



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CARLOS ALBERTO PRATA DE ALMEIDA**

**PREDIÇÃO DE ENCHIMENTO DE BARRAGEM POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO POXIM-AÇU - SE**

**São Cristóvão  
2013**

**CARLOS ALBERTO PRATA DE ALMEIDA**

**PREDIÇÃO DE ENCHIMENTO DE BARRAGEM POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIO POXIM-AÇU - SE**

Dissertação apresentada ao Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, como pré-requisito para obtenção do grau de **Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente**.

Orientador: Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto.

**São Cristóvão  
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

A447p Almeida, Carlos Alberto Prata de  
Predição de enchimento de barragem por meio de  
modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Poxim-  
Açu – SE / Carlos Alberto Prata de Almeida ; orientador  
Antenor de Oliveira Aguiar Netto. – São Cristóvão, 2013.  
102 f. : il.

Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio  
Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, 2013.

1. Modelagem hidrológica. 2. Predição. 3. SWAT. 4.  
Poxim-Açu, Rio, Sergipe (SE). I. Aguiar Netto, Antenor de  
Oliveira, orient. II. Título.

CDU: 556.18.043

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

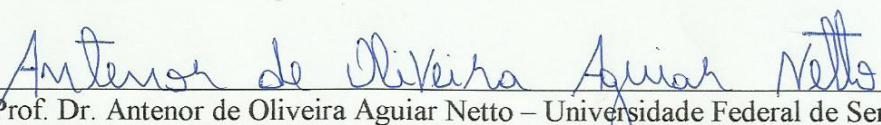
CARLOS ALBERTO PRATA DE ALMEIDA

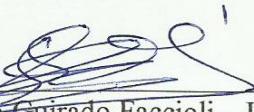
**PREDIÇÃO DE ENCHIMENTO DE BARRAGEM POR MEIO DE  
MODELAGEM HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA  
DO RIO POXIM-AÇU - SE**

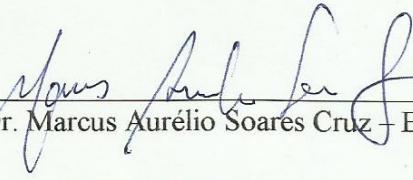
Dissertação apresentada ao Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe, como pré-requisito para obtenção do grau de **Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente**.

Aprovado em 20 de dezembro de 2013.

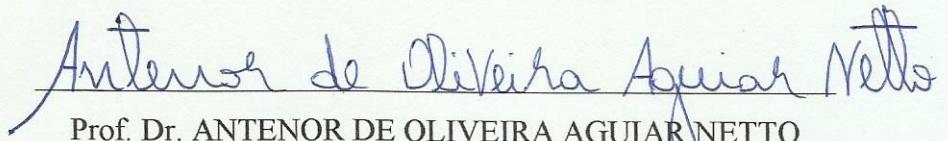
BANCA EXAMINADORA

  
Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto – Universidade Federal de Sergipe

  
Prof. Dr. Gregorio Guirado Faccioli – Universidade Federal de Sergipe

  
Pesq. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz – Embrapa Tabuleiros Costeiros

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

  
Antenor de Oliveira Aguiar Netto

Prof. Dr. ANTENOR DE OLIVEIRA AGUIAR NETTO

Orientador – Universidade Federal de Sergipe

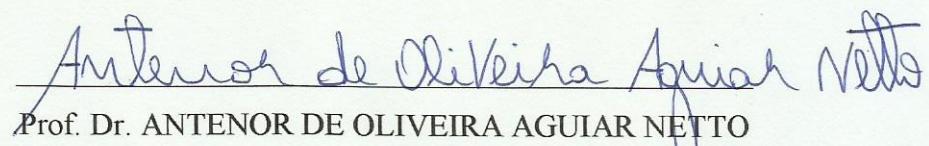
É concedida ao Núcleo responsável pelo Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Sergipe permissão para disponibilizar, reproduzir cópias desta dissertação, distribuir, emprestar ou vender tais cópias.



CARLOS ALBERTO PRATA DE ALMEIDA

Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente – Universidade Federal de Sergipe

Autor



Prof. Dr. ANTENOR DE OLIVEIRA AGUIAR NETTO

Universidade Federal de Sergipe

Orientador

Dedico este trabalho ao Sr. Eribaldo  
Siqueira (*in memorian*)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo, pelo simples fato da existência.

À minha amada esposa Ligia que suportou toda minha ausência. Pelo amor, paciência e dedicação.

Ao Prof. Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto, pela amizade, confiança, orientação e solidariedade.

À minha querida mãe, Dona Maria Luzia Prata e ao Sr. José Ubirai Mendonça, sempre amigos, confiantes e firmes em todos os momentos difíceis.

Agradeço à Universidade Federal de Sergipe, em especial ao seu núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), por propiciar todo o suporte para a realização dos estudos e ampliação de conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Gregório Guirado Faccioli, pela forma determinada e otimista de apoio a presente pesquisa e pela boa amizade que construímos.

Ao meu irmão Marcio Prata Santos, pela missões impossíveis que realizamos a campo, sem sua ajuda este trabalho não teria a mínima qualidade.

A todos que fazem o quadro de pessoal do PRODEMA, nas pessoas da Profa. Dra. Maria José Soares Nascimento e do Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos.

Aos meus filhos Beatriz, Henrique, Eduardo e Daniel, que mesmo ainda muito jovens, tiveram a enorme paciência de se manterem comportados ainda que sem os passeios e brincadeiras juntos.

Aos professores do PRODEMA, Dr. Cristiano, Dr. Adauto, Dr. Emílio, Dra. Benedita, Dr. Tadeu, Dr. Inajá, Dra. Maria José, Dr. Antonio Carlos e Dr. Marcelo, pelas contribuições na formação e consolidação de conhecimentos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, nas pessoas do Diretor do Campus São Cristovão, Sr. Alfredo Franco Cabral, do Prof. MSc. Jacó Araújo de Oliveira e o Magnífico Reitor Ailton Ribeiro.

Aos amigos do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, MSc Paulo Amilcar, Alexis Pertile, Euvaldo Alves, Manoel Sena as estimadas Carmem e Dra. Marluce. Por sempre acreditarem e apoiarem minhas idéias e projetos.

À Alda Lisboa Matos, Marinóe Gonzaga da Silva, Anderson Nascimento Vasco, Samuel Barreto da Silva, Tadeu Ismerim Silva Santos, Thassio Monteiro de Menezes, Crystiano Ayres, Ricardo Monteiro Rocha, Edson Menezes, Neuma Rúbia, agradeço pelo apoio e peço desculpas por não elencar aqui suas titulações.

Ao Dr. Paulo Roberto, do Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe pela ajuda logo no início das pesquisas.

Aos autores que não consegui citar, que Deus os abençoe, a intensidade da leitura foi tamanha, não consegui registrar todos os seus nomes.

Ao grande amigo Francisco Livino, ao meu querido irmão Marcelo Prata, meu tio José Carlos Prata e a todos os meus irmãos e irmãs. Pessoal, perdoem-me o sumiço e logo estaremos juntos aproveitando esta vida maravilhosa nesse mundão de Deus.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Nos dias atuais, a modelagem hidrológica tornou-se ferramenta essencial para predição do comportamento hidrodinâmico em uma bacia hidrográfica devido à importância que tem a detalhada estimativa do balanço hídrico para a gestão ambiental de modo sustentável. Entretanto, os fenômenos envolvidos neste ciclo apresentam grandes variações espaço-temporais, o que dificulta a sua estimativa. Neste contexto, o objetivo estabelecido para o presente estudo é o da avaliação da produção de água do rio Poxim-açu, utilizando o modelo hidrológico *SWAT* (*Soil and Water Assessment Tool*). A calibração do modelo foi realizada manualmente para um período compreendido no ano de 2012, considerando-se alguns aspectos geológicos pertinentes a bacia em estudo, resultando em uma opção de calibração a partir dos parâmetros relacionados ao fluxo das águas subterrâneas e obtendo-se resultados de NSE (0,73), PBIAS (-9,86) e RSR (0,52). Realizou-se procedimentos de validação onde se observou similaridades entre os resultados da produção de água com os resultados obtidos por Silva (2013) para a mesma bacia hidrográfica no ano de 2011. O modelo desenvolvido foi utilizado para simulação preditiva do enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza, no rio Poxim-açu, além de ter sido submetido a simulações com dados de chuvas das estações pluviométricas dos municípios de Itaporanga D'Ajuda e de Aracaju para avaliações das respostas da produção de água. O resultado obtido foi satisfatório, com muito bom encaixe temporal entre o enchimento preditivo e o enchimento registrado. O estudo conclui que o modelo *SWAT* é aplicável satisfatoriamente na realização de simulações preditivas da produção de água na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu em Sergipe. Conclui também que o modelo é aplicável satisfatoriamente em estudos hidrológicos da bacia hidrográfica em questão. Em relação ao Desenvolvimento e Meio Ambiente regional, o estudo recomenda que se aprofundem pesquisas quanto aos aspectos hidrogeológicos da região, com vistas à preservação quanti-qualitativa do grande manancial subterrâneo existente, que representa importante significado para o abastecimento humano da população Aracajuana e para a manutenção do equilíbrio de agroecossistemas litorâneos.

**Palavras-chave:** Modelagem Hidrológica, Predição, Modelo SWAT.

## ABSTRACT

Nowadays, the hydrologic modeling has become an essential tool for predicting the hydrodynamic behavior in a watershed due to the importance of the detailed estimative of the water balance for environmental management in a sustainable manner. However, the phenomena involved in this cycle have large spatial and temporal variations, which complicates their estimation. In this context, the objectives set for this study is the evaluation of the production of water - river Poxim-açu , using the SWAT hydrological model (Soil and Water Assessmente Tool) . The calibration model was manually performed for a period in the year 2012, considering some relevant geological aspects of the basin under study, resulting in a calibration option from related to groundwater flow parameters and obtaining results NSE (0,73), PBIAS (-9,86) and RSR (0.52) . Were performed validation procedures which observed similarities between the results of water production with the results obtained by Silva (2013) for the same watershed in 2011. The model was used for predictive simulation of filling the dam Syndicalist Jaime Umbelino de Souza at river Poxim-açu , besides being subjected to simulations with rainfall data from rainfall stations in the municipalities of Itaporanga D'Ajuda and Aracaju to reviews of water production responses. The result was satisfactory, with fit temporal very good between recorded predictive filling and filling. The study concludes that the SWAT model applies satisfactorily in performing predictive simulations of water production in the basin of Poxim-açu river in Sergipe. Also concludes that the model applies satisfactorily in hydrological studies of the watershed in question. Regarding at Regional Development and the Environment, the study recommends more detailed research on the hydrogeological aspects of the region, aiming at quantitative and qualitative preservation of existing large underground spring, which represents an important meaning for human supply of Aracaju population and to maintaining the balance of coastal agroecosystems .

**Keywords :** Hydrologic Modeling, Prediction , SWAT Model.

## SUMÁRIO

Resumo	x
Abstract	xi
Sumário	xii
Abreviaturas e Siglas	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Introdução	18
<b>CAPITULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	21
1.1 – Desenvolvimento e Meio Ambiente	21
1.2 – Bacia Hidrográfica e Modelagem Ambiental	26
1.3 – Modelo SWAT	31
1.4 – Calibração, avaliação de incertezas e validação de Modelos Hidrológicos	39
<b>CAPITULO 2 – METODOLOGIA</b>	44
2.1 – Caracterização da área de estudo	44
2.2 – Obtenção dos Dados	47
2.3 – Modelagem/Calibração	51
2.4 – Análise Preditiva e Validação dos resultados	54
2.5 – Estatísticas e Qualificação da Modelagem Hidrológica	59
<b>CAPITULO 3 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS</b>	62
3.1 – Estudo das precipitações das estações pluviométricas na região de entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	62
3.2 – Prospecção dos procedimentos de calibração de um modelo para a bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	65
3.3 – Método de avaliação dos resultados de produção preditiva de água a partir da modelagem hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	75
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	79
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	80
Anexo A – Valores parâmetros para cadastro de solos no SWAT	89
Anexo B – Gráficos da avaliação das precipitações de regiões no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	90
Anexo C – Avaliações estatísticas básicas dos dados de precipitação de Aracaju, série histórica do INMET	91
Anexo D – Valores das vazões observadas no exutório	92
Anexo E – Descrição de alguns parâmetros importantes do modelo SWAT	94
Anexo F – Volume acumulado diário de água na represa do rio Poxim-açu	99

## ABREVIACÕES E SIGLAS

Alph_Bf	Fator de escoamento de base
ANA	Agência Nacional de Águas
Anion _ Excl	Porosidade de Anions
Clay	Argila
CN	Curva Número
CN2	Valor da curva número para a condição de umidade II(Soil Conservation Soil)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPIC	Enviromental Impact Policy Climate
EUPS-M	Equação Universal de Perda do Solo Modificada
FRSC	Floresta Ciliar
FRSE	Forest-Evergreen
FRSR	Floresta Restinga
Gwqmn	Profundidade mínima do aquífero superficial para que ocorra escoamento subterrâneo
HRU	Unidade de Resposta Hidrológica
HSPF	Hydrologic Simulation Progam-Fortran
HYDGRP	Grupo hidrológico
IAF	Índice de área foliar
IFS	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPH II	Modelo Hidrológico
LAT _TTime	Taxas do escoamento lateral
LH-OAT	Latin Hipercube-One factor At Time
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMS	Modular Modelling System
MOCOM-UA	Multi Objective Complex Evolution
MOSCEM-UA	Multi Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis
MPa	Mega Pascal
NLAYERS	Número de camadas do solo
NSE	Coeficiente Nash Sutcliffe
NWS	National Weather Service
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PBIAS	Percentual de tendência

Rchrg_Dp	Parcela da água que percola para o aquífero profundo
RMSE	Raiz do erro médio quadrático
RORB	Runoff Routing
RSR	Erro médio padrão normalizado
SAND	Areia
SCEM-UA	Shuffled Complex Evolution Metropolis
SCE-UA	Shuffled Complex Evolution
SCS	Soil Conservation Service
SEMAR/SRH	Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos
SEPLAN	Secretaria de Planejamento do Estado
SHE	Système Hydrologyque Européen
SILT	Silte
SNAM	Nome do Solo
Sol_K	Condutividade hidráulica do solo saturado
SOL_ALB	Albedo do solo
Sol_Awc	Fração de água no solo na capacidade de campo (água disponível)
Sol_BD	Densidade do solo
Sol_CBN	Carbono organico
Sol_EC	Condutividade elétrica
Sol_Z	Profundidade máxima da raiz na terra
SPOT	Satélite para observação da Terra (francês)
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SURLAG	Coeficiente de resposta do escoamento superficial
SWAT	Soil and Water Assessmente Tool
SWRRB	Simulator of Water Resources in Rural Basins
TIN	Técnica de triangulação
TOPKAPI	Topographic Kinematic Aproximation and Integration
UBC	University of British Columbia
UFS	Universidade Federal de Sergipe
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USDA	United States Department of Agriculture
USLE_K	Universal soil loss equation K
WATFLOOD	Distributed Hydrologic Modelling
WBN	Waterbody Network

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	44
Figura 2.2 – Relacionamento das falhas geológicas na região do rio Poxim-açu	46
Figura 2.3 – Estação pluviofluviométrica do IFS/SC	47
Figura 2.4 – Distribuição espacial das estações fluviométricas avaliadas no estudo de produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	50
Figura 2.5 – Resultado da calibração gráfica do método de cálculo da Radiação Solar	51
Figura 2.6 – Divisão da bacia em 15 sub-bacias em função do uso/cobertura da área	52
Figura 2.7 – Classes de solo X Modelo digital do relevo	53
Figura 2.8 – Aspecto lançamento da água de fundo da barragem, vazão regular de $0,2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	55
Figura 2.9 – Vista a montante do talude da Represa do rio Poxim-açu. Detalhe das réguas instaladas para acompanhamento do enchimento da represa	55
Figura 2.10 – Referência da cota de enchimento a partir do lance de régua, pela extensão de uma linha imaginária	56
Figura 2.11 – Modelagem da Elevação do Terreno para a área de interesse e detalhes do enchimento da represa em diferentes cotas	57
Figura 3.1 – Correlação dos volumes mensais registrados no ano de 2012 no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	63
Figura 3.2 – Correlação das precipitações máximas diárias mensais ocorridas no ano de 2012 no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	63
Figura 3.3 – Avaliação gráfica da relação entre vazão simulada e vazão observada em modelo não calibrado, para a estação pluviométrica de Aracaju-INMET.	64
Figura 3.4 – Avaliação da relação entre vazão observada e vazão simulada, modelo não calibrado, para a estação pluviométrica de Itaporanga-ANA	64
Figura 3.5 – Resultado gráfico da avaliação de calibração a partir da parametrização com base na análise de sensibilidade do SWAT	67

2005

Figura 3.6 – Hidrograma da bacia do rio Poxim-açu com a separação do fluxo de base com a técnica baseada na smoothed minima	68
Figura 3.7 – Ajuste gráfico da calibração com base na hipótese de afluência proposta no presente estudo	73
Figura 3.8 – Gráfico para avaliação dos resultados das simulações pelo modelo proposto na presente pesquisa e pelo modelo de Silva (2013), para ano 2011/validação	74
Figura 3.9 – Gráfico de avaliação da correlação: volumes simulados pelo modelo de elevação do terreno X simulados pelo modelo de predição	76
Figura 3.10 – Gráfico de avaliação da correlação: cotas observadas X cotas calculadas a partir da simulação preditiva	77
Figura 3.11 – Avaliação dos resultados da simulação preditiva do enchimento da represa do rio Poxim-açu no ano de 2013	78
Anexo B – Gráficos da avaliação das precipitações de regiões no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros para Estação do Gerador Climático de Aracaju	48
Tabela 2.2 – Parâmetros para Estação de Gerador Climático de Itaporanga	49
Tabela 2.3 – Cálculos de enchimento da represa a partir do MDE.	57
Tabela 2.4 – Quantificação da qualidade de simulações com o SWAT	61
Tabela 3.1 – Dados de precipitação anual registrados por estações do entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	62
Tabela 3.2 – Precipitações anuais, últimos 7 anos, de estações do INMET em Aracaju e da ANA em Itaporanga	65
Tabela 3.3 – Parâmetros considerados no procedimento final de calibração	70
Tabela 3.4 – Avaliações estatísticas da calibração final do estudo	72
Tabela 3.5 – Avaliações estatísticas das simulações para dois modelos realizados na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu	73
Tabela 3.6 – Resultados do procedimento de avaliação da simulação preditiva do enchimento da represa do rio Poxim-açu	76
Anexo A – Dados de solos obtidos pelos levantamentos de campo de SILVA(2013)	89
Anexo C – Avaliações dos dados de precipitação de Aracaju, série histórica do INMET	91
Anexo D – Valores das vazões observadas no exutório.Com base em Silva (2011)	92
Anexo F – Conversão dos valores de vazão preditivos simulados pelo SWAT para a geração do Volume acumulado diário de água na represa do rio Poxim-açu	99

## INTRODUÇÃO

Em ambientes naturais preservados, a água advinda das precipitações sofre variações nos teores de substâncias e sólidos dissolvidos ou em suspensão, em função do tipo de solo, da cobertura vegetal existente, da geomorfologia da área, da ocorrência de escoamento superficial e da infiltração no solo. Contudo, a ação humana modifica drasticamente estas condições, provocando a poluição dos corpos d'água de forma pontual através de lançamentos de efluentes não tratados, ou de forma difusa a exemplo do uso de fertilizantes nos solos, de pulverização dos cultivos com defensivos agrícolas ou da adoção do controle químico das ervas invasoras.

A água contida nos rios, lagos e nos aquíferos subterrâneos é considerada de fácil disponibilização. A interação da água, a partir da precipitação, com os solos e diferentes apresentações de relevo, resulta no delineamento de formações naturais denominadas bacias hidrográficas, compreendidas como o conjunto de terras que são delimitadas por um mesmo divisor de águas e drenadas por um corpo d'água principal e seus afluentes. Nelas se pode observar a realização de grande parte das atividades para sobrevivência humana.

A água doce é um elemento essencial para múltiplos usos humanos, promovendo o desenvolvimento das atividades econômicas, além de ser de importância vital na manutenção da biodiversidade dos ecossistemas terrestres. Cunha e Guerra (2010) explicitam que é no espaço da bacia que se pode ter uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas nela desenvolvidas. Tucci et al. (1997) descreve a bacia hidrográfica como a área de captação natural da água de precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída. Brasil (1997) estabelece a bacia hidrográfica como unidade de planejamento para o gerenciamento e manejo de recursos hídricos brasileiros.

O conhecimento do funcionamento dos recursos naturais, em uma área, neste caso, a bacia hidrográfica, na sua capacidade de produção e reprodução das quantidades com as qualidades desejadas, para os mais diversos usos é fundamental para a gestão de uma bacia hidrográfica, que se insere no contexto das novas práticas para com os recursos naturais, cuja realidade é antecedida por estudos que apontem e demonstrem as formas de apropriação e, os níveis de suporte da relação homem-ambiente. (AGUIAR NETTO et al., 2008; PINTO e AGUIAR NETTO, 2008; AGUIAR NETTO et al., 2010).

Os modelos matemáticos podem ser usados para estabelecer conhecimentos sobre os sistemas ambientais, tanto como um meio de testar hipóteses como de permitir um método

para predizer o manejo desses ecossistemas (BEVEN, 1989; GRAYSON et al., 1992) delimitados em uma bacia hidrográfica. Vários simuladores baseados em modelos matemáticos que retratam processos físicos (naturais e antrópicos) têm sido desenvolvidos para previsão de vazões, escoamento superficial, erosão e transporte de sedimentos e nutrientes de bacias hidrográficas submetidas a diferentes manejos.

Dentre esses modelos destaca-se o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), que é relatado como um dos mais completos em termos de número de componentes simulados, sendo amplamente utilizado para prever o impacto das práticas de manejo do solo nos ambientes aquáticos (superficiais e subterrâneos) em bacias de drenagem complexas, com variação dos tipos de solo, do uso, de aplicação de fertilizantes e defensivos agrícolas, enfim, das condições de manejo em longos períodos de tempo em escalas de bacias hidrográficas (ZHANG et al. 2009). Gassman et al. (2007) informa que o modelo SWAT vem sendo aplicado satisfatoriamente para diversas situações em várias regiões do mundo. Silva (2013), com bons resultados obtidos na modelagem da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, conclui que o SWAT pode ser utilizado como ferramenta no planejamento e gestão de uma bacia hidrográfica.

A bacia hidrográfica do rio Poxim, composta pelos rios Poxim-Açu, Poxim-Mirim e Pitanga é de grande importância para o abastecimento de água da capital do Estado de Sergipe, Aracaju. Nas áreas de nascentes dos cursos d'água predominam pequenas propriedades rurais nas regiões serranas; no curso médio dos rios, encontram-se grandes propriedades agrícolas produtoras de cana-de-açúcar, e em sua foz estendem-se as áreas industriais e urbanas. Apesar de sua importância social e econômica, a sub-bacia hidrográfica do rio Poxim encontra-se em alto estado de degradação ambiental. (FEREIRA et al., 2011).

Em relação à produção de água, o rio Poxim-Açu se constitui no principal corpo d'água da sub-bacia hidrográfica do rio Poxim e apresenta as principais nascentes da unidade de planejamento em estudo (VASCO & PEREIRA, 2010), respondendo diretamente à demanda do sistema de captação posto para funcionar em 1958, momento no qual passou a ser o principal abastecedor de água de Aracaju. Atualmente, contribuí com cerca de 25% do volume total da água ofertada na capital de Sergipe, 580 l/s (DESO, 2013). O governo estadual, ciente da grande importância dos recursos hídricos do rio, construiu uma barragem estabilizadora de vazão, no rio Poxim-açu. Rassaltando-se que, conforme Müller (1995), os efeitos resultantes da implantação de reservatórios não se limitam ao contorno da barragem, mas normalmente são refletidos em outras regiões de considerável extensão.

Segundo Silva (2013), o ambiente tem sido muito afetado ao longo da última década através de ações que causam impactos ambientais, implicando diretamente na sustentabilidade do rio Poxim, provocando diminuição da oferta hídrica, ocasionada tanto pela poluição quanto pela redução da vazão do rio. Ferreira et al. (2011) apresenta dados sobre a situação das nascentes do rio Poxim, sendo as principais encontradas nas cabeceiras do rio Poxim-açu, onde observa que apenas 10% das áreas podem ser consideradas preservadas e que 65.9% degradadas, em função do modo de uso e ocupação dos solos. Já Costa et al. (2011) observaram grande pressão antrópica nas áreas ripárias e identificaram ações impactantes como linhas de transmissão de energia elétrica, urbanização, atividades desordenadas de agropecuária e lazer, obras federais, exploração mineral.

A compreensão do funcionamento do ciclo hidrológico nas camadas subterrâneas, na bacia do rio Poxim-açu tem singular importância. Podendo vir a evidenciar respostas para observações relevantes como as de Silva (2013) quanto à maior produção hídrica ser no sentido de oeste para leste na bacia. Ou mesmo, para algumas questões postas no presente estudo, onde se destaca a da possibilidade de existência de um aquífero litorâneo compartilhado por bacias-hidrográficas na costa sergipana e sobre quais seriam as consequências desta relação?

O presente estudo visa aplicar o modelo hidrológico SWAT na produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu objetivando a previsão do enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza em São Cristovão-SE. Tem como objetivos específicos: avaliar aspectos da distribuição das chuvas na bacia em estudo, estabelecer um procedimento de calibração fundamentado na hipótese da ocorrência de afluência das suas águas e desenvolver uma metodologia de avaliação dos resultados das simulações.

## CAPITULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 – DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

Embora os movimentos ambientalistas sejam bastante recentes, a humanidade já convive com a destruição ambiental há muito tempo. Os Sumérios, há mais de 3000 anos, abandonaram suas cidades quando suas terras irrigadas tornaram-se salinizadas e alagadiças. Na Grécia, Platão já abominava a erosão do solo provocada pelos desmatamentos nas colinas da Ática para obtenção de lenha e implantação de pastagens. Também em Roma, no século I, já se ouvia a advertência de que o gerenciamento medíocre dos recursos ameaçava produzir quebra de safras e erosão do solo. Na Inglaterra medieval, nos idos de 1661, John Evelyn condenava a poluição do ar pela queima de carvão que afigia Londres, dizendo que a “nuvem lúgubre e infernal” fazia a cidade parecer-se com “a corte de vulcão” e não com um local onde viviam cidadãos racionais (MCCORMICK, 1989). Percebe-se assim que muitos problemas ambientais foram realmente identificados e relatados ao longo da história humana, mas somente uns poucos e perspicazes observadores é que tinham tais preocupações e não se encontra relato acerca da dispersão do tema entre as pessoas de forma mais sistêmica.

Por outro lado, tem-se nos séculos XVI e XVII no Velho Mundo, uma nova intensificação nas transformações políticas, sociais e culturais, marcada por um processo de revolução científica, com destaque para a importância que alguns estudiosos tiveram, como Nicolau Copérnico, seguindo-se com Kepler, Galileu, Bacon, Descartes, Newton e outros. Segundo Gallina (1990), “Galileu acreditava que a filosofia da natureza era escrita em caracteres matemáticos, numa língua que permite conhecer quantitativamente os elementos naturais”. Já Francis Bacon, com a descrição do seu método empírico, altera profundamente o espírito da investigação científica que, em grande medida, passa a ser usada para predizer, dominar e controlar o mundo (SILVA e AGUIAR NETTO, 2012). Para Descartes, o mundo poderia ser explicado a partir de suas partes utilizando o modelo da máquina, pois esta permite pensar o universo como uma totalidade de partes que funcionam com independência entre si (SIENA et al., 2007).

O desenvolvimento deste arcabouço científico-filosófico moderno, no qual a definição do padrão relacional sociedade/natureza foi se intensificando ao longo dos últimos quatro séculos, estabelecendo-se sob as formas de interferência entre o desenvolvimento das sociedades humanas e a dinâmica natural dos ecossistemas na perspectiva norteadora básica da ideia de separação entre os domínios social e natural, e a perspectiva de superioridade do primeiro sobre o segundo, tendo sido sintetizado por Thomas Hobbes e ocidentalmente

adoptado como o novo princípio ético da modernidade, ou seja, a visão de total subordinação da natureza ao desejo moderno humano, com seu cunho individualista, materialista e economicista (BATISTELA & BONETI, 2008). Hobbes inferia o risco de tal atitude vir provocar a destruição da vida humana na Terra.

O elemento decisivo então foi dado por Adam Smith, quando considerou que o grande temor de Hobbes era na verdade grande oportunidade, ou seja, essa ação social individualista movida pelo móbil individual do desejo, para Smith aparece como recurso maravilhoso na tessitura de uma nova ordem social. Na sua concepção, cada homem, movido por seu próprio interesse defronta-se, no mercado, com outros homens também movidos por interesses individuais. Dessa relação resulta a harmonia da sociedade e algo mais: o seu progresso. De tal modo que se pode afirmar que todos os problemas sistêmicos que se vivencia atualmente derivam, diretamente, da intensificação desse processo (BATISTELA & BONETI, 2008).

O movimento romântico no final do século XVIII e no século XIX pode ser destacado como a primeira reação ao paradigma cartesiano, principalmente na Inglaterra, onde as raízes de um movimento ambientalista mais amplo podem ser discernidas pela primeira vez já na segunda metade do século XIX, onde grupos protecionistas foram criados. Nos Estados Unidos, do final do século XIX por exemplo, um movimento bipartido de preservacionistas de áreas virgens e de conservacionistas de recursos naturais começou a emergir (MCCORMICK, 1989).

Contudo, a verdadeira revolução ambiental somente veio ter início depois da segunda grande guerra mundial. Quando após o lançamento das bombas atômicas sobre o Japão, começa uma corrida acirrada entre países na realização de testes nucleares, onde foram anunciadas entre os anos de 1945 a 1962 mais de 423 detonações o que, discorre McCormick (1989), serviu como uma espécie estopim para um despertar de pessoas comuns em relação à amplitude das consequências advindas dos experimentos atômicos, sendo expressa através da eclosão de movimentos de reação social. A percepção de não localidade dos problemas ambientais a partir da ocorrência de eventos como os de uma chuva de granizo anormalmente radioativa que ocorreu a 2.820 quilômetros do primeiro local de testes britânico, na costa da Austrália em 1952.

Muitos outros problemas ambientais de grande magnitude começaram a ocorrer e a receber a máxima atenção da imprensa e uma enorme preocupação da população mundial. Apesar da polêmica sobre a assinatura do tratado da proibição parcial dos testes nucleares ter se dado não por questões relativas a uma preocupação real das grandes potências mundiais

com o meio ambiente e sim por que a partir daí se detecta uma primeira alusão ao conceito de um meio ambiente global e a problemas ambientais universais, que passam a ser considerados politicamente.

Esse conceito foi reforçado por muitos fatores, a exemplo da publicação de *Silent Spring* de Rachel Carson que teve grande impacto sobre o público ao tratar da questão do uso do agrotóxico DDT e suas implicações ambientais trazendo grande capacidade de sensibilização à questão ecológica, e ainda, a ocorrência de graves acidentes com consequências desastrosas sobre o meio ambiente como o naufrágio do petroleiro *Torrey Canyon* em março de 1967, quando cerca de 117 mil toneladas de petróleo cru se espalharam depois que o navio se chocou contra um recife perto da costa do extremo sudoeste da Inglaterra, entre Land's End e as ilhas Scilly. A utilização de detergentes não testados para diluir o óleo aumentaram o dano biológico e este incidente ilustrou dramaticamente as ameaças sofridas pelos ecossistemas marinhos com o aumento de 1 para mais de 600 grandes embarcações petroleiras trafegando através de águas próximas à costa, além ainda do elevado custo das missões de bombardeio da Força Aérea Real inglesa que tencionavam incendiar o óleo derramado, e que a conta de seis milhões de libras para limpeza do litoral poluído marcou os contribuintes britânicos quanto aos custos (MCCORMICK, 1989).

Nesta época, ou seja, final da década de 60 até a década de 80 viveu-se o período do crescimento econômico e o início do processo de globalização do capitalismo. Por volta de 1970 a crise ambiental não era mais uma crise silenciosa. Um novo movimento de massas tinha surgido e uma nova questão estava começando a encontrar seu caminho para a agenda das políticas públicas. Evidências científicas crescentes confirmaram muitos dos temores de ativistas e ecologistas amadores; a raça humana estava usando rapidamente seu estoque de recursos naturais e contaminando suas bases durante o processo. O interesse aumentou e nasceu um debate controverso sobre os limites do crescimento, centrado no postulado malthusiano de que crise e colapso eram inevitáveis, a menos que o crescimento da população e a exploração de recursos fossem controlados. Verdadeiros profetas do apocalipse começaram a proliferar pelas vias midiáticas (MCCORMICK, 1989).

O principal produto do ambientalismo dos anos 70 foi o relatório “Limites para o crescimento”, publicado em 1972. As raízes do relatório remontavam ao final da década de 40, quando Jay Forrester se tornou o pioneiro da aplicação do computador digital, de métodos de tomada de decisões militares táticas e dos sistemas de realimentação de informações a estudos das forças que interagem nos sistemas sociais. Durante o final da década de 50, ele

refinou suas teorias de dinâmica industrial como uma técnica de administração. O método da dinâmica de sistemas defende que são necessários modelos para descrever a organização dos sistemas, suas relações internas e pressuposições quanto aos contatos externos fora das fronteiras do sistema. Os componentes das relações podem então ser alterados, a fim de simular resultados alternativos. O método sustenta que os modelos mentais são inferiores aos modelos computacionais porque somente os modelos computacionais permitem que as relações e suas consequências sejam explicitadas (MCCORMICK, 1989).

Especial destaque neste período deve ser dado aos resultados obtidos com a conferência de Estocolmo, 1972, onde os países mais ricos pretendiam que prevalecesse uma estagnação do crescimento econômico em função do entrave imposto pela escassez de recursos naturais necessários para manutenção da economia nos moldes capitalistas de produção e consumo. O que, conforme Ribeiro (2012), não foi aceito pelos países mais pobres, motivando um dos primeiros embates políticos associados à questão ambiental, onde a proposta de crescimento zero é rebatida pelo argumento de que o desenvolvimento a partir do crescimento econômico justifica-se nos países pobres, não somente como caminho de superação da pobreza, mas como cumprimento de dívidas passadas implícitas à colonização e ao imperialismo.

Percebe-se também a ocorrência do embate entre a concepção de desenvolvimento sob a ótica neoliberal do livre mercado e o crescimento econômico e uma concepção do desenvolvimento sob um paradigma ecológico, denominado ecodesenvolvimento, que centrado numa visão holística da sustentabilidade, propunha sua integração a partir dos elementos ecológicos, culturais, econômicos, sociais e espacial/geográficos. Contudo, progressivamente observa-se, tanto nos encontros preparativos como nas conferências, que o conflito começa a ser plasmado pelo consenso dissolvendo-se a racionalidade ambiental sob um paradigma que terá no conceito de “desenvolvimento sustentável” uma estratégia ecológica do processo de globalização neoliberal (LEFF, 2010).

Em outra medida, o conceito “meio ambiente” se desenvolve como um elemento chave de representação da problemática da civilização e adquire uma importância paradigmática a partir da crescente compreensão de uma crise ecológica advinda do funcionamento das mesmas engrenagens políticas e econômicas responsáveis pelas mazelas sociais estabelecidas desde o século XIX. Segundo Ribeiro (2012), o ambiente integra um conjunto sistêmico e multidimensional que envolve uma diversidade de valores que superam

o aspecto puramente ecológico, de modo a abranger os potenciais culturais, os processos sociais e políticos.

Em síntese, o presente estudo considera os conceitos desenvolvimento e meio ambiente no sentido da ambiência para a evolução dos paradigmas da modelagem hidrológica consoante objetivos da sua aplicação para fins do planejamento e gestão hidroambiental. Historicamente, os gregos foram os primeiros filósofos que estudaram seriamente a hidrologia, com Aristóteles sugerindo que os rios eram alimentados pelas chuvas, sendo a sua maior dificuldade explicar a origem da água subterrânea. Somente na época de Leonardo da Vinci (por volta de 1.500 d.C) a ideia da alimentação dos rios pela precipitação começou a ser aceita. No entanto, foi apenas no ano de 1694 que Perrault, através de medidas pluviométricas na bacia do rio Sena, demonstrou, quantitativamente, que o volume precipitado ao longo do ano era suficiente para manter o volume escoado (STUDART, 2006).

O astrônomo inglês Halley, em 1693, provou que a evaporação da água do mar era suficiente para responder por todas as nascentes e fluxos d'água. Mariotte, em 1686, mediou a velocidade do rio Sena. Estes primeiros conhecimentos de Hidrologia permitiram inúmeros avanços no Século XVIII, incluindo o teorema de Bernoulli, o Tubo Pitot e a Fórmula de Chèzy, que formam a base da Hidráulica e da Mecânica dos Fluidos (STUDART, 2006).

Durante o Século XIX, foram feitos significantes avanços na teoria da água subterrânea, incluindo a Lei de Darcy. No que se refere à Hidrologia de águas superficiais, muitas fórmulas e instrumentos de medição foram criados. Pode-se dizer que neste período surge o primeiro modelo hidrológico, o método racional, proposto pelo engenheiro irlandês Thomas James Mulvaney em 1851. (RUIZ, 2008)

Chow (1954) chamou o período compreendido entre 1900 e 1930 de Período do Empirismo. O período de 1930 a 1950 seria o Período da Racionalização. Datam desta época o Hidrograma Unitário de Sherman, em 1932, e a Teoria da Infiltração de Horton, de 1933. Entre 1940 a 1950 foram feitos significantes avanços no entendimento do processo de evaporação. Em 1958, Gumbel lança as bases da moderna hidrologia estocástica (STUDART, 2006).

Tucci (1998) argumenta que a busca da solução na engenharia levou a hidrologia para a ênfase no processo da quantificação dos principais sistemas envolvidos nos projetos, onde os objetivos eram moldados pelo dimensionamento de reservatórios, previsão de vazão em tempo real, extensão de séries para análise de enchentes ou estiagens. Segundo o autor, nos aproveitamentos dos recursos hídricos os aspectos ambientais não eram sequer questionados e

a visão econômica dos benefícios estava voltada fundamentalmente para o crescimento econômico, progressivamente, com as questões da deterioração dos recursos naturais, criou-se uma preocupação maior com a quantificação do impacto da exploração humana.

Os problemas ambientais no mundo desenvolvido foram destacados pela contaminação de aquíferos, conforme o homem começou a enterrar seus despejos. Parte dos hidrólogos tiveram que reciclar seus conhecimentos, já que o escoamento subterrâneo tinha que ser conhecido para que o problema pudesse ser representado e tratado, por outro lado, no âmbito agrícola, o uso de mecanização no preparo do solo produziu a intensificação do processo de erosão e juntamente aos fluxos escoados somam-se os novos pesticidas e fertilizantes como novos contaminantes. Estes desafios geraram a necessidade de conhecimento de novas disciplinas como a geomorfologia, pedologia, biologia e química. A globalização introduziu também aspectos relativos às mudanças climáticas devido ao desmatamento, efeito estufa, criando a necessidade de interação de conhecimentos na hidrometeorologia (TUCCI, 1998).

Entretanto, como já postulava Christofeletti (1999), os modelos são representações simplificadas da realidade. É necessário que o aumento de sua complexidade não inviabilize a análise pela introdução de um número incontrolável de variáveis.

## **1.2 – BACIA HIDROGRÁFICA E MODELAGEM AMBIENTAL**

A bacia hidrográfica é um sistema não-isolado, devido às relações mantidas com os demais sistemas que a circundam, ou seja, é um sistema aberto, porque nela ocorrem constantes trocas de energia e matéria com seu entorno. Para fins hidrológicos, nesse sistema, a variável de entrada é a precipitação que é transformada através de distintos processos do ciclo hidrológico em variável de saída: a vazão.

A quantidade e a qualidade dos recursos hídricos, que escoam pelo canal principal de uma bacia hidrográfica em condições naturais, dependem do clima e das características físicas e biológicas dos ecossistemas que a compõem. A interação contínua e constante entre a litosfera, a biosfera e a atmosfera, acabam definindo um equilíbrio dinâmico para o ciclo da água, o qual define em última análise, as características e as vazões das águas.

Assim como as águas do escoamento superficial, as águas subterrâneas cumprem uma fase do ciclo hidrológico, uma vez que constituem parcela da água precipitada. Segundo Aguiar Netto (2010), no que se refere aos recursos hídricos subterrâneos, os processos e fatores que influem na evolução da qualidade dessas águas podem ser intrínsecos e extrínsecos à formação geológica, a exemplo das rochas sedimentares e os sedimentos

arenosos (aquéfero granular) que possuem elevada porosidade, por conseguinte, elevado índice de renovação e boas características físico-químicas das águas acumuladas nesses meios.

Em muitas regiões do planeta, as necessidades de água já excedem a capacidade de recarga do ambiente e a oferta do recurso está diminuindo, aliado a isso até 90 por cento das águas residuais nos países em desenvolvimento fluem sem tratamento para a natureza. A população mundial deverá aumentar em mais 1 bilhão de pessoas, atingindo os 8 bilhões até 2025, isto acarretará um acréscimo de 50% na demanda por água nos países em desenvolvimento e de 18% nos países desenvolvidos (UNESCO, 2013).

Em termos de demanda quanto ao uso das águas subterrâneas, Proasne (2003 apud ABAS, 2013) constata que varia entre os países, e nestes, de região para região, constituindo o abastecimento público, de modo geral, a maior demanda individual.

Segundo Leal (1999), praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam água subterrânea para suprir suas necessidades. Países como a Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca, França, Holanda, Hungria, Itália, Marrocos, Rússia e Suíça atendem de 70 a 90% da demanda para o abastecimento público (OECD, 1989 citado por REBOUÇAS et al., 2002). Outros utilizam a água subterrânea no atendimento total (Dinamarca, Arábia Saudita, Malta) ou apenas como suplementação do abastecimento público e de atividades como irrigação, produção de energia, turismo, indústria, etc. (PIMENTEL, 1999). 60% das localidades australianas dependem totalmente de mananciais subterrâneos e em mais de 20% daquelas, o seu uso é preponderante. A cidade do México atende cerca de 80% da demanda dos quase 20 milhões de habitantes (GARDUÑO e ARREGUIN-CORTES, 1994 citado por REBOUÇAS et al., 2002).

Em relação à água, o maior consumo brasileiro está na irrigação que utiliza 46% do total de recursos hídricos captados, seguido pelo consumo humano urbano, com 27%, e depois pelo uso industrial, com 18% do total (BRASIL, 2007). Além do uso habitual das fontes superficiais, o uso intensivo das águas subterrâneas já tem oferecido diversos exemplos de esgotamento de aquíferos pelo mundo em virtude de sobreexploração para uso em irrigação (CEPIS, 2000). Avalia-se que existam mundialmente, 270 milhões de hectares irrigados com água subterrânea, 13 milhões desses nos Estados Unidos e 31 milhões na Índia (PROASNE, 2003).

Com relação ao acesso à água em residências na região das nascentes da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, grande parte dos moradores utilizam o recurso provindo de um

chafariz (poço tubular profundo, 46,2%), água de cisterna (poço raso, 29,7%) ou de cacimba (12,1%), (GOMES, 2006). Tal fato pode estar indo de encontro ao que pactuam as Nações Unidas (2013), através da Resolução A/RES/64/292, onde se declarou a água limpa e segura e o saneamento um direito humano essencial para gozar plenamente a vida e todos os outros direitos humanos.

Para obtenção de água subterrânea limpa e segura, por exemplo, fatores como a poluição devem ser considerados, uma vez que decorrem da ocupação inadequada de uma área que não considera suas vulnerabilidades específicas, ou seja, a capacidade do solo em reter e degradar as substâncias tóxicas introduzidas no ambiente. A poluição pode se dar por fossas sépticas; infiltração de efluentes industriais; fugas da rede de esgoto e galerias de águas pluviais; vazamentos de postos de serviços; poluição por água salina advinda do mar em aquíferos costeiros, por aterros sanitários e lixões; uso indevido de fertilizantes nitrogenados; entre outros (ABAS, 2013).

No geral os depósitos de água subterrânea são bem mais resistentes aos processos poluidores dos que os de água superficial, pois a camada de solo sobrejacente atua como filtro físico e químico. Por outro lado, alta permeabilidade (transmissividade) permite uma rápida difusão da poluição. O avanço da mancha poluidora poderá ser acelerado pela exploração do aquífero, na medida em que aumenta a velocidade do fluxo subterrâneo em direção às áreas onde está havendo a retirada de água. No caso de aquíferos litorâneos, a superexploração poderá levar à ruptura do frágil equilíbrio existente entre água doce e água salgada, produzindo o que se convencionou chamar de intrusão de água salgada (ABAS, 2013).

Gomes (2006) apresenta os resultados de um levantamento feito em aproximadamente 77% do total das residências de dois povoados localizados na região das principais nascentes do rio Poxim-açu, em relação ao tema saneamento básico, resultou que a maioria (média de 95,1%) dos entrevistados declarou não possuir sistema de esgoto e destinam efluentes domésticos (média de 42,35%) para fossas e sumidouros, (média de 19,6%) para algum tipo de canalização de suas casas para rio, riacho, rua ou vegetação próxima.

Silva (2013), em amostragens de água no rio Poxim-açu, distribuídas em 6 amostragens trimestrais em quatro pontos ao longo do rio, para o período de fevereiro de 2010 a julho de 2011, detectou, dentre outras variáveis de qualidade da água, que os índices máximos de coliformes totais atingiram valores de  $43.000,0 \text{ NPM.100mL}^{-1}$  e de  $240,0 \text{ NPM.100mL}^{-1}$  para coliformes termo tolerantes. A mesma autora destaca que a classificação de uso para as águas do rio Poxim-açu é adotada como classe 1 e que, por outro lado, 57,9%

das amostras apresentaram resultados acima dos limites para uma categorização mesmo que fosse para classe 2.

É importante destacar também que na face norte da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu o cultivo da cana-de-açúcar tem avançado a partir da bacia vizinha, ou seja, a do rio Poxim-mirim onde Britto (2011), tomando resultados de análises da qualidade das águas, identificou a presença dos pesticidas diuron e ametrina para todo o período no qual desenvolveu suas pesquisas. O mesmo autor afirma que dentre os índices utilizados para avaliação de risco de contaminação das águas, o GUS indicou provável lixiviação para as águas subterrâneas, em doze dos dezessete princípios ativos de ocorrência na região, o EPA indicou considerável risco de contaminação das águas subterrâneas para os pesticidas metribuzim, diuron e thiamethoxam, enquanto o índice GOSS mostrou que 59% dos pesticidas utilizados na região apresentaram alto potencial de contaminação.

Aguiar Netto et al. (2006), identifica a problemática ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu ao observar que a maior parte do seu trajeto apresenta-se com suas margens desmatadas, caracterizando um intenso processo de uso e ocupação predatórios, acarretando, em muitos casos, o desmoronamento das margens e o assoreamento do leito. Silva (2013) arremata ao concluir, no seu estudo de modelagem hidrológica da qualidade da água do rio Poxim-açu, que as ações antrópicas referentes às modificações do uso do solo na bacia promovem alterações na produção e qualidade da água pelo aumento de sedimentos e nutrientes.

Tucci (1998) discorre sobre a evolução dos modelos hidrológicos considerando a existência de fases: uma até 1940, outra de 1940 até metade da década de 1960 e deste marco em diante a terceira. No início, a hidrologia consistia basicamente de estudos descritivos do ciclo hidrológico, raramente quantificando os processos envolvidos, de modo que a modelagem utilizava métodos muito simples. Neste momento, se buscava apenas representar componentes isolados do ciclo hidrológico, como o escoamento superficial, escoamento no canal, infiltração, evaporação, etc. Segundo Lou (2010) são exemplos típicos desta fase o modelo de infiltração proposto por Horton na década de 30 (HORTON, 1933), o de escoamento em rios, por MACCARTHY (1939), o Modelo Muskingum, e Puls (PULS, 1928) para o escoamento em reservatório.

A segunda fase é marcada pelo advento do uso de computadores e grandes investimentos econômicos em obras de infra-estrutura no pós-guerra, conforme Tucci (1998), um dos primeiros modelos conceituais precipitação-vazão é o chamado SSARR-Síntese da

vazão fluvial e regulação de reservatórios que foi desenvolvido pela corporação de engenharia do exército americano (Rockwood, 1958), com objetivos iniciais de simular o processo hidrológico e a regularização de vazão no rio Columbia. A principal característica deste modelo é utilizar funções justáveis pelo utilizador, o que se por um lado cria liberdade por outro dificulta a difusão do seu uso. O modelo STANFORD IV (Crawford e Linsley, 1966) buscou detalhar todos os processos na bacia com discretização temporal de 15 minutos e é conhecido como um modelo completo em relação ao número de processos hídricos que representa (TUCCI, 1998), além de ter introduzido a modelagem espacialmente distribuída.

A terceira fase é marcada por grande aumento da complexidade da modelagem hidrológica onde, inicialmente, com o advento do crescimento econômico, os recursos hídricos começaram a ser utilizados em maior escala, surgindo necessidade cada vez maior de quantificar estes recursos, aliado a isto, o número de combinações possíveis de diferentes métodos em cada componente da parte terrestre do ciclo hidrológico é muito grande, e cada pesquisador tendia a buscar a que se sentia mais familiar ou a que apresentava os melhores resultados nas bacias da sua região. De modo que muitos modelos surgiram e segundo Tucci (1998) eram identificado por nomes geralmente dos seus autores, de universidades ou instituições.

Lou (2010) destaca que os exemplos que merecem referência no início desta fase foram HEC-1- Pacote hidrográfico de cheias (US Army, 1968) por apresentar um algoritmo próprio e IBBITT (1973) que introduziu a otimização dos parâmetros de um modelo hidrológico. Contudo, a crescente preocupação com o meio ambiente gerou novos questionamentos por parte da sociedade. Tucci (1998) apresenta algumas destas questões, tais como: Qual o efeito do desmatamento de uma bacia hidrográfica sobre o escoamento, produção de sedimentos e qualidade da água? Como o efeito das alterações da superfície da bacia altera o clima de uma região? Qual o impacto ambiental da contaminação de aquíferos pelos despejos industriais e domésticos ao longo do tempo? Tais questões não eram respondidas ainda pelos modelos até aqui apresentados, pois o enfoque tradicional de representar processos hidrológicos de forma delimitada, concentrada e empírica para um sistema estacionário não é suficiente para esclarecer tais questionamentos.

Assim, Lou (2010) esclarece que no final da década de 70 a modelagem hidrológica se subdivide em duas direções, uma que buscava a redução da necessidade de parametrização e outra que começou a acompanhar a crescente preocupação com a problemática ambiental e a avaliação do impacto do uso e alteração dos solos, assim, nesta segunda corrente iniciou-se o

desenvolvimento de modelos com maior base física, procurando estabelecer relações que pudessem ser estabelecidas entre as características físicas do sistema e os parâmetros, reduzindo o empirismo das estimativas desses últimos. No fundo, isto significava ir além da equação da continuidade. Por exemplo, na simulação em rios em canais significa introduzir a equação de quantidade de movimento que representa o efeito das forças no escoamento.

O emprego de modelos hidrológicos é de grande utilidade para gestores e planejadores de recursos hídricos, os quais fazem uso das estimativas de vazões futuras para diversos fins, entre eles a operação de reservatórios e prevenção das consequências de eventos extremos. Estes usos são importantes para que autoridades adotem esta ferramenta na escolha das decisões que visam o bem-estar da sociedade e conservação do meio ambiente (BURNASH, 1995).

Todavia, a complexidade dos processos e interações natureza-homem é um ponto que dificulta a modelagem, sendo necessário simplificar muito os processos envolvidos no fluxo da água em uma bacia. Assim não há um modelo hidrológico padrão e a escolha de um determinado modelo se deve às suas características e ao uso que se fará dele.

### **1.3 – MODELO SWAT**

O modelo SWAT (ARNOLD et al., 1998), do inglês Soil and Water Assessment Tool, foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa do Departamento Estadunidense de Agricultura (United States Department of Agriculture, USDA). O seu objetivo principal é a previsão do impacto causado pelas alterações do manejo do solo nos âmbitos da qualidade e quantidade de água, sedimentos e pesticidas em grandes bacias hidrográficas e a longo prazo, levando em consideração variados tipos de solo, cobertura vegetal e práticas agrícolas (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT é o resultado de mais de 30 anos em experiências de modelagem hidrológica desenvolvidas pelo USDA. O SWAT é o descendente direto do SWRRB, Simulator of Water Resources in Rural Basins, (ARNOLD & WILLIAMS, 1987), que por sua vez foi desenvolvido tendo como base três outros modelos: o modelo CREAMS, Chemical, Runoff an Erosion from Agricultural Management Systems (KNISEL, 1980), GLEAMS, Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems, (LEONARD et al., 1987) e por fim o Environmental Impact Policy Climate (IZAURRALDE et al. 2006), originalmente chamado EPIC, Erosion Productivity Impact Calculator (WILLIAMS et al. 1990).

No ínicio da década de 90, foi adicionado ao SWRRB o modelo de propagação de vazões Routing Outputs to Outlet, ROTO, (ARNOLD et al., 1995) dando origem à primeira versão do SWAT. O SWAT vem passando por contínuos aperfeiçoamentos desde sua versão inicial, destacando-se a adição de rotinas cinéticas do modelo QUAL2E (Brown & Barnwell, 1987).

Conforme Dhar (2009), citado por Andrade (2011), em sua estrutura, o modelo SWAT incorpora oito componentes principais para prover suas simulações. Um componente hidrológico que trata do escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem, incluindo ainda a análise de reservatórios. Um componente para tratar do aporte de sedimentos abrange o ciclo hidrossedimentológico, utiliza a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (EUPS-M).

Já o componente clima trata da precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar, enquanto o componente temperatura do solo simula diariamente uma temperatura média no centro de cada camada do solo com objetivo do uso nos processos hidrológicos e no declínio de resíduos orgânicos. Um componente específico cuida do crescimento vegetal, enquanto outro trata da relação entre os nutrientes, investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e do fósforo (ANDRADE, 2011).

Um componente muito importante trata do tema relacionado aos pesticidas e bactérias, descrevendo a movimentação de tais elementos, analisando a biodegradação e transformação dos pesticidas, além do declínio de bactérias. O modelo pode ainda acompanhar a existência de metais pesados, contudo sem analisar possíveis transformações. O oitavo e último componente aborda as práticas agrícolas, analisando desde o cultivo ao crescimento das culturas, considerando ainda a irrigação e o manejo de resíduos na terra (ANDRADE, 2011).

Em relação ao seu componente hidrológico, considerando-se a etapa que se desencadeia no solo, o SWAT considera primeiramente a constituição física como sendo composta por três fases, sólida, líquida e gasosa. A fase sólida forma a matriz ou esqueleto do solo e consiste de minerais e de matéria orgânica. Nos espaços entre as partículas sólidas ocorrem os poros do solo, onde se encontram as fases líquida e gasosa. A solução do solo pode preencher os poros do solo completamente (solo saturado) ou parcialmente (solo insaturado). Quando o solo está insaturado, a solução do solo encontra-se como finas películas ao longo das superfícies das partículas (NEITSCH et al., 2005).

O armazenamento, transporte e disponibilidade da solução do solo e do ar do solo não são somente dependentes da quantidade total de poros, mas também do arranjo dos espaços

porosos. Os poros do solo variam em tamanho e forma, devido à textura e arranjo estrutural. Com base no diâmetro do poro no ponto mais estreito, os poros podem ser classificados como macroporos (diâmetro mais estreito  $> 100 \mu\text{m}$ ), mesoporos (diâmetro mais estreito 30-100  $\mu\text{m}$ ) e microporos (diâmetro mais estreito  $< 30 \mu\text{m}$ ) (Koorevaar et al., 1983). A condução de água via macroporos se processa apenas durante alagamentos ou picos de chuvas intensas e a partir do momento em que cesse a entrada de água (precipitação) a drenagem de água a partir destes poros logo também será concluída. Macroporos estão envolvidos no controle dos processos de arejamento e da drenagem do solo. A condução de água pelos mesoporos continua mesmo depois de terem esvaziado os macroporos, isto é, durante chuvas não intensas e na redistribuição de água ao longo do perfil do solo. Quanto aos microporos pode-se dizer que eles retêm a umidade do solo ou a conduzem de forma muito lenta (NEITSCH et al., 2005).

Ao comparar os solos de textura diferentes, solos argilosos contêm uma maior fração de mesoporos e microporos, enquanto os solos arenosos contêm principalmente macroporos. Isto é evidente quando a condutividade hidráulica de solos argilosos e solos arenosos é comparada. A condutividade de um solo arenoso pode ser várias ordens de magnitude maior do que para um solo de argiloso.

O teor de água do solo pode variar de zero quando o solo está seco em um forno a um valor máximo quando o solo está saturado. Para as interações planta-solo, dois estágios intermediários são reconhecidos: a capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Capacidade de campo é o teor de água encontrado quando um solo completamente saturado sofre drenagem natural por cerca de dois dias. Ponto de murcha permanente é o conteúdo de água encontrado quando as plantas sobre um solo desidratado murcham a um ponto em que não se recuperam mais mesmo que sejam mantidas em ambiente úmido e escuro por um dia. Para permitir que essas duas fases possam ser quantificadas mais facilmente, elas foram redefinidos em termos de tensões de água no solo. Assim, capacidade de campo é a quantidade de água retida no solo a uma tensão de 0,033 MPa e o ponto de murcha permanente é a quantidade de água retida no solo com uma tensão de 1,5 MPa. A quantidade de água retida no solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente é considerada a água disponível para extração vegetal (NEITSCH et al., 2005).

A água no solo pode fluir sob condições saturadas ou insaturadas. Em solos saturados, o fluxo é conduzido por gravidade e geralmente ocorre na direção descendente. Já o fluxo em

solos insaturados é provocado pelos gradientes que surgem em áreas adjacentes com maior ou menor teor de água. O fluxo d'água em solo não saturado pode ocorrer em qualquer direção.

SWAT simula diretamente somente o fluxo d'água em solo saturado. O modelo registra o teor de água das diferentes camadas do solo, mas não assume que a água é uniformemente distribuída dentro de uma determinada camada. Esta suposição elimina a necessidade de modelar fluxo na direção horizontal em solo insaturado. O fluxo, em solo não saturado, entre as camadas é indiretamente modelado com a absorção de água pela planta e pela distribuição em profundidade e a distribuição evaporação de profundidade da água do solo.

O fluxo de água em solo saturado ocorre quando o conteúdo de uma camada de água no solo supera a capacidade de campo para a camada. A água que excede o teor de água da capacidade de campo é a água disponível para percolação, que gera o cálculo do fluxo lateral ou fluxo de drenagem sub-superficial, a menos que a temperatura da camada superficial do solo esteja inferior a 0° C, quando a camada de solo está congelada, sem circulação de água (NEITSCH et al., 2005).

Para a compreensão do funcionamento do componente hidrológico do SWAT, no âmbito da pesquisa, considerou-se que “o escoamento superficial direto é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida” (TUCCI, 2005). O escoamento superficial é estimado separadamente para cada HRU e encaminhado para se obter o escoamento total para a bacia. Isso aumenta a precisão e fornece melhor descrição física do balanço hídrico (ARNOLD et al., 1998).

O SWAT será a partir daqui apresentado de forma bastante resumida em relação a Conforme Neitsch et al. (2009), com destaque para a fase terrestre do ciclo hidrológico.

O escoamento superficial ocorre sempre que o índice de aplicação de água sobre o solo excede a taxa de infiltração do perfil do solo. Quando a água atinge um solo inicialmente seco, a taxa de infiltração é geralmente muito alta. No entanto, irá diminuir à medida que o solo se tornar mais molhado. Quando a taxa de aplicação é superior à taxa de infiltração, as pequenas depressões da superfície do solo começam a encher e se a intensidade da precipitação continuar a ser superior a taxa de infiltração, conforme as depressões superficiais vão atingindo o limite de enchimento, aí o escoamento superficial irá começar.

O SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial, o método da curva número da USDA-SCS (SCS , 1972) e o método de infiltração Green & Ampt (1911). O método Green-Ampt (Mein-Larson) foi incorporado ao SWAT e fornece uma opção

alternativa para determinação do escoamento superficial, porém este método requer dados de precipitação sub-diários fornecidos pelo usuário.

O procedimento da curva número (SCS), se fundamenta numa equação empírica, que entrou em uso comum no ano de 1950. Ele foi o produto de mais de 20 anos de estudos envolvendo relações chuva-vazão em pequenas bacias rurais em todo os EUA, o modelo foi desenvolvido para fornecer uma base consistente para estimativa dos volumes do escoamento superficial nas mais amplas e variadas condições de uso/ocupação da terra e tipos de solo (Rallison e Miller, 1981).

Dentre as abstrações iniciais, ou seja os momentos que antecedem o escoamento superficial, tem-se o armazenamento no dossel da vegetação. O armazenamento no dossel é a água interceptada pelas superfícies das plantas onde é armazenada e disponibilizada para evaporação. O SWAT considera a máxima quantidade de água armazenada no dossel aquela permitida pelo índice foliar máximo de cada uso do solo. Esse valor e o índice de área foliar são utilizados pelo modelo para calcular o armazenamento máximo a cada período do ciclo de crescimento das plantas. Quando a evaporação é calculada, a água primeiramente removida é a que está no dossel, e depois a demanda evaporativa restante é atendida pela transpiração das plantas e evaporação da umidade do solo (NEITSCH et al., 2005).

No SWAT, infiltração refere-se à entrada de água no perfil do solo. Com a continuação da infiltração, o solo torna-se cada vez mais úmido, provocando um decaimento na taxa de infiltração até ela se tornar estável. A taxa inicial de infiltração depende da umidade contida no solo antes do início do escoamento superficial. A taxa final é equivalente a condutividade hidráulica saturada do solo.

SCS define três condições de umidade antecedente : I- seca (ponto de murcha permanente), a umidade II - média, e III- úmido (capacidade de campo). A condição de umidade I representa o menor valor que a curva número diária pode assumir em condições secas. O método CN-SCS é usado para calcular o escoamento superficial diariamente, mas é incapaz de calcular a taxa de infiltração. Por isso, o modelo calcula a água que entra no perfil do solo pela diferença entre a quantidade de precipitação e o escoamento superficial direto (NEITSCH et al., 2005).

O método CN-SCS possui um passo de ajuste para o valor da CN diária em função do cálculo do parâmetro de retenção em função do teor da umidade do solo e da intensidade da chuva, que é a taxa média de chuvas durante o período de concentração. Uma análise dos dados de precipitação coletados por Hershiield (1961) para diferentes durações e frequências

mostrou que a quantidade de chuva que cai durante o tempo de concentração foi proporcional à quantidade de chuva que cai durante o período de 24 hr.

No SWAT, a taxa de pico do escoamento superficial é expressa na forma do caudal máximo de escoamento na calha principal, que ocorre com um determinado evento de chuva. A taxa de escoamento de pico é um indicador da potência erosiva da chuva e é usado para prever perda de sedimentos. O SWAT calcula a taxa de escoamento de pico através do método racional modificado .

O método racional é amplamente utilizado no projeto de valas, canais e sistemas de controle de água das chuvas. O método racional assume que se uma precipitação de intensidade  $i$  começa no tempo  $t = 0$  e continua indefinidamente, a taxa de escoamento irá aumentar até que o tempo da concentração seja atingido,  $t$  se iguala  $t_{wnc}$ , que representa o momento quando a totalidade da área da bacia hidrográfica está contribuindo para a vazão na saída.

Para se saber o tempo em que toda a bacia hidrográfica está contribuindo, ou seja, o tempo de concentração da bacia, o SWAT calcula o intervalo de tempo do início de um evento de precipitação até o momento em que a área inteira da bacia esteja contribuindo para fluxo na saída da calha principal de drenagem. O tempo de concentração é calculado através da soma do tempo de escoamento superficial (o tempo que leva para o deslocamento a partir do ponto mais remoto na bacia para chegar ao canal) e o tempo do fluxo no canal (o tempo que leva para que o fluxo provindo de canais a montante para alcançar o exutório)..

Quanto a água que infiltra no perfil do solo, ela dá origem ao fluxo de água que ocorre nas camadas que se encontram entre 0 e 2m de profundidade, no solo. Este tipo de fluxo pode ser significativo em áreas onde os solos possuem alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e uma base impermeável ou semipermeável. Neste caso, a precipitação irá percolar verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água que fica retida acima da camada impermeável forma a zona saturada, sendo essa zona, a fonte de água para o escoamento lateral ou subsuperficial (NEITSCH et al., 2005).

O modelo SWAT incorpora um modelo de onda cinemática para o escoamento subsuperficial desenvolvido por Sloan et al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Este modelo de onda cinemática é baseado na equação do balanço de massa, onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle, calculando dessa forma, o escoamento lateral em cada camada, além da declividade o modelo leva em consideração a variação leva em consideração a variação da condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo. No

perfil do solo, o SWAT calcula esta contribuição simultaneamente com a redistribuição (NEITSCH et al., 2005).

Para a aproximação pela onda cinemática no escoamento lateral saturado, admite-se que a linha de escoamento na zona saturada é paralela ao limite impermeável e o gradiente hidráulico igual à declividade da base (NEITSCH et al., 2005).

Ao término da infiltração o modelo processa a ocorrência de redistribuição, que se refere ao movimento contínuo da água através das camadas do solo. A redistribuição é causada por diferenças no conteúdo de água ao longo do perfil do solo em função das características específicas de cada um dos seus horizontes. Quando volume de água, contido nos perfis do solo está uniforme, a redistribuição cessa. O componente responsável pela redistribuição no SWAT usa uma técnica de armazenamento para predizer o fluxo através de cada camada do solo na faixa compreendida pela zona radicular.

O modelo processa a percolação de água no solo através de um processo que combina duas condições, a primeira através da propagação do armazenamento e a segunda pelo fluxo por fendas existentes no solo, a exemplo dos vertissolos. O solo é dividido em várias camadas, ou horizontes, e assume-se que a água infiltra-se por estas camadas dependendo da condição da umidade, para chegar ao aquífero raso.

Quando a umidade do solo presente em cada camada apresentar-se superior à capacidade de campo, ocorre a percolação da água, desde que a camada seguinte não esteja saturada. A taxa de percolação é máxima (condutividade hidráulica saturada) na saturação e diminui a zero quando a umidade do solo atingir o ponto de murcha permanente. A água que percola através de todas as camadas torna-se parte do volume armazenado como água subterrânea ou surge como contribuição no curso d'água por meio do escoamento de base (KUMAR, 2008; NEITSCH et al., 2005).

Por outro lado, o SWAT modela a evapotranspiração, considerando-a como o conjunto de processos responsáveis pela transformação da água na fase líquida em vapor d'água. A evapotranspiração inclui os processos de evaporação de rios e lagos, solo nu e superfícies das vegetações e a transpiração é ocasionada pela folhas das plantas. O modelo calcula a evaporação dos solos e a transpiração das plantas separadamente, assim como descrito por Ritchie (1972). A evaporação potencial dos solos é estimada como uma função da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar (IAF), em relação área da HRU. A evaporação real é estimada usando uma função exponencial da profundidade do solo e da

umidade do mesmo. A transpiração das plantas é simulada como uma função linear da evapotranspiração potencial e do IAF (NEITSCH et al., 2005).

A evapotranspiração potencial é determinada no SWAT pelo método de Penman-Monteith, que requer dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Este método combina componentes que avaliam a energia necessária para sustentar a evaporação, o estreito mecanismo requerido para remover o vapor-d' água e os termos aerodinâmicos e de resistência superficial (DURÃES, 2010).

Determinada a evapotranspiração potencial, o modelo calcula a evapotranspiração total primeiramente considerando a evaporação de toda a precipitação interceptada pela cobertura vegetal e depois, a quantidade máxima de transpiração e a quantidade máxima de evaporação do solo (NEITSCH et al., 2005).

Parte do volume percolado que se encontra nas zonas subterrâneas do solo, alimentam um processo denominado escoamento subterrâneo onde, o componente de simulação do SWAT, particiona esta zona aquífera em duas: o aquífero raso (não confinado) e profundo (confinado). A recarga do aquífero raso provém da percolação, como já afirmado, e é dividido em duas partes: uma parte vai para o aquífero profundo e não retorna mais para o curso d'água, enquanto a parte remanescente no aquífero raso contribui para o escoamento no canal ou trecho das sub-bacias, sendo a contribuição da água subterrânea para as seções de controle (outlets do modelo), feita criando-se um armazenamento no aquífero não confinado (ARNOLD et al., 1998).

O tempo em que a água sai da zona radicular e recarrega o aquífero raso é modelado, através de um fator de atraso do escoamento subterrâneo, (Gw\_delay) como proposto por Venetis (1969). Para dividir a recarga total do aquífero raso e subterrâneo, o modelo considera um coeficiente de percolação (Rchg\_dp). Se a água no aquífero raso é maior que o valor limite definido pelo modelo (Gwqmn ), então ele contribui para o escoamento de base.

A água pode ainda mover-se do aquífero raso para zona não saturada sobrejacente. Em períodos quando essa camada do aquífero está seca, a água da franja capilar, que separa as zonas saturadas e não saturadas vai evaporar e mover para cima de forma difusa. Como a água é removida da franja capilar por evaporação, ela é reposta pela água do aquífero subjacente. A água também pode ser retirada do aquífero por plantas com raízes profundas, frequentemente observadas em regiões de descarga de aquíferos, como em matas ciliares, onde o solo encontra-se normalmente saturado (DURÃES, 2010; NEITSCH et al., 2005). No

caso do aquífero profundo ou confinado, admite-se que o mesmo contribui para o escoamento de água para fora da bacia hidrográfica simulada (ARNOLD et al., 1998).

O SWAT conta ainda com parâmetros de lag que regulam as taxas do escoamento lateral (LAT\_TTIME), onde para grandes bacias que apresentam tempo de concentração superior a um dia, apenas parte do fluxo lateral atingirá o canal principal no dia em que é gerada, assim este recurso serve para controlar a liberação deste fluxo para o canal principal. Da mesma forma ocorre para o fluxo de base que pode ser ajustado a partir do parâmetro ALPHA\_BF e do escoamento superficial a partir do SURLAG.

O SWAT adota também o conceito de franja capilar, onde a água pode se mover a partir do aquífero raso para zonas sobrejacentes insaturadas nos períodos em que o solo que cobre o aquífero está seco. A zona que contém a água que separa as zonas saturadas e insaturadas e que irão evaporar e difundir para cima é denominada franja capilar. Como a água é removida desta zona por meio de evaporação, ela é substituída por água do aquífero subjacente. A água pode também ser removida do aquífero por plantas de raízes profundas que são capazes de captação de água diretamente do aquífero. Para evitar confusão com a evaporação no solo, este processo está denominado como Revap. Este processo é muito significativo em bacias hidrográficas onde a zona saturada não é logo abaixo da superfície ou onde ocorrem plantas de sistemas radiculares profundos.

Como o tipo da cobertura vegetal irá afetar a importância do “revap” no balanço de água, os parâmetros que governam essa variável, geralmente, variam com o uso do solo. Esse processo possibilita reger a quantidade de água que recarrega os aquíferos (NEITSCH et al, 2005).

A nível acadêmico, vários trabalhos foram realizados com o SWAT no Brasil, tais como Adriolo et al, 2008; Bittencourt e Gobbi, 2006; Blainski; Silveira; Conceição, 2008; Lelis e Calijuri 2010; Lino Corsuil.; Kobiyama 2009; Souza; Santos; Kobiyama, 2009; no Estado de Sergipe tem-se Rosas, 2009; Srinivasan et al., 2013; Silva, 2013. Andrade (2013) reporta que após ter realizado pesquisa no site oficial do SWAT, em maio de 2013, verificou a existência de 1273 artigos envolvendo a utilização do modelo em revistas internacionais.

#### **1.4 – CALIBRAÇÃO, AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS E VALIDAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS**

A calibração é o procedimento onde os parâmetros do modelo são ajustados de modo que a série de vazão simulada aproxime-se à série observada. A busca do melhor conjunto de parâmetros pode ser de dois modos: manual e automático. No primeiro o operador do modelo

escolhe um conjunto inicial de parâmetros e altera seus valores conforme um critério subjetivo, ou de análise estatística. No segundo, emprega-se uma rotina de busca automática do melhor conjunto de parâmetros, através da minimização de uma determinada função objetivo, como o erro médio quadrático, por exemplo.

O processo de calibração manual é, essencialmente, uma sequência iterativa de tentativa e erro, através de alterações nos valores dos parâmetros, seguidas da execução do modelo e posterior comparação dos resultados simulados com os observados. Como cada parâmetro guarda uma relação conceitual ou física com os fenômenos que ocorrem na bacia, espera-se que através do ajuste de determinados parâmetros se possa reproduzir os efeitos esperados e ajustar as séries simuladas às observadas. Entretanto, no caso de modelos mais complexos, com um grande número de parâmetros que interagem entre si, os resultados podem ser difíceis de prever. Neste caso, a calibração manual torna-se tarefa difícil, demandando tempo e experiência do usuário com o modelo (GUPTA et al., 1999).

Os primeiros métodos de autocalibração foram desenvolvidos nas décadas de 1960 e 1970, baseados em técnicas de busca local (NASH e SUTCLIFFE, 1970). De acordo com Sorooshian e Gupta (1995), os métodos de busca local foram projetados para encontrar eficientemente o mínimo de funções unimodais, independente da escolha do ponto inicial no espaço paramétral. Os algoritmos de busca local podem ser divididos em métodos diretos e métodos baseados em gradientes. Um exemplo clássico de método direto é o método simplex (NELDER e MEAD, 1965). Porém, os métodos de busca local não são adequados para a calibração, uma vez que as superfícies de resposta dos modelos hidrológicos são multimodais, o que faz com que o sucesso desses métodos esteja atrelado à escolha do valor inicial (SOROOSHIAN e GUPTA, 1995).

No fim dos anos 80, surgiram os primeiros métodos de auto calibração de modelos hidrológicos baseados em técnicas de busca global. Uma característica dos algoritmos de busca global é o início simultâneo a partir de diferentes pontos do espaço dos parâmetros, que irão iterativamente evoluir em direção a regiões mais promissoras da superfície de resposta da função objetivo (GUPTA et al., 1999). Um dos algoritmos de busca global mais utilizados é o SCE-UA, Shuffled Complex Evolution, (DUAN et al., 1994), que através dos anos sofreu algumas variações dando origem a outros algoritmos, como o Multi Objective Complex Evolution (MOCOM-UA, YAPO et al., 1998), o Shuffled Complex Evolution Metropolis (SCEM-UA, VRUGT et al., 2003) e o Multi Objective Shuffled Complex Evolution Metropolis (MOSCEM-UA, VRUGT et al., 2003b).

É importante a ressalva de que o SWAT é extremamente sensível à qualidade dos dados de entrada referentes ao solo. Assim, a acurácia do modelo depende, em grande parte, dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e do quão representativos eles são (ADRIOLI et al., 2008).

Ressalta-se que o SWAT é sensível a uma gama de parâmetros de entrada relacionadas a vegetação, manejo e tipo dos solos, clima, aquífero, canal e reservatório (JEONG et al., 2010). Devido a esse grande número de parâmetros de entrada, não é possível estudar a incerteza de todos eles. Por isso, é importante que se identifiquem os parâmetros que mais influenciam no modelo e sua importância nos resultados gerados, ou seja, qual a intensidade que cada alteração provoca no modelo, de forma que se possa dar ênfase maior à aquisição e ao refinamento desses parâmetros e, assim, diminuir as incertezas e aumentar a garantia dos resultados gerados (JHA, 2009).

A análise de sensibilidade é um procedimento que permite identificar quais parâmetros são sensíveis ou os que mais alteram a variável que se deseja calibrar no modelo (LELIS et al. 2012). Ou, conforme Ma et al. (2000), é necessário um processo para identificar cada parâmetro, sua sensibilidade e faixa de precisão necessário para a calibração (MA et al. , 2000). Assim, a análise de sensibilidade é realizada pelo uso de ferramentas que obedecendo a faixa de limites, avaliam os resultados de variações para cada parâmetro classificando a amplitude das respostas para apresentar como auxílio na definição da calibração. (van Griensven, apud Silva (2010)) ressalta que se a variância obtida é baixa então o efeito é dito linear ou ativo. Parâmetros com alta variância exibem efeitos não lineares ou interativos, que são importantes uma vez que isso indica que os parâmetros apresentam níveis de sensibilidade que podem ser alterados se outros intervalos de parâmetros mudarem.

Arnold et al. (1998) ressaltam que o SWAT é sensível a mais de 100 variáveis e parâmetros de entrada associadas aos seus componentes principais e que o modelo possui ainda parâmetros internos que, na maioria das vezes, não são conhecidos pelo modelador. Assim, na calibração é preciso ter atenção ao momento onde a ferramenta de modelagem estimará esses valores, melhorando seus resultados nos modelos subsequentes. Para isso é necessário que seja estabelecido um intervalo sequencial de tempo, posicionado a partir da data inicial da série que será modelada, que não será computado para fins estatísticos e nem de relatórios, somente rodado gerando valores de parâmetros da água armazenada no solo, crescimento das culturas, entre outros. Este processo de inicialização de parâmetros é comumente definido como um processo de “aquecimento”.

Os dados de entrada, utilizados para calibrar simulações do modelo, têm um efeito direto sobre a validação e os resultados da avaliação. Uma calibragem ideal deve usar de 3 a 5 anos de dados representativos da média entre anos molhados e anos secos, de modo que os dados representem uma gama suficiente de eventos hidrológicos para ativar todos os processos constituintes modelo durante a calibração (GAN et al. , 1997). Contudo, se isto não for possível , os dados disponíveis devem ser separados em dois conjuntos , ou seja, os fluxos de "acima da média" (anos chuvosos) e "abaixo da média" (anos secos) e, em seguida, avaliada com as mais rigorosas faixas de desempenho estatístico requeridas para anos chuvosos (GUPTA et al. , 1999).

Além disso, se o objetivo é testar a robustez da aplicação do modelo, sob diferentes condições ambientais, então diferentes conjuntos de dados podem ser utilizados durante a calibração do modelo e validação (MORIASI et al. 2007).

Em Santhi et al. (2001), encontra-se que no processo de validação, o modelo SWAT é operado com parâmetros de entrada definidos durante o processo de calibração, sem qualquer alteração, e os resultados são comparados para os restantes dados de observacionais com o intuito de avaliar a previsão do modelo.

Não é raro o modelo se comportar bem para o período de calibração, apresentando, entretanto, um desempenho inferior durante a validação. Quando isso ocorre, é necessário verificar o processo de calibração utilizado, levantando dúvidas sobre as considerações feitas sobre o sistema modelado (SOROOSHIAN e GUPTA, 1995).

De maneira geral, os modelos hidrológicos são calibrados com dados de um período de tempo e verificados com dados de outro período. Quando a qualidade dos resultados não se reduz substancialmente, o modelo é considerado verificado e, suficientemente, bom para ser aplicado (COLLISHONN, 2001).

Segundo Solomatine e Wagener (2011), o uso de medidas pontuais, como o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe, raiz do erro médio quadrado, entre outros, não é adequado. Gupta et al. (2008) propõe o uso de assinaturas informativas a respeito do comportamento do modelo, que permitiriam determinar o quanto consistente o modelo se apresenta.

Existem, entretanto, técnicas de calibração que prescindem de validação: São as chamadas técnicas de análise sequêncial de dados (MGRADKHANI et al., 2005), na qual o modelo tem seus parâmetros atualizados a medida que os dados são colhidos.

No presente estudo os resultados de validação obtidos a partir da modelagem do enchimento da barragem Sindicalista Jaime Umbelino de Souza, pois a predição de tal evento, como se verá adiante, pode ser identificada como oportunidade na obtenção de dados que corroborem com a avaliação da qualidade do modelo desenvolvido uma vez que as vazões para a predição do momento do transbordamento foram processadas a partir dos mesmos parâmetros obtidos na calibração e comparadas aos volumes mensurados a cada intervalo de tempo do processo espontâneo de acúmulo de água ocorrido na represa.

É necessário observar que, embora um rigoroso procedimento de calibração do modelo deva ser adotado para a redução de erros na sua saída, a experiência demonstra que os resultados da simulação podem conter erros substanciais. Portanto, ao invés de fornecer um valor de estimativa estatístico de uma dada quantidade de saída do modelo, pode ser preferível fornecer este valor de saída simulado associado a um intervalo de probabilidade, ou seja, um valor que será contido pelo intervalo probabilístico (HAAN et al., 1998).

Haan (1998) relata que a análise de incerteza é definida como o processo de quantificação do nível de confiança num dado de saída do modelo simulado que está fundamentado, entre outros, a qualidade e quantidade de dados de medição disponíveis; a ausência de dados medidos, devido à falta de acompanhamento em determinadas localizações; a falta de conhecimento sobre alguns processos físicos e/ou procedimentos operacionais; as aproximações de natureza linearizante das equações matemáticas utilizadas para simular processos e a qualidade da análise de sensibilidade do modelo e calibração. Assim, considera-se que o aprofundamento da discussão acerca da avaliação de incertezas esteja para além do escopo desta pesquisa.

## 2 – METODOLOGIA

### 2.1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área a ser estudada compreende a bacia hidrográfica do rio Poxim-açu localizada na porção leste do estado de Sergipe. Localiza-se entre as coordenadas geográficas de  $10^{\circ}47'48''$  e  $10^{\circ}56'12''$  de latitude sul e,  $37^{\circ}11'05''$  e  $37^{\circ}24'19''$  de longitude oeste, conforme Figura 2.1. Compreendendo uma área de  $128,08 \text{ km}^2$ , sendo seus principais afluentes riacho Cajueiro, das Minas, das Serras, das Porteiras, Tiririca, Caroba, Lagoa Preta, Damásio, Menino, Buraco da Besta, Vermelho, Sizia e o riacho Timbó – que possui o maior fluxo d’água (AGUIAR NETTO et al., 2006).

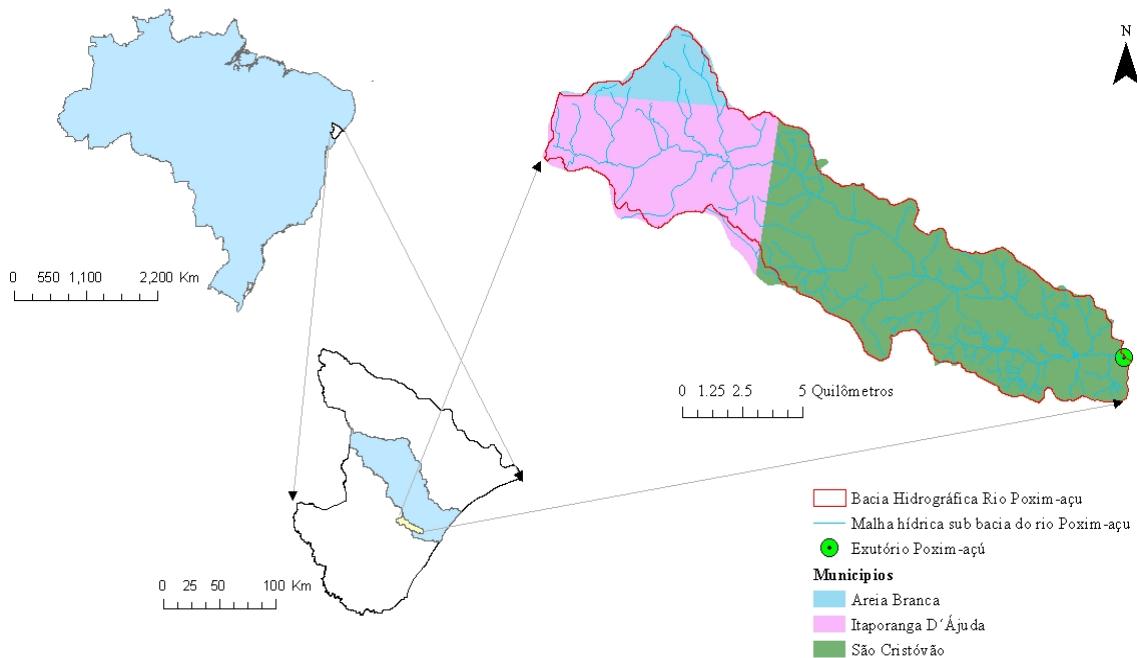


Figura 2.1- Localização da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu. Fonte: Atlas Hidrológico Digital de Sergipe (2012).

O clima da bacia hidrográfica do rio Poxim, de acordo com a classificação climática de Köppen, se enquadra no tipo As (SERGIPE, 2012), clima tropical úmido com seca no verão, devido a proximidade do mar e pelo baixo relevo exposto aos ventos alísios.

A forma de relevo dominante é de colina com cristas e topos arredondados, embora também apareçam os interflúvios tabulares. A quase homogeneidade das formas é devido às características sedimentares das rochas, variando o nível de aprofundamento da drenagem. (AGUIAR NETTO et al, 2007).

Segundo Cruz (2009), acerca do seu estudo da distribuição das chuvas para o estado de Sergipe, verificou-se a ocorrência de dependência espacial nos dados analisados, onde se pode constatar que as chuvas na região da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu possuem

comportamento distinto, assim para o mês de agosto, por exemplo, apresenta o comportamento de maiores intensidades no sentido da serra de Itabaiana para a sede municipal de Aracaju, enquanto que nos meses como o de maio a variação de intensidade tem sentido contrário.

Os índices pluviométricos apresentam valores totais médios anuais distintos e coerentes, entre 1800mm a 1600mm. Onde o período dito chuvoso tem maior concentração entre os meses de maio e agosto, com a temperatura variando entre 23 °C, para os meses mais frios – julho e agosto – e, 31 °C, para os meses mais quentes – dezembro e janeiro (SILVA, 2001; SOARES, 2001).

A nascente principal do rio Poxim-açu está localizada no Povoado Cajueiro, no município de Itaporanga d'Ajuda, e sua foz na confluência com o rio Poxim-mirim, quando passam a constituir o rio Poxim, Aguiar Netto et al. (2006). O rio possui aproximadamente 56,5 km de extensão, entretanto considera-se no presente estudo a extensão de 53,4 Km, em função da existência de uma estação fluvio-pluviométrica em local que oferece melhor logística, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – IFS Campus São Cristóvão.

A bacia hidrográfica do rio Poxim-açu está localizada nos domínios da Província Costeira e Margem Continental, representadas pelas bacias sedimentares costeiras mesocenozóicas e suas extensões submersas na margem continental, desenvolvidas a partir do Jurássico (SANTOS, 2004). Este embasamento geológico, denominado Bacia de Sergipe-Alagoas, registra as diferentes fases de fragmentação, desde o período da formação continental Gondwana, cuja evolução se estende até os dias atuais (CUNHA, 2010). Destro (1995) explicitam que as principais falhas, na Bacia Sergipe-Alagoas, são as de Itaporanga, Siriri e Sinimbu e reconheceu que diversas falhas de direção NW-SE presentes, representavam falhas de alívio. É importante salientar que conforme Sergipe (2012), ocorre uma falha de alívio que intercepta transversalmente a bacia hidrográfica do rio Poxim-açu na sua porção mediana (Figura 2.2).

A bacia hidrográfica do rio Poxim encontra-se inserida no bioma da Mata Atlântica, mas com raríssimos e fragmentos remanescentes da Floresta Tropical Úmida (BRASIL, 2001). Em relação ao uso e ocupação do solo destacam-se a pecuária (50,31%), agricultura (7,0%), Floresta Estacional (36,5%), ocupações urbanas (0,16%), Mata ciliar (2,31%), Vegetação de restinga (3,11%), Superfície d'água (0,04%) e Áreas degradadas (0,55%), (SERGIPE, 2012).

Os solos predominantes na região são: argissolo vermelho amarelo, neossolo quartzarênico litólico, neossolo quartzarênico e gleissolo. O neossolo quartzarênico litólico, representando 9,8%, encontra-se em áreas de relevo forte ondulado das serras residuais. O neossolo quartzarênico (10,9%) é oriundo de deposições fluviais recentes, são subsequentes aos solos litólicos no sentido da diminuição do relevo. O argissolo vermelho amarelo, representando 64,5% da bacia, tem sua ocorrência predominantemente em áreas de tabuleiros costeiros. Os gleissolo, representa 14,8%, são solos periodicamente inundados, margeando os cursos dos rios Poxim-Açu, (SERGIPE, 2012).

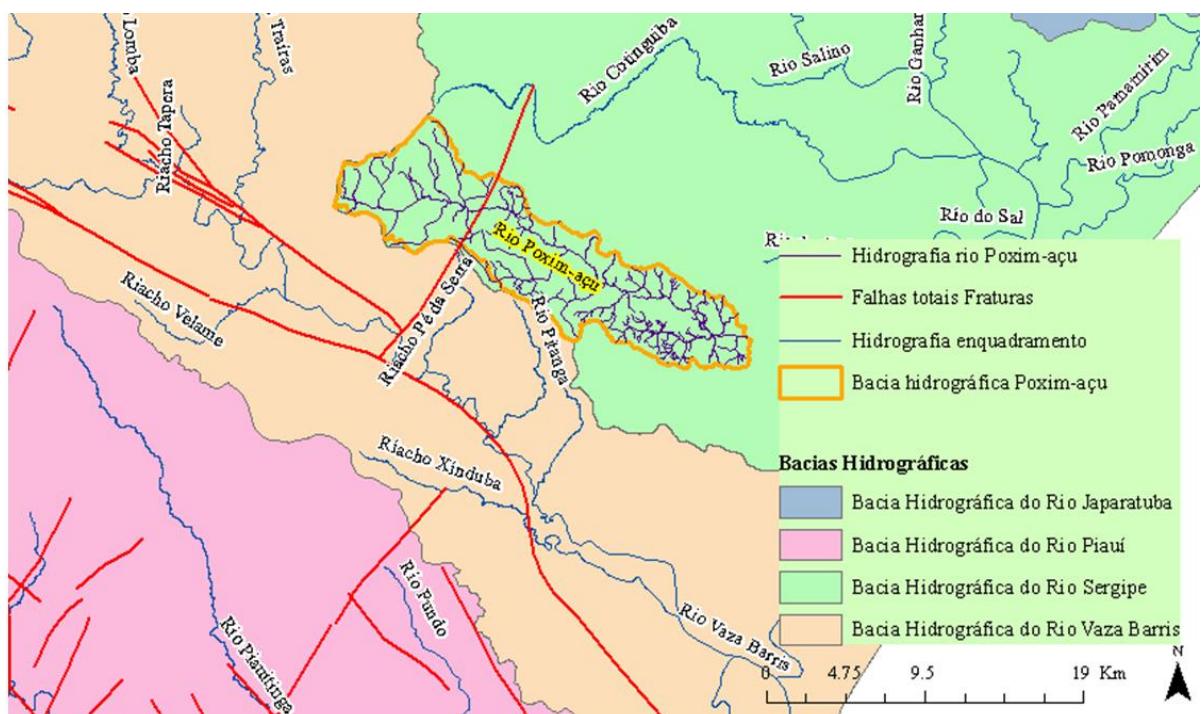


Figura 2.2– Relacionamento das falhas geológicas na região do rio Poxim-açu. Fonte: Atlas Hidrológico Digital de Sergipe (2012).

O rio Poxim-açu, constitui-se no principal corpo d’água da bacia hidrográfica do rio Poxim e apresenta as principais nascentes desta unidade de planejamento. No verão, época de menor precipitação pluvial, o rio Poxim-Açu começa a ser perene cerca de 2000m de seu local original, possivelmente pelo desmatamento ao redor da nascente original (AGUIAR NETTO, 2006).

Em relação aos aspectos humanos, constatou-se no presente estudo, a partir de verificação georreferenciada, a campo, dos locais definidos a partir de estudos da carta de uso/ocupação dos solos em paralelo com a avaliação de imagens de sensoriamento por satélite encontradas no atlas digital de Sergipe (2012), que a bacia hidrográfica do rio Poxim-açu encontra-se bastante povoada em duas porções bastante representativas para este estudo, uma região que é no entorno do exutório onde a estrutura fundiária destaca-se como pequenas

propriedades, melhor caracterizados sob a forma de sítios e chácaras e outra que é na região das nascentes principais do rio, já com ocorrência de propriedades maiores, mas ainda bem caracterizados como um predomínio de sítios, onde se utilizam algumas técnicas de intensificação da produção, como irrigação, adubação, uso de agrotóxicos, entre outros. No curso médio da bacia hidrográfica, por outro lado, não é marcante a observação de localidades e de instalações residenciais, observa-se aí principalmente a exploração agropecuária em áreas mais extensas que nas outras duas regiões. Ao observar no sentido do curso da calha principal do rio, vê-se também que a sua margem esquerda é onde mais prevalece a estrutura de áreas com maior extensão, com ocorrência de pecuária em caráter extensivo e também de cultivos de cana-de-açúcar.

## 2.2 – OBTENÇÃO DOS DADOS

Na figura 2.3, vê-se o aspecto da estação fluvio-pluviométrica, localizada no IFS/SC, constituída por um medidor de altura de lâmina d'água (sensor de nível), um datalogger (modelos WL400 e GW500, respectivamente - marca Global Water), um pluviômetro da marca JCTM, modelo SP-3, placa solar e componentes para alimentação de energia.



Figura 2.3 - Estação pluviométrica do IFS/SC. Fonte: autor.

Os dados climáticos são necessários em dois momentos, o primeiro é na parametrização de Estações de Geração Climática para o SWAT que quando não dispondo dos registros de dados climáticos de entrada para um dado intervalo de tempo de uma simulação, estima os mesmos a partir de um modelo climático disponibilizado internamente num passo alternativo, ou seja, os dados de clima faltantes são estimados pelo modelo climático num pré-processamento de forma automatica. O SWAT roda o modelo de simulação matemática que estima a ocorrência de variáveis climáticas, gerando o que se denomina séries sintéticas de dados que apresentam as mesmas características estatísticas que a série histórica utilizada nesta primeira etapa.

Neste propósito, foram montadas duas estações, uma representando o município de Aracaju e outra o de Itaporanga d'Ajuda, ambos no Estado de Sergipe (Tabela 2.1 e 2.2). Os dados necessários para os cálculos dos parâmetros, foram obtidos a partir da série histórica oferecida para a estação meteorológica Nº 83096 do INMET em Aracaju, nas coordenadas, Latitude: -10.95/Longitude: -37.04 e altitude: 4.72m enquanto que os de Itaporanga foram referentes à estação Nº 1037007 da ANA, localizada na Fazenda Belém, nas coordenadas, Latitude: -10,09/Longitude: -37,71e altitude: 19m.

Os dados diários de precipitação (mm), Temperatura Máxima (°C), Temperatura Mínima (°C), Insolação (h), Umidade Relativa Media (%) e Velocidade média do Vento (m/s), compreendendo o período de 1980 até 2012 da estação Nº 83096 (INMET Aracaju) foram analisados quanto à incidência de falta de dados nos seus registros e selecionou-se o período de 1991 a 2012, ou seja, 22 anos de amostragem.

Os dados de precipitação compreendendo o período de 1991 até 2012 da estação Nº 1037007 (ANA em Itaporanga) foram analisados quanto à incidência de falta de dados nos seus registros e selecionados, 22 anos de amostragem. Os demais dados, necessários ao processamento desta Estação de Geração Climática foram os relativos ao município de Aracaju, conforme descrito no parágrafo anterior, assim ambas as estações só apresentam diferenças relativas aos parâmetro associados a precipitação. Quanto ao dado chuva máxima em meia hora, calculou-se a partir do método de desagregação das chuvas conforme Aragão et al. (2013). Para auxiliar na constituição das Estações de Geração Climática, os parâmetros requeridos podem ser obtidos a partir de planilha eletrônica específica (Srinivasan, 2011).

Tabela 2.1 – Parâmetros para Estação do Gerador Climático de Aracaju.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMP_MX	30,4	30,7	30,8	30,3	29,3	28,4	27,7	27,6	28,3	29,2	29,9	30,3
TMP_MN	23,8	24,1	24,0	23,7	22,8	22,2	21,7	21,8	22,5	23,1	23,5	23,9
DV_TMX	0,91	0,89	0,80	1,07	1,02	0,87	0,80	0,70	0,74	0,88	0,97	1,05

DV_TMN	1,37	1,33	1,26	1,32	1,38	1,50	1,36	1,30	1,26	1,31	1,31	1,35
PCP	53,7	78,5	72,5	174,0	258,6	196,1	157,5	114,3	62,74	57,63	43,3	27,15
DV_PCP	5,59	10,68	6,20	12,79	16,62	12,46	7,25	7,25	5,09	7,79	5,20	4,03
SKW_PCP	5,34	8,38	5,39	3,52	4,05	3,97	2,27	4,87	5,10	7,90	6,03	8,65
PR_W(1)	0,24	0,22	0,26	0,41	0,46	0,57	0,57	0,55	0,30	0,18	0,16	0,14
PR_W(2)	0,49	0,59	0,61	0,67	0,73	0,74	0,77	0,72	0,59	0,51	0,49	0,40
PCP_DAYS	9,60	9,67	12,47	16,33	19,60	20,73	22,13	20,47	13,33	8,20	7,33	5,93
RAINHHR	15,9	42,8	21,1	25,5	48,8	38,4	14,9	24,1	11	31,6	16,2	17,1
SOLAVG	13,8	13,0	12,8	10,4	8,7	7,51	7,53	9,1	10,9	12,6	14,3	13,9
DEWPT	23,0	23,1	23,1	22,8	22,5	21,5	20,9	20,7	21,3	22,1	22,8	23,0
WINDAV	2,85	2,79	2,55	2,20	2,26	2,21	2,28	2,39	2,71	3,26	3,41	3,30

Tabela 2.2 – Parâmetros para Estação de Gerador Climático de Itaporanga.

Parâmetro	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TMP_MX	30,4	30,7	30,8	30,3	29,3	28,4	27,7	27,6	28,3	29,2	29,9	30,3
TMP_MN	23,8	24,1	24,0	23,7	22,8	22,2	21,7	21,8	22,5	23,1	23,5	23,9
DV_TMX	0,91	0,89	0,80	1,07	1,02	0,87	0,80	0,70	0,74	0,88	0,97	1,05
DV_TMN	1,37	1,33	1,26	1,32	1,38	1,50	1,36	1,30	1,26	1,31	1,31	1,35
PCP	99,90	127,7	125,8	137,4	178,2	118,4	115,1	119,4	95,45	125,0	95,5	98,3
DV_PCP	8,73	11,41	10,08	10,66	13,97	9,55	8,14	8,66	8,12	14,14	11,49	8,91
SKW_PCP	4,39	5,94	4,70	4,41	5,12	3,69	3,33	3,70	4,00	7,39	7,09	4,40
PR_W(1)	0,20	0,29	0,27	0,29	0,34	0,30	0,30	0,32	0,27	0,24	0,18	0,17
PR_W(2)	0,63	0,67	0,64	0,63	0,61	0,57	0,61	0,61	0,53	0,54	0,55	0,66
PCP_DAYS	10,96	13,00	13,35	13,04	14,43	12,22	13,39	14,04	10,96	10,70	8,82	9,95
RAINHHR	24,6	54,0	33,1	36,0	48,6	24,8	20,4	24,9	24,9	69,3	45,4	24,6
SOLAVG	13,8	13,0	12,8	10,4	8,7	7,51	7,53	9,1	10,9	12,6	14,3	13,9
DEWPT	23,0	23,1	23,1	22,8	22,5	21,5	20,9	20,7	21,3	22,1	22,8	23,0
WINDAV	2,85	2,79	2,55	2,20	2,26	2,21	2,28	2,39	2,71	3,26	3,41	3,30

TMP\_MX – Média da Temperatura máxima diária(°C); TMP\_MN – Média da Temperatura mínima diária(°C); DV\_TMX – Desvio padrão da temperatura máxima; DV\_TMN – Desvio padrão da temperatura mínima; PCP – Média diária da precipitação (mm); SKW\_PCP – Coeficiente skew para a precipitação diária; PR\_W(1) – Probabilidade de dia com chuva seguido de um dia seco; PR\_W(2) – Probabilidade de um dia de chuva seguido de outro dia de chuva; RAINHHR – Chuva máxima em meia hora; PCP\_DAYS – N° médio de dias chuvosos; SOLAVG – Radiação solar média diária no mês (MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>); DEWPT – Temperatura média diária do ponto de orvalho (°C); WNDAV – Velocidade do vento médio diário no mês (m.s<sup>-1</sup>).

Já quanto ao segundo momento que os dados climáticos são necessários é na realização propriamente dita da execução de modelos com o SWAT. Na presente pesquisa, realizou-se simulações a partir de dados de chuvas de vários locais no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, cujos resultados das vazões diárias simuladas foram avaliados graficamente (Anexo B) em relação aos valores diários de vazão observados (Anexo D) disponíveis para o período de 17 de janeiro de 2012 a 08 de agosto de 2012. Estas avaliações básicas, de correlações gráficas entre picos de maior intensidade das chuvas e picos de vazão, resultaram num dos critérios de seleção da fonte de dados a ser adotada nos estudos.

Tais simulações foram realizadas objetivando a análise de dados de precipitação das seguintes fontes: da Estação Fluvio-linimétrica no Instituto Federal de Sergipe de São Cristovão (IFS/SE), das estações da Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMAR/SRH) localizadas em São Cristovão, em Laranjeiras e em Aracaju, os dados da estação climática da Agência Nacional de Águas (ANA) da Fazenda Belém em

Itaporanga d'Ajuda e os dados das estações OMM: 83096 e A409, ambas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/BDMED). A distribuição espacial das estações avaliadas podem ser visualizadas na Figura 2.4.

É importante destacar que os dados relativos à precipitação, são de longe os mais sensíveis ao correto funcionamento do modelo, assim *a priori*, os dados de chuva das estações do INMET em Aracaju e os da Estação da ANA em Itaporanga d'Ajuda foram selecionados por apresentarem séries de dados extensas o suficiente para a parametrização de todas as etapas da modelagem com o SWAT, como o Gerador Climático, a calibração e as simulações preditivas. Possibilitando estudos destas duas condições de precipitação sobre diferentes modelos desenvolvidos, em relação às suas repercussões na distribuição hidrológica da produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

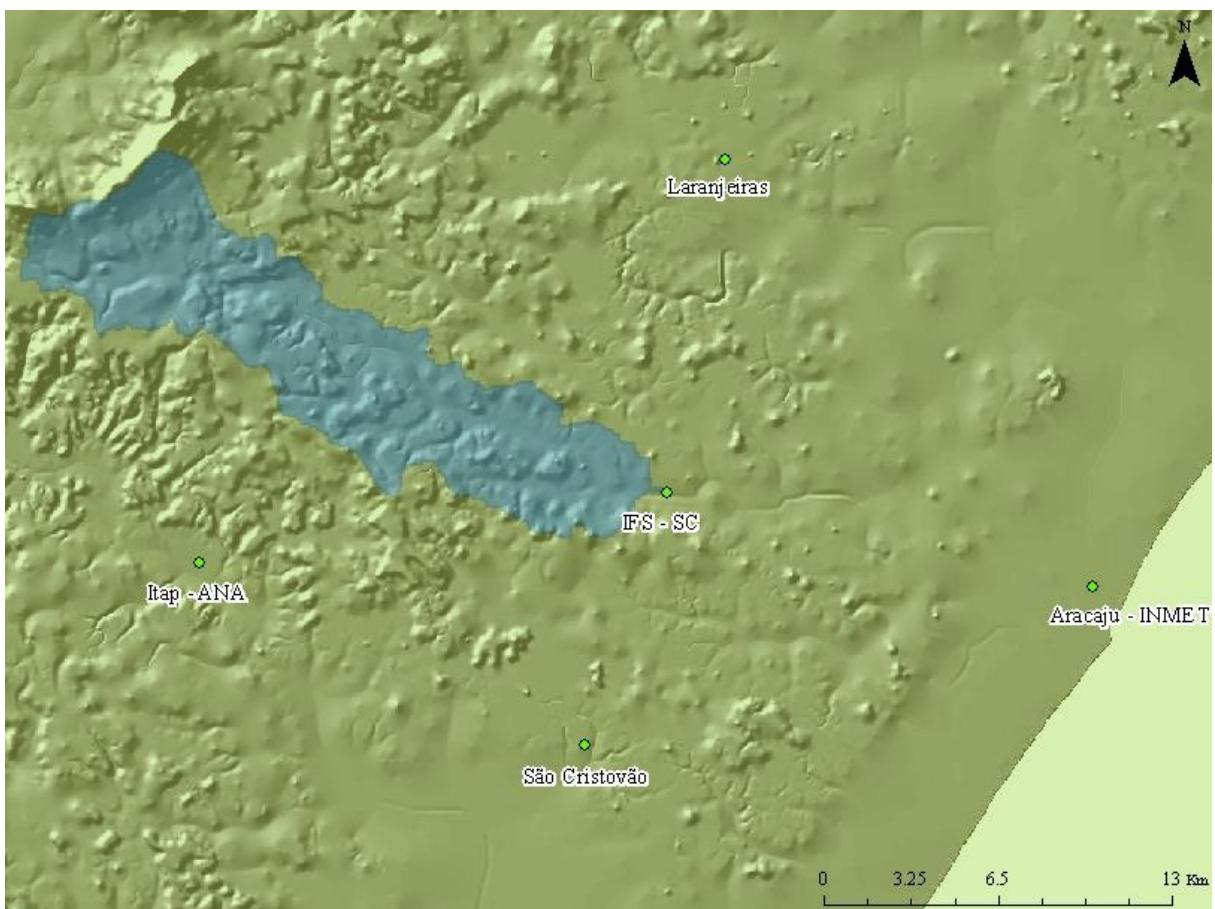


Figura 2.4– Distribuição espacial das estações fluviométricas avaliadas no estudo de produção de água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu. Fonte: Atlas Hidrológico Digital de Sergipe (2012).

Quanto aos dados de radiação solar, há uma restrição de liberação de dados para a estação automática do INMET (A409-Aracaju) relativa à liberação de somente os últimos três meses, de dados, anteriores ao momento do pedido. Assim, sendo esta estação a única fonte

de registro para tais dados mensurados, os dados foram coletados para o período de março de 2013 a outubro de 2013, em duas etapas, e foram totalizados para valores horários para totais diários e os resultados utilizados num procedimento, com auxílio de gráficos (Figura 2.5), de calibração (dados mensurados/dados estimados) do método de cálculo de radiação solar contido no modelo da evapotranspiração de Penman Monteith conforme descrito por Souza e Silva (2013). Isto possibilitou a geração dos valores de radiação para todo o período temporal demandado pelo presente estudo.

Os dados vetoriais de solos foram obtidos a partir do arquivo vetorial de solos existente em Sergipe (2012), nesta mesma fonte, também se obteve os dados vetoriais de uso e ocupação da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, que a partir de levantamentos de campo e análise de imagens SPOT (SERGIPE, 2012), demonstraram boa adequação nas avaliações para a região considerada. Quanto ao Modelo de Elevação do Terreno, sua obtenção se deu a partir do portal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, na área do projeto Brasil em Relevo, onde foi selecionada o encarte SC-24-Z-B, em formato geotiff (MIRANDA, 2013).

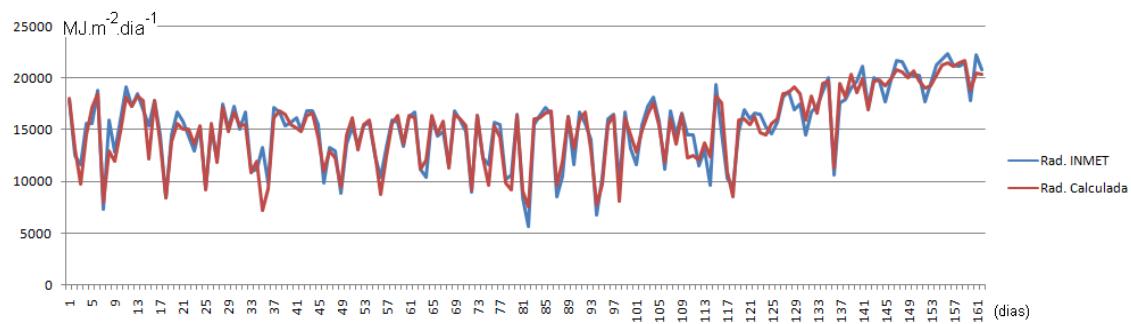


Figura 2.5– Resultado da calibração gráfica do método de cálculo da Radiação Solar. Fonte: INMET (2013).

Sobre os dados específicos das análises de solos, eles estão apresentados no Anexo A (SILVA, 2013). É importante destacar em relação a esta informação, que a autora, já mencionara o fato de que os solos, principalmente sua elevada permeabilidade, eram preponderantes para um ajuste satisfatório dos demais parâmetros da calibração da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

### 2.3 – MODELAGEM/CALIBRAÇÃO

A partir dos dados de entrada apresentados anteriormente, realizou-se os passos de entrada dos mesmos na parametrização inicial do SWAT. Então, iniciou-se o procedimento *Delineador de Bacia Hidrográfica*, ou de delimitação da bacia hidrográfica do modelo, isto foi realizado com a determinação preliminar da melhor escala de definição como sendo a divisão da bacia em 15 sub-bacias onde os pontos do tipo “inlet”, que as determinaram, foram definidos utilizando-se como tema de fundo o encarte vetorial de uso e ocupação das terras,

uma vez que os aspectos de relevo estão implícitos quando da divisão da bacia em sub-bacias e que os tipos de solos estarão contemplados no momento da definição das HRU's assim, pôde-se utilizar as características de cobertura das áreas na definição final de sub-bacias representativas (Figura 2.6).

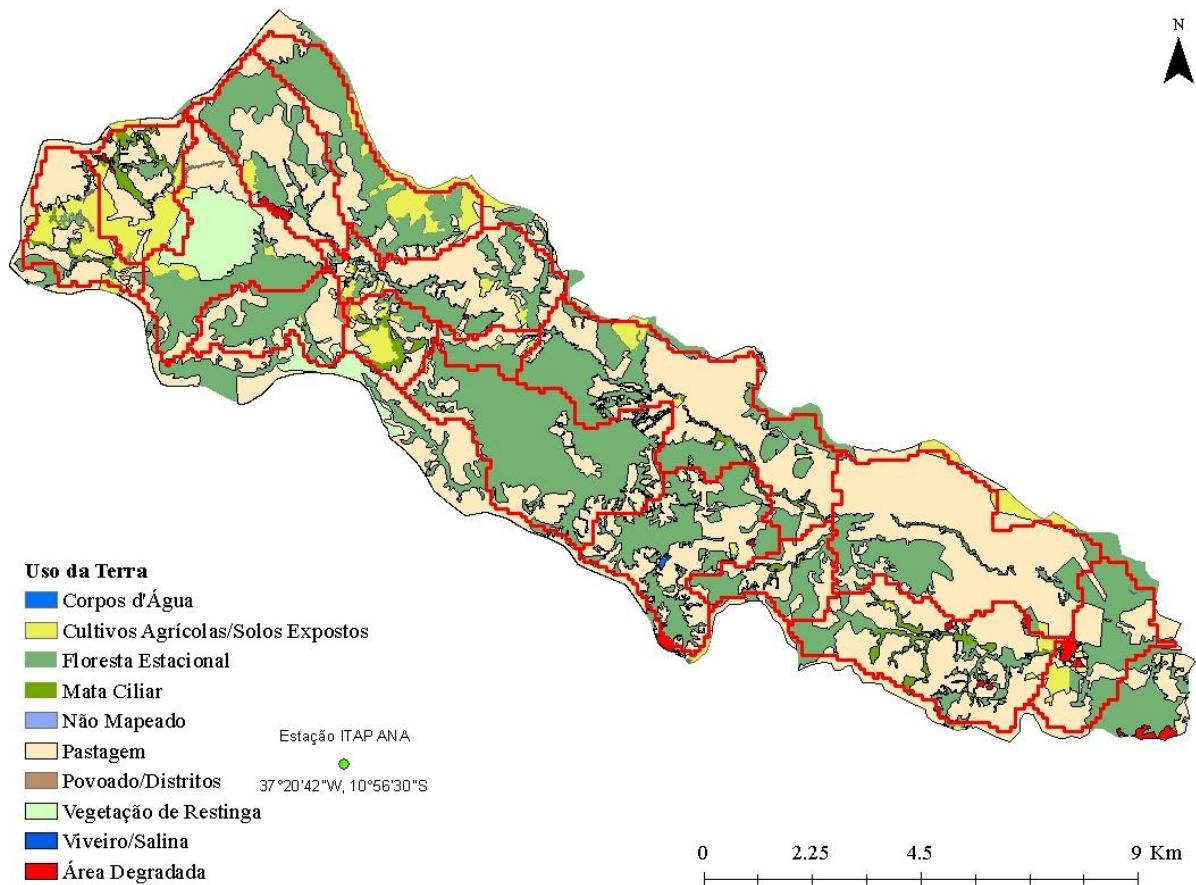


Figura 2.6– Divisão da bacia em 15 sub-bacias em função do uso e cobertura da área.  
Fonte: Swat (2013)

Na etapa de processamento *Análise e Definição de HRU's* fez-se a inserção das camadas vetoriais de solos, cultivos, usos e ocupações necessários à discretização da bacia hidrográfica em estudo. Para as culturas, cadastrou-se a Floresta Ciliar (FRSC) e a Floresta Restinga (FRSR), utilizando-se para isto os valores default do SWAT para a cultura Forest-Evergreen (FRSE). Para os tipos de solos, cadastrou-se os Argissolos, o Neossolo Quartzarênicos e os Gleissolos. Os outros dois tipos de solos, os Neossolos Litólicos Eutróficos e os Neossolos Litólicos (Figura 2.7), presentes na bacia hidrográfica foram fundidos em uma só categoria, com o objetivo de contornar a abordagem interna do SWAT quando da generalização das camadas vetoriais não classificadas nos níveis de ajuste no momento de delimitação das HRU's. Em relação às classes de declividade se adotou aquelas estabelecidas pela EMBRAPA (BRASIL, 1979).

Finalmente, na etapa de Definição das HRU's, estabeleceu-se as faixas de Cortes entre Tipos de Solo X Uso/Ocupação X Declividade, do seguinte modo: 5% para o Uso/Ocupação sobre a área da sub-bacia, 10% para a Classe de Solo sobre o Uso/Ocupação dos Solos e 5% para a declividade sobre a Classe de solo. O rebaixamento da faixa de corte da Declividade sobre a Classe de solo objetivou à máxima consideração deste fator dentro de um limite de representatividade do relevo observado na bacia hidrográfica em estudo.

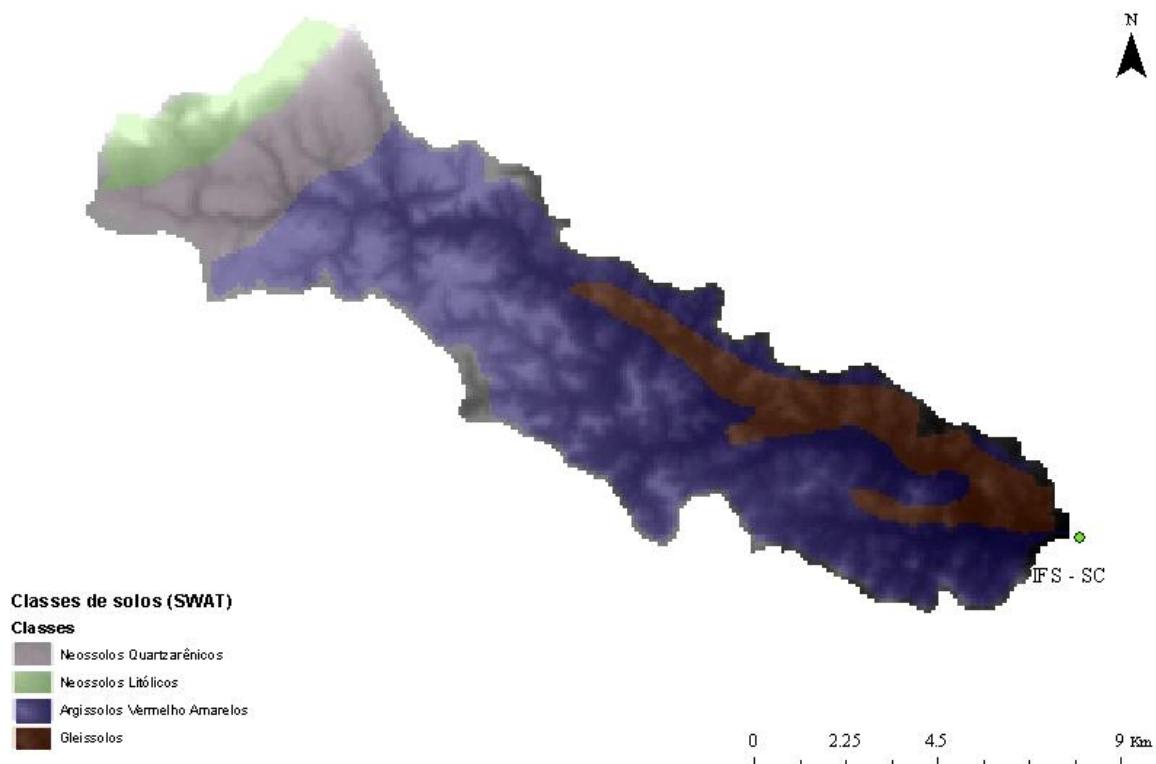


Figura 2.7– Classes de solo X Modelo digital do relevo. Fonte: Atlas Hidrológico Digital de Sergipe (2012).

De início, a calibração foi realizada com ajustes nos parâmetros identificados na análise de sensibilidade do modelo, que foi realizada a partir do procedimento automático disponível no ArcSWAT versão 2005. Segundo van Griensven (2006), este procedimento opera sob algoritmo LH-OAT, destacando-se que o parâmetro que alcança o primeiro lugar no ranking de sensibilidade é muito importante, os que alcançam as posições de 2 a 6 são importantes e os que estão nas posições 7 a 20 são pouco importantes. No presente estudo utilizou-se os 8 primeiros parâmetros ordenados por cada processo de análise realizado. Um realizado com a função objetivo *soma dos quadrados dos resíduos* ativa, demandando dados de vazão observados, período de 17 de janeiro de 2012 a 08 de agosto de 2012, no processamento, e outro realizado com a função objetivo inativa, não requerendo os dados observados.

Finalmente trabalhou-se com a calibração manual numa abordagem, fundamentada no estudo de alguns fenômenos identificados em relação possibilidade de grande influência sobre o fluxo das águas na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, como será visto no próximo capítulo. O período temporal, relativo à execução das simulações para avaliação dos resultados, da calibração refere-se também ao mesmo período relativo aos dados disponíveis das vazões diárias do rio Poxim-açu registradas entre período de 17 de janeiro de 2012 a 08 de agosto de 2012 (Anexo D), tendo sido obtidas a partir da curva-chave proposta por Silva (2011) para os dados da estação pluvio-fluviométrica do IFS/SC.

Apesar de o período poder ser considerado pouco representativo, isto vai depender de um nível de escala, ou seja, para considerações climáticas por exemplo, é insuficiente, por outro lado, pode representar diferentes momentos hidrológicos relativos aos períodos de chuvas e de estiagem da região em relação às respostas fluviométricas dos corpos hídricos (VASCO et al. 2010).

## **2.4 – ANÁLISE PREDITIVA E VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS**

A análise preditiva foi realizada a partir do dia 23 de maio de 2013, data que se observou o fechamento das comportas da represa, até o dia 15 de outubro de 2013, data que se observou vertimento. Contudo, todos os dados diários relativos às precipitações do ano de 2013, foram lançados com o valor -99, para que os respectivos Geradores de dados climáticos do SWAT pudessem gerá-los e, posteriormente, os processem conforme ajustes da calibração parametrizada, gerando daí os dados de vazão simulados e no caso preditivos.

O procedimento da validação, ou avaliação dos resultados das simulações calibradas e preditivas, foi obtido a partir da realização da avaliação estatística entre os resultados de simulações utilizando-se a parametrização proposta no estudo de Silva (2013) e a parametrização do modelo SWAT conforme a proposta desenvolvida aqui para simular preditivamente o enchimento da barragem do rio Poxim-açu. Complementarmente, desenvolveu-se um procedimento de avaliação do enchimento da represa observado em relação aos resultados de predição.

Com o comprometimento do monitoramento linográfico do rio Poxim-açu, em virtude da regularização do fluxo de vazão (Figura 2.8), estimado para o presente estudo em  $0,2\text{m}^3/\text{s}$ , observou-se que o monitoramento do evento do enchimento da represa resultaria em um conjunto de dados suficientemente interessantes ao atendimento de alguns dos objetivos da validação. Além de oportunizarem a realização de simulações preditivas quanto à duração total até o momento do vertimento, assim passou-se a realizar visitas ao talude da barragem,

local onde se pode ter acesso visual a um lance de réguas e realizar o registro fotográfico dos níveis da água (Figura 2.9). Inferiu-se a cota de enchimento a partir de uma análise fotográfica (Figura 2.10), traçando-se uma reta imaginária na altura aproximada da cota do vertedouro, paralela à aresta do topo do talude, o que representou uma leitura estimada em 21,2m no lance de réguas aproximadamente, ou a 29m no MDE.



Figura 2.8– Aspecto lançamento da água de fundo da barragem, vazão regular de  $0,2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .  
Fonte: o autor.



Figura 2.9– Vista a montante do talude da Represa do rio Poxim-açu. Detalhe das réguas instaladas para acompanhamento do enchimento da represa. Fonte: autor.

Isto foi conseguido a partir da observação de que na base da Torre de tomada d'água há um aprofundamento por conta de escavações para sua construção e que após preenchimento pela água possibilitou o registro do nível de referência do fundo da represa, a partir das réguas, o que correspondeu a aproximadamente 6m, ou a aproximadamente 14m de cota de base em relação ao MDE.



Figura 2.10– Referência da cota de enchimento a partir do lance de régua, pela extensão de uma linha imaginária. Fonte: o autor.

De posse do registro fotográfico, dos níveis de enchimento procedeu-se a modelagem da elevação digital do terreno para a área de influência do reservatório. A partir de dados provenientes do levantamento aerofotogramétrico de 2004, realizado pela Secretaria de Recursos Hídricos (SEPLAN/SRH), onde constam também dados resultantes do trabalho de amostragem de cotas altimétricas e de curva de nível com resolução vertical de 5m. Estes dados foram extraídos em relação à área de interesse e interpolados para a confecção do MDE de melhor resolução que o SRTM (Figura 2.11).

Este trabalho aliado aos valores de cota de fundo e cota de topo de enchimento, permitiram a modelagem dos volumes acumulados na represa, partir do MDE gerado, tendo sido calculados a partir dos vários planos de enchimento, realizando-se os cálculos da área da superfície do espelho d'água e dos respectivos volumes de água, através do Software ArcGis® da ESRI (Tabela 2.3). O procedimento consiste na reclassificação do MDE para as faixas de cotas que se desejar obter o volume e a área de superfície do espelho d'água. Após a reclassificação realiza-se a conversão do MDE para o formato vetorial, obtendo-se assim os

polígonos de interesse e em seguida o arquivo vetorial sofre a separação de cada polígono de modo a se obter um único arquivo específico para cada polígono. Finalmente, processa-se o cálculo do volume e da área da superfície da lâmina d'água, utilizando-se um tipo especial de MDE, obtido pela técnica de triangulação (TIN), em conjunto com o arquivo vetorial relativo a cada polígono obtido no passo anterior.

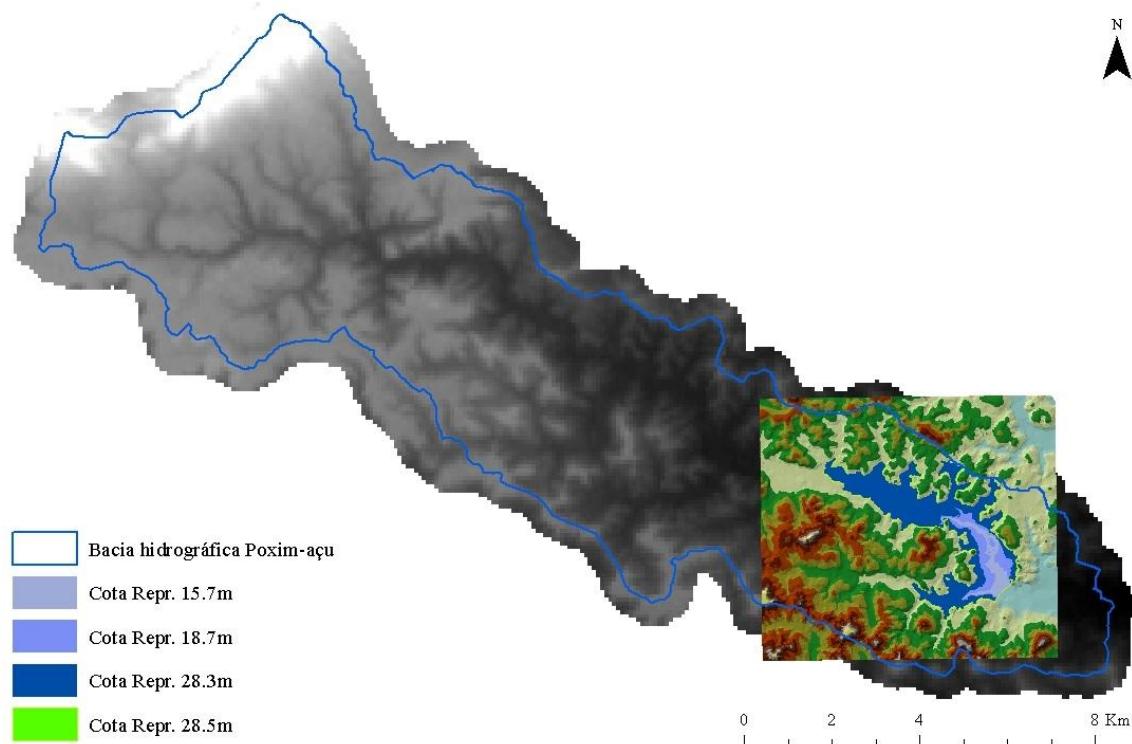


Figura 2.11 – Modelagem da Elevação do Terreno para a área de interesse e detalhes do enchimento da represa em diferentes cotas. Fonte: (SEPLAN/SRH, 2004)

Tabela 2.3 – Cálculos de enchimento da represa a partir do MDE.

Registro Fotográfico		Correlações MDE ArcGis®		
Data	Cota Régua (m)	Cota MDE (m)	Volume MDE Vol (m <sup>3</sup> )	Área espelho d'água (m <sup>2</sup> )
23/05/2013	6,21	14,00	9.199,30	16.444,93
06/06/2013	7,78	15,57	226.616,12	415.611,29
13/06/2013	10,68	18,47	2.472.093,26	1.067.609,63
02/08/2013	18,4	25,62	21.173.212,15	4.057.450,72
19/09/2013	20,38	26,19	29.821.450,32	4.715.585,68
02/10/2013	20,45	28,17	30.151.112,86	4.740.910,00
15/10/2013	21,31	29,1	34.352.603,88	5.069.215,91

Desta forma, obteve-se duas equações-chave que relacionaram o volume (Vol) à cota (h) do enchimento (Equação 1) e o volume (Vol) à área (A) do espelho d'água formado (Equação 2). Observando que a equação 1 corrige a faixa da cota do MDE (14 a 29,1m) de modo que resulta em valores na faixa do lance de réguas, a fim de facilitar a aplicação de avaliações estatísticas. As equações foram desenvolvidas com a utilização do software EXCEL® da Microsoft, aplicando-se o modelo de regressão polinomial. Valores próximos a 1 dos coeficientes  $R^2$  obtidos indicam que as variações dos valores das cotas e das áreas de espelho d'água formadas são bem explicadas pelo conjunto de equações obtido.

$$h = -7E-06*Vol^4 + 0,001*Vol^3) - 0,0462*Vol^2 + 1,154*Vol + 6,2$$

$$R^2 = 0.9872 \quad (\text{Equação 1})$$

$$A = 9.76E-31*Vol^5 - 1E-22* Vol^4 + 4E-15* Vol^3 - 7E-8* Vol^2 + 0,5599* Vol + 154852$$

$$R^2 = 0.99 \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

h é a cota no lance de réguas (m) – Utilizar Vol em  $\text{Km}^3$ ;

A é área da superfície do espelho d'água formado ( $\text{m}^2$ ) – Utilizar Vol em  $\text{m}^3$ ;

Vol é o volume de enchimento do lago;

Estas equações serviram para a obtenção dos volumes de evaporação da água pela superfície do lago, quando, pela correlação entre os valores das áreas da superfície do espelho d'água formadas para cada cota de enchimento, com as taxas de evaporação calculadas pelo método de Morton (1983) utilizando-se o programa WREVAP (MORTON et. al, 1985). O cálculo da produção de água é obtido então a partir do seguinte balanço: Volume de água produzido no dia pelo modelo calibrado, subtraído da soma entre o volume de escoamento base de fundo ( $0.2\text{m}^3/\text{s}$ ) e o volume evaporado no dia (Área lâmina d'água x  $\text{mm} \cdot \text{m}^2$  evaporado). O resultado é somado ao volume já acumulado no lago até o dia anterior, sucessivamente, até que se complete seu total enchimento (Anexo F).

E deste modo, obteve-se a produção de água do rio Poxim-açu para o período de 23 de maio de 2013 a 15 de outubro de 2013, que é o período total de tempo monitorado para o enchimento da represa, subsidiando o procedimento alternativo de validação a partir da comparação do enchimento real, registrado fotograficamente, da represa com o enchimento a partir das vazões preditivas simuladas pelo SWAT e avaliação entre os valores de cota

observados e valores de cota calculados para os volumes acumulados até cada data respectiva de observação registrada.

## 2.5 – ESTATÍSTICAS E QUALIFICAÇÃO DA MODELAGEM HIDROLÓGICA

No processo estatístico para a avaliação da qualidade dos dados gerados por qualquer modelagem, tanto os da calibração como os da validação, devem ser comparados àqueles observados e registrados para os respectivos períodos, tal processo tem sido realizado com base na seleção de coeficientes estatísticos mais utilizados em outros estudos e em resultados de pesquisas de avaliação de adequabilidade de tais coeficientes à técnica de modelagem utilizada. Para avaliação dos resultados obtidos com modelagem feita com O SWAT, se identificam o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (COE), a Tendência Percentual (PBIAS) e a Razão entre o erro quadrático médio e o desvio padrão dos dados medidos (RSR) como os testes estatísticos mais adequados, também se destaca a importância do uso das técnicas gráficas de avaliação dos resultados da calibração (MORIASI et al. 2007).

Abaixo, uma breve discussão acerca dos principais índices estatísticos utilizados na modelagem com SWAT:

- Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE ou COE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

$O_i$  = evento observado;

$s_i$  = evento simulado;

$\bar{O}$  = média dos eventos observados no período de simulação

O Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 3) é um coeficiente do campo da regressão linear padrão, ou seja, referente a proximidade de uma relação linear entre dados simulados e observados. O NSE determina a razão entre a variância relativa e a variância dos valores observados (MORIASI et al, 2007). Os valores de NSE variam entre  $-\infty$  e 1, sendo a unidade o valor para o qual os dados simulados se adequam perfeitamente às observações. Valores entre 0 e 1 são geralmente tidos como aceitáveis (MORIASI et al., 2007).

- A Tendência Percentual (PBIAS)

É um índice de erro, quantificando o desvio entre dados simulados e observados nas próprias unidades da variável em estudo (MORIASI et al., 2007). O PBIAS (Equação 4)

indica a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os observados. Usando a mesma nomenclatura, tem-se a seguinte fórmula:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (\text{Equação 4})$$

Para uma relação ótima tem-se PBIAS igual a zero sendo que valores de pequena magnitude indicam bons ajustes. Valores positivos indicam uma superestimação dos valores simulados enquanto valores negativos indicam uma subestimação dos valores simulados (MORIASI et al., 2007).

- Relação entre a RMSE (raiz do erro médio quadrático) e o desvio padrão da série observada (RSR)

RMSE é uma das estatísticas de índice de erro comumente usados (CHU & SHIRMOHAMMADI, 2004); (SINGH et al, 2004); (VASQUEZ-AMÁBILE & ENGEL, 2005). Embora seja comumente aceito, que quanto menor o RMSE melhor o desempenho do modelo, apenas Singh et al . (2004) publicaram uma diretriz para qualificar o que é considerado um valor RMSE baixo. Esta recomendação de Singh et al. (2004) resultou no desenvolvimento do método RSR que padroniza RMSE usando as observações do desvio padrão.

O coeficiente RSR (Equação 5) incorpora os benefícios estatísticos dos índices de erro e inclui um fator de escala/normalização, de modo que valores estatísticos resultantes são relatados poderem ser aplicados de forma consistente. RSR varia entre o valor ideal 0 para um grande valor positivo. Um valor 0 indica um RMSE 0, ou que quanto menor o RSR, menor o RMSE, sendo indicativo de melhor performance da simulação do modelo.

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (\text{Equação 5})$$

Os resultados obtidos a partir dos coeficientes acima descritos devem ser avaliados segundo faixas de valores e critérios padronizados de avaliação. Moriasi et. al (2007), realizaram um extenso levantamento de trabalhos de modelagem realizados com o SWAT e dos critérios de avaliação estáticos utilizados nos mesmo, identificando os principais coeficientes utilizados, suas fundamentações teóricas, suas adequabilidades na avaliação dos modelos desenvolvidos, as faixas utilizadas para a classificação das avaliações feitas nos estudos e apresentaram suas conclusões conforme a Tabela 2.4. Nela são listados, segundo os

autores os coeficientes e faixas de classificação mais recomendáveis para serem utilizados nas avaliações das simulações feitas com o SWAT.

Tabela 2.4 – Quantificação da qualidade de simulações com o SWAT.

Avaliação	RSR	NSE	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,00 \leq \text{RSR} \leq 0,50$	$0,75 < \text{NSE} \leq 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,50 < \text{RSR} \leq 0,60$	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < \text{RSR} \leq 0,70$	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfatório	$\text{RSR} > 0,70$	$\text{NSE} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} > \pm 25$

Fonte: (MORIASI et al., 2007).

Paralelamente, também se realizou diagnósticos visuais dos hidrogramas, simulados frente ao observado, o que consiste em uma importante ferramenta de confirmação do grau de ajuste, sendo segundo Legates e McCabe (1999), essencial para uma correta avaliação do modelo.

### **3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 – ESTUDO DAS PRECIPITAÇÕES DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NA REGIÃO DE ENTORNO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POXIM-AÇU**

Em relação aos volumes precipitados, os resultados obtidos nas estações de São Cristovão e Laranjeiras apresentaram aderência entre si, enquanto os dados da estação pluviográfica da SEMAR/SRH em Aracaju em relação aos da estação da ANA em Itaporanga d'Ajuda também (Tabela 3.1). O volume das chuvas registrado pela estação do INMET em Aracaju no ano de 2012, representou apenas 67% do volume registrado pela estação de Laranjeiras e 69% em relação ao valor de registro para a estação da ANA em Itaporanga e de forma geral foi sempre inferior aos das demais estações.

Tabela 3.1- Dados de precipitação anual registrados por estações do entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu

<b>ANO</b>	<b>SC</b>	<b>LR</b>	<b>AJU</b>	<b>AJU_I</b>	<b>ITAP</b>
2009	1411.5	1849.3	1435.8	1308.7	1467.0
2010	1969.2	1904.1	1516.4	1239.2	1533.3
2011	1680.6	1613.5	1728.5	1304.7	1582.5
2012	1099.6	1102.0	1018.9	741.6	1068.4

SC - São Cristóvão; LR - Laranjeiras e AJU - Aracaju (Estações da SEMAR/SRH); AJU\_I - Aracaju (Estação do INMET) e de ITAP - Itaporanga D'Ajuda (Estação da ANA)

A partir de estatísticas básicas como média, variância e desvio padrão, onde num intervalo de 24 anos de dados diários, compreendidos entre 01 de janeiro de 1988 a 31 de dezembro de 2012, obteve-se resultados ordenados em que os dados de precipitação desta estação, para o ano de 2012, figuram na terceira posição de menor média de chuvas tanto no primeiro quanto no segundo semestre, apresentando-se ainda entre os primeiros em relação à menor desvio padrão e menor variância (Anexo C). Nas figuras 3.1 e 3.2, vê-se gráficos comparativos dos volumes precipitados para os meses do ano de 2012 e as máximas diárias ocorrida em cada mês do mesmo ano.

Em relação aos dados de chuvas obtidos a partir da ANA, relativos à Fazenda Belém em Itaporanga d'Ajuda, apresentaram dois dias com picos de chuva acumulada acima de 140mm em fevereiro e acima de 130mm em maio para o ano de 2012, em avaliações de resultados de simulações sem calibração, obteve-se resultados ruins de análise estatística utilizando-se os dados desta estação por conta de chuvas em intensidade muito acima da média em 19/02/2012 e 22/05/2012 (Figuras 3.2 e 3.4). Para poder obter resultados satisfatórios na calibração do modelo utilizou-se dois métodos, um que consistiu em deixá-los

marcados (-99) para que o Gerador Climático do SWAT os simulasse e outro que consistiu em calcular a média das precipitações registradas para o respectivo dia, entre todas as estações consideradas e lançar como precipitação para os dias em questão.

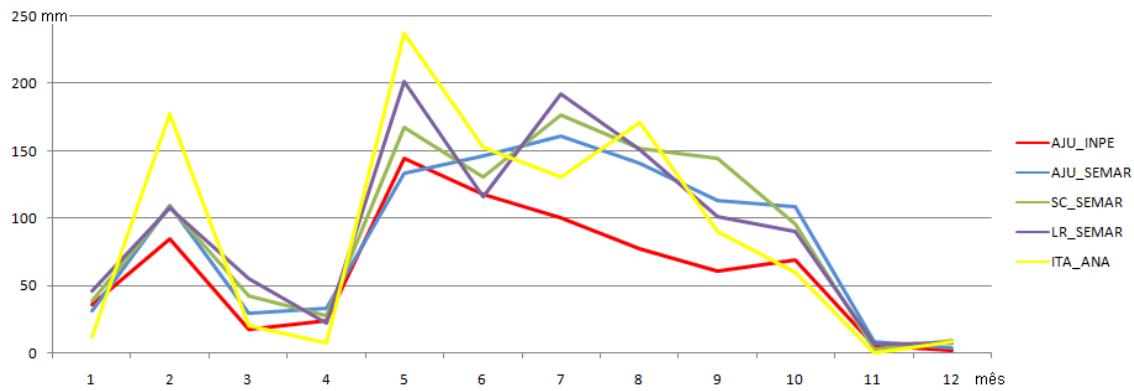


Figura 3.1 - Correlação dos volumes mensais registrados no ano de 2012 no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

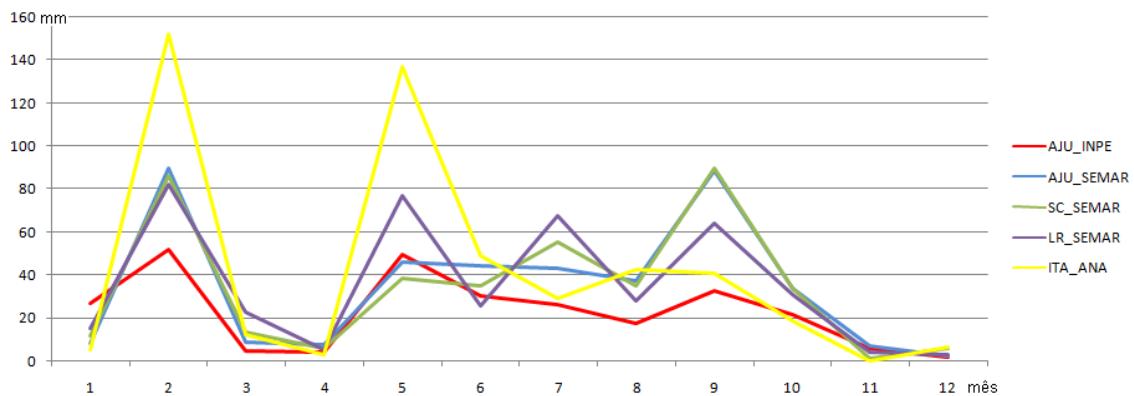


Figura 3.2 - Correlação das precipitações máximas diárias mensais ocorridas no ano de 2012 no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

Em relação ao resultado de avaliações pela técnica gráfica (Figura 3.3 e 3.4), a simulação utilizando-se os dados de precipitação da estação da ANA, em Itaporanga, foi considerada como com melhor ajuste, sendo corroborado o fato quando realizada avaliação a partir de coeficientes de correlação, além ainda, da questão relacionada à maior proximidade da localização geográfica desta estação em relação à bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

As avaliações das simulações obtidas a partir dos dados das diferentes fontes apresentaram consonância às referências encontradas na literatura, onde se relata que um problema relacionado com a chuva é a estimativa de sua distribuição espacial, a exemplo de Tucci (1998) que alerta para o fato de que a distribuição temporal e espacial da precipitação pode embutir erros superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos físicos numa bacia hidrográfica. A chuva é caracteristicamente um fenômeno contínuo no espaço, mas, no entanto, medidas pluviométricas são feitas apenas em alguns pontos do

terreno. A extração dos dados observados para toda a área deve ser feita de maneira bastante criteriosa.

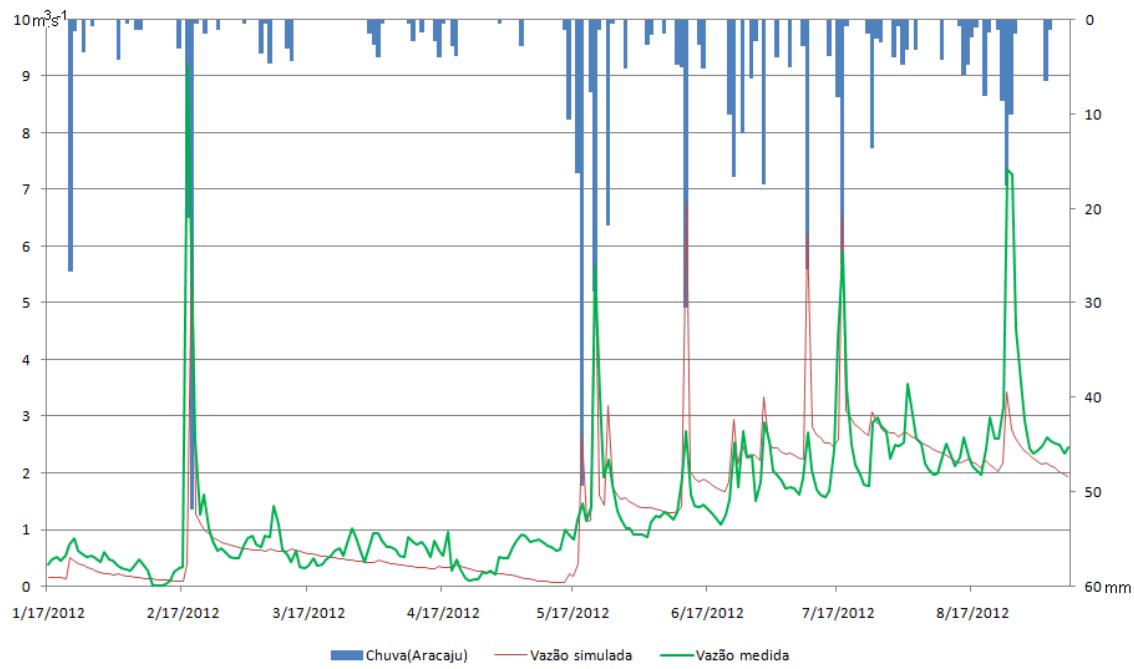


Figura 3.3– Avaliação gráfica da relação entre vazão simulada e vazão observada em modelo não calibrado, para a estação pluviométrica de Aracaju-INMET.

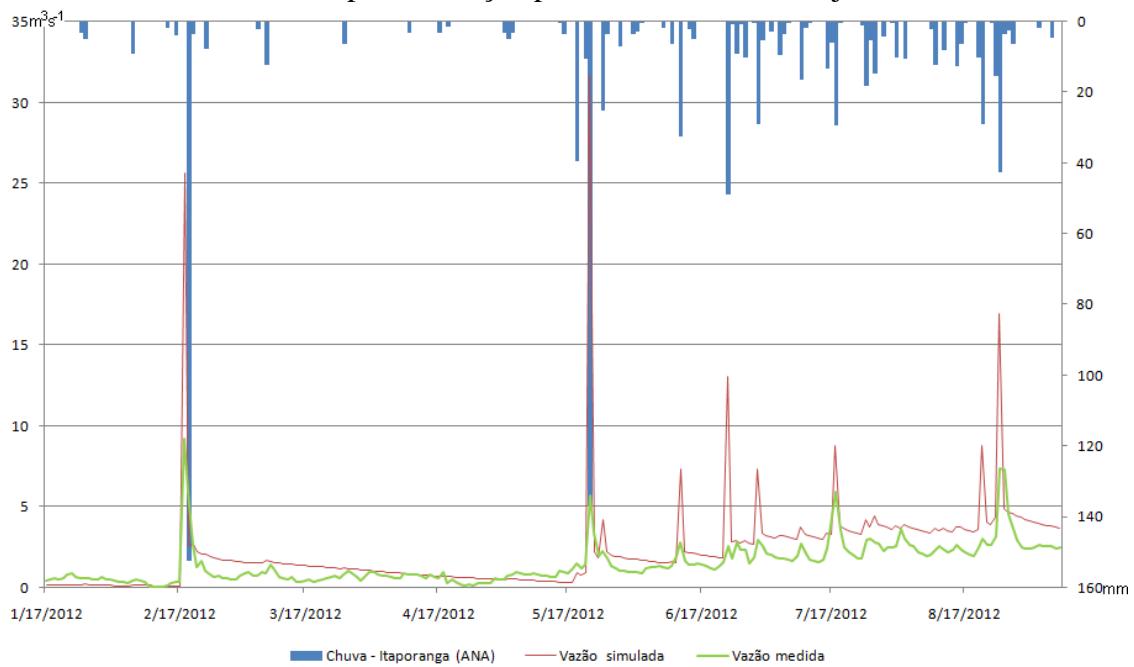


Figura 3.4– Avaliação gráfica da relação entre vazão observada e vazão simulada em modelo não calibrado, para a estação pluviométrica de Itaporanga-ANA.

Reichardt et al. (1995) observaram que um ponto de observação não representou áreas distantes a 1000m dele quando considerou-se as médias pluviométricas diárias, mensais ou

mesmo trimestrais. Os mesmos autores concluíram, no entanto, que médias pluviométricas anuais poderiam ser extrapoladas até 2500m distante do ponto de observação.

Vasco et al. (2009) tomando a estação pluviométrica da SEMAR em Laranjeiras, como referência para seus estudos das vazões dos rios Poxim-açu e Poxim-mirim, verificou que os dados referentes ao período chuvoso (de abril a agosto) do ano de 2009 apresentaram valores de precipitação maiores que a media dos dez anos precedentes, enquanto o período seco (setembro a março) do mesmo ano registrou valores de precipitação menores (também em relação à media dos dez anos precedentes).

De algumas avaliações estatísticas realizadas sobre os dados de precipitação das duas estações selecionados para a pesquisa, obteve-se uma precipitação média para a estação climática do INMET em Aracaju de 1.105,5mm e para a estação pluviométrica da ANA em Itaporanga D'Ajuda de 1.397,8mm, a amostra utilizada para esta estimativa foi referente ao período de 01 de janeiro de 2007 à 31 de agosto de 2013 (Tabela 3.2).

Tabela 3.2– Precipitações anuais, últimos 7 anos, de estações do INMET em Aracaju e da ANA em Itaporanga.

Ano/Índices	Precip. Aracaju (mm)	Precip. Itaporanga (mm)
2007	1177,2	1564,2
2008	1364,1	1403,5
2009	1308,7	1467
2010	1239,2	1632,3
2011	1304,7	1582,5
2012	741,6	1068,4
2013	603	1066,9
Total	7738,5	9784,8
Média	1105,5	1397,8
Desvio Padrão	304,3	237,9

Deste modo, observou-se que as precipitações registradas por estas estações encontradas nas regiões do entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu podem oferecer dados de entrada, relativos à precipitação, úteis para a modelagem hidrológica e outros estudos acerca da produção de água, desde que se leve em consideração as implicações decorrentes das escolhas realizadas em relação às suas influências nos procedimentos da calibração, como também na interpretação dos resultados das simulações obtidas.

### **3.2 – PROSPECÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DE UM MODELO PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POXIM-AÇU.**

Preliminarmente foram realizados dois procedimentos de análise de sensibilidade a partir do SWAT versão 2005, com e sem utilização de função objetivo. Os parâmetros

ordenados obtidos nesta etapa orientaram dois procedimentos preliminares de calibração, ambos referentes ao período de 17 de janeiro de 2012 a 08 de agosto de 2012.

Os resultados da calibração foram melhores quando se utilizou os parâmetros identificados a partir do resultado de análise de sensibilidade com a opção de função objetivo ativa (SSQ-Soma dos quadrados dos resíduos). Quanto aos parâmetros ajustados e melhores faixas de valores utilizados, foram os seguintes: Gwqmn, teve seu valor substituído por 35; Sol\_Awc dos Neossolos Quartzarênicos foi reduzido em 2% e aumentado em 1.351% nos Argissolos e nos Gleissolos; Esco foi substituído por 0.905; Cn2 aumentada em 1.5% em tudo e em mais 2% nos Neossolos Quartzarênicos e Alpha\_BF adicionou-se -0.0158 (Anexo E).

Uma observação importante foi a de que para atingir bons resultados estatísticos bastou-se o ajuste de apenas dois dos parâmetros apontados nas análises de sensibilidade, o Gwqmn e o Alpha\_BF, e, para tanto, substitui-se o primeiro por 35 e a faz-se a subtração de 0,0158 do segundo e assim se obtém NSE acima de 0.91, PBIAS na faixa  $\geq -10$  e  $\leq 10$  e RSR de 0.31, o que juntamente com a resposta gráfica muito boa (Figura 3.5), fez crer que tais parametrizações fossem suficientes e muito satisfatórias.

Porém, ao se ampliar a faixa de tempo do processamento da simulação, de 3 para 23 anos, utilizando-se 4 anos no início da série como período de aquecimento, mantendo-se a parametrização descrita, o modelo apresentou mudanças de comportamento para um aumento excessivo na produção de água justamente para o mesmo período utilizado na calibração. Isto foi devido ao fato de que ao se fixar o Gwqmn numa altura baixa, o curto intervalo de tempo utilizado, inicialmente, para simulação foi suficiente para carregar o nível da água subterrânea, iniciando assim sua participação na manutenção da vazão estimada e apresentando ótimos ajustes estatísticos por conta dos baixos volumes precipitados naquele intervalo de tempo, que conforme tópico anterior apresentara chuvas atípicas muito baixas (2012). Por outro lado, o ajuste do Alpha\_BF regulou a velocidade da liberação da água para a manutenção do fluxo de base garantindo a boa uniformidade nas avaliações das vazões, esta é a base explicativa que sustenta os resultados satisfatórios para os modelos realizados a partir das séries curtas de dados climáticos de entrada até aquele momento do presente estudo.

Quando se processou simulações para períodos mais longos, mantendo-se estes valores de calibração para os parâmetros do Gwqmn, Alpha\_Bf e do Sol\_K, conforme discutido, o modelo não respondia satisfatoriamente em função de não dar vencimento aos volumes do escoamento superficial que passaram a participar na produção de vazões

simuladas muito acima das vazões observadas. Tal fato se agravava ao utilizar-se dados de entrada de precipitação relativos à estação de Itaporanga d'Ajuda.

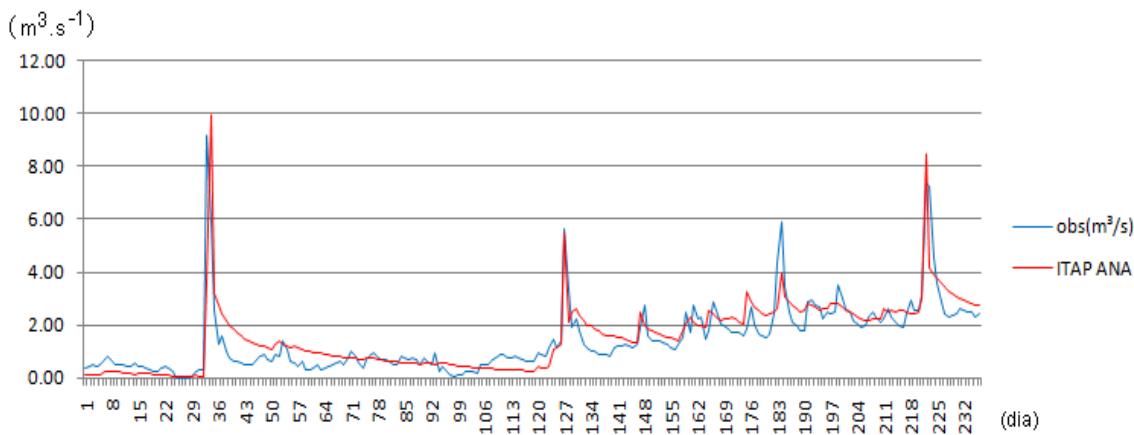


Figura 3.5 – Resultado gráfico da avaliação de calibração a partir da parametrização com base na análise de sensibilidade do SWAT 2005.

A decisão de utilização do SWAT 2012 versão 64 bits foi acertada para contornar o problema relativo à utilização de uma série de dados de entrada mais extensa no momento da calibração, onde se adotou o intervalo de tempo de 01 de janeiro de 1991 a 31 de dezembro de 2012 para a calibração, sendo os 4 primeiros anos para aquecimento. Isto resultou também, na melhoria da análise dos resultados a partir de métodos gráficos, que apesar de bastante simples, permitem a visualização do comportamento da produção de água intercalada com a precipitação, ano-a-ano.

Na verdade, a ideia deste teste gráfico permite a compreensão que a visualização do comportamento da chuva e da vazão ao longo do tempo é o primeiro caminho que se deve seguir para poder visualizar as falhas mais grosseiras. Contudo, tal compreensão, ainda não era suficiente para apontar uma solução satisfatória para a questão da produção excessiva de água ao utilizar-se os dados de precipitação de Itaporanga. Um instrumento muito importante utilizado na análise da calibração do modelo é a nova interface do SWAT 2012 de checagem de erros, onde o comportamento de todo o balanço hídrico, sob a ótica da ferramenta em questão, pode ser acompanhado. Na verdade, é até mais que isso, porque a cada alteração em algum parâmetro de calibração, pode-se acessar a interface e compreender a relação entre as suas camadas de definição do ciclo hidrológico e os grupos de variáveis associadas que sofreram ajustes.

Para um melhor conhecimento do comportamento do movimento da água no solo gerou-se um hidrograma simplificado (Figura 3.6), onde se estimou que a relação entre o escoamento superficial e a produção de água na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu é menor que 0.2. Esta conclusão apontaria para o fato de que o modelo deveria representar grande

participação da água sub-superficial no volume de vazão realizada pelo rio, o que receberá a corroboração de Silva (2013) quando se refere aos dados obtidos nos experimentos de infiltração realizados nos solos da bacia utilizando-se de infiltrometros de anéis e concluiu que os solos Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho Amarelo, ou seja quase 90% da área total, apresentam velocidade de infiltração muito alta, superiores a  $3\text{cm.h}^{-1}$ .

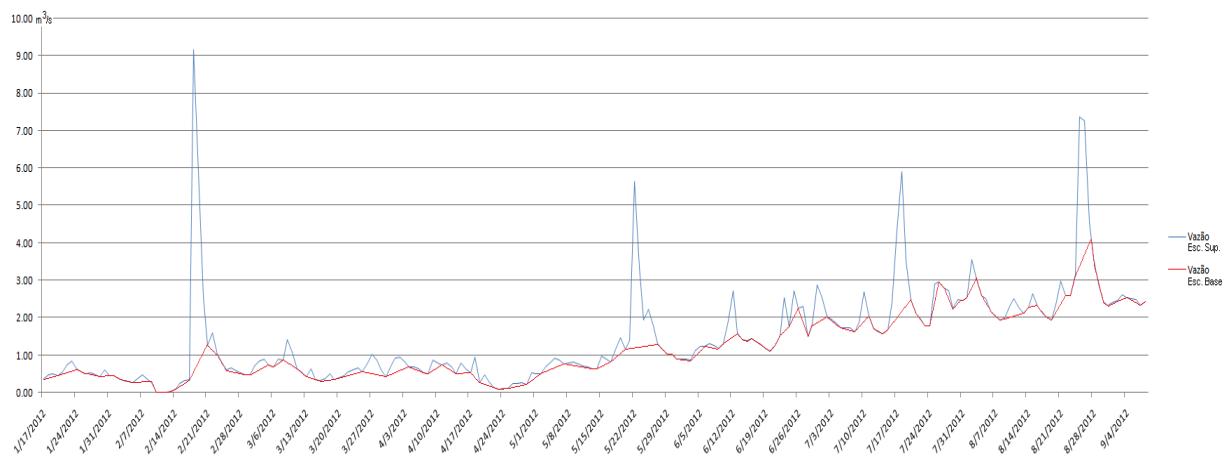


Figura 3.6 – Hidrograma da bacia do rio Poxim-açu com a separação do fluxo de base com a técnica baseada na smoothed minima (Modificado de Costa, 2005).

Além de permitir estimar indiretamente os parâmetros hidrodinâmicos (difusividade e transmissividade), o conhecimento do fluxo de base tem significativa importância no gerenciamento dos recursos hídricos, ao possibilitar estimar a reserva renovável (Castany, 1971), ou seja, volume que pode ser explotado de um aquífero sem comprometer sua sustentabilidade (COSTA & BACELLAR, 2010). Estes autores destacam ainda que segundo Rebouças et al. (1994), a disponibilidade explotável pode ser estimada em 25 a 50% do volume das reservas renováveis.

Em regiões de clima úmido, como em grande parte do Brasil, as recessões são frequentemente interrompidas por episódios de recarga devido às precipitações e, assim, têm-se diversos estágios curtos de recessão, muitas vezes com características distintas entre si em função de condições iniciais variáveis, como a umidade antecedente e a posição do nível freático. Estas recessões, contudo, tendem a convergir para uma curva principal típica (Snyder, 1939; Langbein, 1938; Nathan & McMahon, 1990; Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001), denominada curva de recessão mestra. Tal fato possibilita determinar o coeficiente de recessão para séries fluviométricas curtas e, até mesmo, descontínuas.

O coeficiente de recessão determinado a partir da curva de recessão mestra, teoricamente, representa de forma mais fiel as condições da bacia, pois indica um nível básico

para onde todos os pequenos estágios de recessão convergem (COSTA; BACELLAR, 2010). No presente estudo buscou-se somente a visualização da separação entre a participação do fluxo de escoamento superficial e dos fluxos de base dos solos, além da observação do comportamento da recessão, após os momentos de picos de chuvas, e o da concentração, nas diferentes situações antecedentes de umidade.

Outro referencial interdisciplinar importante foi quanto ao embasamento geológico da bacia hidrográfica, que se encontra completamente inserida no domínio da bacia sedimentar denominada Sergipe-Alagoas. De forma sucinta, a dimensão geológica está ligada à formação do embasamento e à movimentação das placas continentais. Quanto à formação, a placa Sergipe-Alagoas, já esteve conectada a outro remanescente seu que se encontra provavelmente no Gabão (CHAGAS, 1996).

Quanto à movimentação das placas, com a deriva dos continentes as placas americanas passaram a sofrer soerguimento na sua porção oeste, de modo que os rios que corriam para este sentido tiveram seus cursos invertidos, o rio São Francisco é um grande exemplo disto.

Esta deriva continental provoca ainda, na porção leste da placa americana, o rifteamento das placas das bordas (LANA, 1985), como no caso da placa Sergipe-Alagoas que é considerada a mais importante para estudos extratigráficos de placas sedimentares litorâneas do Brasil, mas que em resposta aos movimentos da placa continental sofre fraturas e movimentações tensionais e extensionais importantes.

Aragão et. al (2013), em um estudo realizado na bacia hidrográfica do rio Japaratuba-Mirim, em Sergipe, apresentou discussão relativas à importância do embasamento geológico tanto para a parametrização da calibração quanto para a avaliação dos resultados da modelagem SWAT. O autor reportou que para a área do seu estudo, a existência das diferentes formações geológicas na área de contribuição da estação aninhada (Estação fluviométrica Pão de Açúcar) em relação à área da bacia contingente (Estação fluviométrica Cajueiro), sugere que enquanto a porção da Formação Barreiras (litotipo arenito/argilito) serve como área de recarga, a formação Macururé (litotipo mármore/quartizito) não permite um considerável aporte da água subterrânea para esse trecho do rio, o que considerou compatível com as condições geológicas e a região climática da nascente daquele rio da sua pesquisa.

No caso da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, observou-se que uma importante fratura extensional ocorre na sua porção central (visto na Figura 1.2), praticamente dividindo-a em relação à sua terça parte superior, esta fratura foi considerada como tendo sua abertura

expandindo-se e aprofundando-se no sentido Nordeste para Sudoeste, em direção a uma das três principais fraturas da placa Sergipe-Alagoas, a de Itaporanga d'Ajuda, que por sua vez acompanha o sentido do médio a baixo rio Vaza-Barris. O estudo destes importantes fatores devem ser considerados no comportamento das águas subterrâneas na bacia em estudo, pois podem implicar na identificação de afluência da sua produção de água para a bacia hidrográfica vizinha. Constata-se ainda na Figura 1.2 que na região do divisor d'água da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu com o rio Vaza-Barris, justamente na sua interseção com a linha da falha estrutural, consta a nascente do riacho Pé da Serra.

Os resultados dos estudos, apresentados acima, condicionaram o estabelecimento de um procedimento de calibração fundamentado na influência destes elementos na dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, onde os solos têm características de infiltração, predominantemente, muito elevadas, onde o embasamento geológico é arenítico-sedimentar de alta porosidade e condutividade hidráulica, onde fraturas geológicas e também existência de regiões cársticas (SERGIPE, 2012) na porção central da bacia podem ainda estar promovendo afluência das suas águas subterrâneas. Assim tem-se, um subsolo profundo e desconhecido que repousa sob uma diversidade de tipos de solos e coberturas vegetais, manejados conforme interesses econômicos, sociais e culturais humanos em função do modelado do relevo colinoso.

Tabela 3.3 – Parâmetros considerados no procedimento final de calibração.

Processo	Parâmetro	Limite		Valor ajuste
		Inferior	Superior	
<b>Evapotranspiração</b>	Canmx*	0	10	2 (Todos os solos)
<b>Escoamento superficial</b>	Cn2*	35	92	40,28 (Neossolos) 50,73 (demais)
<b>Água no Solo</b>	Sol_Z	0	3000	-25,55% (Neossolo Q) - 45% (Demais Solos) +95 (Neossolo Q) +43,39 (Demais Solos)
	Sol_K	0	100	+61,3% (Neossolos) +95,8% (Argissolos) +86,5% (Gleissolos)
	Sol_Awc	0	1	+3,95% (em todos Solos)
<b>Água subterrânea</b>	Rchg_Dp*	0	1	0,6 (Neossolos) 0,3 (Argissolos) 0,25 (Gleissolos)
	Alpha_BF*	0	1	0,026 (para todos)

\* Ajustados por substituição integral de valores.

Tantas considerações são realmente muito importantes, pois permitiram partir para um novo procedimento de calibração. Planejado em função de objetivos relacionados ao ajuste da distribuição entre as fases hidrológicas e que consistiu no ajuste dos parâmetros conforme apresentados anteriormente na Tabela 3.3 onde o primeiro parâmetro ajustado foi o CANMX, objetivando incrementar a saída de água do ecossistema via processos da evapotranspiração, em seguida ajustou-se o parâmetro da profundidade do solo (Sol\_Z), pois a faixa de ajuste deste parâmetro apresentou bastante sensibilidade quanto à contribuição de vazão advinda do escoamento por fluxo lateral; em seguida, a taxa de infiltração (Sol\_K) foi aumentada em virtude da observação de diferenças no hidrograma que representavam a lentidão das respostas fluviais do modelo quando a umidade anterior era baixa.

Continuando, ajustou-se a transmissão de água para aquíferos profundos (Rchrg\_Dp), com o objetivo de compensar perdas por afluência estabelecida na hipótese do corrente procedimento de calibração; em seguida reduziu-se o fator de liberação das águas profundas para o fluxo base (Alpha\_BF), com o objetivo de ajustar a manutenção da produção hídrica nos períodos de recessão e finalmente reduziu-se o fator de produção de água por escoamento superficial, a partir da diminuição da curva número inicial para a condição de umidade II (Cn2), devido à percepção, a partir do hidrograma, de menor participação do escoamento superficial no fluxo escoado pela calha principal.

Em relação à análise de sensibilidade e os parâmetros adotados para a nova proposta de calibração, somente Sol\_Z, Sol\_Awc, Cn2 e Alpha\_BF formam identidade, enquanto que o parâmetro Sol\_K foi identificado somente no procedimento com função objetivo. Por outro lado, Rchrg\_Dp não constou das relações resultantes das análises de sensibilidade, sendo um parâmetro advindo do encarte Geológico, que conforme Aguiar Netto (2010) é o ponto de partida para a compreensão da qualidade e da quantidade das águas subterrâneas que contribuem com o que os hidrólogos denominam de fluxo de base, ou seja, o fluxo que propicia que os rios permaneçam com água por longos períodos sem a ocorrência de precipitações pluviais.

Para se obter os resultados finais dos valores para os parâmetros na calibração se procedeu, de forma manual, de maneira semelhante à técnica LH-OAT (Hipercubo Latino – Um fator por vez), assim, cada parâmetro foi trabalhado individualmente, segmentando-se a faixa limite em três intervalos e lançando valores aleatórios para cada um deles. Descoberta a

melhor faixa, através dos coeficientes estatísticos NSE, PBIAS e RSR, aplicados, procede-se uma segunda etapa, subdivide-se a faixa selecionada em três faixas e lança um valor aleatório para cada uma, e assim sucessivamente até obter-se o melhor ajuste e poder reiniciar este procedimento para o próximo parâmetro. Este método mostrou-se bastante satisfatório na obtenção destes valores, contudo é importante salientar que somente estes parâmetros apresentados na Tabela 3.3, foram submetidos ao método, em função de terem sido identificados a partir da consideração da hipótese da ocorrência de afluência das águas.

Obviamente, este resultado é parcial. Contudo, a calibração apresentou suficiência estatística (Tabela 3.4), apesar de compreender apenas 252 dias (de 17/01/2012 à 09/08/2012) os dados utilizados no processamento das simulações, para o procedimento de calibração, compreenderam todo o intervalo de 01/01/1991 a 31/12/12, apresentando uniformidade e coerência gráfica. Em virtude da longa extensão da série temporal, a apresentação do gráfico gerado para tais análises é de impossível visualização se impresso na presente mídia, porém trata-se de um gráfico linear de toda a série de vazões diárias e de precipitações, ao longo do intervalo de tempo amostral.

Tabela 3.4 – Avaliações estatísticas da calibração final do estudo.

Estatística Básica dos dados de Vazão			Estatística de avaliação do modelo		
Descrição	Observados	Simulados	Estatística	Valor	Desempenho
Total ( $m^3s^{-1}$ dur $^{-1}$ )	343	325,6	NSE	0,74	Bom
Média ( $m^3s^{-1}$ )	1,46	1,38	PBIAS	-5,22	Muito bom
Desv. Pad. ( $m^3s^{-1}$ )	1,28	1,18	RSR	0,51	Bom

Observando-se a tabela 3.4, vê-se uma diferença aproximada na produção de água de 18 ( $m^3s^{-1}$ ) a menos no montante simulado em relação ao montante observado, uma diferença de 5%. Tal diferença é refletida no PBIAS, já que se trata de um coeficiente de tendência central, onde o valor de melhor ajuste é 0, valores negativos são indicativos de subestimação e positivos indicativos de superestimação dos valores simulados, quanto ao desvio padrão, os dados simulados obtiveram um valor mais baixo indicando que o modelo suaviza a variação das vazões, contudo a média dos valores simulados foram bastante próximas da média dos dados observados. A análise gráfica aponta para bom ajuste Figura 3.7.

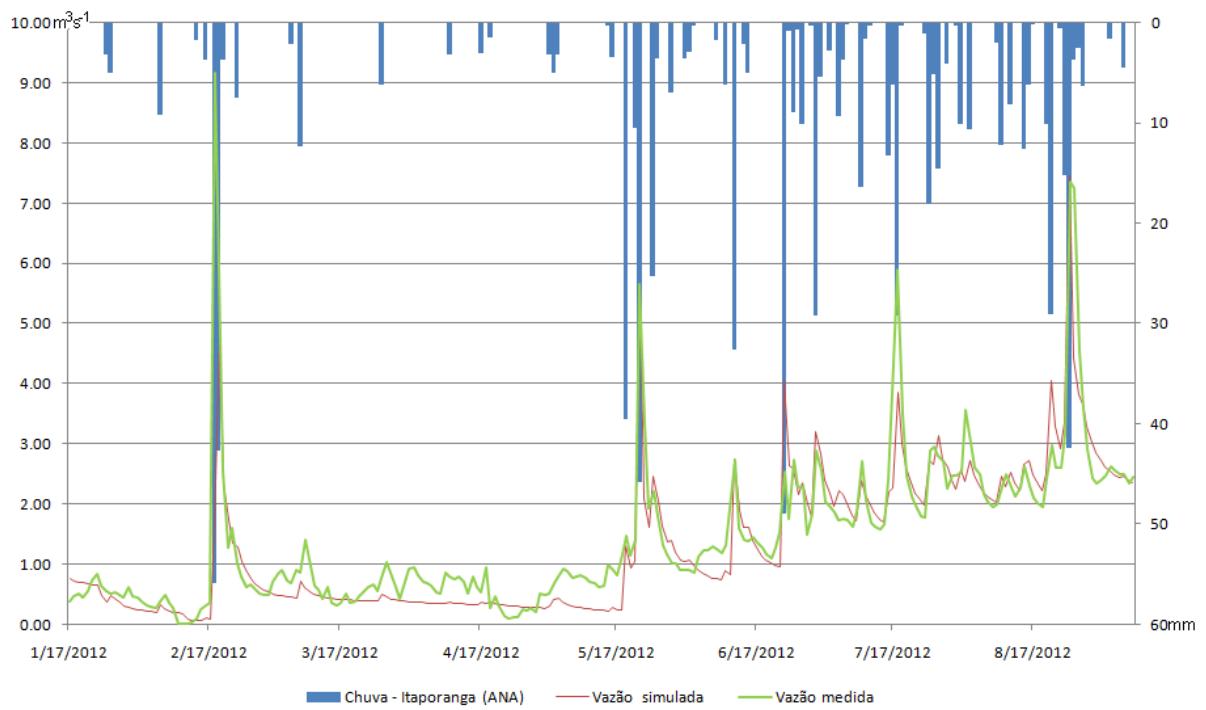


Figura 3.7 – Ajuste gráfico da calibração com base na hipótese de afluência proposta no presente estudo.

Em relação aos estudos de produção de água realizados por Silva(2013), por exemplo, identificou-se que o período adotado na sua calibração incidente sobre o ano de 2012 e para a validação se utilizou um intervalo de tempo ocorrido no ano de 2011. Deste modo, com o objetivo da realização de um primeiro teste validativo da proposta de calibração desenvolvida na pesquisa corrente, procedeu-se avaliações estatísticas das vazões do rio Poxim-açu para o ano de 2011 a partir de simulações obtidas com a parametrização de ambos os modelos.

Tabela 3.5–Avaliações estatísticas das simulações para dois modelos realizados na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

Estatística Básica dos dados de Vazão			Estatística de avaliação do modelo		
Descrição	Simula 1	Simula 2	Estatística	Valor	Desempenho
Total ( $m^3 s^{-1} dur^{-1}$ )	780,4	812,2	NSE	0,61	Satisfatório
Média ( $m^3 s^{-1}$ )	3,79	3,94	PBIAS	4,07	Muito bom
Desv. Pad. ( $m^3 s^{-1}$ )	7.98	5.62	RSR	0,62	Satisfatório

Simula 1 - Parametrização modelo SILVA (2013) e Simula 2 – Parametrização modelo proposto no presente estudo.

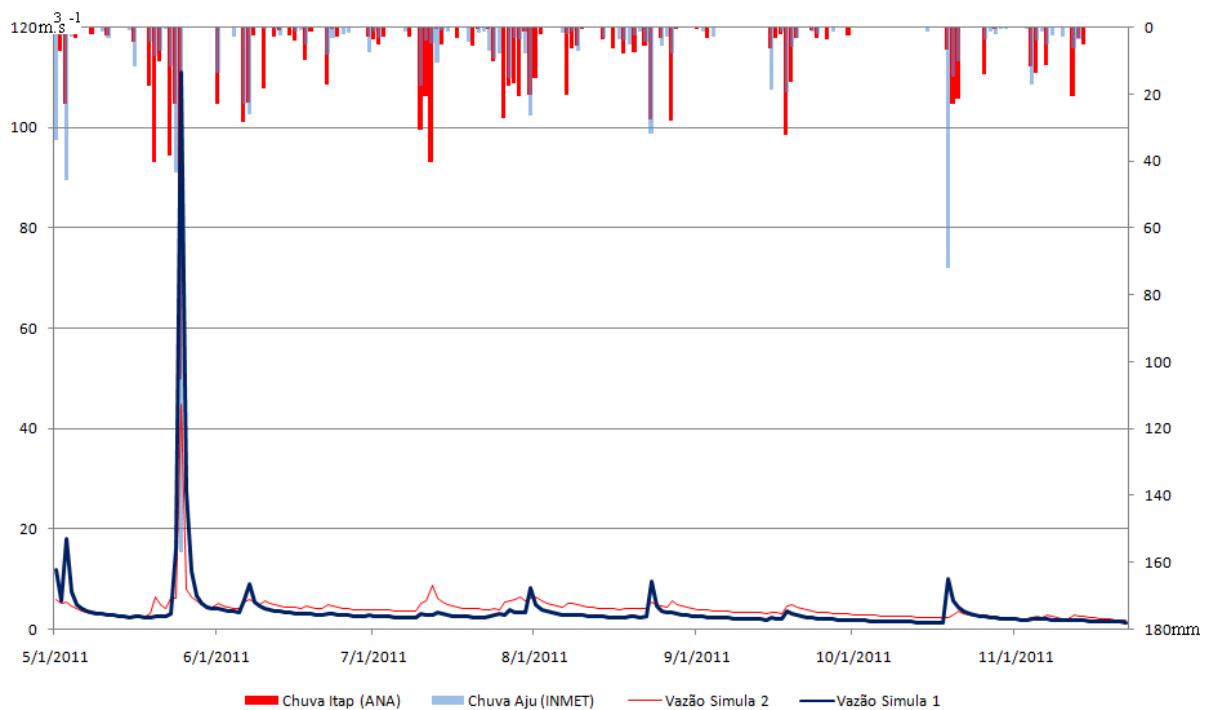


Figura 3.8 - Gráfico para avaliação dos resultados das simulações pelo modelo proposto na presente pesquisa (Simula 2) e pelo modelo de Silva (2013), para ano 2011/validação.

Observando-se a Tabela 3.5 e a Figura 3.8, pode-se constatar uma adequação satisfatória para os resultados simulados para o período juliano de 121 a 326 do ano de 2011. As diferenças para mais da soma da vazão para o período e das respectivas médias, são justificáveis em função de o modelo Simula 1 (SILVA, 2013) ter sido desenvolvido com objetivos de ajustes para o escoamento superficial, uma vez que serviu de base para a calibração da produção de sedimentos e também de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo), enquanto que na presente pesquisa, durante o procedimento de calibração do modelo Simula 2, manteve-se o foco nas relações do balanço hídrico subterrâneo com vistas a uma possível identificação dos riscos potenciais de poluição e das interferências antrópicas nas reservas de aquífero da bacia hidrográfica em estudo. É importante observar que além de parametrizações de calibração diferentes, cada modelo foi também submetido a regimes de chuvas diferentes, de modo que modelo Simula 1 produziu seus resultados a partir das chuvas registradas para Aracaju pelo INMET e o modelo Simula 2 a partir das chuvas registradas para Itaporanga pela ANA o que, conforme a Tabela 3.2, representa para o ano de 2011, os valores de 1.304,7mm e 1582,5mm, respectivamente.

Considere-se ainda que os modelos estão calibrados a partir de dados de vazão registrados para um período disponível, ocorrido no ano de 2012. Este ano, considerado atípico quanto aos volumes precipitados com valores muito abaixo da faixa encontrada na

carta de isoetas estadual em SERGIPE (2012), ou seja, faixa variando entre 1500mm a 1700mm mas que, conforme a Tabela 3.2, registrou valores de 741,6mm em Aracaju e 1068,4mm em Itaporanga d'Ajuda. Deste modo considera-se o resultado da validação apresentado satisfatório para os objetivos propostos.

### **3.3 – MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE PRODUÇÃO PREDITIVA DE ÁGUA A PARTIR DA MODELAGEM HIDROAMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO POXIM-AÇU.**

Como o objetivo principal da pesquisa é a avaliação da capacidade preditiva do enchimento da represa e os resultados da calibração da produção de água, fundamentado numa hipótese de ocorrência de afluência das águas da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu para o aquífero profundo e para bacias do entorno, que resultou num procedimento de calibração que apresentou ajuste satisfatório para o período calibrado em relação às vazões observadas em 2012 e também em relação ao modelo de Silva(2013), utilizado aqui com objetivos de subsidiar procedimentos de avaliação dos resultados para o ano de 2011. Assim, realizou-se o procedimento de simulação preditiva.

Para ativação do gerador climático foi definida toda a série de precipitação do ano de 2013 com o valor -99. O procedimento da predição do enchimento da represa do rio Poxim-açu atingiu resultados de elevada adequação para a produção de água que, conforme anúncios oficiais sobre o volume que seria armazenado no reservatório, são da ordem de mais de 32 milhões de  $m^3$ .

Observando-se, na última linha do Anexo F, que o volume final foi de 32,25 milhões de  $m^3$  pela simulação preditiva do SWAT para o período, uma diferença pequena em relação ao montante divulgado, cabendo-se ainda a consideração para o fato de que no registro do enchimento da represa no dia 15/10/2013 já ocorria o vertimento de uma lâmina, com cota de não mais que 10cm, acima da cota do vertedouro, ou seja, justifica-se o volume de predição um pouco a maior que o volume total necessário ao enchimento da represa.

Analizando-se estes dados a partir do procedimento de avaliação proposto, pode-se observar uma grande aderência dos resultados preditivos do modelo calibrado na corrente pesquisa para a bacia hidrográfica do rio Poxim-açu em relação tanto aos valores de cotas observados, registrados fotograficamente, quanto aos volumes obtidos a partir das simulações com o modelo de elevação do terreno a partir dos valores das cotas registradas (Figuras 3.9 e 3.10).

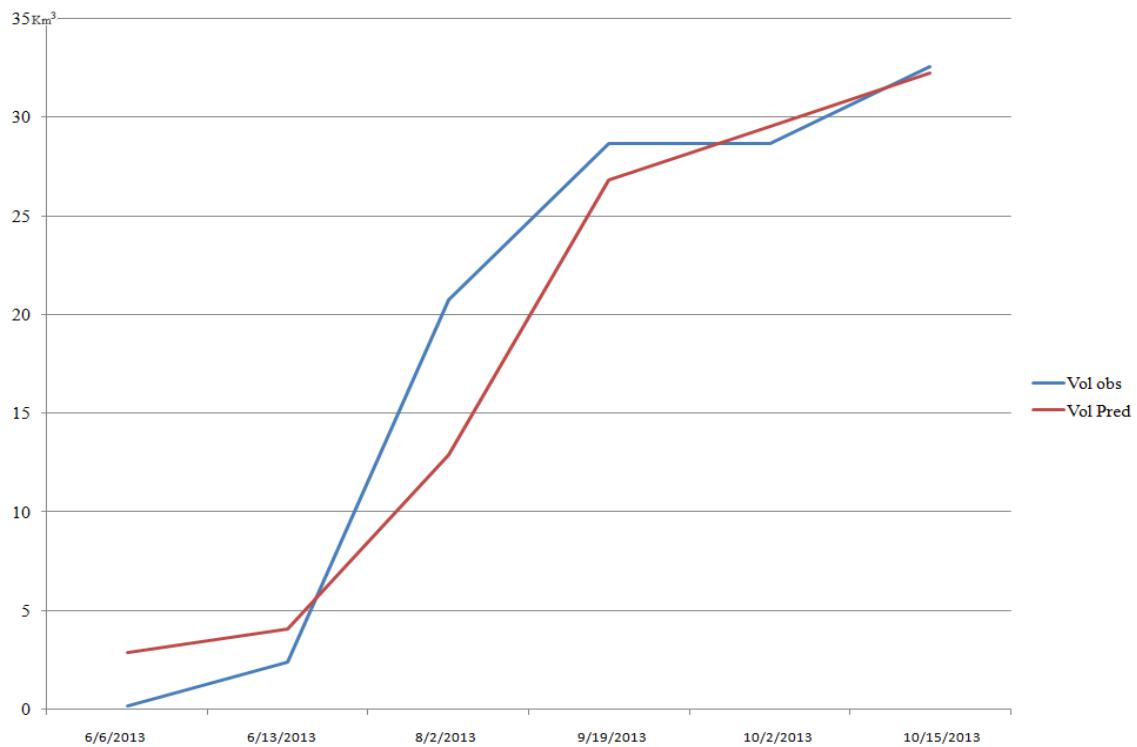


Figura 3.9 – Gráfico de avaliação da correlação: volumes simulados pelo modelo de elevação do terreno X simulados pelo modelo de predição.

Na Tabela 3.6 pode-se avaliar os resultados dos índices estatísticos como o Nash-Sutcliffe (NSE) que foi satisfatório quanto à avaliação dos resultados relativos aos volumes de enchimento e para avaliação relativas às cotas. Em relação aos outros dois índices utilizados, o RSR e o PBIAS, as avaliações podem ser classificadas como tendo obtido resultados também satisfatórios.

Tabela 3.6 – Resultados do procedimento de avaliação da simulação preditiva do enchimento da represa do rio Poxim-açu.

Data	Avaliação das cotas			Avaliação da Produção de água		
	CotaRef	CotaPred	Estatística	VolRef	VolPred	Estatística
06/06/2013	7,68	9,17	NSE=0,93	0,18	2,89	NSE 0,92
13/06/2013	10,68	10,21	Muito bom	2,40	4,08	Muito bom
02/08/2013	18,4	15,35	PBIAS -2,95	20,75	12,91	PBIAS -4,20
19/09/2013	20,38	19,59	Muito bom	28,68	26,84	Muito bom
02/10/2013	20,45	20,42	RSR 0,27	28,69	29,54	RSR 0,27
15/10/2013	21,31	21,34	Muito bom	32,57	32,25	Muito bom

CotaRef é a cota observada, registrada fotograficamente (m); CotaPred é a cota obtida a partir da Eq. 1 aplicada sobre o volume obtido a partir das simulações preditivas SWAT até o dia (m); VolRef é o volume calculado a partir do modelo de elevação do terreno em função da CotaRef para o dia(Km<sup>3</sup>) e VolPred é o volume acumulado, calculado a partir do balanço das perdas sobre o volume preditivo simulado pelo modelo aqui desenvolvido até o dia (Km<sup>3</sup>).

É de grande relevância a observação de que outras técnicas para avaliação de resultados preditivos simulados podem ser sugeridas ou empregadas nas avaliações, contudo, observou-se que a simples aplicação dos coeficientes estatísticos mais recomendáveis para a avaliação de modelos SWAT em cima dos valores de vazões diretamente obtidas das simulações analisadas não resultariam em qualificações satisfatórias pelo simples fato das limitações inerentes às técnicas estatísticas que são aplicadas na geração dos parâmetros utilizados pelo Gerador Climático do SWAT.

A técnica apresentada ainda é limitada, em função de limites impostos pela resolução vertical, principalmente, dos dados disponíveis para a geração do modelo digital de elevação do terreno. Contudo é condizente sob a perspectiva da disponibilização de novos parâmetros a serem considerados, que não só volumes, mas também dados de cotas da altura da água, das áreas das lâminas d'água formadas, volumes evaporados, os quais analisados nas suas cronologias e por técnicas estatísticas, oferecendo novas opções analíticas.

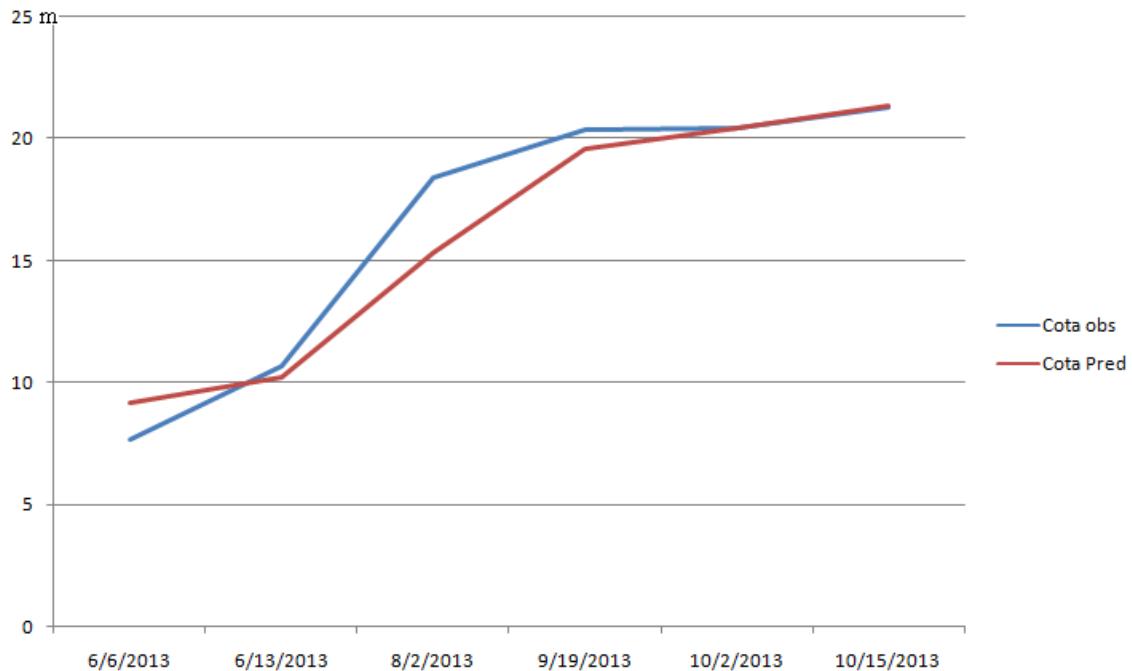


Figura 3.10 – Gráfico de avaliação da correlação: cotas observadas X cotas calculadas a partir da simulação preditiva.

Em relação aos dados de chuva gerados pelo Gerador Climático do SWAT, na Figura 3.11 vê-se o gráfico que correlaciona seus valores em relação aos valores registrados pelo INMET na estação de Aracaju para o período de 01 de janeiro de 2013 a 15 de outubro de 2013, as vazões simuladas estão também representadas.

Em relação aos volumes de precipitação registrados e totalizados para este período em Aracaju foi de 886,2 mm, enquanto que o gerador climático do SWAT simulou um valor de

1181,2 mm. Observe-se também no gráfico que o gerador climático tendeu a apresentar certa regularidade na distribuição das chuvas ao longo do período.

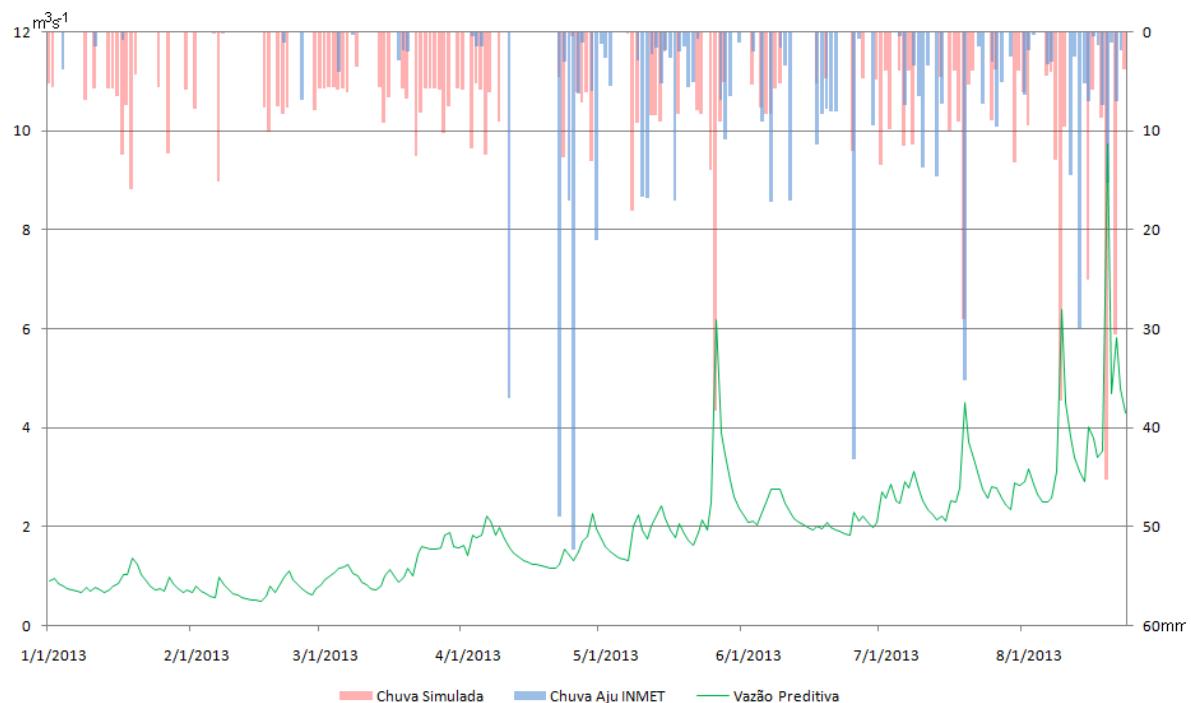


Figura 3.11 -Avaliação dos resultados da simulação preditiva do enchimento da represa do rio Poxim-açu no ano de 2013.

Assim são encerradas as discussões acerca dos resultados, momento em que é oportuno destacar Aguiar Netto (2010), quando afirma que a modelagem de um sistema de informações sobre recursos hídricos que subsidie o planejamento e a tomada de decisão representa uma tarefa árdua, com destaque para a existência de séries históricas de dados significativas para a gestão de recursos hídricos, além de informações sobre disponibilidade e demanda. Deste modo os resultados preditivos obtidos na presente pesquisa são considerados satisfatórios, trazendo à luz a importância da compreensão acerca das fases hidrológicas envolvidas para melhores aproveitamento e preservação do aquífero litorâneo sergipano.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo SWAT é aplicável satisfatoriamente na realização de simulações preditivas da produção de água na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu. O modelo SWAT é aplicável satisfatoriamente nos estudos do balanço hidrológico da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu.

Como recomendação sugere-se que na escolha de estações pluviométricas, na região do entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, se leve em consideração suas implicações na etapa de calibração e interpretação de resultados obtidos.

Recomenda-se também que seja dada continuidade aos procedimentos e rotinas que garantam, ao menos, o registro de dados de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Poxim-Açu com o intuito do aperfeiçoamento da calibração e validação de modelos representativos para ela desenvolvidos.

Em relação ao modelo realizado sob a hipótese de afluência das águas da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu, observou-se que apresentou satisfatório ajuste estatístico, tanto na calibração quanto na validação, o que pode indicar possibilidade da ocorrência de perdas de água para o aquífero subterrâneo e bacias de entorno. Deste modo é imprescindível a realização de estudos hidrogeológicos aprofundados, inclusive no que concerne às questões de riscos de contaminação de aquíferos naquela região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIOLLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C. & CAMARGO, A.S.G. Calibração do modelo SW AT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., Belo Horizonte, 2008. *Anais...* Belo Horizonte, 2008.
- AGUIAR NETTO, A. O. et al. Cenário dos corpos d'água na subbacia hidrográfica do rio Poxim - Sergipe, na zona urbana, e suas relações ambientais e antrópicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. *Anais eletrônicos*, Porto Alegre: ABRH, 2007.
- AGUIAR NETTO, A. O. et al. Caminhos da gestão de recursos hídricos: o caso da subbacia hidrográfica do riacho Jacaré, Baixo São Francisco Sergipano. *Irriga* Botucatu, v.13, p.12 – 25. 2008.
- AGUIAR NETTO, A. O. et al. Águas de Sergipe: reflexões sobre cenários e limitações. In: AGUIAR NETTO, A. O. (Org.), GOMES, L. J (Org.). *Meio Ambiente: distintos olhares*. EDUFS: São Cristóvão, 2010. p .40-70.
- AGUIAR NETTO, A. O. et al. Physical and chemical characteristics of water from the hydrographic basin of the Poxim River, Sergipe State, Brazil. *Environmental Modeling and Assessment*, v. 184, p. 4417-4426, 2013. .
- ALBERTS, E. E.; SPOMER, R. G. Dissolved nitrogen and phosphorus in runoff from watersheds in conservation and conventional tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, p. 153-157, jan./fev. 1985.
- AMARAL, A. J. et al. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um cambissolo húmico da região do planalto sul-catarinense. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, n. 32, p. 2145-55. 2008.
- ANDRADE, A. P. et al. Perdas de solo e água por erosão num latossolo vermelho amarelo, submetido a diferentes práticas agrícolas. *Agropecuária Técnica*, Areia, v. 20, p. 14-19. 1999.
- ANDRADE, A.M. *Simulação hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região alto Rio Grande*. Lavras:UFLA, 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 34, n. 1, p 73-89, 1998.
- BAHIA. SEPLANTEC-SECRETARIA DO PLANEJAMENTO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA: *Recursos Hídricos no Estado da Bahia – Ênfase no semi-árido*. 1995b. Salvador, 105p.
- BALDISSERA, G. C. *Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. Cuiabá:UFMT, 2005. 148 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2005.

- BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M.H.F.; MACHADO, R.E. & OLIVEIRA, M.P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 34, p. 253-261. 2010.
- BATISTELA, A. C.; BONETI, L. W. A Relação Homem/Natureza no Pensamento Moderno. In: VIII Congresso Nacional de Educação – EDUCERE: formação de professores, 2008. **Anais...** Curitiba: Champagnat. 2008.
- BEVEN, K, Changing ideas in hydrology-the case of physically based models. **Journal of Hydrology**, v.105, p.157-172. 1989.
- BRASIL. Lei N° 6938/1981 - "Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências" - Data da legislação: 31/08/1981 - **Diário Oficial da União, Brasília**, O2 de set. 1981, Seção 1.
- \_\_\_\_\_. ANA - Agência Nacional das Águas. A gestão dos recursos hídricos no Estado de Sergipe. Série: **Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos**, CD nº 1, versão preliminar, 2011.
- \_\_\_\_\_. Lei N° 9433/1997 - "Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 , Data da legislação: 08/01/1997 - **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 de jan. 1997, Seção 1. 470 p.
- BRAVO, J. M.; COLLISCHON, W. ; TUCCI, C. E. M.; Calibração automática de um modelo hidrológico utilizando um algoritmo evolucionário multi objetivo. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- BREDA, A. **Avaliação de melhorias para um sistema de previsão hidrológica horária**. Cuiabá:UFMT, 2008. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- BREDA , A.; Gonçalves, J. E. ; SILVEIRA, R. B. ; Análise de Alterações em Componentes de um Método de Calibração Automática Mono-Objetivo na Qualidade e Eficiência do Ajuste de Parâmetros do Modelo Sacramento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** Volume 16 n.2 - Abr/Jun 2011, 89-100
- BRITTO,F. B. **Pesticidas no alto do Rio Poxim e os riscos de contaminação**. São Cristovão: UFS, 2011. 83p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão, 2011.
- BRUSEKE, F. J. O Problema do Desenvolvimento Sustentável. In: Clóvis Cavalcanti (org.). **Desenvolvimento e natureza** – estudos para uma sociedade sustentável. 4. ed. São Paulo: Cortez, 2003. p. 29-40.
- BURNASH, R.J.C. **The NWS River Forecast System** - Catchment Modeling, Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P., ed. 1995. P. 311-366.
- BURROUGH, P. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford, Clarendon Press, 1986.

- CARPENTER, T., SPERFLAGE, I.; GEORGANKAKOS, K., SWEENEY, T.; FREAD, D. National threshold runoff estimation utilizing gis in support of operational flash flood Waming systems. **Journal of Hydrology**, v.224, p.21-44, 1999.
- CARVALHO, D.A.; OLIVEIRA-FILHO, A.; VILELA, E.A.; CURI, N.; VAN DEN BERG, E.; FONTES, M.A.L. **Estudos florísticos e fitossociológicos em remanescentes de florestas ripárias do Alto São Francisco e Bacia do Rio Doce – MG**. Lavras: UFLA, 1999. 39p.
- CIBIN R.; SUDHEER, K.P. & CHAUBEY, I. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model **Hydrol. Process. Wiley InterScience**. 2010.DOI: 10.1002/hyp.7568. p.1133-1148.
- COSTA, C. C. **Subsídios para a proteção dos fragmentos florestais na bacia hidrográfica do rio Poxim-SE**. São Cristovão:UFS, 2011, 112p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Universidade Federal de Sergipe, São Cristovão. 2001.
- COSTA, F. M.; BACELLAR, L. A.P. Caracterização hidrogeológica de Aquíferos a Partir do Fluxo de Base. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, volume 15, n.3, p. 173-183, Universidade Federal de Ouro Preto, Jul/Set. 2010.
- CHAGAS, L.S. **Tectono-sedimentação das bacias do tipo Rifte: Aplicação na porção emersa da bacia de Sergipe-Alagoas**. Porto Alegre:UFRS, 1996, 322p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgar Blücher ltda, 1999.
- CRUZ, M. A. S. Regionalização de precipitações médias e prováveis mensais e anuais no estado de Sergipe. Aracaju, SE. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Embrapa Tabuleiros Costeiros. Aracaju, 2009. 26 p.
- CUNHA, S.B, GUERRA, A. J. T. (Org). **Geomorfologia do Brasil**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.
- CUNHA,T.R. **Evolução Estratigráfica dos Depósitos Fluviais e Deltaicos das Formações Serraria e Feliz Deserto da Seção Jurássico Superior-Neocomiano da Bacia de Sergipe-Alagoas, Propriá-SE**. Trabalho de conclusão do curso de Geologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- DEVANTIER, B.A.; FELDMAN, A.D. Review of gis applications in hydrologic modeling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v.119, p.60-246. 1993.
- DURÃES, M.F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo distribuído**. Lavras: UFLA, 2010, 147p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Lavras, 2010.
- EMBRAPA - CNPS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasilia: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

\_\_\_\_\_. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula - 10<sup>a</sup>**. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Miscelânea, 1).

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Feeding the world**: sustainable management of natural resources: Roma, 2010.

FERREIRA, R. A. et al. As áreas ciliares na região do baixo rio São Francisco: processo de ocupação e sua recuperação. In: LUCAS, A. A. T.; AGUIAR NETTO, A. O (Orgs.). **Águas do São Francisco**. EDUFS: São Cristóvão, 2011, p. 85-122.

FERREIRA, R. A. et al. Nascentes da sub-bacia hidrográfica do rio Poxim, estado de Sergipe: da degradação à restauração. **Revista Árvore**, v.35, n.2, p.265-277. Viçosa, 2011.

FOHRER, K.; ECKI-IARDT, K.; I-IAVERKAMP, S.; FREDE, I-I.G. Applying the SWAT model as a decision support tool for land use concepts in peripheral regions in Germany. 10 th International Soil Conservation Organization Meeting. **Anais...** Purdue University and USDA-ARS National soil Erosion Research Laboratory. p 24-29,1999

GALLINA, Albertinho L. A concepção cartesiana de natureza. **Ciência e Ambiente**, v. 1 n. 1, 1990.

GASSMAN, P.W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 4, p. 1211-1250. St. Joseph, 2007.

GAUTHIER,M.J.; CAMPORESE, M.;RIVARD, C.; PANICONI, C.; LAROCQUE,M.; A modeling study of heterogeneity and surface water-groundwater interactions in the Thomas Brook catchment, Annapolis Valley . **Hydrology and Earth System Sciences**, Nova Scotia, Canada.

GOMES, L.J.; MAROTI, P.S. Estudo socioambiental nos povoados Cajueiro e Caroba, visando estratégias para uso sustentável dos recursos naturais In: ALVES, J.P.H; GARCIA, C.A.B.; AGUIAR NETTO, A.O; FERREIRA, R.A. (Eds) **Diagnóstico e Avaliação da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Poxim**, EDUFS/FAPESE, Sergipe. 2006. pp 199-255.

GRAYSON, R.B.; MOORE, I.D.; McMAHON, T.A. Physically-based hydrologic modeling: II. Is the concept realistic? **Water Resources Research**, v.26, n.10, p.2659-2666, 1992.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: IBGE, 1978.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**. V. 4, n. 2, p. 135-143. 1999.

HEUVELMANS, G. ;MUYS,B.;FEYEN,J. Analysis of the spatial variation in the parameters of the SWAT model with application in Flanders, Northern Belgium. **Hydrology and Earth System Sciences**, 8(5), p. 931-939, 2004.

IBBIT, R. P.; O'DONNEL, T. Fitting methods for conceptual catchment models. **Journal of the Hydraulics Division**. V. 97, n.9 p. 1331-1342. 1971.

- JAYAKRISHNAN, R.; SRINIVASAN, R.; SANTHI C.; ARNOLD, J. G. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. **Hydrological process**, V 19, p.749-762, 2005.
- JEONG, J.; KANNAN, N.; ARNOLD, J.; GLICK, R.; GOSSELINK, L. & SRINIVASAN, R. Development and integration of sub-hourly rainfall-runoff modeling capability within a watershed model. **Water Res Manage**, 2010. DOI 10.1007/s11269-010-9670-4.
- JHA, M. **Hydrologic Simulations of the Maquoketa River Watershed Using SWAT**. Center for Agricultural and Rural Development (CARD). Ames, Iowa State University, 2009. (Publications 09-wp492).
- KOBIYAMA, M.,CHAFFE p. l. b., ROCHA, h.l. et al. . **Implementation of school catchments nework for water resourcees management of the upper Negro river region, southern Brazil**. In: Makoto T., Wiliam C. B., Yoshinori F. et al., org. From headwaters to the ocean hydrological changes and watershed management. London, Taylor & Francis group, p. 151-157, 2009.
- LEFF, E. **Discursos Sustentáveis**. São Paulo: Editora Cortez, 2010.
- LEGATES, D.R.;MCCABE, G.J. Evaluating the use of “goodness off it” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 26. 1999. P. 69-86.
- LELIS , T. A. & CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente Água**, 5:158-174, 2010.
- LELIS, Thatiana Aparecida ; CALIJURI, Maria Lúcia ; SANTIAGO, Aníbal da Fonseca ; LIMA, Dario Cardoso de ; ROCHA, Everton de Oliveira . Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 623-634, 2012.
- LINO, J. F. L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Preto (SC) com o modelo Swat**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2009. 150p.
- LOPES, P. M. S. **Metodologias de calibração e validação do modelo de simulação climática CLIGEN de apoio à modelagem de perda de solo**. Évora: Universidade de Évora, 2005, 130p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Solo e da Água, Évora, 2005.
- LOU, R.F. **Modelagem Hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010. 174p.
- LUCAS, A. A. T.; MYKAEL, B. S. S.; MAGALHÃES,L. T. S.; AGUIAR NETTO,A. O.;FACCIOLI,G. G. Classificação de Nascentes e Análise Física Do Solo Na Micro bacia do Riacho Timbó, Região Nordeste . XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Juazeiro(BA) Petrolina(PE). **Anais...** 2 a 6 de agosto de 2009.
- MAIDMENT, D. Gis and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T., ed. **Environmental Modeling with GIS**. New York, Oxford,p.146-167,1993.

- McCORMICK, J. 1992. **Rumo ao Paraíso: A História do Movimento Ambientalista.** Relume-Dumará, Rio de Janeiro, 1989 .
- MCMAHON, T.; PEEL, M. C. ; LOWE L.; SRIKANTHAN, R. ; Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis . **Hydrology and Earth System Sciences**, April, 2013
- MENDES, C. A. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 1, p.47-66,1996.
- MELO NETO, J. O. ; ARAÚJO,C. E. S.,SANTOS,F. M. S.; PINTO, D. S.S.;FONTES, M. P.; VASCO,A. N.;CHAGAS,R. M.;MACEDOS,F. L.; MELLO JÚNIOR, A. V.; Espacialização da Chuva Diária na Bacia Do Rio Sergipe. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** 22 a 26 de novembro de 2009. Campo Grande , MS.
- MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 18 jan. 2013.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER R. L.; HARMEL R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n.3, p.885-900, 2007.
- MÜLLER, Arnaldo Carlos. **Hidrelétricas, meio ambiente e desenvolvimento.** São Paulo: Makron Books, 1995.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool:** Theoretical Documentation – Version 2009. Temple: Agricultural Research Service (USDA) & Texas A& Agricultural Experiment Station (Texas M University), 647p, 2009.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. **Soil and Water Assessment Tool:** Theoretical Documentation – Version 2005. Temple: Agricultural Research Service (USDA) & Texas Agricultural Experiment Station (Texas A&M University), 541p. , 2005.
- NELDER, J. A.; MEAD, R. A. A simplex method for function minimization. **Computer Journal**, v. 7, p. 308-313. 1965.
- OLIVEIRA, L. F. C. de , FIOREZE, Ana P.,MEDEIROS, Antonio M. & SILVA , Mellissa A. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v 14, n.11, p. 1186-1192, Campina Grande, PB,2010.
- PAPPAGALLO, G.; LO PORTO, A.; LEONE, A. Use of the SWAT model for evaluation of anthropic impacts on water resources quality and availability in the Celone Creek basin (Apulia 7 Italy). 2003. **2" International SWAT Conference.** TWRI Techical Report 266. Baria/Italy.
- PINTO, J. E. S. S.; AGUIAR NETTO, A. O. **Clima, Geografia e Agrometeorologia: uma abordagem interdisciplinar.** São Cristóvão: Editora UFS; Aracaju: Fundação Oviêdo Teixeira, 2008.

- PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E.; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de bacia hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de bacias hidrográficas:** 2. ed. Ilhéus, BA: Editus, 293p.,2008.
- PRUSKI, F. F.; BRANDAO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial.** Viçosa UFV, 2004.
- REICHARDT, K.; ANGELOCCI, L.R.; BACCHI, O.O.S.; PILOTTO, J.E. Daily rainfall variability at local scale (1,000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. **Sci. Agric.**, 52(1):43-49, 1995.
- REBOUÇAS, A.C. e GASPARTY, J. **As águas subterrâneas do Nordeste: estimativas preliminares**, 2<sup>a</sup> edição-Recife. SUDENE/Div.Doc.1971
- REBOUÇAS, A.C. **Recursos Hídricos: As águas subterrâneas no Brasil**, CNPq, Brasília, 1978.
- RIBEIRO, F. P. O paradigma ambiental na globalização neoliberal: da condição crítica ao protagonismo de mercado. **Sociedade & Natureza**, ano 24 n°2. Uberlândia, 2012.
- RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. São Carlos EESC/USP, 840 p., 1998.
- ROQUE, R. O.; SANSIGOLO, C. A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n.1, p.21-28, 2001.
- RUIZ, J.M.E. **Aplicación de modelos hidrológicos con fines de prevención de desastres en cuencas de venezuela**. 2008. Dissertação (Mestrado em Desarrollo de los Recursos Aguas y Tierras mención Planificación de Recursos Hidráulicos) - Universidade de Los Andes Mérida, Venezuela.
- SACHS, Ignacy. **Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro, RJ. Garamond. 2002.
- SANTHI, C.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; DUGAS, W. A.; SRINIVASAN, R.; HAUCK, L. M.; Validation of the SWAT Model on a large River Basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, vol. 37, no. 5, october, 2001.
- SANTOS, M. S. **Estudo da sub-bacia do rio Poxim/SE: uma proposta arqueológica**. 75p. , 2003. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Sergipe.
- SANTOS, R. C. **Classificação textural aplicada à cobertura do solo de uma bacia hidrográfica usando sensoriamento remoto**. 153 p. , 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.
- SANTOS, R. O. ; SCUDELARI, A. C. . Avaliação da suscetibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Pogenti, RN. In: XIXSBRH, 2011, Maceió. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Porto Alegre: ABRH, 2011. v. 1. p. 1-20.
- SERGIPE. SMARH/SRH- Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos/ Superintendência de Recursos Hídricos: **Atlas digital sobre recursos hídricos**. DVD-ROM, 2012.

- SETTI, A. A.; et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 226p .2001.
- SIENA, Osmar; COSTA, Gleimíria; OLIVEIRA, Oleides. Desenvolvimento Sustentável:Discussão Conceitual. **Anais** do II Seminário sobre Sustentabilidade da UNIFAE. Curitiba, 2007.
- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, J. A.; AGUIAR NETTO, A. O ; VASCO, A. N. ; QUINTILIANO, D. S. **Determinação da curva-chave no rio Poxim-Açu, para auxílio na gestão dos recursos hídricos**. In: VI Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação Tecnológica, 2011, Natal, Rio Grande do Norte. 2011.
- SILVA, M. G.; AGUIAR NETTO, A. O. Francis Bacon e a reformulação da ciência. In: Santos, A. C; BECKER, E (orgs.). **Entre o homem e a natureza: abordagens teórico-metodológicas**. 1. ed. Porto Alegre: Redes Editora, 2012. p. 63-71.
- SILVA, M. G. **Modelagem ambiental na bacia hidrográfica do rio Poxim-açu/SE e suas relações antrópicas**. 2013. 224p. Tese de Doutorado (Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe.
- SILVA,R.F.G. **Estimativa de Parâmetros Hidrodinâmicos de aquíferos em Área e Embasamento através de Métodos Indiretos**.Dissertação de Mestrado,Universidade Federal de Ouro Preto. 2009.
- SILVA, Z. F. B. **Cenário atual da secção urbana do Rio Poxim**. 85p. , 2001. Monografia (Especialização em Gestão de Recursos Hídricos em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe.
- SOARES, J. A. **O Rio Poxim, Processo Urbano e Meio Ambiente**. 67p. 2001. Monografia (Especialização em Gestão de Recursos Hídricos em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe.
- SOLOMATINE, D.P.; WAGENER, T. Hydrological Modeling. In: PETER, W. (Ed.) **Treatise on Water Science**. Oxford: Elsevier, 2011. P. 435-457.
- SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K. Model Calibration. In: SINGH, V.P. et al. (Ed.) Computer Models of Watershed Hydrology, Littleton, Colorado: **Water Resources Publication**. p. 23-67. 1995.
- SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J.G. Integration of the basin-scale water quality model With GIS. **Water Resources Bulletin**, v.30, n.03, p. 453-462, 1994.
- STUDART, Ticiana M. Carvalho. Hidrologia: Precipitação. Universidade Federal do Ceará - UFC. Ceará, Cap. 1, p. 22-23. 2006. **Apostila**. Disponível em: <[http://www.barramentos.ufc.br/Hometiciana/Arquivos/Graduacao/Apostila\\_Hidrologia\\_grad/Cap\\_1\\_Introducao\\_2004.pdf](http://www.barramentos.ufc.br/Hometiciana/Arquivos/Graduacao/Apostila_Hidrologia_grad/Cap_1_Introducao_2004.pdf)>. Acesso em: 18/01/2014.
- TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**.UFGRS/ABRH, 2a edição, 943p. Porto Alegre, 1997.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS/ABRH, 1. Edição, 669p. Porto Alegre, 1998.

- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v.55, n.4, p.31-33, 2003.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- UNITED NATIONS/WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. 1st UN World Water Development Report: Water for People, Water for Life. In: **The world's water crisis**. Paris, New York and Oxford: UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) and Berghan Books, 2003. cap. 2. Disponível em: <[www.unesco.org/water/wwap/wwdr1](http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr1)> Acesso em 01 de agosto de 2013.
- VASCO, A.N.; PEREIRA, A.P.S.; BRITTO, F.B.; MELLO JÚNIOR, A.V.; NOGUEIRA, L. C. **Estudo hidrológico na sub-bacia do rio Poxim e sua importância para a capital Aracaju**. In: Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, 2010, Maceió.
- VASCO, A. N. et al. Estudo hidrológico na sub-bacia do rio Poxim e sua importância para a capital Aracaju. In: CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA. **Anais...**, Maceió, 2010.
- VAN GRIENSVEN, A. Sensitivity, autocalibration, uncertainty and model evaluation in SWAT2005. **Artigo técnico**. Disponível em: <[http://gis-vrac.vrac.iastate.edu/icrw/download/PrintOut/SWAT2005\\_manual\\_sens\\_cal\\_unc.pdf](http://gis-vrac.vrac.iastate.edu/icrw/download/PrintOut/SWAT2005_manual_sens_cal_unc.pdf)>. Acesso em: 10 dez. de 2012.
- VAN GRIENSVEN, A.; MEWIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SIRINIVASAN, R. A global Sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, Vol. 324. p.10-23. 2006.
- VEITH, T. L.; SHARPLEY, A. N.; ARNOLD, J. G. **Modeling a small, northeastern watershed with detailed, field-level data**. Transactions of the ASABE. vol. 51, n. 2, p. 83-471, 2008.
- VENETIS, C. A study of the recession of unconfined aquifers. **Bulletin International Association Science Hydrology**. v. 14, n.4. 1969. P.119-125.
- 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, p. 307-317, 2009.

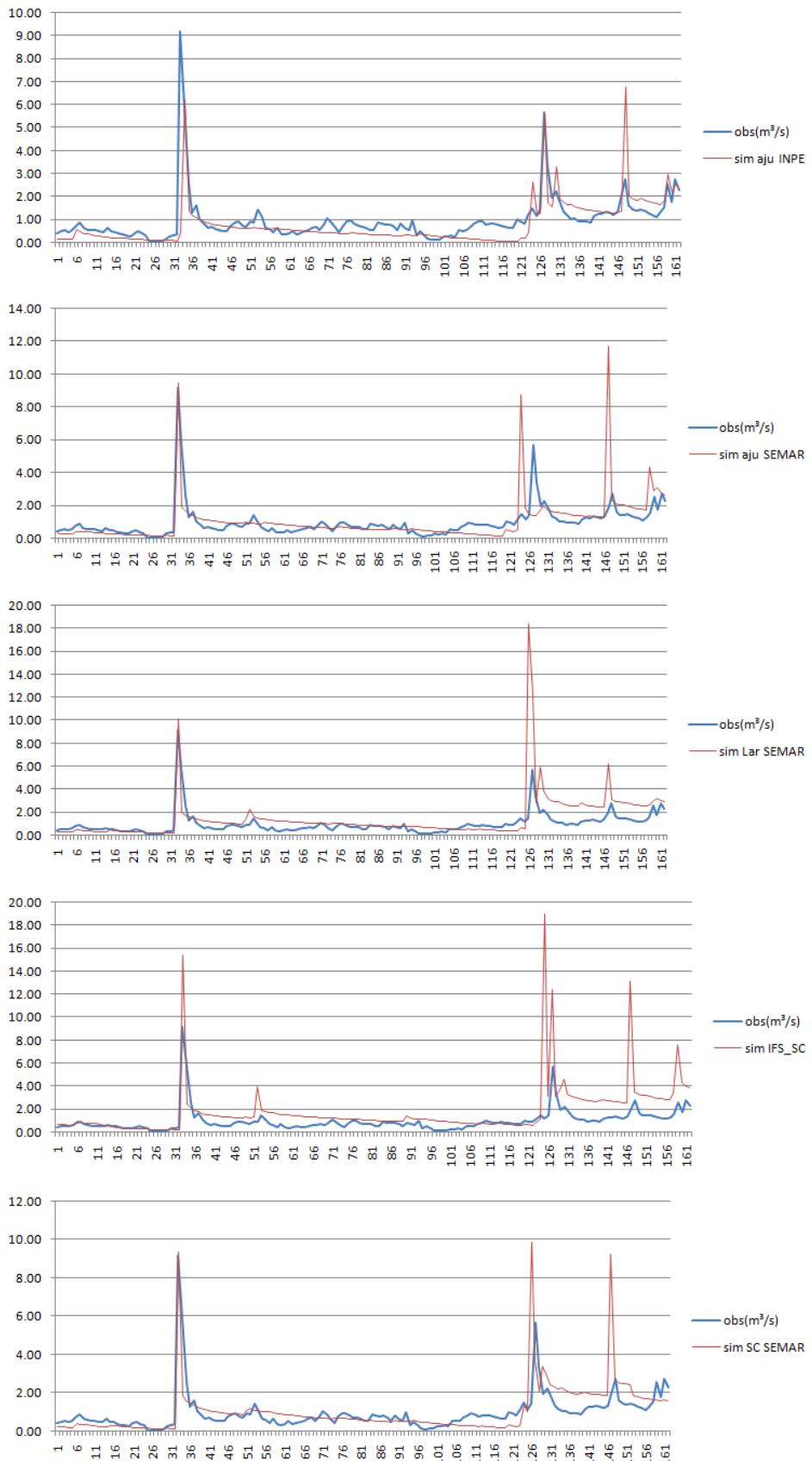
## Anexo A – Dados de solos obtidos pelos levantamentos de campo de SILVA(2013)

VARIÁVEIS	SOLOS			
	Argissolo Vermelho Amarelo		Gleissolo	
NLAYERs	2		2	
HYDGRP	B		B	
SOL_ZMX (mm)	500.00		500.00	
ANION_EXCL (fração)	0.49		0.46	
Camadas	1	2	1	2
SOL_Z (mm)	235.00	500.00	250.00	500.00
SOL_BD (g/cm3)	1.54	1.66	1.63	1.75
SOL_AWC (mm/mm)	0.30	0.42	0.37	0.40
SOL_CBN (%)	0.63	0.50	0.37	1.02
SOL_K (mm/h)	24.03	39.21	52.77	57.80
CLAY (%)	11.82	13.78	2.23	0.31
SILT (%)	22.17	18.21	15.13	12.80
SAND (%)	66.01	68.01	82.64	86.89
SOL_ALB (fração)	0.20	0.20	0.20	0.20
SOL_EC (dS/m)	0.43	0.44	0.59	0.49
USLE_K	0.16	0.13	0.07	0.06

SNAM	Neossolo Quartzarrênico		Neossolo Litólico	
	1	2	1	2
NLAYERs	2		2	
HYDGRP	B		B	
SOL_ZMX (mm)	300.00		500.00	
ANION_EXCL (fração)	0.45		0.48	
Camadas	1	2	1	2
SOL_Z (mm)	150.00	300.00	250.00	500.00
SOL_BD (g/cm3)	1.52	1.70	1.55	1.66
SOL_AWC (mm/mm)	0.30	0.12	0.29	0.25
SOL_CBN (%)	1.02	1.11	0.74	0.91
SOL_K (mm/h)	50.17	55.75	51.08	49.08
CLAY (%)	4.03	4.23	5.74	5.74
SILT (%)	13.34	13.26	17.79	13.62
SAND (%)	82.64	82.52	76.47	80.64
SOL_ALB (fração)	0.20	0.20	0.20	0.20
SOL_EC (dS/m)	0.66	0.51	0.23	0.19
USLE_K	0.06	0.06	0.09	0.06

Onde: NOME SOLO (SNAM); Número de Camadas (NLAYERs); Grupo Hidrológico (HYDGRP); Profundidade (SOL\_ZMX); Porosidade de Anions (ANION\_EXCL); Profundidade (SOL\_Z); Densidade do solo (SOL\_BD); Água disponível (SOL\_AWC); Carbono orgânico (SOL\_CBN); Condutividade hidráulica (SOL\_K); Argila (CLAY); Silte (SILT); Areia (SAND); Albedo (SOL\_ALB); Condutividade elétrica (SOL\_EC); Fator USLE K (USLE\_K)

Anexo B – Gráficos da avaliação das precipitações de regiões no entorno da bacia hidrográfica do rio Poxim-açu



## Anexo C – Avaliações dos dados de precipitação de Aracaju, série histórica do INMET.

Semestre	Ordem	Ano	Média	Ano	Dv	Ano	Var
1	1	1993	1.958563536	1991	5.029505149	1991	25.29592205
1	2	1991	2.243820225	1993	5.839415508	1993	34.09877348
1	3	2012	2.340659341	1988	6.888928563	1988	47.45733675
1	4	1988	2.866111111	2012	7.095045007	2012	50.33966365
1	5	1995	3.13480663	1995	7.249923646	1995	52.56139288
1	6	2003	3.293370166	2005	7.395099625	2005	54.68749847
1	7	2005	3.385082873	2003	7.883531373	2003	62.15006691
1	8	1989	3.922905028	2002	8.668975716	2002	75.15113996
1	9	1992	3.933519553	2007	9.148099428	2007	83.68772314
1	10	2004	3.935164835	2004	9.500856299	2004	90.26627041
1	11	2001	4.229834254	2006	9.677453529	2006	93.65310681
1	12	1998	4.235911602	1989	10.65892992	1989	113.612787
1	13	1999	4.311049724	1990	10.6911129	1990	114.2998949
1	14	1990	4.345505618	1992	10.8025379	1992	116.6948252
1	15	2007	4.34640884	2001	11.22937588	2001	126.0988828
1	16	2002	4.443646409	2009	11.38338517	2009	129.5814579
1	17	2006	4.541436464	1994	11.72370367	1994	137.4452278
1	18	1994	4.618888889	1998	11.96260762	1998	143.103981
1	19	2009	4.857458564	2010	11.97927359	2010	143.5029957
1	20	2010	4.858563536	1997	11.98540554	1997	143.649946
1	21	2011	4.883425414	2011	14.15465575	2011	200.3542793
1	22	1997	5.059776536	2000	14.40244656	2000	207.4304669
1	23	1996	5.698901099	1999	14.78327469	1999	218.5452106
1	24	2008	5.739010989	1996	15.13779066	1996	229.152706
1	25	2000	6.094505495	2008	15.27500269	2008	233.3257073
2	1	2002	1.245652174	2002	2.901946324	2002	8.421292469
2	2	1997	1.320652174	1997	3.902977371	1997	15.23323236
2	3	2012	1.715217391	2010	3.939525481	2010	15.51986101
2	4	2008	1.736956522	2008	4.070853817	2008	16.5718508
2	5	2010	1.955434783	2007	4.518872775	2007	20.42021115
2	6	1998	2.115217391	1998	4.660224315	1998	21.71769066
2	7	2007	2.122282609	2012	4.806869738	2012	23.10599667
2	8	2011	2.286956522	2009	5.240184315	2009	27.45953166
2	9	2004	2.316847826	2004	5.915164254	2004	34.98916815
2	10	2009	2.33423913	2000	5.948145866	2000	35.38043924
2	11	2000	2.460326087	1990	6.217169086	1990	38.65319145
2	12	2005	2.533695652	2005	6.285307304	2005	39.50508791
2	13	1995	2.614754098	2011	6.875095109	2011	47.26693276
2	14	1992	2.746448087	1994	7.008281575	1994	49.11601063
2	15	1994	2.800543478	1992	7.222323144	1992	52.1619516
2	16	1996	2.857065217	1996	7.654089523	1996	58.58508642
2	17	1993	2.93423913	2001	7.997887283	2001	63.966201
2	18	1990	3.310169492	2003	8.351906055	2003	69.75433476
2	19	2006	3.377717391	1995	8.812419484	1995	77.65873716
2	20	2003	3.464130435	1999	9.00641991	1999	81.11559959
2	21	1989	3.596174863	1993	9.694445002	1993	93.9822639
2	22	2001	3.876086957	2006	10.20743826	2006	104.1917959
2	23	1999	4.035519126	1989	11.06497973	1989	122.4337765
2	24	1991	5.242857143	1991	13.12343981	1991	172.2246725
2	25	1988	6.804918033	1988	15.64412356	1988	244.7386021

**Anexo D – Valores das vazões observadas no exutório.**  
**Com base em Silva (2011)**

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
1/17/2012	0.40
1/18/2012	0.48
1/19/2012	0.52
1/20/2012	0.46
1/21/2012	0.55
1/22/2012	0.74
1/23/2012	0.85
1/24/2012	0.64
1/25/2012	0.56
1/26/2012	0.53
1/27/2012	0.54
1/28/2012	0.50
1/29/2012	0.45
1/30/2012	0.62
1/31/2012	0.47
2/1/2012	0.46
2/2/2012	0.38
2/3/2012	0.32
2/4/2012	0.30
2/5/2012	0.27
2/6/2012	0.39
2/7/2012	0.49
2/8/2012	0.37
2/9/2012	0.28
2/10/2012	0.02
2/11/2012	0.02
2/12/2012	0.02
2/13/2012	0.04
2/14/2012	0.10
2/15/2012	0.26
2/16/2012	0.32
2/17/2012	0.36
2/18/2012	9.17
2/19/2012	5.89
2/20/2012	2.58
2/21/2012	1.27
2/22/2012	1.61
2/23/2012	1.02
2/24/2012	0.80
2/25/2012	0.63
2/26/2012	0.67
2/27/2012	0.58
2/28/2012	0.53
2/29/2012	0.50
3/1/2012	0.50

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
3/2/2012	0.73
3/3/2012	0.86
3/4/2012	0.90
3/5/2012	0.74
3/6/2012	0.69
3/7/2012	0.90
3/8/2012	0.88
3/9/2012	1.42
3/10/2012	1.09
3/11/2012	0.65
3/12/2012	0.58
3/13/2012	0.44
3/14/2012	0.63
3/15/2012	0.36
3/16/2012	0.32
3/17/2012	0.37
3/18/2012	0.51
3/19/2012	0.36
3/20/2012	0.40
3/21/2012	0.47
3/22/2012	0.55
3/23/2012	0.63
3/24/2012	0.67
3/25/2012	0.55
3/26/2012	0.77
3/27/2012	1.03
3/28/2012	0.87
3/29/2012	0.62
3/30/2012	0.43
3/31/2012	0.72
4/1/2012	0.93
4/2/2012	0.95
4/3/2012	0.82
4/4/2012	0.70
4/5/2012	0.69
4/6/2012	0.65
4/7/2012	0.53
4/8/2012	0.52
4/9/2012	0.87
4/10/2012	0.80
4/11/2012	0.75
4/12/2012	0.79
4/13/2012	0.71
4/14/2012	0.52
4/15/2012	0.81

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
4/16/2012	0.63
4/17/2012	0.55
4/18/2012	0.95
4/19/2012	0.28
4/20/2012	0.48
4/21/2012	0.30
4/22/2012	0.14
4/23/2012	0.09
4/24/2012	0.13
4/25/2012	0.13
4/26/2012	0.25
4/27/2012	0.24
4/28/2012	0.28
4/29/2012	0.22
4/30/2012	0.53
5/1/2012	0.50
5/2/2012	0.51
5/3/2012	0.69
5/4/2012	0.80
5/5/2012	0.92
5/6/2012	0.89
5/7/2012	0.78
5/8/2012	0.80
5/9/2012	0.83
5/10/2012	0.78
5/11/2012	0.73
5/12/2012	0.69
5/13/2012	0.64
5/14/2012	0.64
5/15/2012	1.00
5/16/2012	0.91
5/17/2012	0.82
5/18/2012	1.17
5/19/2012	1.48
5/20/2012	1.16
5/21/2012	1.41
5/22/2012	5.65
5/23/2012	3.36
5/24/2012	1.94
5/25/2012	2.23
5/26/2012	1.80
5/27/2012	1.33
5/28/2012	1.17
5/29/2012	1.03
5/30/2012	1.03

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
5/31/2012	0.91
6/1/2012	0.91
6/2/2012	0.92
6/3/2012	0.87
6/4/2012	1.14
6/5/2012	1.24
6/6/2012	1.23
6/7/2012	1.31
6/8/2012	1.26
6/9/2012	1.19
6/10/2012	1.32
6/11/2012	1.93
6/12/2012	2.74
6/13/2012	1.61
6/14/2012	1.41
6/15/2012	1.40
6/16/2012	1.45
6/17/2012	1.36
6/18/2012	1.29
6/19/2012	1.18
6/20/2012	1.10
6/21/2012	1.28
6/22/2012	1.54
6/23/2012	2.54
6/24/2012	1.75
6/25/2012	2.74
6/26/2012	2.27
6/27/2012	2.30
6/28/2012	1.50
6/29/2012	1.84
6/30/2012	2.89
7/1/2012	2.56
7/2/2012	2.04
7/3/2012	1.98
7/4/2012	1.87
7/5/2012	1.74

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
7/6/2012	1.75
7/7/2012	1.73
7/8/2012	1.63
7/9/2012	1.9
7/10/2012	2.71
7/11/2012	2.06
7/12/2012	1.7
7/13/2012	1.63
7/14/2012	1.58
7/15/2012	1.68
7/16/2012	2.42
7/17/2012	4.34
7/18/2012	5.91
7/19/2012	3.5
7/20/2012	2.49
7/21/2012	2.14
7/22/2012	1.97
7/23/2012	1.8
7/24/2012	1.78
7/25/2012	2.9
7/26/2012	2.97
7/27/2012	2.8
7/28/2012	2.72
7/29/2012	2.26
7/30/2012	2.49
7/31/2012	2.48
8/1/2012	2.54
8/2/2012	3.57
8/3/2012	3.02
8/4/2012	2.61
8/5/2012	2.51
8/6/2012	2.17
8/7/2012	2.05
8/8/2012	1.96
8/9/2012	2
8/10/2012	2.3

Data Obs	QObs. (m <sup>3</sup> /s)
8/11/2012	2.51
8/12/2012	2.29
8/13/2012	2.13
8/14/2012	2.28
8/15/2012	2.64
8/16/2012	2.3
8/17/2012	2.12
8/18/2012	2.03
8/19/2012	1.96
8/20/2012	2.43
8/21/2012	2.99
8/22/2012	2.6
8/23/2012	2.6
8/24/2012	3.18
8/25/2012	7.36
8/26/2012	7.26
8/27/2012	4.55
8/28/2012	3.6
8/29/2012	2.92
8/30/2012	2.44
8/31/2012	2.35
9/1/2012	2.41
9/2/2012	2.48
9/3/2012	2.63
9/4/2012	2.56
9/5/2012	2.51
9/6/2012	2.5
9/7/2012	2.35
9/8/2012	2.45

## Anexo E – Alguns parâmetros importantes do modelo SWAT

A seguir serão apresentados os principais parâmetros hidrológicos que podem ser submetidos à análise de sensibilidade e a calibração utilizando-se o modelo SWAT.

### 1) Constante de recessão do escoamento de base (dias) – Alpha\_Bf

A constante de recessão do escoamento de base, gw (Alpha\_Bf) é um índice que avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga. Os valores variam entre 0,1 e 0,3 para locais cujas repostas às recargas são lentas, e 0,9 e 1,0 em locais sensíveis à recarga. Apesar de a constante poder ser calculada, os melhores resultados são obtidos analisando-se dados de vazão ocorridos durante períodos de nenhuma recarga na bacia. Maiores detalhes sobre a constante de recessão pode ser obtida em Arnold et al. (1995) e em Arnold e Allen (1999).

### 2) Eficiência do revolvimento biológico – Biomix

O revolvimento biológico é redistribuição das propriedades de um solo devido à atividade biológica no solo. Estudos sustentam que a atividade biológica ser significativa em sistemas onde os distúrbios no solo não ocorrem repetidamente. No geral, na medida em que o manejo do solo muda do plantio convencional para plantio direto haverá um aumento da atividade biológica. O SWAT considera que o revolvimento biológico pode ocorrer até uma profundidade de 300 mm, variando de acordo com o tipo de solo.

### 3) Índice do potencial máximo de área foliar – Blai

É um dos seis parâmetros usados para quantificar o desenvolvimento foliar durante a fase de crescimento da planta. O índice é calculado dividindo a área foliar pela área ocupada no terreno, sendo necessário montar campos experimentais para representar a densidade das plantas ou então a o índice de área foliar máximo, com valores de séries temporais de no mínimo dois anos.

### 4) Armazenamento máximo do dossel (mm H<sub>2</sub>O) – Canmx

O dossel das árvores pode afetar significativamente a infiltração, o escoamento superficial e a evapotranspiração, interceptando as gotas da chuva e armazenando parte da água. Quando o escoamento superficial é calculado, o Método SCS Curva Número agrega a interceptação do dossel para realizar primeiras análises. Essa variável também inclui o armazenamento na superfície e a infiltração antes de calcular o escoamento e é estimada como sendo 20% do parâmetro de retenção para um dia qualquer. Quando o método de Infiltração Green & Ampt é usado, a interceptação do dossel deve ser calculado separadamente. O SWAT permite que a quantidade máxima de água que pode ser retido no dossel varie diariamente, assim

como uma função do índice de área foliar. Portanto, o parâmetro CANMX, é a quantidade máxima de água que pode ser armazenada em um dossel completamente desenvolvido (mm H<sub>2</sub>O).

#### 5) Condutividade hidráulica efetiva do canal (mm.h<sup>-1</sup>) – Ch\_K

Os rios podem ser classificados em efluentes ou influentes, em função de sua relação com o escoamento de base. O rio que perde água para o subsolo denomina-se influente, enquanto aquele que recebe água subterrânea é classificado em efluente. Existem também aqueles rios que concomitantemente recebem água subterrânea como perdem água, sendo denominados "flow-through stream". Para rios perenes e que recebem constantemente água do escoamento de base a condutividade hidráulica será igual a zero.

#### 6) Coeficiente de rugosidade de Manning – Ch\_N

O valor n de Manning para canais tributários. Os valores são de acordo com Chow (1959) apud Neitsch et al. (2004), o qual possui uma lista com muitos valores do coeficiente de rugosidade de Manning.

#### 7) Valor inicial do SCS Curva-Número para a condição de umidade II – CN2

O SCS Curva-Número é uma função de permeabilidade do solo, uso do solo e condições antecedentes de água no solo. Valores típicos de Curva-Número para a condição II de umidade do solo são listados em SCS Engineering Division (1986), sendo apropriados para 5% de declividade e utilizado para estimar os valores do escoamento superficial nas condições do solo da murcha permanente à saturação. A Curva-Número pode ser atualizado para condições alterações no manejo ou para variações do ciclo natural de colheita e crescimento de lavoura.

#### 8) Fator de compensação de água pelas plantas – Epco

A quantidade de água utilizada pelas plantas por dia é função da quantidade demandada pelas plantas e a quantidade de água disponível ao longo do perfil do solo. Na medida em que o teor de umidade das camadas superficiais do perfil diminui, as plantas compensam nas camadas mais profundas. O Epco varia de 0,01 a 1, sendo que valores cada vez próximos de 1 indicam cada vez camadas mais profundas compensando. Se nenhum valor for informado será estabelecido o valor igual a um, e o valor Epco pode ser determinado por unidade hidrológica ou então para toda bacia hidrográfica.

#### 9) Fator de compensação de evaporação do solo – Esco

Esse coeficiente modifica a profundidade usada para determinar a demanda evaporativa do solo, de forma a levar em consideração o efeito da capilaridade, sendo que o Esco varia entre 0 e 1. Na medida em que os valores diminuem o modelo é capaz de extrair mais água de níveis mais baixos. Se nenhum valor for dado será usado o valor igual a

0,95, e, assim como o Epco, o valor de Esco pode ser determinado por unidade hidrológica ou então um valor único para toda bacia hidrográfica.

10) Tempo de retardo da água subterrânea (dias) – GW\_Delay

A água que se move pela camada mais profunda entra e flui na zona vadosa antes de se tornar a recarga de um aquífero raso. O tempo de retardo entre a saída de água do perfil do solo e a entrada em um aquífero raso dependerá do nível piezométrico e das propriedades hidráulicas das formações geológicas na zona vadosa e na zona de água subterrânea. O tempo de retardo, não pode ser mensurado diretamente, entretanto, pode ser estimado simulando a recarga do aquífero usando diferentes valores de comparando com valores do nível piezométrico observados.

11) Revap, de água subterrânea – Gw\_revap

A água pode se mover de um aquífero raso para uma zona insaturada logo acima. Nos períodos de estiagem, a franja capilar a qual separa a zona saturada da zona insaturada irá evaporar no sentido de baixo para cima, e assim, na medida em que a água evapora da franja capilar, o aquífero reabastece a própria franja capilar. A água também poderá ser retirada de aquíferos por plantas com raízes profundas, principalmente quando a zona saturada estiver próxima da superfície. Devido ao fato do tipo cobertura vegetal afetar o balanço hidrológico, os parâmetros que governam o Revap podem ser alterados de acordo com o tipo de uso do solo. Na medida em que os valores de Gw\_revap se aproximam de 0, o movimento de água de um aquífero raso para a zona que contém raízes é restringido, enquanto valores próximos de 1 a taxa de transferência do aquífero para a zona radicular aproxima-se as taxas de evapotranspiração potencial. Esse parâmetro deve variar entre 0,02 e 0,20.

12) Limite entre a profundidade de água, aqshthr,q , em aquífero raso e a superfície – Gwqmn (mm H<sub>2</sub>O)

A água subterrânea atinge a superfície apenas se a profundidade da água no aquífero raso for igual ou maior do que o Gwqmn.

13) Fração de Recarga para o aquífero profundo. – Rchrg\_dp

Representa a fração de água percolada do aquífero raso para o aquífero profundo, deep. Os valores atribuídos a esse parâmetro variam entre 0 e 1. Vale lembrar que a água que atinge o aquífero não fica disponível para a bacia.

14) Profundidade de água limite no aquífero raso, aqshthr,rvp, para que ocorra "revap" (mm H<sub>2</sub>O) – Revapmn

O movimento de água de um aquífero raso para a zona insaturada é permitida apenas se o volume de água no aquífero raso é maior ou igual ao Revapmn. Essa variável em conjunto com a Gw\_revap são a razão pela qual diferentes pastas de água subterrânea são criadas para cada HRU, ao invés de ser por subbacia.

15) Declividade média, slp ( $m \cdot m^{-1}$ ) – Slope

Declividade média da rampa ( $m \cdot m^{-1}$ ), slp, sendo utilizado em diferentes equações do SWAT. Este parâmetro é obtido na fase de geoprocessamento do modelo, sendo calculado a partir do Modelo Digital de Elevação.

16) Comprimento da declividade média, Lslp, (m) – S1subbsn

O comprimento da declividade média, Lslp, deve ser medido do topo da encosta até o ponto onde o escoamento começa a se concentrar. Terraços podem alterar essa distância, e assim, a distância horizontal entre cada terraço defini-se como o comprimento da declividade média. O comprimento da declividade média geralmente é superestimado, e o modelo adota 50 como um valor padrão caso não for inserido nenhum dado. A interface de SIG irá assumir o mesmo valor para todas HRUs dentro de cada bacia, entretanto, alguns usuários preferem de variar esses valores de acordo com o tipo de solo e o tipo de uso do solo.

17) Albedo do solo úmido – Sol\_Alb

Consiste na razão entre a quantidade de energia refletida por um corpo e a quantidade de radiação incidente, sendo importante no processo de evaporação. O valor atribuído ao albedo deve ser calculado quando o solo estiver próximo ou na capacidade de campo.

18) Teor de umidade disponível nas camadas do solo ( $mm \cdot H_2O \cdot mm^{-1}$  solo) – Sol\_Awc

O teor de umidade disponível para as plantas nas camadas do solo (AWC) é calculada subtraindo-se da quantidade de água na capacidade de campo (FC) a fração de água do ponto de murcha permanente.

19) Condutividade hidráulica do solo saturado , Ksat (mm h-1) – Sol\_K

A condutividade hidráulica saturada, Ksat, relaciona-se à taxa do fluxo de água com o gradiente hidráulico. Ela mensura a facilidade na qual a água se move pelo solo, sendo que o Ksat é recíproco à resistência da matriz do solo ao fluxo de água.

20) Profundidade do solo – Sol\_Z

Profundidade entre a superfície do solo e a camada mais profunda, ou seja, parâmetro que define a profundidade do solo. Segundo Sarmento (2010), este parâmetro é necessário nos cálculos de temperatura do solo, sendo importante para a movimentação de água e evaporação no solo.

21) Coeficiente de retardo do escoamento superficial – Surlag.

Em sub-bacias grandes, com tempo de concentração maior do que um dia, apenas parte do escoamento superficial irá atingir o tributário principal no dia em que ele for gerado. O SWAT incorpora parte armazenamento do escoamento superficial, de

forma a retardar parte da entrada de água oriunda do escoamento superficial no canal principal. Desse modo, o Surlag controla a fração de toda água disponível que irá abastecer diariamente o canal. Caso não seja atribuído nenhum valor, o modelo irá usar o valor igual a 4.

## 22) Timp, Tlaps, Sftmp, Smfmn, Smfmx, e Smtmp

Estes seis parâmetros são usados nas equações responsáveis relacionadas com a ocorrência de neve que ocorre na bacia hidrográfica. Os parâmetros Timp e Tlaps representam, respectivamente, o fator de retardo da temperatura do bloco de neve e a taxa de lapso da temperatura. O Sftmp, por sua vez, representa a temperatura de queda de neve ( $^{\circ}\text{C}$ ), enquanto o Smtmp é a temperatura base de derretimento de neve. Por último, os parâmetros Smfmn e Smfmx representam o fator de derretimento de neve nos dias 21 de dezembro e no dia 21 de junho, respectivamente.

## Anexo F

Conversão dos valores de vazão preditivos simulados pelo SWAT para a geração do Volume acumulado diário de água na represa do rio Poxim-açu.

Data	PCP mm	Qsim $m^3 s^{-1}$	Qdia $m^3 dia^{-1}$	Qfund $m^3 dia^{-1}$	A $Km^2$	Et0 mm	Qacum $Km^3$	Cota m
5/23/2013	-99	1,85	159840,0	17280	0,22	4,72	0,11	6,33
5/24/2013	-99	1,64	123398,8	17280	0,28	4,78	0,23	6,47
5/25/2013	-99	2,21	172317,5	17280	0,37	3,2	0,41	6,66
5/26/2013	-99	5,68	472285,8	17280	0,60	3,49	0,88	7,18
5/27/2013	-99	3,66	296867,2	17280	0,72	1,41	1,17	7,49
5/28/2013	-99	3,23	260773,6	17280	0,83	1,62	1,44	7,76
5/29/2013	-99	2,72	216390,3	17280	0,91	4,98	1,65	7,98
5/30/2013	-99	2,38	183840,0	17280	0,97	4,99	1,84	8,17
5/31/2013	-99	2,15	163637,7	17280	1,02	5,22	2,00	8,33
6/1/2013	-99	1,99	149306,2	17280	1,07	4,64	2,15	8,48
6/2/2013	-99	1,87	139312,5	17280	1,11	4,62	2,29	8,61
6/3/2013	-99	1,89	140866,2	17280	1,16	4,35	2,43	8,74
6/4/2013	-99	1,79	132348,6	17280	1,19	4,62	2,56	8,87
6/5/2013	-99	2,03	152601,8	17280	1,23	4,83	2,71	9,01
6/6/2013	-99	2,3	175482,5	17280	1,28	4,38	2,89	9,17
6/7/2013	-99	2,5	193122,8	17280	1,32	3,45	3,08	9,35
6/8/2013	-99	2,51	195016,2	17280	1,37	3,59	3,28	9,52
6/9/2013	-99	2,49	192946,2	17280	1,41	3,89	3,47	9,69
6/10/2013	-99	2,24	170778,7	17280	1,44	2,75	3,64	9,84
6/11/2013	-99	2,07	157603,6	17280	1,47	3,26	3,80	9,97
6/12/2013	-99	1,96	147269,0	17280	1,50	4,64	3,95	10,09
6/13/2013	-99	1,87	137343,2	17280	1,52	4,33	4,08	10,21
6/14/2013	-99	1,81	132524,1	17280	1,54	4,28	4,22	10,32
6/15/2013	-99	1,76	128190,2	17280	1,56	4,64	4,34	10,42
6/16/2013	-99	1,73	124953,9	17280	1,58	4,27	4,47	10,52
6/17/2013	-99	1,79	130638,4	17280	1,60	2,75	4,60	10,62
6/18/2013	-99	1,73	127803,8	17280	1,61	2,64	4,73	10,73
6/19/2013	-99	1,84	137439,5	17280	1,63	4,05	4,86	10,83
6/20/2013	-99	1,76	128185,7	17280	1,64	4,69	4,99	10,93
6/21/2013	-99	1,71	122753,1	17280	1,66	4,55	5,12	11,02
6/22/2013	-99	1,67	119465,6	17280	1,67	4,54	5,24	11,11
6/23/2013	-99	1,64	116833,3	17280	1,68	4,76	5,35	11,20
6/24/2013	-99	1,61	113818,5	17280	1,69	4,22	5,47	11,28
6/25/2013	-99	2,05	152697,3	17280	1,71	3,6	5,62	11,40
6/26/2013	-99	1,89	139873,7	17280	1,72	3,92	5,76	11,50
6/27/2013	-99	1,97	146194,0	17280	1,73	4,38	5,90	11,60
6/28/2013	-99	1,84	134121,9	17280	1,74	4,63	6,04	11,69
6/29/2013	-99	1,75	125868,4	17280	1,75	4,13	6,16	11,78
6/30/2013	-99	1,85	135342,4	17280	1,76	4,05	6,30	11,88
7/1/2013	-99	2,49	190743,1	17280	1,77	4,42	6,49	12,00
7/2/2013	-99	2,37	179675,6	17280	1,78	4,72	6,67	12,12
7/3/2013	-99	2,65	203292,0	17280	1,79	4,17	6,87	12,26

7/4/2013	-99	2,34	177444,6	17280	1,79	3,59	7,05	12,37
7/5/2013	-99	2,29	174133,4	17280	1,80	3,81	7,23	12,48
7/6/2013	-99	2,73	211728,6	17280	1,81	3,77	7,44	12,62
7/7/2013	-99	2,61	201404,7	17280	1,82	3,36	7,64	12,74
7/8/2013	-99	2,95	231501,4	17280	1,82	3,56	7,87	12,88
7/9/2013	-99	2,58	199148,2	17280	1,83	4,02	8,07	13,00
7/10/2013	-99	2,34	177555,5	17280	1,83	3,21	8,25	13,10
7/11/2013	-99	2,17	164334,7	17280	1,83	2,93	8,41	13,20
7/12/2013	-99	2,06	155334,0	17280	1,84	3,23	8,57	13,29
7/13/2013	-99	1,97	146999,7	17280	1,84	2,66	8,71	13,37
7/14/2013	-99	2,02	152359,9	17280	1,84	2,2	8,87	13,45
7/15/2013	-99	1,93	145424,5	17280	1,84	3,2	9,01	13,53
7/16/2013	-99	2,36	180730,8	17280	1,84	4,27	9,19	13,63
7/17/2013	-99	2,33	176159,3	17280	1,85	4,71	9,37	13,72
7/18/2013	-99	2,62	200395,2	17280	1,85	4,31	9,57	13,83
7/19/2013	-99	4,33	348869,0	17280	1,85	3,58	9,92	14,01
7/20/2013	-99	3,6	287134,4	17280	1,85	3,36	10,20	14,15
7/21/2013	-99	3,26	258157,2	17280	1,86	3,89	10,46	14,28
7/22/2013	-99	2,87	223470,0	17280	1,86	4,01	10,69	14,39
7/23/2013	-99	2,61	200775,0	17280	1,86	4,24	10,89	14,48
7/24/2013	-99	2,43	184787,2	17280	1,86	4,45	11,07	14,57
7/25/2013	-99	2,67	205123,7	17280	1,86	3,57	11,28	14,66
7/26/2013	-99	2,66	205889,3	17280	1,87	2,79	11,48	14,75
7/27/2013	-99	2,46	190055,7	17280	1,87	2,24	11,67	14,84
7/28/2013	-99	2,32	178980,3	17280	1,87	3,1	11,85	14,91
7/29/2013	-99	2,22	168723,7	17280	1,88	3,81	12,02	14,99
7/30/2013	-99	2,79	216631,2	17280	1,88	3,39	12,24	15,08
7/31/2013	-99	2,71	210492,8	17280	1,88	3,1	12,45	15,17
8/1/2013	-99	2,81	219664,0	17280	1,89	3,64	12,67	15,26
8/2/2013	-99	3,08	241956,0	17280	1,90	3,91	12,91	15,35
8/3/2013	-99	2,76	213773,4	17280	1,90	4,16	13,12	15,44
8/4/2013	-99	2,54	194266,1	17280	1,91	4,48	13,32	15,52
8/5/2013	-99	2,4	181534,5	17280	1,91	4,79	13,50	15,59
8/6/2013	-99	2,4	180913,9	17280	1,92	4,81	13,68	15,66
8/7/2013	-99	2,48	187756,3	17280	1,93	4,52	13,87	15,73
8/8/2013	-99	3,04	236664,4	17280	1,94	4,07	14,10	15,81
8/9/2013	-99	6,14	505331,6	17280	1,96	4,33	14,61	16,00
8/10/2013	-99	4,49	362165,1	17280	1,98	4,38	14,97	16,13
8/11/2013	-99	3,8	302365,9	17280	2,00	4,31	15,27	16,23
8/12/2013	-99	3,36	264411,8	17280	2,01	3,89	15,54	16,32
8/13/2013	-99	3,07	240129,7	17280	2,03	3,71	15,78	16,40
8/14/2013	-99	2,86	222288,1	17280	2,05	3,74	16,00	16,47
8/15/2013	-99	4,01	321527,8	17280	2,07	3,86	16,32	16,58
8/16/2013	-99	3,78	301315,8	17280	2,10	4,14	16,62	16,68
8/17/2013	-99	3,37	265210,3	17280	2,12	4,68	16,89	16,76
8/18/2013	-99	3,52	276931,6	17280	2,14	4,16	17,17	16,85
8/19/2013	-99	9,6	803240,8	17280	2,22	2,86	17,97	17,09
8/20/2013	-99	4,72	384166,4	17280	2,27	2,94	18,35	17,21

8/21/2013	-99	5,79	476312,0	17280	2,32	3,88	18,83	17,35
8/22/2013	-99	4,85	392748,4	17280	2,37	4,38	19,22	17,46
8/23/2013	-99	4,37	349900,6	17280	2,42	4,59	19,57	17,56
8/24/2013	-99	4,13	328456,5	17280	2,46	4,55	19,90	17,65
8/25/2013	-99	3,78	298109,3	17280	2,50	4,43	20,20	17,74
8/26/2013	-99	3,54	277481,9	17280	2,54	4,34	20,48	17,81
8/27/2013	-99	3,45	269755,3	17280	2,59	4,47	20,75	17,89
8/28/2013	-99	3,46	270107,0	17280	2,63	4,69	21,02	17,96
8/29/2013	-99	3,29	254654,2	17280	2,67	5,06	21,27	18,03
8/30/2013	-99	3,28	252613,6	17280	2,71	5,26	21,52	18,10
8/31/2013	-99	3,88	303703,8	17280	2,76	5,31	21,83	18,19
9/1/2013	-99	4,48	355139,1	17280	2,82	5,06	22,18	18,29
9/2/2013	-99	4	314048,0	17280	2,88	5,16	22,50	18,37
9/3/2013	-99	3,69	286695,3	17280	2,93	5,27	22,78	18,45
9/4/2013	-99	3,48	267960,8	17280	2,98	5,47	23,05	18,52
9/5/2013	-99	3,33	254143,3	17280	3,03	5,78	23,30	18,59
9/6/2013	-99	3,21	242574,0	17280	3,07	5,08	23,55	18,66
9/7/2013	-99	3,13	237542,4	17280	3,12	4,67	23,79	18,73
9/8/2013	-99	3,06	232536,3	17280	3,17	5,38	24,02	18,79
9/9/2013	-99	3,01	225751,4	17280	3,21	5,68	24,24	18,85
9/10/2013	-99	3,04	227132,9	17280	3,26	5,94	24,47	18,92
9/11/2013	-99	3,09	230339,1	17280	3,31	5,73	24,70	18,98
9/12/2013	-99	3,22	241978,3	17280	3,36	5,64	24,94	19,05
9/13/2013	-99	4,38	342208,6	17280	3,43	5,6	25,29	19,15
9/14/2013	-99	3,9	300453,4	17280	3,50	5,69	25,59	19,23
9/15/2013	-99	3,59	272979,6	17280	3,56	5,91	25,86	19,31
9/16/2013	-99	3,38	253699,1	17280	3,62	5,87	26,11	19,38
9/17/2013	-99	3,35	250905,1	17280	3,68	5,97	26,36	19,45
9/18/2013	-99	3,2	237230,4	17280	3,74	6,16	26,60	19,52
9/19/2013	-99	3,21	237045,5	17280	3,79	6,33	26,84	19,59
9/20/2013	-99	3,3	243821,1	17280	3,85	6,32	27,08	19,67
9/21/2013	-99	3,34	246933,8	17280	3,92	6,07	27,33	19,74
9/22/2013	-99	3,17	232832,2	17280	3,98	5,98	27,56	19,81
9/23/2013	-99	3,06	223324,1	17280	4,03	5,93	27,78	19,88
9/24/2013	-99	2,97	215402,2	17280	4,09	6,01	28,00	19,94
9/25/2013	-99	2,9	208689,0	17280	4,15	6,12	28,21	20,00
9/26/2013	-99	2,84	202711,8	17280	4,20	6,21	28,41	20,07
9/27/2013	-99	2,79	197675,0	17280	4,26	6,27	28,61	20,13
9/28/2013	-99	2,74	192759,4	17280	4,31	6,27	28,80	20,19
9/29/2013	-99	2,7	188963,5	17280	4,37	6,19	28,99	20,25
9/30/2013	-99	2,66	185518,6	17280	4,42	6,1	29,18	20,31
10/1/2013	-99	2,63	182991,6	17280	4,47	5,85	29,36	20,36
10/2/2013	-99	2,59	180325,7	17280	4,53	6,03	29,54	20,42
10/3/2013	-99	2,56	176603,9	17280	4,58	5,32	29,72	20,48
10/4/2013	-99	2,52	176077,7	17280	4,64	4,25	29,89	20,53
10/5/2013	-99	2,82	206669,2	17280	4,70	4,44	30,10	20,60
10/6/2013	-99	3,1	229693,7	17280	4,77	5,3	30,33	20,68
10/7/2013	-99	2,88	206256,1	17280	4,84	5,94	30,53	20,75

10/8/2013	-99	2,74	190707,6	17280	4,90	6,26	30,73	20,81
10/9/2013	-99	2,63	179260,0	17280	4,96	6,25	30,90	20,87
10/10/2013	-99	2,55	172020,1	17280	5,02	6,07	31,08	20,93
10/11/2013	-99	2,49	167372,4	17280	5,08	5,95	31,24	20,99
10/12/2013	-99	2,73	188365,0	17280	5,15	6,06	31,43	21,05
10/13/2013	-99	2,59	175306,6	17280	5,21	5,53	31,61	21,11
10/14/2013	-99	4,7	359989,4	17280	5,34	4,47	31,97	21,24
10/15/2013	-99	3,75	282837,0	17280	5,45	3,96	32,25	21,34

Onde: PCP é a precipitação (mm); Qsim é a vazão simulada pelo SWAT calibrado ( $m^3.s^{-1}$ ); Qdia é o volume de água produzida no dia já subtraído de Qfund+evaporado ( $m^3.dia^{-1}$ ); Qfund é a vazão de manutenção sanitária de fundo ( $m^3.dia^{-1}$ ); A é a área da superfície do espelho d'água formado ( $m^2$ ); Et0 é o valor da evapotranspiração por Morton (mm); Qacum é o volume acumulado no lago (Milhões de  $m^3$ ); Cota é a altura estimada no lance de réguas (m)