais volume 1. 1. ed. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa, 2007. 33p.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). **Dados gerais**. Resende, RJ, 2016. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/dadosgerais.php>>. Acesso em 17 de Jul 2016.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO, 2016. Usina Hidrelétrica de Paraibuna. Disponível em: <[http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa\\_UsinaParaibuna?OpenDocument](http://www.cesp.com.br/portalCesp/portal.nsf/V03.02/Empresa_UsinaParaibuna?OpenDocument)>. Acesso em 17 de Jul 2016.

CHINO, M.; NAKAYAMA, H.; NAGAI, H.; TERADA, H.; KATATA, G.; YAMAZAWA, H. Preliminary estimation of release amounts of <sup>131</sup>I and <sup>137</sup>Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v. 48, n. 7, p. 1129-1134, 2011.

CLARKE, R. T. Estimating time trends in Gumbel-distributed data by means of generalized linear models. **Water Resources Research**, v. 38, n. 7, 2002.

COE, M.T.; COSTA, M.H.; SOARES-FILHO, B.S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, p. 165–174, 2009. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.043.

COMITÊ DE INTEGRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (CEIVAP). **Bacia do rio Paraíba do Sul**: livro da bacia. Brasília: MMA/ANA, 2006. 68p.

CORNISH, P.M. The effects of logging and forest regeneration on water yields in a moist eucalypt forest in New South Wales, Australia. **Journal of Hydrology**, v. 150, p. 301- 322, 1993.

COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, p. 206–217, 2003. doi:10.1016/S0022-1694(03)00267-1.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Cemaden participa do Encontro Global das Academias de Ciências para discutir redução de riscos de desastres naturais. Notícias. 23 de fev. 2016. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/cemaden-participa-do-encontro-global-das-academias-de-ciencias-para-discutir-reducao-de-riscos-de-desastres-naturais-2/>>. Acesso em: 18 de Jun. 2016



CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED). **Explanatory notes**. Brussels, Belgium, 2010. Disponível em <http://www.emdat.be/explanatory-notes>. Acesso em 22 de Nov. de 2012.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.1, p.111-124, 2008.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). **Plano diretor de macrodrenagem da bacia do Rio Paraitinga**. São Luiz do Paraitinga: Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, 2012. v. 1, 86 p.

DAVIS, C.; KEILIS-BOROK, V.; KOSSOBOKOV, V.; SOLOVIEV, A. Advance prediction of March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: a missed opportunity for disaster preparedness. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 1, n. 1, p. 17-32, 2012.

DA SILVA VALENCIO, Norma Felicidade Lopes. Desastres: tecnicismo e sofrimento social. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, 2014.

DE LA TORRE, W. G. "Conferencia de Abertura-EUCALIPTO: O VERDE ENGANADOR Reflexões sobre o avanço irrefreado da monocultura do eucalipto e os imensuráveis impactos ambientais e sociais dele defluentes." *Revista Eletrônica AGB-TL* 1.14 (2011): 8-28. Disponível em: <<http://seer.ufms.br/ojs/index.php/RevAGB/article/view/614/414>>. Acesso em: 12 jul 2012.

DIAS, N. W.; BATISTA, G. T.; CATELANI, C. S. A enchente de São Luiz do Paraitinga: evidências de sua dimensão obtidas a partir de dados orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1411-1418. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A5J2LL>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

DÍEZ-HERRERO, A.; HUERTA, L. L.; ISIDRO, M. L. **A handbook on flood hazard mapping methodologies**. IGME, 2009

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.CD- ROM.

FRAGA, N. C. KÖHLER, V. B. As Enchentes no Vale do Itajaí-açu, SC: das obras de contenção à indústria da enchente. Revisão bibliográfica. **Boletim de Geografia** v. 17, p 81-92. Maringá, 1999.

FELTRIN, Talita Fernanda; JUNIOR, Archimedes Azevedo Raia. Lei 12.608/12: Instrumento de auxílio à gestão da logística humanitária no enfrentamento de desastres causados por fenômenos naturais. In: **IX Convibra Administração– Congresso Virtual Brasileiro de Administração**. Novembro. 2012.

GANEM, Roseli Senna. Gestão de desastres no Brasil. Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação.

**Coordenação Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados.** Brasília-Distrito Federal. Outubro de 2012.

GASSMAN, P.W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. **Transactions of the ASABE**.v.50, n. 4, p.1211-1250, 2007. Doi: 10.13031/2013.23634.

GIAMBELLUCA, T. W. et al. Transpiration in a small tropical forest patch. **Agricultural and forest Meteorology**, v. 117, n. 1, p. 1-22, 2003.

GIAMBELLUCA, T. W. Hydrology of altered tropical forest. **Hydrological processes**, v. 16, n. 8, p. 1665-1669, 2002.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S.S. Aplicação de modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista de Geografia Acadêmica**, v.2 n. 2, p. 73-83, 2008.

GUHA-SAPIR, D.; VOS, F.; BELOW, R.; PONSERRE, S. **Annual disaster statistical review 2011**: the numbers and trends. Brussels: CRED, 2012. Disponível em: <[http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR\\_2011.pdf](http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2011.pdf)>.

GUPTA, H. V.; Sorooshian, S. Yapo, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **J. Hydrologic Eng.** v. 4, n. 2, p.135-143, 1999.

GUSTARD, A.; WESSELINK, A.J. Impact of land-use change on water resources: Balquhiddy catchments. **Journal of Hydrology**, v. 145, n. 3-4, p. 389-401, 1993.

HANDMER, J.; HONDA, Y.; KUNDZEWICZ, Z. W.; ARNELL, N.; BENITO, G.; HATFIELD, J.; MOHAMED, I. F.; PEDUZZI, P.; WU, S.; SHERSTYUKOV, B.; TAKAHASHI, K.; YAN, Z. Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G.-K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (eds.). **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**. - a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. p. 231-290.

HORNBECK, J.W.; ADAMS, M.B.; CORBETT, E.S.; VERRY, E.S.; LYNCH, J.A. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p. 323-344, 1993.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE. 1992, 92p. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 nov.2010.

INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR ). **Terminology on disaster risk reduction**.2009. Disponível em: <<http://www.unisdr.org>>. Acesso em: Ago. 2016.

- IPCC. Summary for policymakers. In: FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDREA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G.-K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M.(eds.)]. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation** -a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.p. 3-21.
- PACHAURI, R. K. et al. **Climate change 2014**: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, 2014.
- JAYASURIYA, M.D.A.; DUNN, G.; BENYON, R.; O'SHAUGHNESSY, P.J. Some factors affecting water yield from mountain ash (*Eucalyptus regnans*) dominated forests in south-east Australia. **Journal of Hydrology**, v. 150, n. 2-4, p. 345-367, 1993.
- JHA, M.; ARNOLD, J. G.; GASSMAN, P. W.; GIORGI, F.; GU, R. R. Climate change sensitivity assessment on Upper Mississippi River Basin streamflow using SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**. v. 42, n. 4, p. 997-1016, 2006. Doi: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb04510.x.
- JHA, M. **Hydrologic simulations of the Maquoketa river watershed using SWAT**. Center for Agricultural and rural development (CARD).Iowa State University, 2009.Working Papers. Paper 530.
- JORNAL DA RECONSTRUÇÃO – Histórico da Cidade. Portal digital da Prefeitura Municipal de São Luiz do Paraitinga. 2012. Disponível em: <<http://www.saoluizdoparaitinga.sp.gov.br/index.php/historico>>. Acesso em 08 de abril de 2012.
- KINNELL, P.; RISSE, L.; USLE-M: Empirical modelling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. **Soil Science Society of America Journal**. v. 62, n. 6, p. 1667–1672, 1998.
- KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais**: Conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2008.
- KWON, H-H., KHALILL, A. F.; SIEGFRIED, T. Analysis of extreme summer rainfall using climate teleconnections and typhoon characteristics in South Korea. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 44, n. 02.p. 436-448, 2008.
- LELIS, T. A. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012. Disponível em<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-)

06832012000200031&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 25 jun. 2016.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200031>.

Li, Min et al. The antimicrobial peptide- sensing system aps of *Staphylococcus aureus*. **Molecular microbiology**, v. 66, n. 5, p. 1136-1147, 2007.

Liebscher, H.J. Hydrology for the water management of large river basins. **Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 38, p.1–13, 1993. doi:10.1080/02626669309492636.

LØRUP, J.K.; REFSGAARD, J.C.; MAZVIMAVI, D. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling: case studies from Zimbabwe. **Journal of hydrology**, v. 205, n. 3, p. 147-163, 1998.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water resources systems planning and management**. Turin: UNESCO, 680p, 2005.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 2, p. 215-226, 2005.

MEDEIROS V. S. **Análise estatística de eventos críticos de precipitação relacionados a desastres naturais em diferentes regiões do Brasil**. 2013. 207p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) Escola Politécnica, São Paulo, 2013.

MEDEIROS, O. B. Estudo da distribuição na área chuvas intensas em bacias de médio porte. 2002. 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - - Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas,2002. Disponível em:<  
<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000287887&opt=4>  
>. Acesso em 19 jun de 2015.

MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T. L. Metodologia para classificação de eventos extremos de precipitação em São Luiz do Paraitinga - SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20. 2013, 17-22 nov., Bento Gonçalves-RS. **Anais...**2013. p. 1–8. Disponível em:  
<[http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/f51775e29825611a8bb8ad803aec13b0\\_2237adc7616d5c7ff371744bbbaac0e1.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/f51775e29825611a8bb8ad803aec13b0_2237adc7616d5c7ff371744bbbaac0e1.pdf).> Acesso em: 13 jul. 2016.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. In *The state and movement of water in living organisms*. **19th Symposia of the Society for Experimental Biology**. Cambridge Univ. Press, London, U.K.

MORAES, J.M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p.61-70, 2003.

MORIASI, D. N.;ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. M.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of

accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**. v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.

MUELLER, E.N. et al. Modelling the effects of land-use change on runoff and sediment yield for a meso-scale catchment in the Southern Pyrenees. **Catena**, v.79, p.288–296, 2009. doi:10.1016/j.catena.2009.06.007.

NASH, J. E.;SUTCLIFFE, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. **J. Hydrology**, v.10, n.3,p. 282-290.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil water assessment tool theoretical documentation**. Version 2009.Temple, Tex.: USDA- ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory, 2005.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool - SWAT: Theoretical Documentation**. Temple: Agricultural Research Service, 2011. 647p.

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, n. 5, p. 794-804, 1986.

OLIVEIRA J.B.; CAMARGO M.N.; ROSSI M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida (mapa)**. Campinas: Instituto Agrônômico e Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 1999.

OLIVEIRA, B. S. S.; CUNHA, A. C. Correlação entre qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Revista Ambiente & Água**, v. 9, n. 2. Taubaté: p. 261-275, apr. /jun. 2014

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agrônômico e Rio de Janeiro. Embrapa Solos, 1999a.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1999b.

OLSEN, J. R.; STEDINGER, J. R.; MATALAS, N. C.; STAKHIV, E. Z. Climate variability and flood frequency estimation for the upper Mississippi and lower Missouri rivers, **Journal of the American Water Resources Association**, v.35, n. 6, p. 1509-1523, 1999.

Prefeitura Municipal de São Luiz do Paraitinga - PMSLP. **Dados gerais**. 2010b. Disponível em: <<http://www.saoluizdoparaitinga.sp.gov.br/site/a-cidade/historico/como-tudo-comecou/>> Acesso em 29 de março de 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUIZ DO PARAITINGA - PMSLP. **Histórico: Como tudo começou**. 2010a.. Disponível em: <<http://www.saoluizdoparaitinga.sp.gov.br/site/a-cidade/historico/como-tudo-comecou/>> Acesso em 29 de março de 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO LUIZ DO PARAITINGA - PMSLP.

**Histórico:** a enchente de 2010. 2010c. Disponível em:

<<http://www.saoluizdoparaitinga.sp.gov.br/site/a-cidade/historico/a-enchente-de-2010/>> Acesso em 26 de maio de 2012.

RODRIGUES, E. L.; ELMIRO, M. A. T.; JACOBI, C. M.; LAMOUNIER, W. L. Aplicação do Modelo Swat na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Sociedade e Natureza**. Uberlândia, v. 27, n. 3, p. 485-500, set/dez 2015.

RODRIGUEZ, E.A global assessment of the SRTM accuracy. In: **The shuttle radar topography mission— data validation and applications Workshop**.

Reston, VA, 2005. Disponível em:

<<http://edc.usgs.gov/conferences/SRTM/WorkshopProgram.html>>. Acesso em: 01 fev. 2010.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**. v. 2, n. 4, p.1057-1076, 2010. doi: <10.3390/rs2041057>.

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

SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; NETTO, A. L. C. Hidrologia de encosta numa cabeceira de drenagem com cobertura de eucalipto na bacia do rio Sesmarias: médio vale do rio Paraíba do Sul. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 1,2007, Taubaté. **Anais...Taubaté: IPABHi,2007**. p. 147-154. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2315/93>>. Acesso em: 26 jun. 2008.

SCHMALZ, B.; FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. **Advances in**

**Geosciences**. v.21, p. 91-98, 2009. Doi: 10.1023/B:ENMO.0000032094.92482.6f.

SESTINI, M. F.; ALVALÁ, R. C. S.; MELLO, E. M. K. et al. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: INPE, 2002. (INPE-8972-RPQ/730). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/marciana/2003/03.05.15.05>>. Acesso em: 24 out. 2016.

SHUTTLEWORTH, W. James. Macrohydrology—the new challenge for process hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 100, n. 1, p. 31-56, 1988.

SIDLE, R.C.; TAYLOR, D.; LU,X.X.; ADGER, W.N.; LOWE, D.J.; DE LANGE, W.P.; NEWNHAM, R.M.; DODSON, J.R. Interactions of natural hazards and society in Austral-Asia: evidence in past and recent records. Elsevier.

**Quaternary International**,v.118–119, p. 181–203, 2004.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M. Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.3, n.3, p.97-110. 1998.

SINGH, J.; Knapp, H. V.; Demissie, M. **Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT**. Illinois: State Water Survey, 2004. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill...Disponível em: <[www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf](http://www.sws.uiuc.edu/pubdoc/CR/ISWSCR2004-08.pdf)>. Acesso em 1 junho 2015.

SINDEC-SISTEMA NACIONAL DA DEFESA CIVIL. **AVADAN-Avaliação de Danos da Estância Turística de São Luiz do Paraitinga**. Brasília, DF, 2010. Disponível em: <<http://150.162.127.14:8080/ged/SP-A-3550001-12302-100101.pdf>>. 01/01/2010. Acesso em: 12 jul. 2010.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; BARBOSA, S. A. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. **Revista Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 1, p. 26-42, mar. 2008. ISSN 1980-993X. Disponível em: <<http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/77>>. Acesso em: 19 jul 2015.

SOS Mata Atlântica/ Fundação SOS Mata Atlântica/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.sosmatatlantica.org.br>>. Acesso em: 23 mai., 2013.

SOUZA, C.R. G. Flood risk assessment in coastal drainage basins through a multivariate analysis within a gis-based model. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, v. 56, p. 900-904, 2009c.

TAKAHASHI, T.; GOTO, M.; YOSHIDA, H.; SUMINO, H.; MATSUI, H. Infectious diseases after the 2011 Great East Japan Earthquake. **Journal of Experimental & Clinical Medicine**, v.4, n. 1, p. 20-23, 2012.

TOLEDO, M. C. B. Vegetação: evolução da paisagem verde no Vale do Paraíba. In: FERREIRA, P. C. (Org.). **A biologia e a geografia do Vale do Paraíba**: trecho paulista. São José dos Campos: IEPA- Instituto Ecológico e de Proteção aos Animais, 2007. cap. 2, p. 55-64.

TUCCI C. E. M. **Hidrologia**: ciências e aplicações. EDUSP. Editora UFRGS. ABRH, 1993.952p.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da drenagem urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, jul/dez, pp. 5-12, 1997

TUCCI C. E. M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. EDUSP. Editora UFRGS. ABRH, p192. 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 943 p, 2004.

TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: princípios e concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 2, jul/dez, pp. 5-12, 1997.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. **A gestão da água no Brasil**: uma primeira avaliação da situação atual e das perspectivas para 2025. jan. 2000. Disponível em: <<http://goo.gl/Veq4W4>>. Acesso em: 15 out. 2014.

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina/Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010. Volume Brasil**. Florianópolis: UFSC, CEPED, 2012. 94 p. Disponível em: <<http://150.162.127.14:8080/atlas/atlas.html>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina/Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres (CEPED). **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010. Volume São Paulo**. Florianópolis: UFSC, CEPED, 2011. 71 p. Disponível em: <<http://150.162.127.14:8080/atlas/atlas.html>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION (UNISDR). **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**. Sendai: UNISDR, 2015. Disponível em <[http://www.unisdr.org/files/43291\\_sendaiframeworkfordrren.pdf](http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf)>. Acesso em:

USDA Soil Conservation Service. 1972. National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapters 4-10.

VANSHAAR, J.R.; HADDELAND, I.; LETTENMAIER, D. P. Effects of land- cover changes on the hydrological response of interior Columbia River basin forested catchments. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 13, p. 2499-2520, 2002.

VIEIRA, R. M. S. P.; ALVALÁ, R. C. S.; PONZONI, F. J.; FERRAZ-NETO, S.; CANAVESI, V. **Mapeamento dos usos da terra e da cobertura vegetal do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 2010-01-23. (INPE ePrint [sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.22.12.32](http://sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.22.12.32)). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.22.12.32>>.

VIEIRA, R. M. S. P.; CUNHA, A. P. M. A.; ALVALÁ, R. C. S.; CARVALHO, V. C. FERRAZ NETO, S.; SESTINI, M. F. Land use and land cover map of a semiarid Region of Brazil for meteorological and climatic models / Mapa de uso e cobertura da terra do semiárido do Brasil para modelos climáticos e meteorológicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 129-138, June2013. doi: <10.1590/S0102-77862013000200002>.

VIOLA, E. The sum of d small-bias generators fools polynomials of degree d. **Computational Complexity**, v. 18, n. 2, p. 209-217, 2009.



Von RANDOW, R.C.V. et al. Does secondary forest compensate the low evapotranspiration caused by conversion of forest to pasture? In THE MEETING OF THE AMERICAS., 2010, Foz do Iguaçu, BR. **Pôsteres...** 2010. . Foz do Iguaçu: American Geophysical Union. Available from: <http://abstractsearch.agu.org/meetings/2010/JAhtml> [Accessed 8–13 August 2010].

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; BOSCH, D. Calibration and uncertainty analysis of the swat model using genetic algorithms and bayesian model averaging. **Journal of Hydrology**, v. 374, n. 3–4, 15 Aug.p. 307-317, 2009.

## APÊNDICE A - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

Os resultados da calibração do modelo SWAT foram obtidos após terem sido realizadas diversas simulações para conhecer os parâmetros mais relevantes à análise de sensibilidade do modelo para BHRP. Contudo foram descritos no presente trabalho somente os resultados das últimas 11 simulações, os quais estão dispostos na tabela A.1.

A simulação número 1 com o último conjunto de parâmetros utilizados na calibração final do modelo SWAT foi considerada o default para as simulações seguintes. Na tabela A.1 estão descritos somente os parâmetros, que tiveram seus valores alterados para cada simulação.

A definição para os parâmetros apresentados na tabela A.1 foi descrita anteriormente na tabela 3.6 (item 3.2.3.8), a qual descreve a definição de cada parâmetro utilizado nas simulações. Os resultados das 10 simulações realizados com a mudança de um ou mais parâmetros a partir da simulação 1 de default, revelaram a influência dos parâmetros de solo na bacia do rio Paraitinga, em virtude da quantidade significativa de parâmetros do solo a serem utilizados nas 10 últimas simulações. Também, foi observada a relevância dos parâmetros de uso e cobertura da terra (CN2, CANMX e ESCO) no desempenho do modelo SWAT para bacia.

A tabela A.1, também, apresentou os resultados dos testes estatísticos realizados por meio da análise de eficiência do modelo. Conforme apresentado no item 3.2.2, os resultados desses testes foram comparados aos limiares de controle:  $NSE \geq 0.5$ ;  $RSM \leq 0.7$ ;  $PBIAS \pm 25\%$  da vazão, já descritos anteriormente na tabela 3.3 do item 3.2.2. Assim, observou-se que o conjunto de dados das últimas 11 simulações, somente as simulações de número 4 e 10 foram consideradas não satisfatórias. Dentre as últimas 11 simulações realizadas na bacia, a número 11 obteve o melhor índice de aproveitamento,

com um NSE=0,7, PBIAS=9,1 e um RSM =0,5 sendo definida como satisfatória pronta a ser utilizada como situação de controle (Linha de Base).

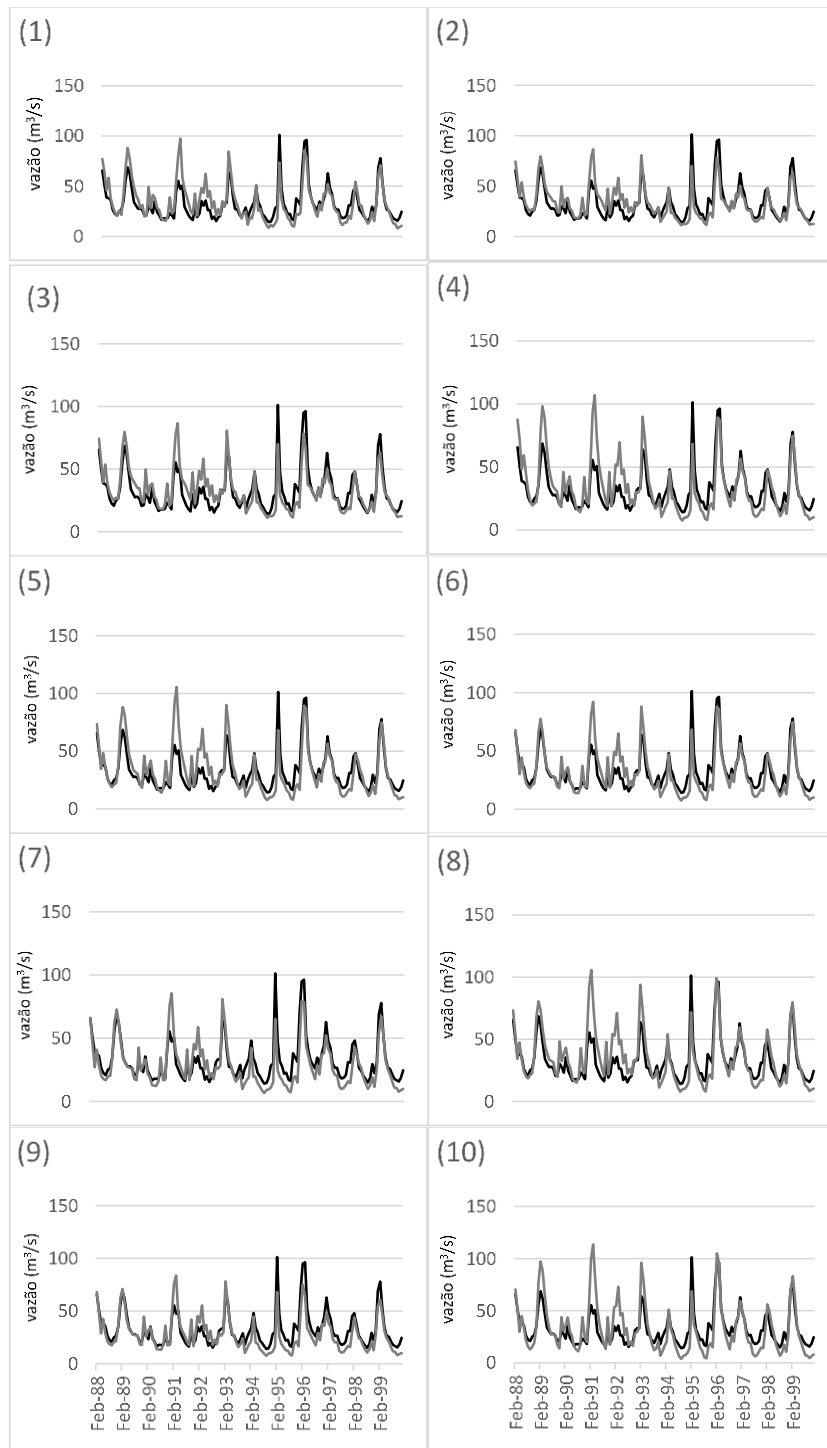
Tabela A. 2 - Resultados dos testes estatísticos para avaliação das simulações do modelo SWAT

Nº da Simulação	Parâmetro	Valores	NSE	PBIAS	RSM
1	CN2	P/F/E=50; U=92; W=60	0.6	-4.0	0.6
1	RCHRG_DP	0.75	0.6	-4.0	0.6
1	ALFHA_BF	0.948	0.6	-4.0	0.6
1	GWQMN	3500	0.6	-4.0	0.6
1	GW_REVAP	0.2	0.6	-4.0	0.6
1	GW_DELAY	35	0.6	-4.0	0.6
1	REVAPMN	50	0.6	-4.0	0.6
1	ESCO	0.95	0.6	-4.0	0.6
1	CANMX	0	0.6	-4.0	0.6
1	Ch_K2	0	0.6	-4.0	0.6
2	CN2	P=50; F=45; E=35; U=92; W=60	0.6	-2.3	0.6
2	GWQMN	4000	0.6	-2.3	0.6
2	GW_DELAY	70	0.6	-2.3	0.6
2	REVAPMN	25	0.6	-2.3	0.6
2	CANMX	P=3; F=8; E=6; U=0; W=0	0.6	-2.3	0.6
2	Ch_K2	125	0.6	-2.3	0.6
3	GWQMN	2000	0.6	-2.3	0.6
3	GW_REVAP	0.1	0.6	-2.3	0.6
3	REVAPMN	250	0.6	-2.3	0.6
4	RCHRG_DP	0.5	0.4	-4.8	0.8
5	GWQMN	2500	0.5	-2.2	0.7
6	GWQMN	3000	0.6	3.3	0.6
6	REVAPMN	300	0.6	3.3	0.6
7	ESCO	0.75	0.6	11.7	0.6
8	GW_REVAP	0.05	0.5	-7.3	0.7
8	ESCO	0.95	0.5	-7.3	0.7
9	GW_REVAP	0.15	0.6	12.7	0.6
10	RCHRG_DP	0.25	0.3	0.3	0.8
10	GWQMN	3500	0.3	0.3	0.8
10	REVAPMN	350	0.3	0.3	0.8
11	RCHRG_DP	0.5	0.7	9.1	0.5

Fonte: Organização do autor (2016)

A Figura A.1 mostra o resultado das últimas 10 simulações com registros da vazão simulada comparada a observada na sub-bacia 25.

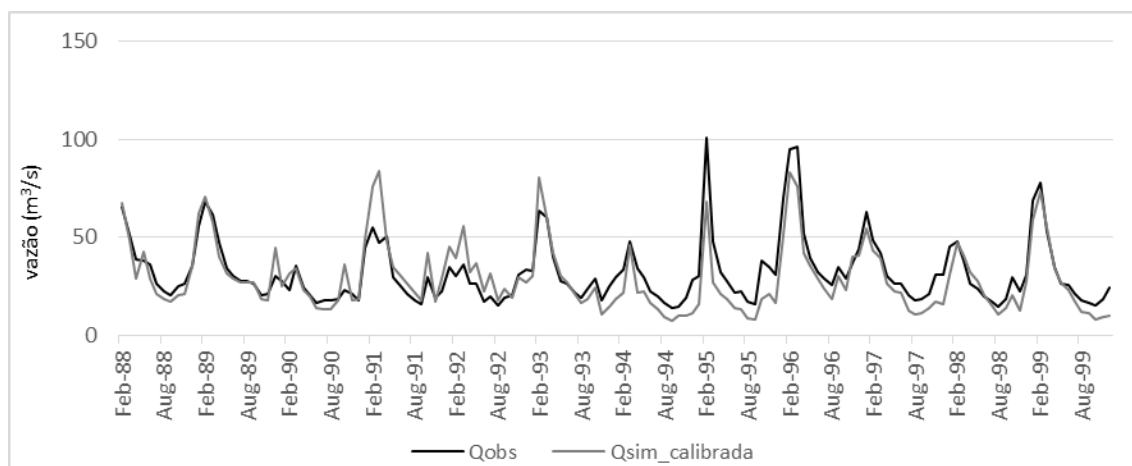
Figura A. 1 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para a sequência das 10 últimas simulações apresentadas na tabela A.1.



Na Figura A.2 apresenta-se os valores da vazão observada e simulada para cada uma das 10 simulações na tabela 4.1. A figura A.1(1) mostra o conjunto de dados sem a mudança dos parâmetros e revela uma vazão simulada superestimada com alguns picos desajustados. A figura A.1(2) apresentou um pequeno ajuste da vazão simulada com a mudança dos principais parâmetros de uso e cobertura da terra (cn2 e canmx) e no parâmetro de condutividade hidráulica (ch\_k2), além de ajustes nos parâmetros do solo. As figuras A.1(3), A.1(5), A.1(6), A.1(7), A.1(8) e A.1(9) também fizeram ajustes nos parâmetros do solo e mostraram um pouco de melhora nos resultados das simulações. Entretanto, os resultados das simulações 4 e 10 mostraram desajustes nos picos e na regularidade do fluxo.

Para complementar os resultados de análise da calibração, foi selecionada a simulação de número 11 que serviu para situação de controle (Linha Base) para as análises do capítulo de resultados (Figura A.2).

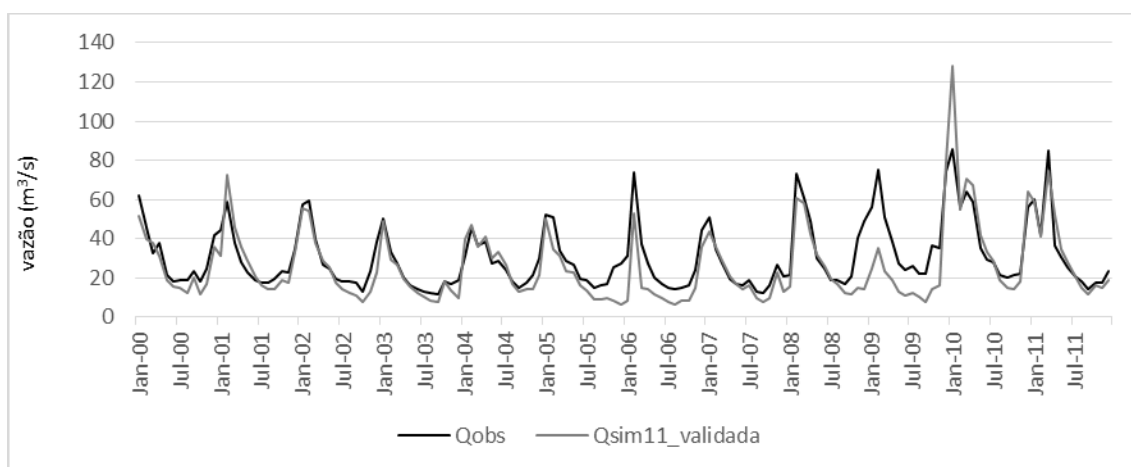
Figura A. 2 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para simulação 11 no período de calibração (01/01/1988-01/01/1999)



A Figura A. 2 apresenta dados da vazão simulada e calibrada para a sub-bacia 25 em comparação com a vazão observada para estação São Luiz do Paraitinga. A figura mostrou um desempenho satisfatório do modelo para essa simulação.

Para validação da situação de controle (Linha Base) foram utilizados os mesmos testes estatísticos para avaliação dos resultados no período de 01/01/2000 até 01/12/2011. Os resultados da validação para os testes foram NSE=0.5, PBIAS=15.7 e RSM= 0.6 indicando uma validação satisfatória. A vazão simulada do período de validação foi comparada a vazão observada e apresentadas na Figura A.3.

Figura A. 3 - Comparação da vazão observada na cor preta, com a vazão simulada na cor cinza para simulação 11 no período de validação.



A Figura A.3 apresentou a comparação da vazão observada com a vazão simulada para o período de validação. A Figura A.3 mostrou uma regularidade na simulação para o período de janeiro de 2000 até junho de 2005 e uma defasagem do fluxo de base no período após junho de 2005 até novembro de 2010, quando retorna à regularidade padrão da vazão observada.