



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciência

Faculdade de Engenharia

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**

Rio de Janeiro

2014

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**



Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luciene Pimentel da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Marconi Fonseca de Moraes

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

B447 Bellon, Ernani.

Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro / Ernani Bellon. - 2014.
110 f.

Orientadora: Luciene Pimentel da Silva.

Coorientador: Marconi Fonseca de Moraes

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Recursos hídricos – Dissertações. 3. Rio de Janeiro (Brasil) – Dissertações. I. Silva, Luciene Pimentel da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 556.18(815.3)

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Ernani Bellon

**Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas:
aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental
na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental – Gestão Sustentável de Recursos Hídricos.

Aprovado em: 25 de março de 2014.

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Luciene Pimentel da Silva (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. Marconi Fonseca de Moraes (Coorientador)
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

Prof. Dr. Alfredo Akira Ohnuma Júnior
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dr.^a Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora
Universidade Federal Fluminense – UFF

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

Aos meus tios-avós, Eduardo e Yolanda, *in memoriam*.

Aos meus filhos, Eduardo e Luiza.

AGRADECIMENTOS

À professora Luciene Pimentel da Silva, minha orientadora, por ter me dedicado parte do seu precioso tempo e conhecimento, e com enorme paciência me incentivou à realização desta pesquisa.

Ao professor Marconi Fonseca de Moraes, meu coorientador, que implantou e operou as estações hidrometeorológicas na microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó cujos dados serviram ao presente estudo.

Aos professores Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora e Alfredo Akira Ohnuma Júnior, por terem aceitado participar da banca examinadora e me honrado com suas contribuições valiosas.

Às instituições, pesquisadores e técnicos que participaram do Projeto Gestão Participativa da Sub-bacia do Rio São Domingos, pela concessão dos dados que serviram ao presente estudo. Em especial, à Embrapa Solos e Marta Vasconcelos Ottoni.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, pelos dados climatológicos cedidos e aqueles consultados no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.

Aos professores, colegas e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da UERJ, pela convivência fraterna durante a realização do curso.

Ao Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pela oportunidade de cursar o mestrado do PEAMB.

RESUMO

BELLON, Ernani. *Planejamento de recursos hídricos de áreas rurais degradadas: aplicação do modelo SWAT em bacia hidrográfica experimental na região Noroeste do Estado do Rio de Janeiro*. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

A degradação ambiental do Noroeste do Estado do Rio de Janeiro tem se intensificado nas últimas décadas devido às práticas agrícolas não preservacionistas. Esta situação, que decorre do uso inadequado do solo, tem implicado em mudanças na oferta hídrica em grau variável nos municípios da região com prejuízos econômicos nas atividades dos pequenos e médios proprietários rurais e na qualidade de vida. A abordagem para enfrentar problemas deste tipo depende da participação efetiva das instâncias de governo e dos órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos. No âmbito da hidrologia os modelos hidrológicos com base no uso e ocupação do solo são ferramentas que podem auxiliar com ótimo custo e benefício a geração de informações em bacias hidrográficas, instrumentadas ou não. Os modelos são úteis ao planejamento e à tomada de decisão por possibilitarem a previsão de vazões e simulação de cenários sobre o uso do solo e qualidade da água. Neste sentido, o presente estudo pretende dar sua contribuição ao avaliar a adequabilidade do modelo SWAT simular o processo chuva-vazão na microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó, com 13,5 km², localizada na região hidrográfica do rio Muriaé, afluente do rio Paraíba do Sul. O SWAT tem sido empregado em bacias agrícolas nos EUA, na Europa e, atualmente, na China, sudeste asiático e Irã, entre outros países, e na última década maior inserção no meio acadêmico brasileiro. A versão 2005 do modelo foi utilizada por meio da sua interface SIG para simular as vazões médias diárias com base na precipitação medida no intervalo de 15 minutos no período de 2005/2006. As vazões simuladas foram comparadas com as vazões observadas no exutório da microbacia. Foram testadas as ferramentas de análise de sensibilidade e autocalibração. O método de calibração manual foi usado para o ajuste por tentativa e erro. Os parâmetros ajustados corresponderam ao CN2 e ESCO. Os valores obtidos na calibração para os coeficientes estatísticos R², NSE, PBIAS e RSR foram 0,80, 0,80, 7,02 e 0,45, respectivamente, indicando escore “muito bom”, o que foi confirmado pela inspeção dos hidrogramas. As saídas validadas para período diferente da calibração forneceram para os mesmos coeficientes os valores 0,84, 0,80, 25,92 e 0,44. Os dois primeiros, com escore “muito bom”. O valor de PBIAS, no limite do satisfatório, e RSR, “muito bom”. O desempenho permitiu concluir que a simulação com o SWAT foi adequada. Em relação às pesquisas que têm sido realizadas no Brasil os valores obtidos para os indicadores foram semelhantes, indicando a capacidade do modelo para novos estudos nesta microbacia que considerem os usos consuntivos e cenários de uso do solo.

Palavras-chave: Modelo SWAT; Microbacia experimental; Gestão dos recursos hídricos.

ABSTRACT

BELLON, Ernani. *Water resources planning of degraded rural areas: application of the SWAT model in an experimental catchment in the Northwest region of the State of Rio de Janeiro*. 2014. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

The environmental degradation in the Northwest region of the State of Rio de Janeiro has intensified in the last decades due to no preservationist agricultural practices. This arises from inappropriate land use that has been associated to changes in water supply to a varying extent in the Region's municipalities. These, has led to economic losses in the activities of small and medium rural homeowners, and quality of life decaying. The approach to address such problems depends on the active participation of government bodies and agencies responsible for water resources management. Hydrological simulation models can assist with great value and benefit to the generation of information in basins, instrumented or not. Models are useful for planning and decision making as they allow the discharges forecasting and simulation scenarios on land use and water quality. In this context, the study aims to make a contribution to assess the suitability of the rainfall-runoff component of the SWAT model in the Santa Maria and Cambiocó catchment, with 13.5 km², located in Muriaé's river basin, a tributary of the Paraíba do Sul's river basin. SWAT has been employed in agricultural basins in the U.S., Europe, and currently in China, Southeast Asia and Iran, among other countries, and had in the last decade greater insertion in the Brazilian academia. The 2005 version of the model was used through its GIS interface to simulate the daily mean discharges based on rainfall measured at 15 minute intervals from 2005/2006. Simulated and observed discharges at catchment's outlet gage station have been compared. Tools for sensitivity analysis and calibration were tested. Manual calibration adjustment was conducted with CN2 and ESCO parameters. The values obtained by calibration for the statistical coefficients R², NSE, PBIAS and RSR were 0.80, 0.80, 7.02 and 0.45, respectively, indicating "very good" score. This was confirmed by inspection of hydrographs. The validation period for the different outputs provided the coefficients 0.84, 0.80, 25.92 and 0.44. The R² and NSE matched a "very good" score. The PBIAS was at the limit of satisfactory and RSR, "very good". The results showed that SWAT simulations were appropriate comparing with others studies in Brazil. The model can be recommended for further studies in this catchment for modeling consumptive uses and land use scenarios.

Keywords: SWAT model; Experimental microwatershed; Water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do ciclo hidrológico no SWAT	44
Figura 2 - Localização da microbacia experimental de Santa Maria e Cambiocó	57
Figura 3 - Vistas da microbacia em Santa Maria e Cambiocó	58
Figura 4 - Comunidades de Santa Maria e Cambiocó	59
Figura 5 - Comandos do SWAT2005 e etapas do projeto	63
Figura 6 - Relevo e classes de declividades na microbacia	65
Figura 7 - Distribuição dos Solos / URHs na microbacia	67
Figura 8 - Hidrogramas observado/simulado (1ª simulação)	71
Figura 9 - Hidrograma do escoamento de base simulado (1ª simulação)	71
Figura 10 - Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQ	74
Figura 11 - Ranqueamento dos parâmetros com base na função objetivo SSQR	74
Figura 12 - Ranqueamento dos parâmetros com base na vazão média simulada	75
Figura 13 - Hidrogramas observado/simulado com a função SSQ (autocalibração)	77
Figura 14 - Hidrogramas observado/simulado com a função SSQR (autocalibração)	77
Figura 15 - Hidrogramas observado/simulado (calibração)	81
Figura 16 - Hidrograma do escoamento de base simulado (calibração)	81
Figura 17 - Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (calibração)	82
Figura 18 - Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (calibração)	83
Figura 19 - Hidrogramas observado/simulado no período a validar (antes da validação) .	85
Figura 20 - Hidrogramas observado/simulado (validação)	86
Figura 21 - Hidrograma do escoamento de base simulado (validação)	87
Figura 22 - Dispersão das vazões diárias observadas/simuladas (validação)	87
Figura 23 - Dispersão dos resíduos entre as vazões diárias observadas/simuladas normalizados pela média das vazões diárias observadas (validação)	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores usados na avaliação de simulações hidrológicas	32
Tabela 2 - Classificação das simulações hidrológicas	33
Tabela 3 - Modelos hidrológicos de base física e de qualidade da água	40
Tabela 4 - SWAT no Brasil em bacias menores do que 100 km ² (2003-2010)	56
Tabela 5 - Resultados da 1ª simulação (antes da calibração)	70
Tabela 6 - Parâmetros que influenciam o processo chuva-vazão disponíveis na análise de sensibilidade do SWAT2005	72
Tabela 7 - Resultados da autocalibração com as funções objetivo SSQ e SSQR	77
Tabela 8 - Resultados da calibração do parâmetro CN2	79
Tabela 9 - Resultados da calibração do parâmetro ESCO (com “CN2 = 80”)	80
Tabela 10 - Resultados da simulação do período a ser validado (antes da validação)	85
Tabela 11 - Resultados da validação com “CN2 = 80” e “ESCO = 0,4”	86
Tabela 12 - Resultados das etapas de calibração e validação	89
Tabela 13 - Comparação com o estudo de Andrade (2011)	91
Tabela 14 - Parâmetros de crescimento de vegetação (pastagem) fornecidos pelo <i>Land cover/Plant Growth database</i>	106
Tabela 15 - Parâmetros físico-hídricos dos solos inseridos no <i>User soils database</i>	107
Tabela 16 - Dados do gerador climático inseridos no <i>User weather stations database</i> ..	108
Tabela 17 - Parâmetros do <i>input file</i> “unidade de resposta hidrológica” (.hru)	109
Tabela 18 - Parâmetros do <i>input file</i> “água subterrânea” (.gw)	109
Tabela 19 - Parâmetros do <i>input file</i> “manejo do solo” (.mgt)	109
Tabela 20 - Parâmetros do <i>input file</i> “canal principal” (.rte)	109
Tabela 21 - Parâmetros do <i>input file</i> “sub-bacia” (.sub)	110
Tabela 22 - Parâmetros do <i>input file</i> “bacia hidrográfica” (.bsn)	110
Tabela 23 - Parâmetros do <i>input file</i> “configurações e opções de modelagem” (file.cio)	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base
AnnAGNPS	<i>Annualized Agricultural Non-point Source</i>
ANSEWRS	<i>Area Non-point Source Watershed Environment Response Simulation</i>
ArcGIS	Software de Sistemas de Informações Geográficas da ESRI
ArcMap	Aplicativo do ArcGIS
ArcSWAT	Extensão SWAT para o ArcGIS
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BLAI	Índice do potencial máximo de área foliar
CC	Capacidade de Campo
CEIVAP	Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul
CH_K2	Condutividade efetiva do canal principal
CH_N2	Coefficiente de Manning do canal principal
CN	Curva Número
CN1	Curva Número para a condição I de umidade (solos secos)
CN2	Curva Número para a condição de umidade II (solos na CC)
CN3	Curva Número para a condição de umidade III (solos saturados)
CNOP	Curva Número (quando ocorre operação de manejo)
COPPE/UFRJ	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia Politécnica
CREAMS	<i>Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management</i>
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio de Janeiro
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPCO	Fator de compensação da remoção de água pelas raízes
EPIC	<i>Environmental Impact Policy Climate</i>
ESCO	Fator de compensação da evaporação do solo
ESRI	<i>Environmental Systems Research Institute</i>
GEPARMBH	Projeto Gestão Participativa da Sub-Bacia do Rio São Domingos
GLEAMS	<i>Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems</i>
GRASS	<i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
GRHIP/UERJ	Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos
GW_REVAP	Coefficiente de retorno da água para a zona não saturada
GWQMN	Profundidade mínima do aquífero raso para ocorrer o escoamento de base
HSPF	<i>Hydrological Simulation Program – FORTRAN</i>
HRU	<i>Hydrologic Response Unit</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LH	<i>Latin Hypercube</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
NSE	Coefficiente de Nash & Sutcliffe
OAT	<i>One-factor-At-a-Time</i>
OV_N	Coefficiente de Manning para o fluxo superficial

PARASOL	<i>Parameter Solutions</i>
PBIAS	Percentual de tendência bias
PRMS	<i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>
R ²	Coefficiente de Determinação
RCHRG_DP	Fração de água que percola para o aquífero profundo
REVAPMN	Profundidade mínima do aquífero raso para ocorrer “revap”
RMSE	Raiz do Erro Quadrático Médio
ROTO	<i>Routing Outputs to Outlet</i>
RSR	Razão entre o RMSE e o desvio padrão das observações
SCFH	Sistema de Classificação Físico-Hídrica
SEAAPI	Secretaria de Estado de Agricultura, Abastecimento, Pesca e Desenvolvimento do Interior do Estado do Rio de Janeiro
SHE	Sistema Hidrológico Europeu
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo
SOL_Z	Profundidade da camada do solo
SSQ	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SSQR	Soma dos Quadrados das Diferenças dos Resíduos Ranqueados
SURLAG	Coefficiente que controla o atraso do escoamento superficial
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWRRB	<i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>
TR-55	<i>Technical Release 55</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
URH	Unidade de Resposta Hidrológica
WEPP	<i>Water Erosion Prediction Project</i>

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
	Problemática e justificativa	13
	Objetivos geral e específicos	17
	Estrutura da dissertação	17
1	SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	18
1.1	Sistemas e modelos	19
1.2	Classificação dos modelos hidrológicos	20
1.3	Evolução dos modelos hidrológicos	21
1.4	Modelagem hidrológica	22
1.4.1	<u>Escolha do modelo</u>	23
1.4.2	<u>Bacia hidrográfica</u>	25
1.4.3	<u>Definição dos dados</u>	27
1.4.3.1	Variáveis hidrometeorológicas	27
1.4.3.2	Parâmetros físicos	29
1.4.3.3	Ajustes dos parâmetros	29
1.4.4	<u>Avaliação do desempenho</u>	31
1.4.5	<u>Análise de incertezas</u>	34
1.5	Sistemas de Informações Geográficas	36
1.6	Modelos hidrológicos de base física	39
1.7	Sistema hidrológico SWAT	41
1.7.1	<u>Descrição do SWAT2005</u>	43
1.7.1.1	Aspectos conceituais	43
1.7.1.2	Planos de informação	46
1.7.1.3	Dados de entrada	48
1.7.1.4	Parametrização	50
1.7.1.5	Edição	51
1.7.1.6	Simulação	51
1.7.1.7	Análise de sensibilidade e calibração	51
1.7.2	<u>Aplicações do SWAT</u>	53
1.7.3.	<u>SWAT no Brasil</u>	55

2	METODOLOGIA	57
2.1	Caracterização da área de estudo	57
2.1.1	<u>Localização geográfica</u>	57
2.1.2	<u>Aspectos gerais</u>	58
2.1.3	<u>Aspectos socioeconômicos</u>	59
2.1.4	<u>Solos da microbacia</u>	61
2.1.5	<u>Estudo hidrológico da microbacia</u>	62
2.2	Desenvolvimento do projeto	62
2.2.1	<u>Instalação da interface</u>	63
2.2.2	<u>Criação do projeto SWAT2005</u>	64
2.2.3	<u>Delineamento da microbacia</u>	64
2.2.4	<u>Reclassificação e definição das URHs</u>	65
2.2.5	<u>Dados climáticos e parametrização</u>	68
2.2.6	<u>Edição dos dados</u>	69
3	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
3.1	Primeira simulação	70
3.2	Análise de sensibilidade	72
3.3	Autocalibração	76
3.4	Calibração manual	78
3.5	Validação	84
3.6	Análise dos resultados	89
	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ...	92
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A – Descrição dos processos hidrológicos do SWAT	102
	APÊNDICE B – Dados da cobertura vegetal da microbacia	106
	APÊNDICE C – Dados dos solos da microbacia	107
	APÊNDICE D – Dados do gerador de clima da microbacia	108
	APÊNDICE E – Demais parâmetros da microbacia	109