



JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ESCALAR DO
MODELO HIDROLÓGICO *SWAT***

LAVRAS – MG

2013

JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ESCALAR DO MODELO
HIDROLÓGICO *SWAT***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Antônio Marciano da Silva

Coorientadores

Dr. Carlos Rogério de Mello

Dr. Gilberto Coelho

LAVRAS – MG

2012

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Melo Neto, José de Oliveira.

Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT /
José de Oliveira Melo Neto. – Lavras: UFLA, 2013.

149 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012.

Orientador: Antônio Marciano da Silva.

Bibliografia.

1. Mesoescala. 2. Microescala. 3. Simulação. 4. Balanço hídrico.
5. Modelagem hidrológica. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 551.488

JOSÉ DE OLIVEIRA MELO NETO

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE ESCALAR DO MODELO
HIDROLÓGICO *SWAT***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 27 de setembro de 2012.

Dr. Arisvaldo Vieira Mélo Júnior EPUSP

Dr. Carlos Rogério de Mello UFLA

Dr. Antônio Marciano da Silva

Orientador

Dr. Gilberto Coelho

Coorientador

LAVRAS – MG

2012

A minha amada mãe Maria José Souza Melo (*in memoriam*) que com candura,
paciência e esforço me guiou até este momento.

Ao meu pai José Carlos Santos Melo e meu irmão Matheus Eusek Souza Melo
que sempre estiveram presentes em minha vida como sustentáculo para que eu
pudesse me erguer.

A minha Avó Maria da Graças Santos (*in memoriam*) e o meu Avô José de
Oliveira Melo (*in memoriam*) pelo apoio incondicional em minhas decisões.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela formação profissional e estrutura física fornecida para realização deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo ao longo do mestrado.

Ao meu orientador, Dr. Antônio Marciano da Silva, pela confiança, paciência e compreensão dedicadas a mim ao longo desta jornada.

A todos os professores do PPGRHSA e em especial, aos professores Carlos Rogério de Mello e Gilberto Coelho pelos ensinamentos e dedicação em solucionar os desafios encontrados ao longo da realização deste estudo.

Ao Professor Arisvaldo Vieira Mélo Júnior pelas contribuições realizadas na avaliação desta dissertação e pela amizade de longa data.

A minha companheira de todas as horas, Danielle Guimarães, que mesmo com a distância a nós imposta esteve sempre presente, paciente, compreensiva e atenciosa nos momentos felizes e de angústia.

Aos colegas Alisson Souza de Oliveira, Geovane Junqueira Alves, Léo Fernandes Ávila e Matheus Durães que contribuíram diretamente com este trabalho, sejam como companheiros de atividade de campo ou nos vários momentos de discussão deste estudo.

A todos os colegas do PPGRHSA pela convivência proporcionada e pelos momentos de descontração.

A todos aqueles que contribuíram de forma indireta para a conquista deste título.

Muito Obrigado!

RESUMO

A modelagem hidrológica é uma ferramenta útil para predição do comportamento dinâmico da água em uma bacia hidrográfica e, por conseguinte, a estimativa detalhada do balanço hídrico é uma informação de grande valia para a gestão dos recursos hídricos. Entretanto, os fenômenos que regem o ciclo hidrológico apresentam distribuição heterogênea tanto no espaço quanto no tempo, o que dificulta a sua estimativa. Dentro dessa perspectiva, tomou-se como objetivo neste estudo avaliar o desempenho do modelo *SWAT* (*Soil and Water Assessment Tool*) na estimativa do escoamento em duas bacias hidrográficas com escalas espaciais distintas. De maneira complementar foram testadas duas discretizações de área de drenagem (100 e 10 hectares) e duas discretizações do perfil do solo (três e uma camada) a fim de verificar seus efeitos no processo de simulação. O modelo foi aplicado à bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ – mesoescala) e na microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (MBHRM – microescala), ambas com predomínio de Latossolos na região do Alto Rio Grande. Foram utilizados índices estatísticos para avaliar a precisão quali-quantitativa do modelo na simulação do escoamento. O *SWAT* simulou de modo satisfatório em todas as discretizações o escoamento para a BHRJ apresentando tendências de superestimativa, principalmente, do escoamento de base. Entretanto, recomenda-se a opção pela discretização da rede de drenagem em 100 hectares e do perfil do solo em três camadas, visto que essa combinação apresentou o melhor desempenho. Em contrapartida, na microescala o modelo obteve desempenho inadequado em todas as discretizações avaliadas segundo os limites recomendados pela literatura para os índices estatísticos utilizados.

Palavras-chave: Mesoescala. Microescala. Simulação. Balanço Hídrico. Modelagem hidrológica.

ABSTRACT

Hydrological modeling is a useful tool for predicting water dynamic behavior in a given basin and therefore a detailed estimate of the water balance is valuable information for water resources management. However, the phenomena governing the water cycle exhibit heterogeneous distribution, both in space and in time, which complicates their estimation. Within this perspective, this study had as objective to evaluate the performance of the model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) in the runoff estimated in two basins with different spatial scales. In a complementary way were tested two discretizations of the drainage area (100 and 10 hectares) and two discretizations of the soil profile (three and one layer) in order to verify their effects on the simulation process. The model was applied on Jaguara River basin (BHRJ - mesoscale) and Marcela River microbasin (MBHRM - microscale), both with predominantly Latosols in the region of Alto Rio Grande. Statistical indices were applied to evaluate the qualitative and quantitative accuracy of the model in the runoff simulation. The SWAT simulated satisfactorily on all discretizations the runoff for BHRJ presenting trends of overestimation, mainly the base runoff. However, it is recommended option for discretization of the drainage network in 100 hectares and the soil profile in three layers, since this combination showed the best performance. In contrast, the microscale model obtained inadequate performance in all discretizations evaluated according to the recommended limits in the literature for statistical indices used.

Keywords: Mesoscale. Microscale. Simulation. Water Balance.

Modelling hydrologic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico.....	22
Figura 2	Representação do processo de desenvolvimento do modelo <i>SWAT</i> ..	36
Figura 3	Espacialização da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara, com identificação da estação meteorológica, rede de drenagem e seção de controle	48
Figura 4	Distribuição espacial do uso do solo na BHRJ.....	50
Figura 5	Distribuição espacial das classes de solos da BHRJ.....	51
Figura 6	Mapa hipsométrico da BHRJ	52
Figura 7	Distribuição espacial das classes de declividade na BHRJ.....	53
Figura 8	Espacialização da microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela.....	55
Figura 9	Distribuição espacial dos usos do solo na MBHRM	56
Figura 10	Distribuição espacial das classes de solos da MBHRM	57
Figura 11	Mapa hipsométrico da MBHRM.....	58
Figura 12	Distribuição espacial da declividade na MBHRM	59
Figura 13	Distribuição da demanda evaporativa em relação à profundidade do solo.....	74
Figura 14	Divisão da BHRJ em sub-bacias com discretização de 100 hectares	82
Figura 15	Divisão da BHRJ em sub-bacias com discretização de 10 hectares	98
Figura 16	Divisão da MBHRM em sub-bacias com discretização de 100 hectares	109
Figura 17	Divisão da MBHRM em sub-bacias com discretização de 10 hectares	121

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil de solo em três camadas.....	91
Gráfico 2	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em uma camada.....	92
Gráfico 3	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para as séries observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b).....	95
Gráfico 4	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b).....	96
Gráfico 5	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil de solo em três camadas.....	103
Gráfico 6	Hidrogramas observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em uma camada.....	103
Gráfico 7	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares.....	106
Gráfico 8	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares.....	107
Gráfico 9	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas.....	115
Gráfico 10	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em uma camada.....	115
Gráfico 11	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 100 hectares.....	118
Gráfico 12	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 100 hectares.....	119
Gráfico 13	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas.....	125

Gráfico 14	Hidrograma observado e simulado pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em uma camada	125
Gráfico 15	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares.....	128
Gráfico 16	Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para a série observada e simulada pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Síntese de aplicação do modelo <i>SWAT</i> em algumas bacias.....	43
Tabela 2	Hierarquização do parâmetro no processo de calibração de acordo com a sua posição na análise de sensibilidade.....	76
Tabela 3	Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização de 100 hectares em ambas discretizações do solo	83
Tabela 4	Parâmetros utilizados na calibração do modelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização de 100 hectares.....	84
Tabela 5	Valores de CN empregados na simulação da BHRJ com discretização de 100 hectares.....	88
Tabela 6	Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do <i>SWAT</i> aplicadas à BHRJ com discretização de 100 hectares.....	89
Tabela 7	Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ em ambas discretizações do perfil de solo	93
Tabela 8	Valores de evapotranspiração estimados e calculados para BHRJ com discretização de 100 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada	97
Tabela 9	Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização de 10 hectares em ambas as discretizações do solo	99
Tabela 10	Parâmetros utilizados na calibração do modelo <i>SWAT</i> para a BHRJ com discretização de 10 hectares.....	100
Tabela 11	Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do <i>SWAT</i> aplicadas a BHRJ com discretização de 10 hectares.....	102
Tabela 12	Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo <i>SWAT</i> para a BHRJ em ambas as discretizações do perfil de solo	104
Tabela 13	Valores de evapotranspiração estimados e calculados para BHRJ com discretização de 10 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada.....	108
Tabela 14	Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização de 100 hectares em ambas as discretizações do solo	110
Tabela 15	Parâmetros utilizados na calibração do modelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização de 100 hectares	112
Tabela 16	Valores de CN empregados na simulação da MBHRM com discretização de 100 hectares.....	113

Tabela 17	Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do <i>SWAT</i> aplicadas a MBHRM com discretização de 100 hectares	114
Tabela 18	Índices representativos de permanência e desvios das vazões observadas e simuladas pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM em ambas as discretizações do perfil de solo	116
Tabela 19	Valores de evapotranspiração estimados e calculados para MBHRM com discretização de 100 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada	120
Tabela 20	Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização de 10 hectares em ambas as discretizações do solo	122
Tabela 21	Parâmetros utilizados na calibração do modelo <i>SWAT</i> para a MBHRM com discretização de 10 hectares	123
Tabela 22	Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do <i>SWAT</i> aplicadas a MBHRM com discretização de 10 hectares	124
Tabela 23	Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo <i>SWAT</i> para a MBHRM em ambas as discretizações do perfil de solo	126
Tabela 24	Valores de evapotranspiração estimados e calculados para MBHRM com discretização de 10 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada	130
Tabela 25	Resumo das principais informações obtidas para as duas bacias estudadas em todos os níveis de discretização abordados	131
Tabela 26	Tempo de simulação e quantidade de ciclos executados pelo <i>SWAT</i> para as bacias estudadas nas calibrações automáticas	132

LISTA DE SÍMBOLOS

SW_i	Conteúdo final de água no solo
SW	Conteúdo de água no solo disponível para as plantas
t	Tempo
R_i	Precipitação
Q_i	Escoamento superficial
ET_i	Evapotranspiração
P_i	Percolação
QR_i	Fluxo de retorno
Q	Escoamento superficial diário
R	Precipitação pluvial diária
S	Absorção potencial do solo
CN	Curva-Número
CN1	Curva-Número para solos com baixa umidade
CN2	Curva-Número para solos com umidade próxima a capacidade de campo
CN3	Curva-Número para solos com umidade acima da capacidade de campo
Q_{surf}	Volume de escoamento superficial descarregado no canal principal em um dado dia
Q'_{surf}	Volume de escoamento superficial gerado em uma sub-bacia em um dado dia
$Q_{stor,i-1}$	Volume do escoamento superficial armazenado no dia anterior
$surlag$	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial
t_{conc}	Tempo de concentração para a sub-bacia
q_{peak}	Vazão de pico
C	Coefficiente de escoamento superficial
i	Intensidade de precipitação
A	Área da sub-bacia
$SW_{perc,ly}$	Quantidade de água que percola para a próxima camada
$SW_{ly,excess}$	Volume drenável de água da camada de solo
Δt	Duração do passo de tempo
TT_{perc}	Tempo de propagação através da camada i
SW_{ly}	Conteúdo de água armazenado no solo
FC_{ly}	Conteúdo de água na capacidade de campo para a camada de solo i
SAT_{ly}	Volume de água na camada de solo quando completamente saturado
K_{sat}	Condutividade hidráulica saturada
Q_{lat}	Quantidade de água que esco subsuperficialmente
Slp	Declividade média da sub-bacia

Φ_d	Porosidade drenável da camada de solo
L_{hill}	Comprimento do declive
Q_{gw}	Escoamento subterrâneo do canal principal
L_{gw}	Distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal
h_{wtbl}	Altura do lençol freático
$Q_{gw,i}$	Escoamento subterrâneo no canal principal no dia i
$Q_{gw,i-1}$	Escoamento subterrâneo no canal principal no dia anterior
α_{gw}	Constante de recessão de escoamento de base
$W_{rchr,sh}$	Quantidade de água de recarga entrando no aquífero raso no dia i
aq_{sh}	Quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i
$aq_{shthr,q}$	Nível limite de água no aquífero raso para que ocorra a contribuição da água subterrânea para o canal principal
$Q_{gw,o}$	Escoamento subterrâneo no canal principal no início da recessão
$Q_{gw,N}$	Escoamento subterrâneo no canal principal no tempo N
BFD	Número de dias com o escoamento em recessão na bacia hidrográfica
$aq_{shthr,rvp}$	Nível limite de água no aquífero raso para que ocorra a contribuição por ascensão capilar
$W_{revap,mx}$	Máxima de água movendo-se para a zona do solo em resposta ao déficit hídrico
β_{rev}	Coefficiente de <i>revap</i>
E_o	Evapotranspiração potencial no dia
W_{revap}	Quantidade de água movendo-se para a zona do solo em resposta ao déficit hídrico
$W_{deep,mx}$	Quantidade máxima de água movendo-se para o aquífero profundo em um dia i
β_{deep}	Coefficiente de percolação do aquífero profundo
W_{rchr}	Quantidade de recarga entrando no aquífero no dia i
W_{YLD}	Quantidade de água que passa pela seção de controle no intervalo de tempo
$SURQ$	Quantidade de água obtida pelo escoamento superficial
$LATQ$	Contribuição do fluxo subsuperficial
GWQ	Contribuição do escoamento subterrâneo
$TLOSS$	Perda de água no sistema
abs	Abstrações de água no sistema
λE	Densidade do fluxo de calor latente de evaporação
Δ	Declividade da curva de saturação de vapor d'água
R_n	Radiação líquida
G	Fluxo de calor no solo
ρ_{ar}	Densidade do ar
c_p	Calor específico do ar

Δe	Déficit de pressão de vapor d'água
γ	Coefficiente psicométrico
r_c	Resistência da cultura à difusão do vapor d'água
r_a	Resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água
E_a	Quantidade de evapotranspiração real que ocorre numa bacia hidrográfica
E_{can}	Quantidade de evaporação de água livre nas copas
E_o	Evapotranspiração potencial
$R_{int}(i)$	Quantidade inicial de água livre mantida nas copas
$R_{int}(f)$	Quantidade final de água livre mantida nas copas
$E_{solo,z}$	Demanda de evaporação na profundidade z
E''_z	Evaporação máxima da água no solo
z	Profundidade da camada do solo a partir da superfície
$E_{soil,ly}$	Demanda evaporativa para a camada ly
$E_{soil,zl}$	Demanda evaporativa na camada inferior do solo
$E_{soil,zu}$	Demanda evaporativa na camada superior do solo
$esco$	Coefficiente de compensação da evaporação de água no solo
C_{NS}	Coefficiente de eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i>
$\log(C_{NS})$	Logaritmo do coeficiente de eficiência de <i>Nash-Sutcliffe</i>
R^2	Coefficiente de determinação
P_{bias}	Percentual de viés das vazões simuladas em relação às observadas
Q_{OBSi}	Vazão observada no dia i
Q_{SIMi}	Vazão simulada no dia i
Q_{OBS}	Vazão média dos dados observados
Q_{SIM}	Vazão média dos dados simulados
q	Vazão específica
Q_m	Vazão média da série
rcp_{95}	Relação de permanência com probabilidade de 95%
Q_{95}	Vazão com probabilidade de ocorrência de 95%
rcp_{50}	Relação de permanência com probabilidade de 50%
Q_{50}	Vazão com probabilidade de ocorrência de 50%

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Dinâmica do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas	21
2.2	Análise escalar de bacias hidrográficas	26
2.3	Conceitos e desafios da modelagem hidrológica	29
2.4	O modelo <i>SWAT</i> – <i>Soil and Water Assessment Tool</i>	35
2.5	Desempenho do modelo <i>SWAT</i>	40
3	MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1	Aplicativos utilizados	44
3.2	Material cartográfico e dados de campo	44
3.3	Caracterização da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará	47
3.4	Caracterização da microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela	54
3.5	Descrição do modelo hidrológico <i>SWAT</i>	60
3.5.1	Fase terrestre do ciclo hidrológico	60
3.5.2	Clima	71
3.6	Delimitação das URHs	74
3.7	Análise de sensibilidade do <i>SWAT</i>	75
3.8	Calibração e validação do modelo	77
3.9	Estatísticas de precisão	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1	Avaliação do desempenho do <i>SWAT</i> na BHRJ com discretização da drenagem em 100 hectares	82
4.2	Discretização da drenagem em 10 hectares para a BHRJ	98
4.3	Avaliação do desempenho do <i>SWAT</i> na MBHRM com discretização da drenagem em 100 hectares	109
4.4	Discretização da drenagem em 10 hectares para a MBHRM	121
4.5	Avaliação do desempenho do <i>SWAT</i> em diferentes escalas espaciais	130
5	CONCLUSÕES	134
	REFERÊNCIAS	135
	ANEXOS	148

1 INTRODUÇÃO

A essencialidade da água está intrinsecamente ligada à manutenção da vida na Terra, seja na dinâmica climática global, produção de alimentos, dessedentação da grande maioria dos organismos vivos ou na manutenção dos seus processos fisiológicos.

Por sua vez, as atividades antrópicas desenvolvidas ao longo do tempo não deram enfoque ao uso sustentável desse recurso, promovendo grandes modificações na cobertura do solo, alterações no fluxo natural de rios, despejos de resíduos diversos sem tratamento, fatores os quais promovem a depreciação dos recursos hídricos e favorecem o conflito entre seus usuários.

A caracterização dos processos que interferem direta ou indiretamente no comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica e a compreensão de suas interações no sistema água-solo-planta-atmosfera é crucial para o melhor gerenciamento e exploração sustentável da água.

Entretanto, o monitoramento de variáveis hidrológicas necessita de grandes investimentos a fim de implementar uma infraestrutura capaz de cobrir todas as regiões de interesse, resultando na escassez de dados observados em diversas áreas, especialmente em bacias de pequeno porte. Associado a isso, os dados observados estão restritos ao local onde se encontram os postos de medição, produzindo assim lacunas espaços-temporais na disponibilidade de informações hidrológicas.

O emprego de modelos de simulação tem sido a alternativa mais explorada no intuito de preencher as lacunas acima citadas. Essas ferramentas têm por finalidade expressar o comportamento do objeto de estudo tomando por base a dinâmica dos processos que o regem de acordo com diferentes entradas.

A principal limitação associada à representatividade dos modelos hidrológicos está ligada à heterogeneidade espaço-temporal das variáveis que

compõem o ciclo hidrológico e as suas interações com o meio ambiente. Dentro dessa linha, torna-se imprescindível uma análise escalar do comportamento dessas variáveis que envolvem o ciclo hidrológico e da performance dos modelos de simulação na representação de tais informações, fornecendo dados confiáveis e condizentes com a escala de estudo.

A bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ) com área de drenagem de 32km² está inserida em um contexto macro na região do Alto Rio Grande, no Sul de Minas Gerais, cuja classe de solo predominante é a dos Latossolos. O uso do solo está associado à atividade pecuária extensiva que domina a paisagem com pastagens. Destaca-se também a presença do milho como cultura anual e, em caráter secundário, as culturas perenes do café e eucalipto.

Em contexto similar de representatividade dos Latossolos, a microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (MBHRM), com área de drenagem de 4,7km², apresenta-se como uma subunidade da BHRJ.

Essas unidades geomorfológicas oferecem características ímpares para realização de estudos de balanço hídrico e inferências sobre os efeitos do uso do solo sobre o mesmo, apresentando uma combinação de fatores geomorfológicos, pedológicos e climáticos que, associados aos diferentes usos do solo, fornecem uma distribuição espaço-temporal heterogênea do recurso hídrico.

Justifica-se ainda a realização de estudos hidrológicos nessas bacias devido à sua localização estratégica nas proximidades do reservatório da usina hidrelétrica de Itutinga/Camargos sob gestão da CEMIG e inserção em importante região de recarga do Rio Grande.

Dessa maneira, uma análise em caráter distribuído dos diversos fenômenos que influem no balanço hídrico permitirá o entendimento com grau de detalhamento maior das variáveis que compõem o sistema hídrico, além de possibilitar inferências sobre quais dessas variáveis são mais sensíveis a alterações climáticas e da paisagem.

Diante do exposto, tomou-se como objetivo para este estudo a aplicação do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tools (SWAT)* na simulação do escoamento nas bacias hidrográficas do Ribeirão Jaguara e Marcela, a fim de avaliar o efeito dessas escalas espaciais.

Em caráter específico, buscou-se i) calibrar e validar o modelo para as bacias em estudo, ii) testar diferentes discretizações espaciais para definição das unidades de resposta hidrológica (URH), iii) avaliar o efeito da discretização do perfil do solo em camadas, e iv) verificar para quais parâmetros o modelo mostra-se mais sensível ao processo de simulação nas bacias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A água é um dos elementos essenciais para a manutenção da vida em nosso planeta, ocorrendo naturalmente em todos os estados físicos e percorrendo os ambientes atmosféricos, terrestres e subterrâneos, através de ciclos contínuos, impulsionados pela ação da energia solar associada à força gravitacional (SALGUEIRO, 2005).

A limitação dos recursos hídricos tem papel fundamental no desenvolvimento econômico e social de uma região. A *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* - UNESCO (2003) apresentou em relatório uma ampla análise da disponibilidade dos recursos hídricos, sendo mencionado que para 1,1 bilhão de habitantes não existe água em quantidade suficiente para garantir nem mesmo as necessidades básicas.

Tundisi (2003) afirma que o aumento e diversificação da atividade econômica tornam crescente a dependência das comunidades aos recursos hídricos. O aumento da demanda associado à má gestão de tais recursos promove a redução do volume disponível e instiga o conflito entre os diversos setores usuários sobre a distribuição e definição das prioridades de uso do recurso hídrico.

Para Foley et al. (2005), as demandas de água associadas às práticas agrícolas representam o maior montante de captação em relação aos outros setores usuários, respondendo em termos globais, por aproximadamente 85% dos usos consuntivos dos recursos hídricos.

O Brasil nesse sentido é considerado um país privilegiado, pois apresenta grande disponibilidade hídrica, porém, a sua distribuição espacial no país é moldada por uma acentuada distorção. A região Norte tem 68,5% dos recursos hídricos, com 7% da população nacional, enquanto que o Sudeste tem

apenas 6% do total das águas para abastecer 42,6% da população total (EUCLYDES; FERREIRA; FARIA FILHO, 2005).

Segundo Setti et al. (2000), no Brasil, 72% do volume de água captado são destinados à atividade agrícola, seguindo a tendência mundial. Para as atividades industriais, são captados 10% do total, sendo o restante da captação, 18%, destinado ao abastecimento de água da população.

Atualmente, a maioria dos governos e grande número de agências internacionais destacam a água como prioridade, dentro do conjunto dos recursos naturais estratégicos, desenvolvendo políticas holísticas e sustentáveis de gerenciamento dos recursos hídricos, tomando como foco o emprego de fatores hidrológicos e ecológicos para a caracterização da disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2006).

2.1 Dinâmica do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas

De acordo com Tucci (2007), o ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre.

O ciclo hidrológico é fundamentalmente a recirculação da água por meio da evaporação dos oceanos, da precipitação, da infiltração da água nos aquíferos e das reservas de água nos sistemas continentais (lagos, rios, represas e áreas alagadas) (TUNDISI; TUNDISI, 2010).

Os fatores que impulsionam o ciclo hidrológico são a energia térmica solar, a força dos ventos, que transportam vapor d'água para os continentes, a força da gravidade responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e deslocamento das massas de água (TUNDISI, 2003).

A análise do ciclo hidrológico, com base na compreensão dos diversos fenômenos e processos que o regem, é crucial para o desenvolvimento de ações de exploração e conservação dos recursos hídricos, tornando fundamental a discretização dos componentes do ciclo hidrológico e a indicação das suas inter-relações com o ambiente no qual interagem a fim de caracterizar o comportamento dinâmico da água na paisagem. Na Figura 1 estão representados os principais componentes do ciclo hidrológico.

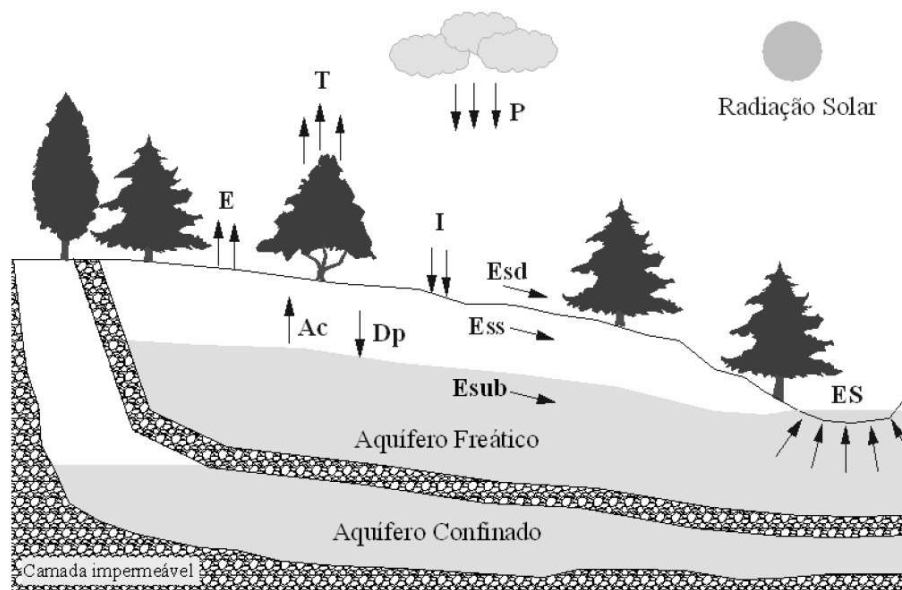


Figura 1 Representação dos principais componentes do ciclo hidrológico
Fonte: Viola (2008)

A precipitação pluvial (P) é considerada a principal entrada de água do ciclo hidrológico e sua ocorrência é sazonal sendo influenciada por diversos fenômenos meteorológicos e características fisiográficas da paisagem. Parte do volume precipitado é interceptada pela cobertura do solo e pelos corpos hídricos. Desse montante, parte pode ser devolvida a atmosfera pela evaporação (E) ou pela transpiração da cobertura vegetal (T).

Do volume que atinge o solo, uma parcela infiltra (I) e se redistribui ao longo do perfil do solo e, a depender das condições de umidade, pode percolar (Dp) promovendo a recarga do aquífero freático. Quando a superfície do solo se encontra saturada ou a capacidade de infiltração é inferior a taxa de precipitação, ocorre o escoamento superficial (ES).

O escoamento superficial pode ser dividido em: escoamento superficial direto (Esd) que representa a parcela que escoia diretamente sobre a superfície do solo, escoamento subterrâneo (Esb) que representa a contribuição do aquífero freático ao escoamento, e escoamento subsuperficial (Ess) que representa o escoamento pela camada superficial insaturada do solo.

Em situações de estresse hídrico das camadas superiores do solo pode ocorrer um fluxo ascendente, originário do aquífero freático para atender a demanda de tais camadas, denominado de ascensão capilar (Ac).

Dentro desse contexto, torna-se necessário a definição de uma unidade básica da paisagem para mensuração e interpretação do comportamento do ciclo hidrológico. A Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotando a definição de bacias hidrográficas como unidade de estudo e gestão. Nesse sentido é de suma importância para a atuação dos gestores e técnicos a compreensão dos conceitos de bacia hidrográfica e como esta interfere na dinâmica da água.

A bacia hidrográfica é reconhecida como uma unidade básica de ecossistema terrestre porque reúne partes do meio ambiente que interagem local e regionalmente por intermédio do fluxo de materiais e organismos mediado pela água (MOULTON; SOUZA, 2006). Os mesmos autores ainda abordam o conceito de bacia hidrográfica como uma referência no espaço, onde ela é a definição topográfica da área de escoamento da chuva por um sistema interligado de corpos hídricos que convergem para uma única saída.

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

Para Lima e Zakia (2000), as bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão e dessa forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico. Teodoro et al. (2007) complementam o raciocínio acima apontando que qualquer modificação no recebimento ou na liberação de energia, ou modificação na forma do sistema, acarretará em uma mudança compensatória que tende a minimizar o efeito da modificação e restaurar o estado de equilíbrio dinâmico.

Pruski, Brandão e Silva (2004) afirmam que a fase terrestre do ciclo hidrológico é a de maior interesse para os hidrólogos, pois os fatores agroclimáticos e fisiográficos interferem naqueles processos, logo, a compreensão desses contribui com as obras de engenharia, com o aproveitamento da água superficial e com a proteção contra enchentes.

Para Tundisi (2001), superpondo-se ao ciclo hidrológico há um ciclo hidrossocial de grande dimensão e impacto ecológico e econômico que advém da diversidade de usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos representados pelas alterações promovidas pelo homem nas diferentes características do ciclo hidrológico.

A fim de caracterizar o ciclo hidrológico e as suas interações com o meio natural e/ou antrópico, em termos do atendimento de suas demandas, tem-se como ferramenta o balanço hídrico que busca representar de forma quantitativa as entradas e saídas de água em uma unidade específica da paisagem inferindo sobre as variações efetivas do total armazenado.

Fill et al. (2005) denotam que o balanço hídrico possibilita ao analista inferir sobre a variação temporal do volume de água armazenado e seus respectivos fluxos indicando potencialidades de exploração dos recursos hídricos.

Archfield et al. (2010) afirmam que o volume de água disponível para retirada em uma bacia hidrográfica é dependente de diversas variáveis, incluindo, a quantidade total de água disponível, a quantidade de água a ser retirada em um determinado momento, os efeitos dessas saídas, o período de análise e a quantidade de água que pode ser necessária para manter o habitat aquático.

Dentre os fatores que afetam o ciclo hidrológico tem-se destacado como prioritários em estudos hidrológicos o uso e ocupação do solo, as classes de solo, o clima e a geomorfologia da área de estudo.

A cobertura vegetal tem um papel importante na regulação dos ciclos biogeoquímicos em bacias hidrográficas principalmente no tocante a interface água-planta. A remoção da cobertura vegetal, principalmente a natural, compromete drasticamente os serviços ambientais fornecidos pelos ecossistemas aquáticos (TUNDISI; TUNDISI, 2010). As modificações na cobertura do solo podem afetar o ciclo hidrológico, comprometendo a drenagem e o estoque de água nos corpos hídricos, alterando o albedo da superfície, reduzindo a ciclagem de nutrientes e modificando a rugosidade da superfície.

A degradação dos recursos hídricos também está relacionada com a degradação dos solos, pois os sedimentos decorrentes da erosão do solo são os responsáveis pelo assoreamento de rios, canais e reservatórios e pela redução da qualidade da água destinada ao abastecimento humano devido à presença de poluentes adsorvidos aos sedimentos (PEDROTTI; MELLO JÚNIOR, 2009).

Menezes et al. (2009) denotam que o solo funciona como um reservatório dinâmico de água, onde suas características podem influenciar esse

sistema de partição de água, especialmente a infiltração, afetando de forma direta o processo de recarga dos aquíferos.

Dentre as propriedades físicas do solo, as mais expressivas que vão influenciar diretamente no movimento de água no solo são a textura e a estrutura afetando a condutividade hidráulica, estabilidade de agregados do solo e infiltração (BRANDÃO et al., 2006).

Por sua vez, as alterações climáticas se refletem nas modificações das variáveis representativas do clima, como a precipitação, evapotranspiração, vento, umidade, temperatura e radiação, podendo produzir alterações nas estatísticas das séries dessas variáveis afetando a resposta da bacia (TUCCI, 2005).

A caracterização dos aspectos morfológicos de uma bacia hidrográfica, com o intuito de levantar as áreas críticas do ponto de vista da manutenção da água, é condição básica para o planejamento bem sucedido da conservação e aumento da disponibilidade hídrica.

Alves e Castro (2003) apontam a necessidade do emprego de métodos quantitativos em estudos associados à caracterização morfométrica de bacias hidrográficas a fim de identificar homogeneidades que permitam correlacionar a forma do relevo com a disponibilidade hídrica.

2.2 Análise escalar de bacias hidrográficas

O termo escala é utilizado para se referir ao espaço, tempo, dimensões quantitativas e analíticas empregadas por analistas para medir e estudar objetos e processos (GIBSON; OSTROM; AHN, 2000).

Os processos que compõem o ciclo hidrológico são dinâmicos e as variáveis que os representam têm sua ocorrência intrinsecamente associada a

modificações no tempo e no espaço e atuam na maioria das vezes de maneira não linear.

Rennó (2003) ao fazer algumas considerações sobre escala aponta que alguns processos podem ser simulados considerando-se intervalos de tempo bastante pequenos (minutos, horas e dias) e escalas espaciais muito detalhadas (estômato, folha, planta), mas os resultados podem ser generalizados para intervalos de tempo maiores (dias, meses, estações, anos, décadas) e escalas espaciais menos detalhadas (dossel, comunidade, região).

Em relação ao espaço, Dahl et al. (2007) afirmam que para diferentes referenciais de observação, considerando-se os processos do ciclo hidrológico, uma área de estudo pode ser vista sob vários níveis, desde escalas globais (como a bacia hidrográfica e sistemas aquíferos), passando por modelos regionais (áreas que subdividem a bacia segundo critérios específicos ou em sub-bacias) e considerações locais (poço ou uma microbacia industrial/rural).

Sob a mesma ótica de compartimentação em níveis de observação, Tucci (2003) afirma que a escala temporal dos processos hidrológicos pode ser de curto prazo (de minutos a poucos dias), sazonal (dentro do ano), interanual de curto prazo (2 a 3 anos) e variabilidade decadal (dezenas de anos).

Fioreze et al. (2008) afirmam que para determinação da disponibilidade hídrica de uma dada bacia é necessário o monitoramento contínuo e a realização de estudos complementares das variáveis hidrológicas. Esse conhecimento é obtido, preferencialmente, a partir de dados históricos.

Almeida (2008) ressalta que uma rede de monitoramento bem dimensionada, que gera séries extensas não pode ser substituída, pois não há método capaz de criar informações. O autor afirma ainda que o conhecimento de um fenômeno físico deve ser espacial e temporal, uma vez que se pretende, na maioria das vezes, fazer previsão e simulação.

Nesse sentido, a chave para uma boa representação do balanço hídrico em uma determinada bacia hidrográfica está na escala empregada. Contudo, no Brasil o monitoramento das diversas variáveis do ciclo hidrológico ainda é incipiente no tocante a construção de séries temporais robustas que representem de fato sua variabilidade apresentando, na maioria das vezes, um caráter estacionário. Essa dificuldade em obter séries temporais representativas de dados hidrológicos é agravada quando a proposta de estudo está associada a pequenas escalas espaciais (microbacias). Dessa maneira, estudos hidrológicos envolvendo análises espaciais se sobressaem em detrimento de análises temporais.

Gibson, Ostrom e Ahn (2000) identificaram pelo menos quatro problemas teóricos relacionados à escala: (1) o efeito da escala, extensão e resolução sobre a identificação de padrões de mudanças ambientais; (2) como os fenômenos específicos variam entre os níveis; (3) possibilidade de generalizar proposições derivadas de um nível para o outro; e (4) otimização dos processos em pontos e regiões particulares.

Assim, os principais desafios associados à análise escalar são: (a) representatividade dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais; (b) empirismo de modelos e parâmetros ao representar os processos hidrológicos na bacia hidrográfica e; (c) a integração de modelos meteorológicos e hidrológicos que atuam em escalas diferentes (MENDIONDO; TUCCI, 1997).

Quanto à hierarquização das bacias hidrográficas em relação ao seu tamanho, não existe um consenso do meio científico que defina os limites dimensionais para o enquadramento das mesmas em categorias.

Para Santana (2003), bacias hidrográficas podem ser desmembradas em um número qualquer de sub-bacias, onde cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de ordem hierárquica superior, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia. Portanto, os termos bacia e sub-bacias hidrográficas são relativos.

Para Lima e Zakia (2000) o conceito de bacia grande e pequena é fundamentado nos fatores dominantes na produção do deflúvio, tendo as microbacias respostas mais sensíveis à intensidade da chuva e ao uso e ocupação do solo, enquanto que nas bacias maiores esses dois fatores perdem importância frente às características da rede de drenagem.

Calijuri e Bubel (2006) adotam unidades hidrológicas e ecológicas para conceitualizarem o termo microbacia hidrográfica. Para os autores, são áreas formadas por canais de 1ª e 2ª ordem e, em alguns casos, de 3ª ordem, representados por áreas frágeis e frequentemente ameaçadas por perturbações.

Já Tucci (2003) aponta que os processos hidrológicos podem ser avaliados em cinco níveis espaciais diferentes: micro ($< 10^4 \text{ km}^2$), transição γ ($10^4 - 10^5 \text{ km}^2$), meso ($10^5 - 10^6 \text{ km}^2$), transição α ($10^6 - 10^7 \text{ km}^2$) e macro ($> 10^7 \text{ km}^2$).

Neste estudo abordou-se o conceito de bacia e suas subdivisões com base na combinação dos conceitos de Calijuri e Bubel (2006) e Tucci (2003) onde será considerada microbacia hidrográfica, aquela cuja área de drenagem seja inferior a 10 km^2 , sub-bacia hidrográfica aquela que drene para outra hidrografia de ordem superior, sendo considerada como uma unidade de meso escala aquelas sub-bacias que tenham área de drenagem entre 10 e 1000 km^2 e macro escala aquelas que sua área de drenagem seja superior a 1000 km^2 .

2.3 Conceitos e desafios da modelagem hidrológica

Devido à complexidade dos processos hidrológicos no solo, associada à influência da cobertura vegetal e da distribuição espacial da precipitação e evapotranspiração, a utilização de modelos matemáticos é praticamente imprescindível para uma adequada interpretação dos fenômenos envolvidos (COLLISCHONN; TUCCI, 2003).

Faz-se necessário uma diferenciação dos termos sistema, modelo e simulação para uma melhor compreensão de seus usos e evitar o seu emprego indiscriminado nas abordagens metodológicas. Dooge (1973) definiu sistema como qualquer estrutura, esquema ou procedimento, real ou abstrato, que num dado tempo de referência interrelaciona-se com uma entrada, causa ou estímulo de energia ou informação e uma saída, efeito ou resposta de energia ou informação.

Um modelo é uma representação de um sistema real ou imaginário usando uma linguagem, um meio, e de acordo com um ponto de vista específico, sendo assim, considerado como uma representação do conhecimento é a principal ferramenta para se estudar o comportamento de sistemas complexos. O aspecto mais importante de um modelo é a relação simplicidade *versus* fidelidade (TRIVELATO, 2003).

Tucci (2005) afirma que simulação é o processo de utilização do modelo baseado na estimativa de parâmetros, verificação de seus ajustes e a previsão de novas informações por meio de diferentes entradas.

Para Rennó (2003) os modelos hidrológicos podem ser classificados quanto à representação espacial (concentrados ou distribuídos), quanto à representação dos dados (discretos ou contínuos), quanto às variáveis utilizadas (estocásticas ou determinísticas), o tipo de relação entre essas variáveis (empíricos ou baseados em processos) e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Um modelo é considerado concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial, sendo os dados de entrada e saída representativos da área estudada. Já um modelo é considerado distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo (TUCCI, 2005). Contudo, o mesmo autor aponta que na prática não existe um modelo puramente distribuído visto que são utilizadas discretizações numéricas, que de alguma

forma, tornam o modelo distribuído em concentrado em uma pequena subdivisão limitada pela escala espacial de coleta de suas variáveis de entrada.

Os modelos são considerados discretos quando as mudanças de estados são avaliadas em intervalos de tempo discretos, enquanto que nos contínuos a análise dos fenômenos é contínua em relação ao tempo. A escolha do intervalo de tempo está associada ao fenômeno que se quer representar e a precisão dos resultados esperados (TUCCI, 2005). Em estudos hidrológicos os sistemas são contínuos, porém na maioria das vezes são representados por intervalos discretos.

Rennó (2003) denota que um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas apresenta comportamento aleatório, caso contrário o modelo será determinístico. O mesmo autor ressalta que os modelos determinísticos podem conter variáveis de entrada de caráter aleatório, porém o modelo ainda será determinístico caso esse valor de entrada produza um único valor de saída.

Os modelos empíricos tomam como base o ajuste dos valores calculados por meio dos dados observados, enquanto que os modelos baseados em processos contam na sua concepção com funções que levam em consideração os processos físicos (TUCCI, 2005).

Por fim, os modelos são considerados estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada, produz-se um resultado oriundo da simulação realizada em um único passo. Já os modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma dada iteração como entrada para a próxima iteração (RENNÓ, 2003).

Os modelos matemáticos que simulam processos hidrológicos se constituem em ferramentas indispensáveis de previsão e análise quando se deseja garantir um uso sustentável dos recursos hídricos no médio e no longo prazo, auxiliando na identificação de estratégias que harmonizem a vocação dos ecossistemas com sistemas de ocupação nas áreas de bacias hidrográficas,

viabilizando assim um modelo diferenciado de ocupação dessas áreas no qual o respeito às questões ambientais seja prioridade (CHAGAS et al., 2009).

Segundo Araújo Filho et al. (2005), a modelagem computacional de bacias hidrográficas já vem sendo feita no Brasil há bastante tempo, sendo que gradativamente vêm sendo implantados aperfeiçoamentos para uma melhor representação dos processos físicos. Inicialmente, os modelos consideravam a bacia como homogênea ou no máximo a dividiam em regiões homogêneas, mas com o aumento da capacidade dos computadores, a modelagem de bacias hidrográficas tomou um grande impulso, através da introdução de algumas técnicas que possibilitaram uma melhor representatividade do comportamento dos processos ao longo da bacia.

Dentro desse contexto, nas últimas décadas os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: a) modelos para grandes bacias que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em área de grande magnitude; b) modelos para pequenas bacias que buscam representar com maior precisão, de forma distribuída, os processos hidrológicos (TUCCI, 2007).

Silans et al. (2009) afirmam que, em bacias hidrográficas médias e grandes, a importância da variabilidade espacial da precipitação sobre a geração do escoamento superficial é reconhecida. No entanto, em pequenas bacias, ou em sub-bacias, geralmente se considera uma precipitação uniforme estimada a partir de um único posto pluviométrico. Os seus estudos mostram que em caso de precipitações convectivas, mesmo em pequenas sub-bacias de um modelo hidrológico distribuído, a variabilidade espacial da precipitação deve ser levada em conta a partir de um processo adequado de interpolação.

Contudo, Naghettini e Pinto (2007), afirmam que a inexistência de amostras suficientemente longas para as variáveis hidrológicas estabelece um limite ao grau de sofisticação da análise local dessas variáveis. Em função disso, a variável espaço ganhou força frente à variável tempo, estabelecendo a análise

regional de um conjunto de informações hidrológicas, apropriadas em locais diferentes, como alternativa para compensar as amostras locais de tamanho relativamente curto.

Por sua vez, o ajuste dos parâmetros de um modelo hidrológico é uma etapa do uso do mesmo que envolve o maior esforço para seu usuário devido à necessidade de maior entendimento do comportamento do modelo e dos parâmetros e aos problemas com a qualidade e representatividade dos dados hidrológicos (COLLISCHONN; TUCCI, 2003). Os referidos autores afirmam ainda que nos problemas práticos de calibração de modelos hidrológicos, não existe um conjunto único de parâmetros capaz de representar os processos hidrológicos, devido às incertezas inerentes aos dados, das simplificações do modelo e da representatividade dos parâmetros, pois existem várias combinações de parâmetros que apresentam resultados semelhantes entre si e relativamente próximos aos dados observados.

Para Krauskopf Neto, Guetter e Mine (2007) a redução das diferenças entre os valores simulados e observados não é tarefa trivial, devido à forte não linearidade dos processos do ciclo hidrológico e às inúmeras fontes de erro que podem contaminar o processo.

A quantidade e a simplicidade dos parâmetros estão associadas ao fenômeno que se quer representar. É essencial entender o modelo para usá-lo, mas existe uma diferença entre entender o modelo e possuir habilidade para encontrar uma solução para o mesmo.

A habilidade do usuário é essencial no uso do modelo. O ajuste manual é realizado por tentativa e erro, em repetidas execuções do modelo e análises dos resultados. Para Collischonn e Tucci (2003) a calibração manual pode, portanto, ser relativamente rápida e, ao mesmo tempo, considerar múltiplos objetivos de forma implícita. Os problemas surgem quando o usuário do modelo não é experiente. Nesse caso, a calibração automática pode ser a solução.

No processo de calibração automática, são empregados métodos matemáticos de otimização, sendo o mais frequente a minimização de uma função-objetivo que mede o desvio entre as séries de vazão observada e simulada (TUCCI; ORDONEZ; SIMÕES, 1981). Entende-se por função-objetivo a representação matemática dos desvios. O método consiste de um algoritmo que calcula diversas combinações de parâmetros, comparando os valores calculados até que o valor ótimo da função seja atingido. Magalhães (2005) destaca o fato de que, devido ao ajuste ser meramente matemático, deve-se atentar para o uso de parâmetros com valores fora de sua faixa de variação física.

Moraes et al. (2003) afirmam que muito pouco tem sido feito em termos de parametrização das diversas propriedades físicas envolvidas nos processos hidrológicos, sendo a modelagem frequentemente limitada ao simples exercício matemático, onde os parâmetros possuem pouca ou nenhuma relação com os processos físicos.

Para Tucci (2005) as incertezas que envolvem a simulação hidrológica são causadas, basicamente, por erros nas variáveis de entrada, limitação da estrutura do modelo e, principalmente, por incerteza na estimativa dos parâmetros. Para solucionar tal questão Viola (2011) recomenda a realização de análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, pois a mesma proporciona o conhecimento da influência do parâmetro sobre a resposta do modelo, possibilitando a racionalização de etapas de calibração, bem como a fixação de parâmetros os quais o modelo é pouco sensível.

Atualmente existe uma gama de modelos hidrológicos que são aplicados para simulação e previsão de diversos cenários e sistemas hídricos baseados principalmente em estruturas conceituais ou físicas, discretizados desde níveis de sub-bacias, regiões hidrologicamente homogêneas ou em células associadas a características topográficas, principalmente. Dentre esses modelos destacam-se o

STANFORD IV (CRAWFORD; LINSLEY, 1966), ANSWERS (BEASLEY; HUGGINS, 1981), IPH-II (TUCCI; ORDONEZ; SIMÕES, 1981), SWAT (ARNOLD; ALLEN; BERNHARDT, 1993), TOPMODEL (BEVEN et al., 1994), DHSVM (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994), AÇUMOD (SILANS et al., 2000), MGB-IPH (COLLISCHONN; TUCCI, 2001) e LASH (BESKOW; MELLO; NORTON, 2011).

2.4 O modelo *SWAT* – *Soil and Water Assessment Tool*

O *SWAT* (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo de simulação de base hidrológica desenvolvido pelo *Agricultural Research Service* (ARS) em Temple no Texas, Estados Unidos da América (NEITSCH et al., 2005). O desenvolvimento do *SWAT* é resultado de mais de 30 anos de experiência em modelagem dos pesquisadores do ARS, sendo o modelo *SWAT* uma combinação de componentes estruturais de outros modelos.

O *SWAT* é um modelo de base física que permite a análise de diferentes processos em bacias hidrográficas a partir de parâmetros espacialmente distribuídos em nível de sub-bacias e em caráter temporal contínuo operando em um passo de tempo diário. O modelo foi projetado para predizer o impacto de alterações do uso e manejo do solo em bacias hidrográficas agrícolas não instrumentadas no tocante a quantidade e qualidade da água e produção de sedimentos (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994).

Sua base descende diretamente do modelo SWRRB que permitia a simulação do comportamento do escoamento superficial em nível de sub-bacias. Os modelos QUAL2E e ROTO também contribuíram diretamente na concepção do *SWAT* fornecendo o componente de cinética de fluxo e estrutura de propagação, respectivamente. O SWRRB por sua vez já agregava aprimoramentos e estruturas dos modelos GLEAMS (componente de

propagação de pesticidas), CREAMS (componente para análise de precipitações diárias) e EPIC (componente para simulação do crescimento de culturas) (GASSMAN et al., 2007). Na Figura 2 está representado o processo evolucionário de desenvolvimento do *SWAT*.

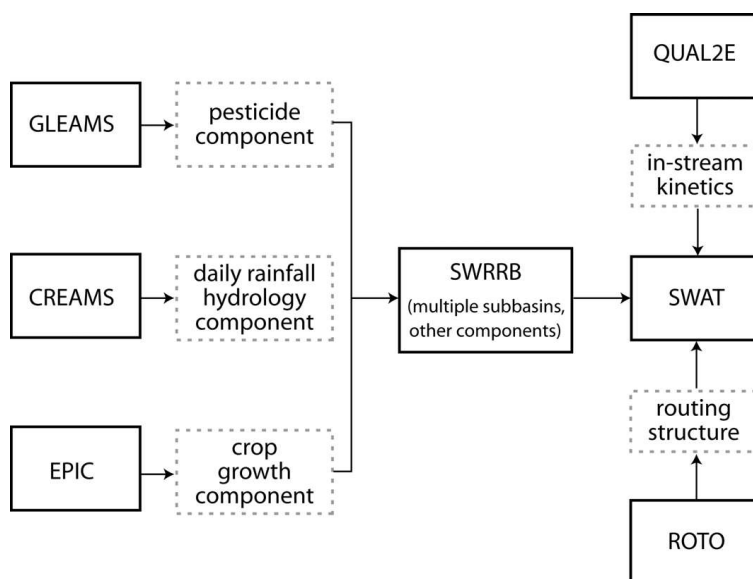


Figura 2 Representação do processo de desenvolvimento do modelo *SWAT*
Fonte: Gassman et al. (2007)

A informação, base para definição das unidades e subunidades para a determinação do balanço hídrico é o Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir do qual serão obtidas as informações de área de contribuição, rede de fluxo e sub-bacias com seus respectivos parâmetros. Como informações geoespaciais, o modelo ainda requer dados de classe e uso do solo (NIETSCH et al., 2005).

O *SWAT* requer informações para o processo de simulação em três níveis de escala espacial: bacia hidrográfica, sub-bacias e Unidades de Resposta Hidrológica (URHs).

O primeiro nível, bacia hidrográfica, é representado por parâmetros que o modelo não distingue variabilidade espacial dentro da bacia hidrográfica, tais como parâmetros associados ao derretimento de neve, fator de ajuste da evaporação e o coeficiente de retardamento do escoamento superficial (NIETSCH et al., 2005).

O segundo nível espacial de entrada e parametrização disponível no *SWAT* é o nível de sub-bacia. As sub-bacias são representadas, basicamente, por áreas espaciais dentro da maior bacia hidrográfica que estão hidrologicamente conectadas. As sub-bacias são definidas, inicialmente, pelo *SWAT* através do processo de delineamento automático, entretanto, após essa etapa, o modelo permite ao analista modificar trechos ou sub-bacias específicas para tender a sua modelagem. Como exemplos de parâmetros e informações de entrada do modelo ao nível de sub-bacia tem-se os dados meteorológicos, coeficiente de armazenamento e a condutividade hidráulica da rede de drenagem (NIETSCH et al., 2005).

Por fim, o terceiro nível refere-se às URHs que representam no modelo uma combinação única de classe e uso do solo sendo consideradas unidades hidrologicamente homogêneas. A distribuição das URHs é definida pelo analista podendo ser efetuada com base em características dominantes ou com base em um nível de sensibilidade.

Ao se trabalhar com a distribuição dominante, os parâmetros desse nível serão transferidos para a respectiva sub-bacia tomando como base somente as informações da URH mais representativa da sub-bacia, enquanto que a distribuição com base em níveis de sensibilidade é obtida a partir da combinação de classe e uso do solo que supere a porcentagem definida pelo analista, onde as informações inferiores são agregadas até atingirem o limiar de sensibilidade definido. Exemplos de parâmetros representativos desse nível de análise

utilizados pelo modelo são parâmetros de fluxo subterrâneo, curva número e o coeficiente de rugosidade de *Manning* (NIETSCH et al., 2005).

Segundo Arnold et al. (1998) o escoamento é calculado para cada URH e propagado para obter o escoamento total da sub-bacia o que pode aumentar a precisão das predições e fornecer uma melhor descrição física do balanço hídrico na bacia hidrográfica.

Nietsch et al. (2005) subdivide o *SWAT* em oito componentes principais responsáveis pelo armazenamento, gerenciamento e aplicação das informações de entrada no processo de simulação, sendo os componentes: clima, hidrologia, solo, erosão, crescimento de vegetal, manejo do solo, nutrientes e pesticidas.

O componente **clima** gerencia os dados de precipitação, velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade do ar armazenados em seu banco de dados além de gerar dados climáticos faltantes na série com base em algoritmos específicos existente no pacote do modelo. O componente **hidrologia** é responsável pelo cálculo do balanço hídrico diário através do seu desmembramento no balanço de água no solo (infiltração, ascensão capilar, fluxo subsuperficial e percolação) escoamento superficial e subterrâneo, evapotranspiração e propagação na rede de drenagem.

O componente **solo** armazena e gerencia informações e parâmetros físicos (textura, profundidade da camada de solo, albedo, entre outros) e hídricos (condutividade hidráulica do solo, capacidade de armazenamento, entre outros) além de simular diariamente uma temperatura média para cada camada de solo. O componente **erosão** é responsável pelo cálculo da erosão e aporte de sedimentos nos corpos hídricos com base na Equação Universal de Perda de Solo Modificada (EUPS-M).

O componente **crescimento vegetal** simula as variações temporais do crescimento das culturas por meio de seus parâmetros (profundidade do sistema radicular, índice de área foliar, produção de biomassa, entre outros).

O componente **manejo do solo** simula a dinâmica das interações entre as práticas agrícolas aplicadas na bacia hidrográfica com o crescimento das culturas e geração de resíduos.

Nos componentes **nutrientes** e **pesticidas** o modelo analisa o comportamento dos compostos minerais e orgânicos nitrogenados e fosfatados bem como a biodegradação, transformação e movimento de pesticidas e como se propagam no solo e na rede de drenagem.

Arnold et al. (1998) ressaltam que o *SWAT* é sensível a mais de 100 variáveis de entrada associadas a esses componentes principais, portanto, é necessário a identificação de quais parâmetros vão ser mais sensíveis no processo de simulação e o seu impacto nos resultados gerados.

O *SWAT* também vem sofrendo alterações ao longo dos anos, dando origem a outros modelos ou tendo rotinas e ferramentas implementadas e/ou sendo melhoradas em sua estrutura. O *SWAT/GRASS* foi o primeiro pacote do modelo permitindo a integração entre um sistema de informação geográfica (SIG) com o modelo para facilitar a elaboração das entradas e saídas associadas ao mapeamento (SRINIVASAN; ARNOLD, 1994). Também associado à SIGs foram desenvolvidas as ferramentas *AVSWAT* (DI LUZIO et al., 2004) para o ArcVIEW 3.x e o *ArcSWAT* (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL - SWAT, 2007) para o ArcGIS 9.x.

Algumas ferramentas aprimoraram processos específicos do modelo, seja para melhor simular uma dada característica ou adequar o modelo a uma realidade específica. Como exemplo dessas ferramentas tem-se o *ESWAT* (VANDENBERGHE; VAN GRIENSVEN; BAUWENS, 2001) que alterou o modelo de onda cinemática para o canal fluvial, *SWAT-G* (ECKHARDT et al., 2002) que aprimorou o mecanismo de condutividade hidráulica e percolação da água no solo para regiões de baixas montanhas na Alemanha, *SWIN* (KRYANOVA; MULLER-WOHLFEIL; BECKER, 2005) que é um modelo

parcialmente baseado no *SWAT* para simular processos eco-hidrológicos espacialmente distribuídos, entre outros.

2.5 Desempenho do modelo *SWAT*

O *SWAT* é um modelo que, desde o seu desenvolvimento, vem sendo aprimorado por seus desenvolvedores e outros colaboradores, apresentando uma vasta literatura técnico-científica que tem respaldado a sua larga aplicação na modelagem de processos hidrológicos.

Gitau e Chaubey (2010) avaliaram métodos de regionalização dos parâmetros do *SWAT* em três bacias hidrográficas no Estado de Arkansas-EUA para estimativa do escoamento. Os autores obtiveram resultados satisfatórios apresentando coeficientes de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (C_{NS}) entre 0,45 e 0,90 indicando que o modelo pode ser aplicado na estimativa do escoamento em bacias hidrográficas não instrumentadas.

Ao estudarem os impactos da substituição da pastagem por pinus no comportamento hidrológico em uma microbacia de 107,7 hectares na bacia do Rio Tacuarembó, Uruguai, Von Stackelberg et al. (2007) detectaram uma redução de, aproximadamente, 23% do deflúvio.

Wu e Johnston (2007) analisaram a resposta da simulação do *SWAT* para calibrar períodos distintos de influência climática, um período seco e outro com resposta climática média utilizando um mesmo período para validação. Os resultados apontaram para um melhor desempenho do modelo na simulação do período seco tanto na calibração quanto na validação em relação ao período de média climática.

Green e Van Griensven (2008) avaliaram a capacidade de autocalibração do *SWAT* com períodos distintos de informações (2002 e 2000-2004) para seis microbacias (4 a 8,4ha) no Texas-EUA. Os autores detectaram melhor

desempenho do modelo na simulação com uma série maior de dados apresentando altos valores das estatísticas aplicadas verificando uma melhor aderência dos dados.

Chaplot (2005) realizou um estudo para determinar o impacto do tamanho de malha do modelo digital de elevação variando seus valores com resoluções de 20 a 500 metros e a escala do mapa solo (1/25000; 1/250000 e 1/500000) para simulação do escoamento, sedimentos e concentrações de nitrogênio na forma de nitrato em uma bacia hidrográfica agrícola de 21,8 km². Os resultados mostraram que um MDE com tamanho de malha superior a 50m é suficiente para simular a dinâmica das variáveis na bacia. O mesmo autor destaca também que com resoluções menores a simulação do escoamento não foi substancialmente afetada, porém as simulações de sedimentos e nitrogênio foram bastante impactadas promovendo um decréscimo em suas estimativas. No tocante a escala do mapa de solos o autor afirmou que quanto maior o detalhe dessa informação melhor foi a resposta do modelo na representação das variáveis estudadas.

Geza e McCray (2008) ao avaliarem o efeito de duas resoluções espaciais distintas do mapa de solos na produção do escoamento na bacia do Rio Turkey em Denver - EUA identificaram que a resolução com maior nível de detalhe apresentou melhor eficiência na simulação do escoamento.

Em estudo realizado para avaliar o impacto do número e tamanho das URHs sobre o escoamento e a evapotranspiração em uma bacia agrícola no Sudeste da Austrália, Githui e Thayalakumaran (2011) detectaram que a quantidade de URHs não influenciou a evapotranspiração simulada, pois a mesma depende diretamente da dinâmica de crescimento e distribuição espacial das culturas na bacia. Já o escoamento apresentou melhor desempenho na simulação com menor quantidade URHs.

No Brasil o modelo *SWAT* vem sendo aplicado principalmente para simulação do impacto de mudanças da cobertura do solo no ciclo hidrológico e sedimentológico.

Machado, Vetorazzi e Cruciani (2003) utilizaram o *SWAT* na simulação do escoamento na microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins testando diferentes discretizações de sub-bacias. Para a referida bacia foram encontrados valores satisfatórios das estatísticas de precisão para todas discretizações estudadas, sendo o melhor valor de 0,92 para o coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (C_{NS}) e -0,7 para o desvio padrão.

Paim e Menezes (2009) aplicaram o *SWAT* na bacia hidrográfica do Rio Tijucas para quantificar a produção de água e sedimentos e encontraram valores C_{NS} de 0,63 indicando um bom ajuste do modelo na representação desses processos na bacia.

Durães, Mello e Naghettini (2011) aplicaram o *SWAT* na bacia do Rio Paraopeba para estimativa do estresse hidrológico causado por modificações na cobertura do solo na bacia obtendo valores de C_{NS} de 0,79 tanto para calibração quanto para a validação do modelo demonstrando a adequabilidade do mesmo na representação dessas modificações na bacia.

Blainski et al. (2011) estudando a disponibilidade hídrica na bacia do Rio Araranguá simularam cenários de uso do solo onde as áreas agrícolas eram substituídas por reflorestamento e vice-versa apontando para uma maior regularização da vazão no cenário com reflorestamento da bacia.

Andrade (2011) simulou o comportamento do escoamento na bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara com discretização temporal diária e mensal obtendo valores de C_{NS} de 0,66 e 0,87 para os dados diários e 0,94 e 0,85 para os dados mensais na calibração e validação, respectivamente.

Lelis et al. (2012) aplicaram o *SWAT* na bacia do Ribeirão São Bartolomeu para simulação da vazão e produção de sedimentos obtendo valores de C_{NS} na ordem 0,997 e 0,808, respectivamente, para as variáveis analisadas.

Pinto et al. (2012) avaliaram o desempenho do modelo *SWAT* no Ribeirão Lavrinha na simulação do escoamento e transporte de sedimentos e encontraram valores de C_{NS} entre 0,683 e 0,793.

Na Tabela 1 estão representadas em síntese algumas informações sobre a aplicação do modelo *SWAT*.

Tabela 1 Síntese de aplicação do modelo *SWAT* em algumas bacias

Estudo	Autor	C_{NS}	Bacia
Discretização de sub-bacias	Machado, Vetorazzi e Cruciani (2003)	0,90	Ribeirão Marins
Escoamento	Wu e Johnston (2007)	0,40 – 0,90	Bacia Great Lakes
Escoamento e sedimento	Paim e Menezes (2009)	0,63	Ribeirão Tijucas
Escoamento	Gitau e Chaubey (2010)	0,45 – 0,90	Três bacias no Arkansas-EUA
Cenários de uso do solo	Durães, Mello e Naghettini (2011)	0,79	Rio Paraopeba
Disponibilidade hídrica e uso do solo	Blainski (2011)	0,78 – 0,94	Rio Aranrangá
Escoamento (diário e mensal)	Andrade (2011)	0,66 – 0,94	Ribeirão Jaguará
Escoamento e sedimento	Lelis et al. (2012)	0,997 – 0,808	Ribeirão São Bartolomeu
Escoamento e sedimento	Pinto et al. (2012)	0,683 – 0,793	Ribeirão Lavrinha

3 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir são apresentados todos os procedimentos e requisitos necessários para execução deste trabalho, bem como os recursos utilizados.

3.1 Aplicativos utilizados

Os seguintes aplicativos foram utilizados para tabulação, edição e processamento das informações trabalhadas ao longo do estudo.

- a) ArcGIS® em sua versão 9.3;
- b) ArcSWAT 2005 em sua versão 2.3.4;
- c) Envi® e ENVI EX® em suas versões 4.8;
- d) Extensões 3D Analyst® e Spatial Analyst® para o ArcGIS 9.3;
- e) SigmaPlot® em sua versão 10.0;
- f) Pacote de aplicativos Microsoft Office® em sua versão 2007.

3.2 Material cartográfico e dados de campo

Foram utilizadas cartas topográficas vetoriais do mapeamento sistemático disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala de 1:50.000. Tais cartas foram interpoladas para gerar o Modelo Digital de Elevação (MDE) empregando-se um fator de escala de 0,3 permitindo gerar uma grade regular com resolução espacial de 15x15 metros.

Posteriormente, o MDE foi consistido tomando como base a hidrografia vetorizada a fim de eliminar possíveis distorções causadas pelo processo de interpolação e, por fim, efetuado os recortes das áreas de estudo com base em mapas vetoriais.

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo foram utilizadas duas imagens orbitais do satélite *RAPIDEYE* de 2010 com resolução espacial de 5 metros que foram empregadas para confeccionar um mosaico aplicado nos processos de segmentação e classificação.

O processo de segmentação ocorreu tomando como base as três bandas da imagem *RAPIDEYE* que consiste em uma combinação do processo de segmentação e classificação orientada ao objeto.

A segmentação consiste na técnica de agrupar pontos que tenham características semelhantes até que o objeto de interesse seja reconstruído (MEDEIROS; SILVA; NOGUEIRA, 2002). Nessa etapa leva-se em consideração o fator de escala e fusão para agrupar os objetos segundo suas características espectrais, espaciais e de textura da imagem (FERREIRA; DANTAS; TOLEDO, 2011).

Na sequência ocorre a classificação supervisionada dos segmentos gerados, onde são colhidas amostras conhecidas para cada classe de interesse a fim de representar a heterogeneidade da mesma. As classes utilizadas na classificação do uso do solo foram: pastagem, vegetação nativa, áreas agrícolas (milho), solo exposto, eucalipto e áreas urbanizadas.

Como base para o mapa de classes de solo da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara foi utilizado o trabalho desenvolvido por Araújo (2006). No referido trabalho o autor realizou um mapeamento em nível de reconhecimento de alta intensidade para a região do Alto Rio Grande, levantando informações de 65 perfis de solos em locais representativos e os correlacionou com o material de origem, clima, relevo e vegetação para delimitar as classes de solo.

Para a microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela foi utilizado o mapa de classes de solo confeccionado com base no levantamento realizado por Motta et al. (2001).

As características físico-hídricas das classes de solo foram determinadas com base em dados coletados em campo pelo grupo de pesquisa de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras correspondendo a levantamentos com 166 amostras para a microbacia do Ribeirão Marcela e 60 amostras coletadas na área da bacia do Ribeirão Jaguará.

Para utilização do modelo é necessário o preenchimento de tabelas que requerem informações associadas a práticas conservacionistas e de erodibilidade das classes de solo. Foram utilizadas as equações e tabelas recomendadas por Neitsch et al. (2005) para obtenção dessas informações.

Os grupos hidrológicos do solo foram definidos segundo a classificação de Sartori, Genovez e Lombardi Neto (2005) que adaptaram a classificação norte-americana para as condições brasileiras.

Foram trabalhados dois níveis de discretização do perfil do solo para avaliar a influência do mesmo na resposta ao processo de simulação do escoamento. As classes de solo foram discretizadas em uma e três camadas, onde nas simulações com apenas uma camada foram utilizados os dados médios levantados da camada superficial de cada classe de solo e nas simulações com discretização de três camadas foram utilizados os dados médios de três horizontes característicos para cada classe de solo.

A exceção dessa discretização foi a classe dos Neossolos já que os perfis levantados apresentaram uma camada que foi a utilizada em ambas as discretizações.

Os parâmetros físico-hídricos requeridos pelo *SWAT* para cada classe de solo em cada camada estão apresentados no ANEXO A.

Para o monitoramento da vazão foram utilizados linígrafos automáticos com sensor de pressão para registro da lâmina d'água na seção de controle de cada bacia registrando tais informações a cada 30 minutos. O dado de vazão diária foi obtido com a média dos valores registrados para um dado dia.

Os dados climáticos foram obtidos de uma estação meteorológica completa localizada em área representativa para ambas as bacias estudadas com registro das informações no intervalo de 30 minutos compondo uma série de quatro anos hidrológicos (2006-2010). Os dados climáticos requeridos pelo *SWAT* são precipitação total diária, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura máxima e mínima do ar.

3.3 Caracterização da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara

A primeira área do estudo corresponde à bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ) que está localizada na região do Alto Rio Grande, desaguando diretamente no reservatório da Usina Hidroelétrica de Camargos sob a responsabilidade de operação da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG.

A BHRJ tem partes de sua área distribuída nos territórios dos municípios mineiros de Conceição da Barra de Minas (10% da área da bacia), Nazareno (38% da área da bacia) e São João Del-Rei (52% da área da bacia). A BHRJ apresenta uma área de 32 km² estando inserida na mesorregião denominada Campos das Vertentes e na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos GD1.

A bacia vem sendo utilizada para estudos de caráter técnico-científico desenvolvidos pelo grupo de pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras. A sua área está localizada entre as coordenadas planas 550177 e 560711 Oeste e 7645757 e 7652443 Sul sob a projeção UTM e referencial geodésico SAD69 zona 23.

Na Figura 3 está espacializada a BHRJ e sua posição em relação à UPGRH GD1 e o Estado de Minas Gerais.

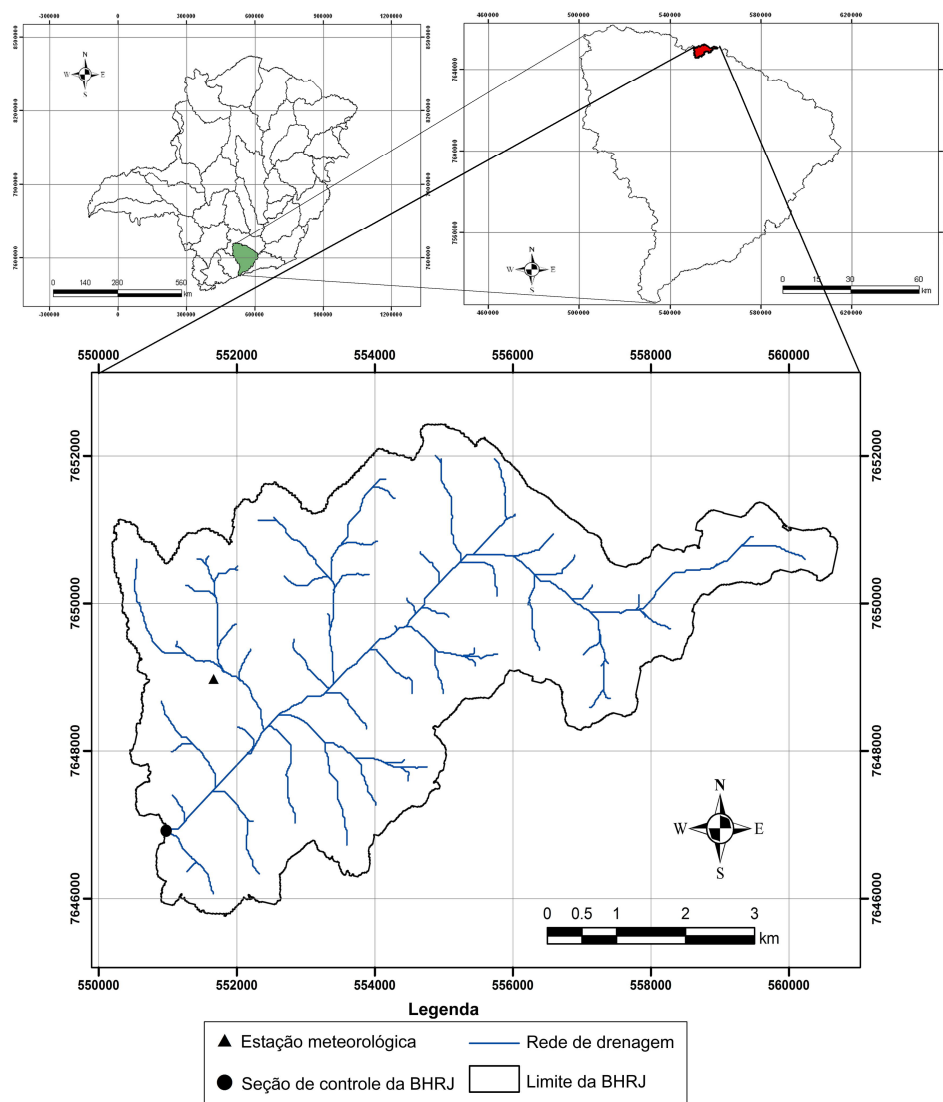


Figura 3 Espacialização da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará, com identificação da estação meteorológica, rede de drenagem e seção de controle

A BHRJ tem como característica marcante o desenvolvimento de atividades agrícolas, tendo como atividade predominante a pecuária extensiva sendo representada pela presença de pastagens (59,9%). Tais pastagens

apresentam cenários diversificados na bacia, ora apresentando-se em condições de manejo inadequadas e em certas áreas bem conservada. Para o estudo particularmente foi considerado um manejo adequado da pastagem para os fins da modelagem, visto que não foi possível identificar e espacializar os manejos aplicados à pastagem na área da BHRJ.

No tocante a cultivos destacam-se a presença da cultura do milho (11,8%) e do eucalipto (4,7%). A presença de 2,5% de solo exposto na área é um indicativo da negligência em relação a práticas conservacionistas associadas ao uso e manejo dos solos. Áreas associadas à vegetação nativa correspondem a 21,1% da área da bacia, estando bastante fragmentadas demonstrando uma fragilidade ambiental da região. Essas áreas são características por apresentarem vegetação de Mata Atlântica em estágio secundário de desenvolvimento e com grau moderado de antropização. Na Figura 4 está a distribuição espacial do uso do solo na BHRJ.

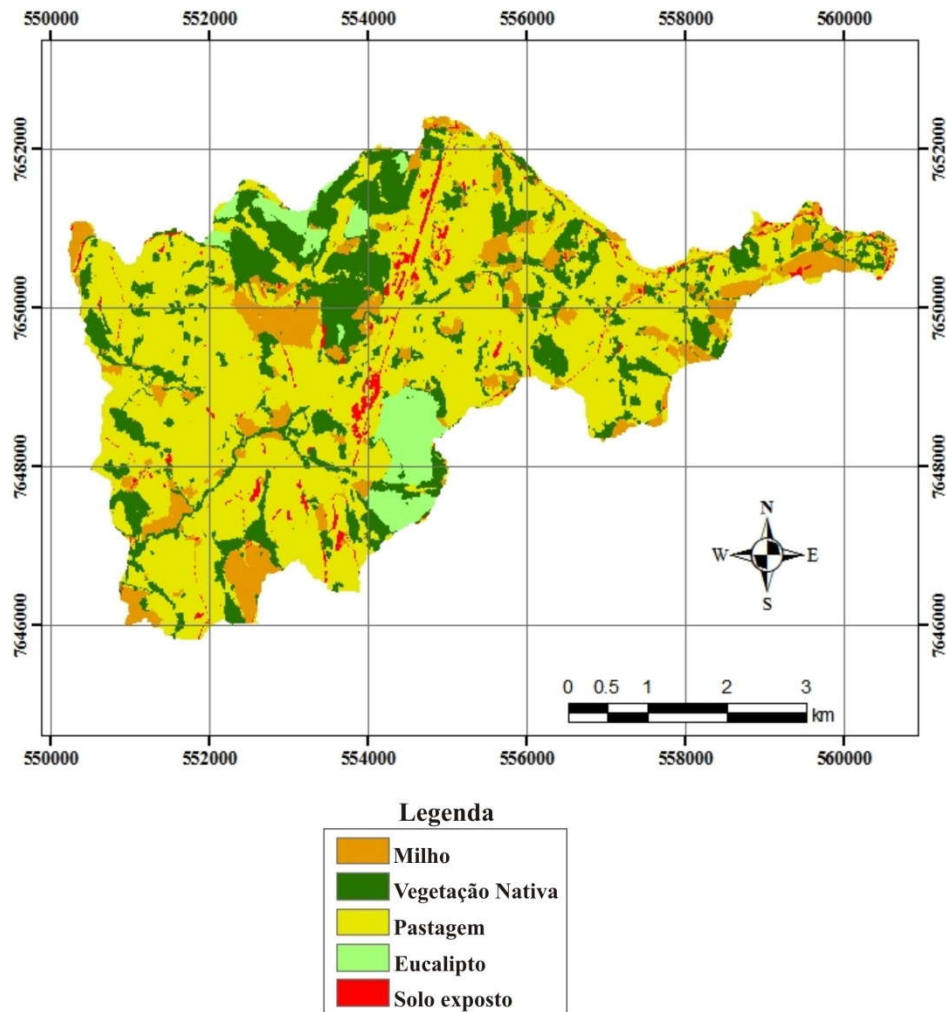


Figura 4 Distribuição espacial do uso do solo na BHRJ

Em relação às classes de solos a predominante é a dos Latossolos ocupando uma área de 61,8% da bacia. Na sequência tem-se o Cambissolo Háplico (29,8%) e o Neossolo Flúvico (8,4%) (ARAÚJO, 2006). Na Figura 5 está representada a distribuição espacial das classes de solos da BHRJ.

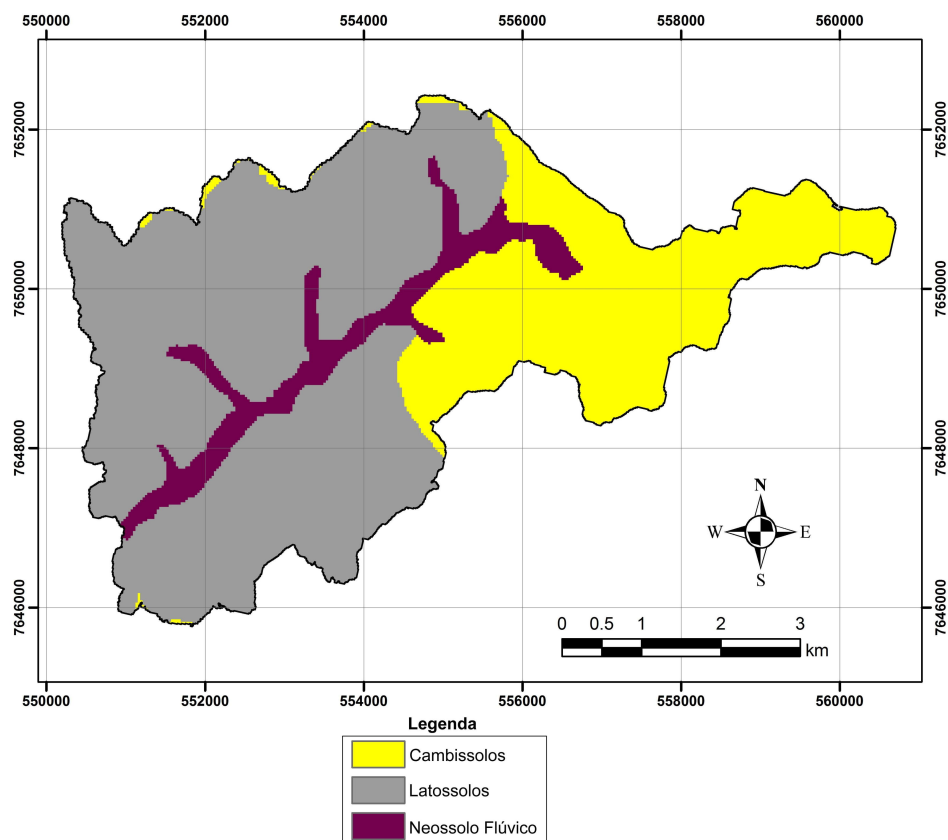


Figura 5 Distribuição espacial das classes de solos da BHRJ

A BHRJ apresenta um forte domínio da classe dos Latossolos com destaque para o Latossolo Vermelho Distrófico Típico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico. A concentração de argila e alta porosidade são as características marcantes destas classes de solo.

Já os Cambissolos presentes na bacia são os Háplicos Tb Distrófico tendo como característica a sua posição em áreas mais movimentadas do relevo com maior concentração de silte e serem solos rasos. Os Neossolos são os Flúvicos que se encontram ao longo da rede de drenagem.

Na Figura 6 está representada a distribuição espacial da hipsometria da BHRJ que apresenta como menor altitude a cota de 950 metros presente nas proximidades da seção de controle da bacia e como cota máxima 1070 metros em sua cabeceira.

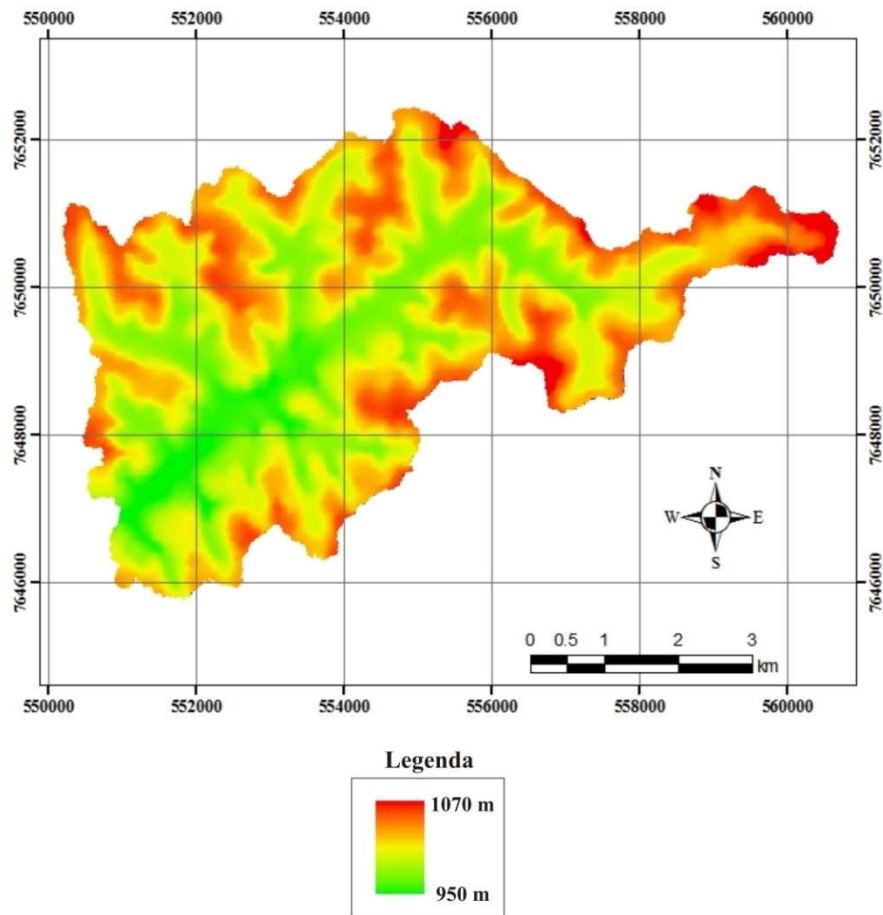


Figura 6 Mapa hipsométrico da BHRJ

Na Figura 7 está a distribuição espacial da declividade da BHRJ em classes segundo a EMBRAPA (1979). O relevo na bacia pode ser considerado ondulado, visto a predominância das classes de 8-20% e uma declividade média de 11,7%.

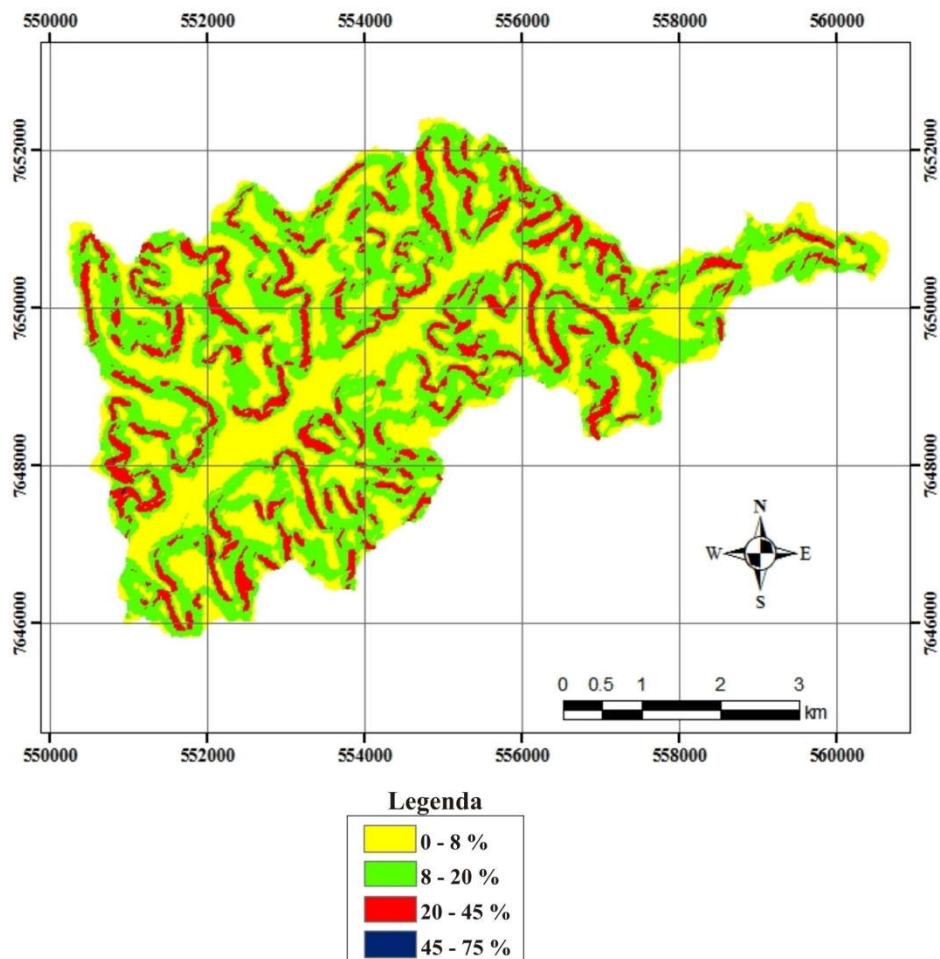


Figura 7 Distribuição espacial das classes de declividade na BHRJ

O clima, de acordo com classificação de Koppen, e Cwa, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. A temperatura média anual é de 19 °C, variando de 14 °C a 22 °C. A precipitação média anual é de 1500 mm, com os valores variando de 900 a 2100 mm e ocorrência de 80% da precipitação entre o período de outubro a abril (MELLO et al., 2008).

3.4 Caracterização da microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela

O Ribeirão Marcela é um afluente que deságua pelo lado direito do Ribeirão Jaguara nas proximidades de sua jusante. Sua área de drenagem ocupa uma extensão de 4,7 km² estando distribuída em partes dos municípios de Conceição da Barra de Minas (19,1% da área da bacia) e Nazareno (80,9% da área da bacia).

A microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela (MBHRM) está situada entre as coordenadas planas 550191 e 552725 Oeste e 7648412 e 7651142 Sul sob a projeção UTM e referencial geodésico SAD69 zona 23. Na Figura 8 tem-se a sua localização e inserção em relação à BHRJ.

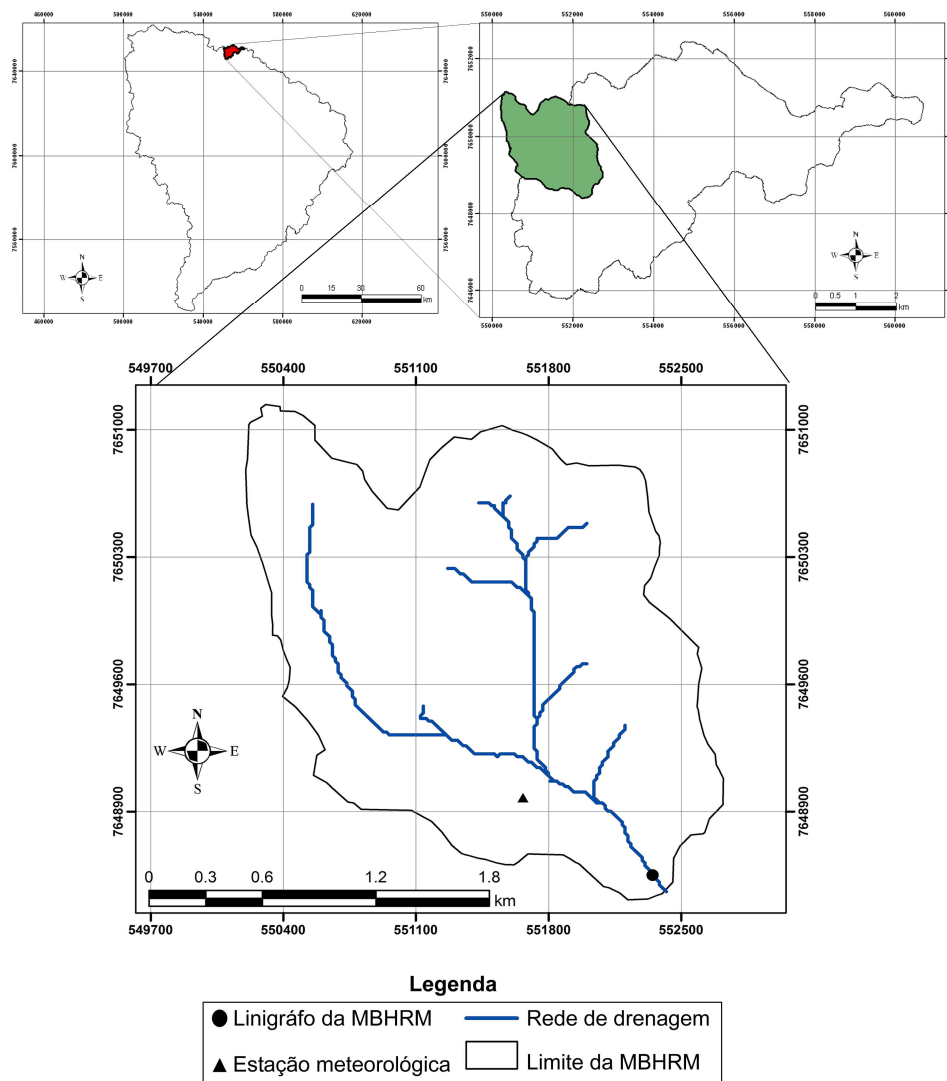


Figura 8 Espacialização da microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela

Em termos de uso e ocupação do solo na MBHRM há um domínio do uso dedicado a pastagens (78,2%) seguido por vegetação nativa (14,7%), milho (5,9%), eucalipto (0,2%) e solo exposto (1,0%). Na Figura 9 está a distribuição espacial do uso do solo na MBHRM.

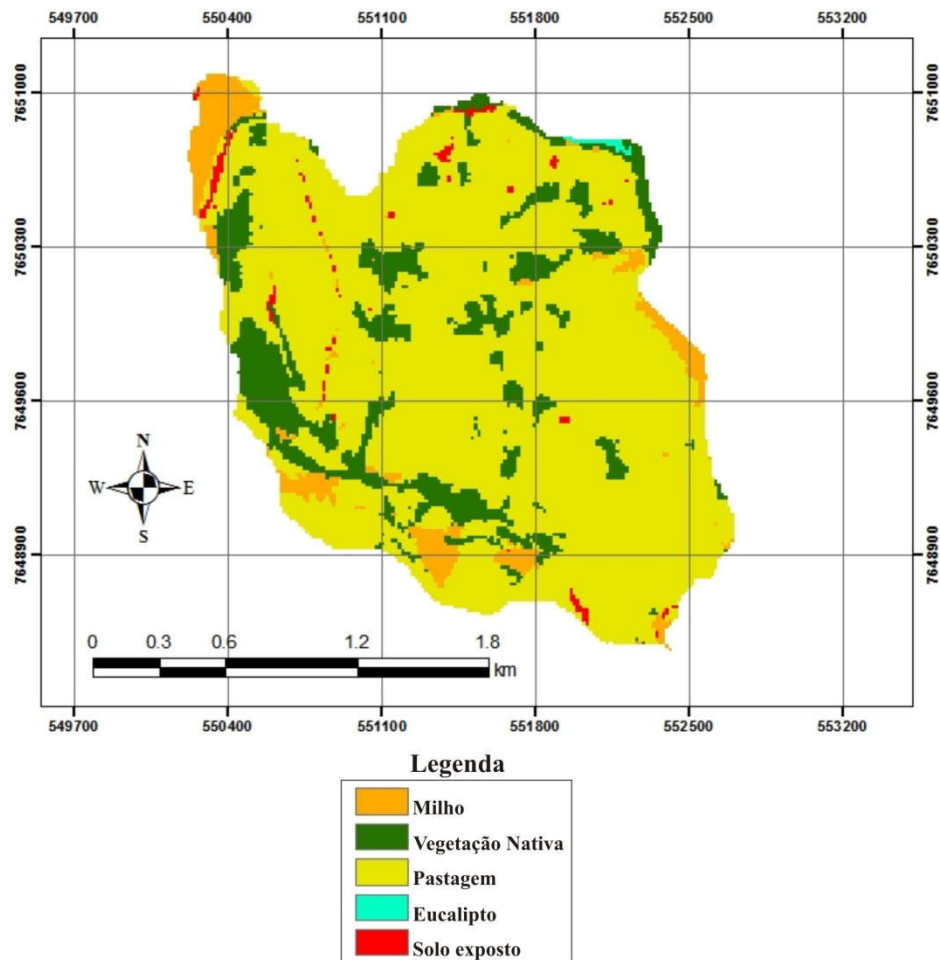


Figura 9 Distribuição espacial dos usos do solo na MBHRM

Em relação aos solos, observa-se o predomínio da classe dos Latossolos ocupando 71% da área, seguido do Neossolo Flúvico com 23% e por fim apresenta de Cambissolos em 6% da área.

Na Figura 10 tem-se a distribuição espacial das classes de solos para a MBHRM.

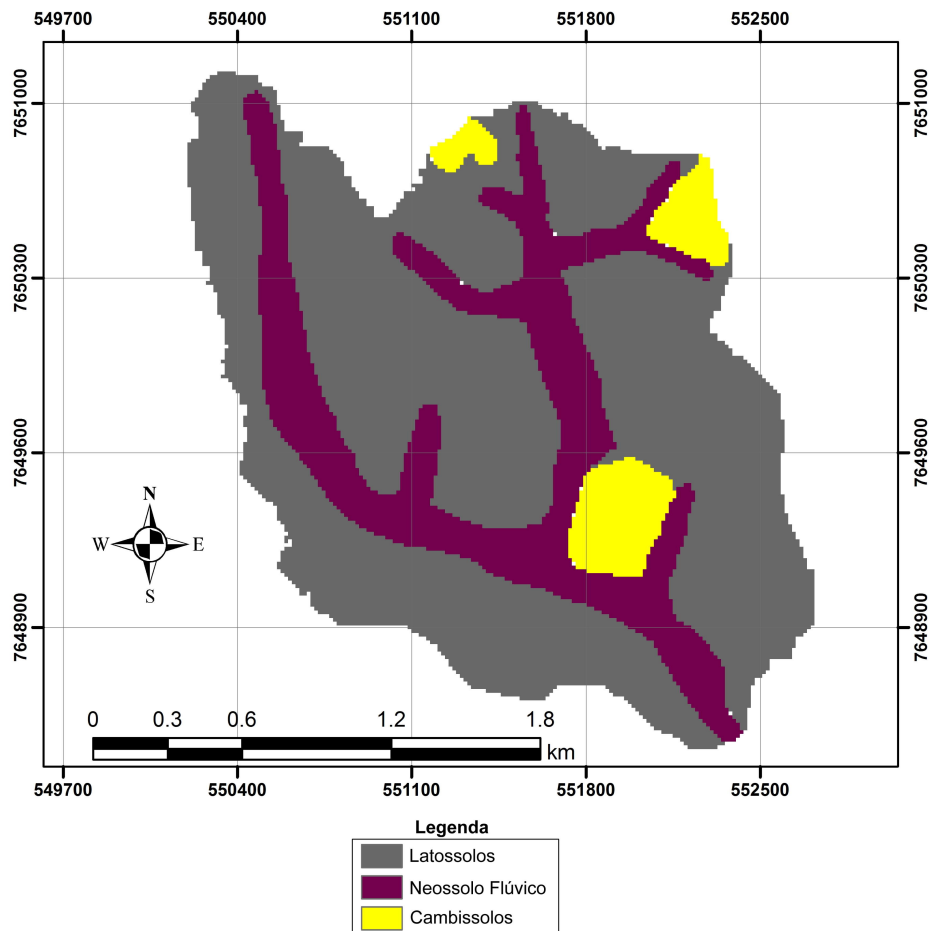


Figura 10 Distribuição espacial das classes de solos da MBHRM

A MBHRM apresenta cotas variando de 956 metros (na seção de controle) a 1051 metros (na cabeceira de sua principal nascente) de altitude. Na Figura 11 encontra-se o mapa hipsométrico da MBHRM.

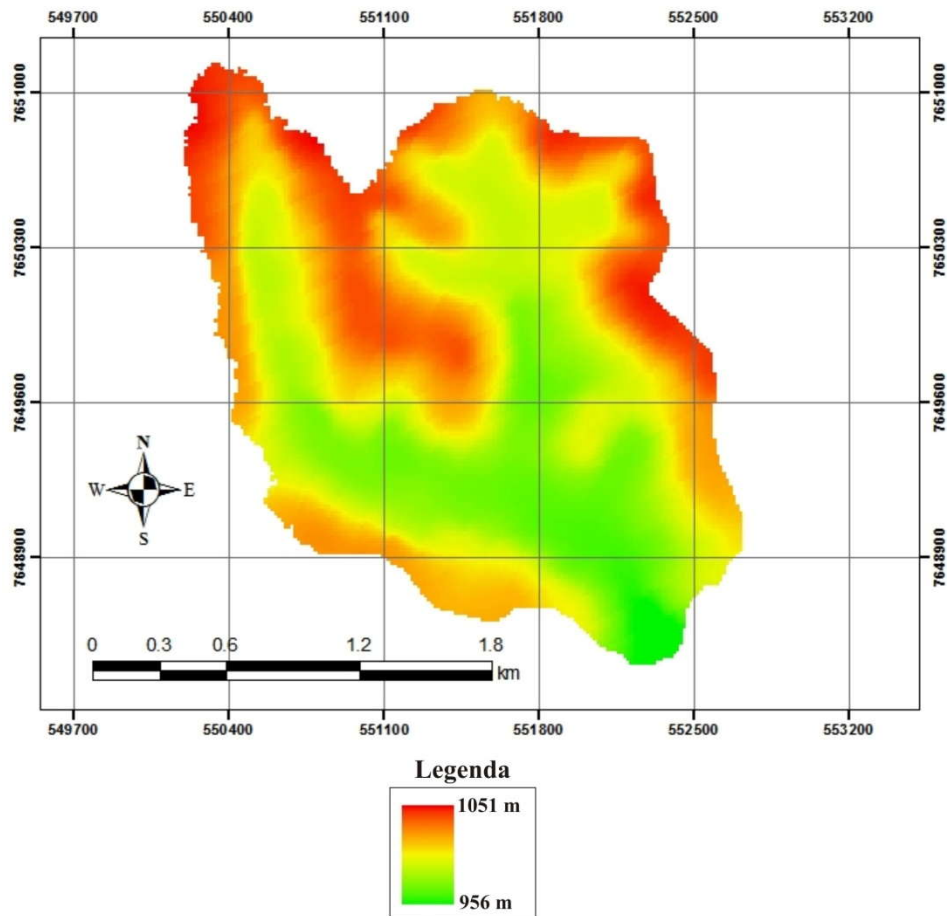


Figura 11 Mapa hipsométrico da MBHRM

O relevo da MBHRM é considerado ondulado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 1979) com declividade média de 12,8%. Apresenta uma declividade mínima de 0% e máxima de 49% na encosta. A Figura 12 representa a distribuição espacial da declividade na MBHRM.

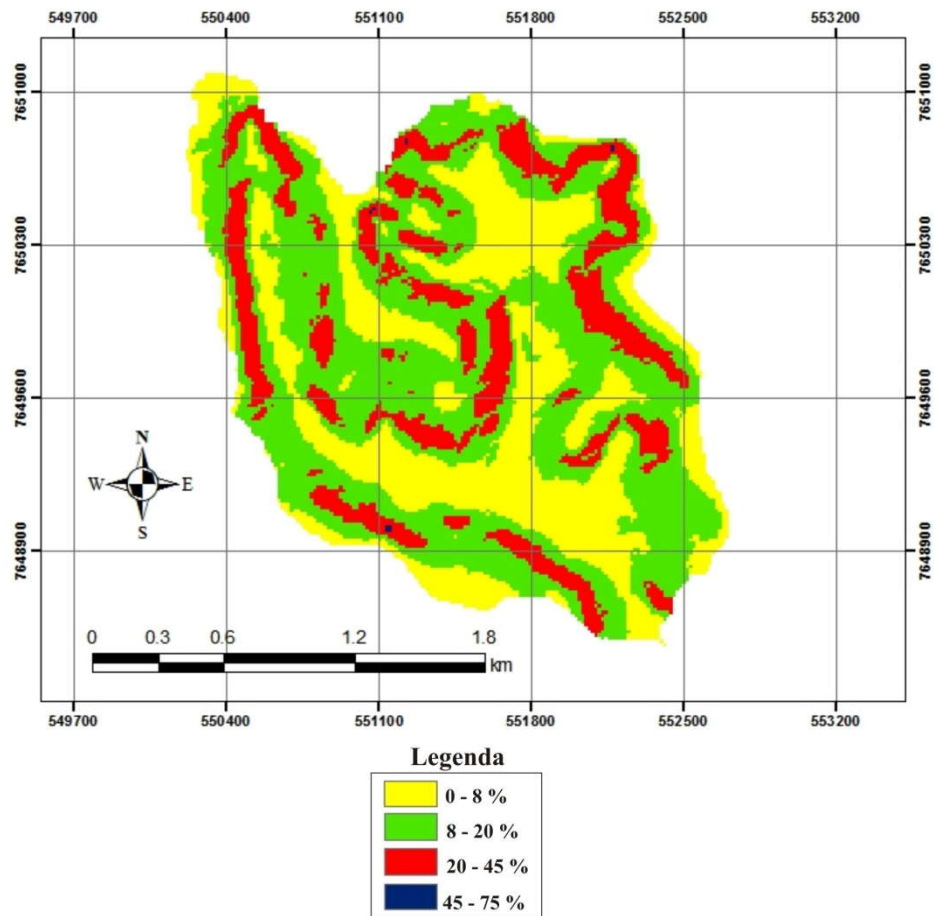


Figura 12 Distribuição espacial da declividade na MBHRM

A estação meteorológica utilizada no estudo para ambas às áreas está localizada na MBHRM em área representativa do uso do solo (pastagem), classe de solo (Latosolo) e declividade (classe de 8 - 20%) com altitude de 992 metros.

A estação está sob as coordenadas planas 551665 Oeste e 7648977 Sul na projeção UTM e referencial geodésico SAD69 zona 23.

3.5 Descrição do modelo hidrológico *SWAT*

De acordo com Neitsch et al. (2005) o modelo apresenta sete subdivisões em sua estrutura: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas. Neste trabalho serão detalhados tão somente os componentes hidrologia e clima de acordo com Neitsch et al. (2005), visto que são as estruturas responsáveis pela simulação do balanço hídrico na bacia. Maiores detalhes sobre o modelo, estrutura e funcionamento podem ser obtidas em literaturas específicas sobre o *SWAT* como Arnold et al. (1998), Neitsch et al. (2004), Neitsch et al. (2005) e Winchell et al. (2009).

3.5.1 Fase terrestre do ciclo hidrológico

O *SWAT*, em sua concepção, particiona o ciclo hidrológico em seis processos principais: interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento lateral, evapotranspiração e percolação. Parte da água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, podendo assim retornar a atmosfera pelo processo de evaporação, e parte atinge a superfície do solo. Da parcela que atinge a superfície do solo, uma parcela infiltra e outra pode escoar superficialmente. A parcela infiltrada será redistribuída ao longo do perfil do solo podendo retornar a atmosfera através do processo de evapotranspiração ou promover a recarga do lençol freático e aquífero profundo.

Dentro dessa perspectiva, o *SWAT* opera considerando quatro volumes de controle para estimativa do balanço hídrico: superficial, subsuperficial, aquífero raso e aquífero profundo. Na Equação 1 tem-se a representação do balanço hídrico admitido pelo *SWAT*.

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

Em que:

SW_t = conteúdo final de água no solo (mm);

SW = conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo no ponto de murcha permanente (mm);

t = tempo (dias);

R_i = precipitação (mm);

Q_i = escoamento superficial (mm);

ET_i = evapotranspiração (mm);

P_i = percolação (mm);

QR_i = fluxo de retorno (ascensão capilar) (mm).

O escoamento superficial direto pode ser estimado pelo modelo por dois métodos: Curva-Número (SOIL CONSERVATION SERVICE - SCS, 1972) e Green e Ampt modificado por Mein e Larson (1973). O método empregado neste trabalho foi o da Curva-Número (CN) devido a uma maior facilidade de obtenção das variáveis requeridas pelo método (Equações 2 e 3).

$$Q = \frac{(R - 0,2 \times S)^2}{R + 0,8 \times S} \quad R > 0,2 \times S \quad (2)$$

$$Q = 0 \quad R \leq 0,2 \times S \quad (3)$$

Onde: Q representa o escoamento superficial diário (mm), R a precipitação pluvial diária (mm) e S o armazenamento potencial do solo (mm).

O parâmetro S irá variar em função da classe, uso e manejo do solo na bacia; e em relação às características físicas da bacia (Equação 4).

$$S = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

O valor do CN é definido de acordo com as características de infiltração do solo. Dessa maneira, os solos são classificados em grupos hidrológicos que buscam representar suas potencialidades para gerar escoamento superficial.

O CN varia de 1 (cobertura extremamente permeável) a 100 (cobertura extremamente impermeável) em uma escala não linear. Os valores do CN são representados em três condições de umidade do solo, a saber:

CN1: Curva-Número para solos com baixa umidade;

CN2: Curva-Número para solos com umidade próxima à capacidade de campo;

CN3: Curva-Número para solos com umidade acima da capacidade de campo.

O CN para as condições de solos mais secos ou úmidos é calculado em função da condição de umidade CN2 (Equações 5 e 6).

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

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

Após o cálculo do escoamento superficial, o volume do escoamento é liberado para a rede de drenagem sendo calculado pela Equação 7.

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \times \left(1 - \exp \left[\frac{-surlag}{t_{conc}} \right] \right) \quad (7)$$

Em que:

Q_{surf} é o volume de escoamento superficial descarregado no canal principal em um dado dia (mm);

Q'_{surf} é o volume de escoamento superficial gerado em uma sub-bacia em um dado dia (mm);

$Q_{stor,i-1}$ é o volume do escoamento superficial armazenado no dia anterior (mm);

$surlag$ é o coeficiente de retardamento do escoamento superficial (h);

t_{conc} é o tempo de concentração para a sub-bacia (h).

A vazão de pico é calculada pelo *SWAT* por meio do método Racional. Esse método toma como base a suposição de se uma chuva com intensidade de precipitação i começa no tempo $t=0$ e continua indefinidamente, a taxa de escoamento irá aumentar até o tempo de concentração t_{conc} , quando toda bacia estará contribuindo com o fluxo na seção de controle (Equação 8).

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times A}{3,6} \quad (8)$$

Onde:

q_{peak} é a vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$);

C é o coeficiente de escoamento superficial (Adimensional);

i é a intensidade de precipitação ($mm \cdot h^{-1}$);

A é a área da sub-bacia (km^2).

A percolação é calculada no *SWAT* em função do armazenamento combinado com um modelo de fluxo em fendas no solo para simular o escoamento através das camadas de solo. Ao percolar abaixo da zona radicular a água é armazenada como água subterrânea ou retorna como escoamento a jusante do ponto considerado. A quantidade de água percolada para próxima camada é determinada pela Equação 9.

$$SW_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \times \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (9)$$

Sendo:

$SW_{perc,ly}$ a quantidade de água que percola para a próxima camada (mm);

$SW_{ly,excess}$ o volume drenável de água da camada de solo (mm);

Δt a duração do passo de tempo (h);

TT_{perc} o tempo de propagação através da camada i (h).

O volume de água disponível para percolação $SW_{ly,excess}$ na camada de solo é calculado pelas Equações 10 e 11.

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad SW_{ly} > FC_{ly} \quad (10)$$

$$SW_{ly,excess} = 0 \quad SW_{ly} \leq FC_{ly} \quad (11)$$

Onde SW_{ly} representa o conteúdo de água armazenado no solo (mm) e FC_{ly} representa o conteúdo de água na capacidade de campo para a camada de solo i (mm).

O tempo de propagação em cada camada de solo (TT_{perc}) é calculado com base na Equação 12.

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (12)$$

Onde:

SAT_{ly} é o volume de água na camada de solo quando completamente saturado (mm);

K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}).

O modelo *SWAT* incorpora um modelo de onda cinemática para o cálculo do escoamento subsuperficial desenvolvido por Sloan e Moore (1984). Esse modelo de onda cinemática é baseado na equação do balanço de massa (balanço de massa líquida) onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle, calculando dessa forma, o escoamento lateral em cada camada de solo (Equação 13).

$$Q_{lat} = 0,024 \times \left(\frac{2 \times SW_{ly,excess} \times K_{sat} \times slp}{\phi_d \times L_{hill}} \right) \quad (13)$$

Sendo:

Q_{lat} a quantidade de água que esco subsuperficialmente (mm);

slp a declividade média da sub-bacia (m.m^{-1});

Φ_d a porosidade drenável da camada de solo (mm.mm^{-1});

L_{hill} o comprimento do declive (m).

O escoamento subterrâneo no modelo é simulado considerando dois tipos de aquíferos: raso e profundo. O aquífero raso contribui para o escoamento no canal ou em trechos das sub-bacias, sendo a contribuição da água subterrânea para a vazão total simulada na seção de controle através da criação de um armazenamento no aquífero raso. Já aquífero profundo não contribui para o escoamento na bacia.

A água armazenada no escoamento subterrâneo até a recarga é dada pela Equação 14.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \times K_{sat}}{(L_{gw})^2} \times h_{wtbl} \quad (14)$$

Sendo:

Q_{gw} o escoamento subterrâneo do canal principal no dia i (mm);

K_{sat} a condutividade hidráulica saturada do aquífero (mm.dia^{-1});

L_{gw} a distância do divisor da bacia do sistema subterrâneo para o canal principal (m);

h_{wtbl} a altura do lençol freático (m).

O escoamento subterrâneo somente entra no trecho do canal se a quantidade de água armazenada no aquífero exceder um valor limite especificado pelo usuário ($aq_{shthr,q}$). Ocorrendo a recarga do aquífero raso o escoamento subterrâneo poderá ser calculado pelas Equações 15 e 16.

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \times \exp[-\alpha \times \Delta t] + w_{recrg,sh} \times (1 - \exp[-\alpha \times \Delta t]) \quad aq_{sh} > aq_{shthr,q} \quad (15)$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (16)$$

Onde:

$Q_{gw,i}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia i (mm);

$Q_{gw,i-1}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no dia anterior (mm);

α_{gw} é a constante de recessão de escoamento subterrâneo;

Δt é o passo de tempo (valor igual a 1);

$w_{rchr,sh}$ é a quantidade de água de recarga entrando no aquífero raso no dia i (mm);

aq_{sh} é a quantidade de água inicial armazenada no aquífero raso no dia i (mm);

$aq_{shthr,q}$ é o nível limite de água no aquífero raso para que ocorra a contribuição da água subterrânea para o canal principal (mm).

Quando não houver recarga no aquífero raso o escoamento subterrâneo poderá ser calculado pelas Equações 17 e 18.

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \times \exp\left[-\alpha_{gw} \times t\right] \quad aq_{sh} > aq_{shthr,q} \quad (17)$$

$$Q_{gw,i} = 0 \quad aq_{sh} \leq aq_{shthr,q} \quad (18)$$

Em que:

Q_{gw} é o escoamento subterrâneo no canal principal no tempo t (mm);

$Q_{gw,0}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no início da recessão ($t=0$) (mm);

α_{gw} é a constante de recessão de escoamento subterrâneo;

t é o tempo passado desde o início da recessão.

A constante de recessão do escoamento subterrâneo é calculada pelo modelo com base na Equação 19.

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \times \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] = \frac{1}{BFD} \times \ln(10) = \frac{2,3}{BFD} \quad (19)$$

Onde:

$Q_{gw,N}$ é o escoamento subterrâneo no canal principal no tempo N (mm);
 BFD é o número de dias com o escoamento em recessão na bacia hidrográfica.

O *SWAT* modela o movimento de água para as camadas adjacentes não saturadas como uma função da demanda de água para a evapotranspiração. Esse processo é significativo em bacias onde a zona saturada não está muito abaixo da superfície ou em locais onde se desenvolvem plantas com raízes profundas. Para evitar alguma confusão com a evaporação do solo e a transpiração, esse processo dentro do *SWAT* é denominado de *revap*. 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.

O *revap* somente acontece se a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder um valor limite especificado pelo usuário ($aq_{shtrh,rvp}$). A Equação 20 expressa a formulação da quantidade máxima de água que poderá ser removida do aquífero raso via *revap* em um dado dia.

$$W_{revap,mx} = \beta_{rev} \times E_0 \quad (20)$$

Em que:

$W_{revap,mx}$ é a quantidade máxima de água movendo-se para a zona do solo em resposta ao déficit hídrico (mm);

β_{rev} é o coeficiente de *revap*;

E_o é a evapotranspiração potencial no dia (mm).

A quantidade atual de *revap* que poderá ocorrer em um dado dia está em função das Equações 21, 22 e 23.

$$W_{revap} = 0 \quad aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad (21)$$

$$W_{revap} = W_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + W_{revap,mx}) \quad (22)$$

$$W_{revap} = W_{revap,mx} \quad aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + W_{revap,mx}) \quad (23)$$

Onde:

W_{revap} é a quantidade de água movendo-se para a zona do solo em resposta ao déficit hídrico (mm);

aq_{sh} = quantidade de água armazenada no aquífero raso no início do dia i (mm).

No *SWAT*, uma parcela do total diário da recarga pode ser destinada para o aquífero profundo. A quantidade máxima de água que será percolada do aquífero raso para o aquífero profundo é expressa pela Equação 24.

$$W_{deep,mx} = \beta_{deep} \times W_{rchr} \quad (24)$$

Em que:

$W_{deep,mx}$ é a quantidade máxima de água movendo-se para o aquífero profundo em um dia i (mm);

β_{deep} é o coeficiente de percolação do aquífero profundo;

W_{rchrg} é a quantidade de recarga entrando no aquífero no dia i (mm).

A quantidade atual de água que percola para o aquífero profundo em um dado dia i pode ser calculada pelas Equações 25, 26 e 27.

$$W_{\text{deep}} = 0 \quad aq_{sh} \leq aq_{\text{shthr},rvp} \quad (25)$$

$$W_{\text{deep}} = W_{\text{deep},mx} - aq_{\text{shthr},rvp} \quad aq_{\text{shthr},rvp} < aq_{sh} < (aq_{\text{shthr},rvp} + W_{\text{revap},mx}) \quad (26)$$

$$W_{\text{deep}} = W_{\text{deep},mx} \quad aq_{sh} \geq (aq_{\text{shthr},rvp} + W_{\text{revap},mx}) \quad (27)$$

Em que W_{deep} é a quantidade atual de água movendo-se para o aquífero profundo no dia i (mm).

A quantidade de água que passa pela seção de controle no intervalo de tempo analisado é definida pela Equação 28.

$$W_{YLD} = SURQ + LATQ + GWQ + TLOSS - abs \quad (28)$$

Onde:

W_{YLD} é a quantidade de água que passa pela seção de controle no intervalo de tempo (mm);

$SURQ$ é a quantidade de água obtida pelo escoamento superficial (mm);

$LATQ$ é a contribuição do fluxo subsuperficial (mm);

GWQ é a contribuição do escoamento subterrâneo (mm);

$TLOSS$ é a perda de água no sistema (mm);

abs são as abstrações de água no sistema (mm).

3.5.2 Clima

No tocante ao clima, o modelo calcula os efeitos da transpiração das plantas e evaporação da água no perfil do solo no balanço hídrico. Para a estimativa da evapotranspiração potencial o modelo oferece como opções os métodos de Penman-Monteith; Hargreaves e Samani; e Priestley e Taylor.

Neste trabalho foi utilizado o método de Penman-Monteith por ser considerado o método-padrão de estimativa da evapotranspiração potencial. A Equação 29 expressa a formulação do método de Penman-Monteith.

$$\lambda E = \frac{\Delta \times (Rn - G) + \frac{\rho_{ar} \times c_p \times \Delta e}{r_a}}{\Delta + \gamma \times \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (29)$$

Onde:

λE é a densidade do fluxo de calor latente de evaporação ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

Δ é a declividade da curva de saturação de vapor d'água ($\text{kPa}.\text{°C}^{-1}$);

Rn é a radiação líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

ρ_{ar} é a densidade do ar (kg.m^{-3});

c_p é o calor específico do ar ($\text{MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);

Δe é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa);

γ é o coeficiente psicométrico ($\text{kPa}.\text{°C}^{-1}$);

r_c resistência da cultura à difusão do vapor d'água (s.m^{-1});

r_a resistência aerodinâmica à difusão do vapor d'água (s.m^{-1}).

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.

A evaporação é determinada a partir da evapotranspiração potencial separada em duas condições. Se a evapotranspiração potencial (E_o) for menor que a quantidade de água livre retida nas copas (R_{int}), então, utiliza-se a Equação 30. Se a evapotranspiração potencial (E_o) for maior que a quantidade de água livre mantida nas copas (R_{int}) é utilizada a Equação 31.

$$Ea = Ecan = Eo \rightarrow R_{int(f)} = R_{int(i)} - Ecan \quad (30)$$

$$Ea = R_{int(f)} \rightarrow R_{int(f)} = 0 \quad (31)$$

Sendo:

Ea a quantidade de evapotranspiração real que ocorre numa bacia hidrográfica (mm.dia^{-1});

$Ecan$ a quantidade de evaporação de água livre nas copas (mm.dia^{-1});

Eo a evapotranspiração potencial (mm.dia^{-1});

$R_{int(i)}$ a quantidade inicial de água livre mantida nas copas (mm.dia^{-1});

$R_{int(f)}$ a quantidade final de água livre mantida nas copas (mm.dia^{-1}).

A quantidade de água evaporada do solo é estimada pela utilização de funções exponenciais conforme a profundidade do solo e da quantidade de água. A distribuição da profundidade utilizada para determinar a quantidade máxima de água que pode ser evaporada é calculada pela Equação 32.

$$E_{solo,z} = E''_s \times \frac{z}{z + \exp(2,374 - 0,00713 \times z)} \quad (32)$$

Sendo:

$E_{solo,z}$ a demanda de evaporação na profundidade z (mm);

E''_z a evaporação máxima da água no solo (mm dia^{-1});

z a profundidade da camada do solo a partir da superfície (mm).

Os coeficientes nessa equação foram selecionados de forma que 50% da demanda evaporativa é extraída de 10mm do solo e 95% é extraída dos 100mm iniciais do solo.

A quantidade de demanda evaporativa para uma camada de solo é determinada pela diferença entre as demandas evaporativas calculadas nas camadas superiores e inferiores do perfil do solo, como segue na Equação 33.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad (33)$$

Em que:

$E_{soil,ly}$ é a demanda evaporativa para a camada ly (mm);

$E_{soil,zl}$ é a demanda evaporativa na camada inferior do solo (mm);

$E_{soil,zu}$ é a demanda evaporativa na camada superior do solo (mm).

Um coeficiente de compensação denominado *esco* foi incorporado na Equação 34 para permitir que o usuário modifique a distribuição em profundidade usada para atender a demanda evaporativa do solo.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \times esco \quad (34)$$

A Figura 13 representa a solução da equação 34 para diferentes valores de *esco*, em que a sua redução, permite uma maior extração de água pela demanda evaporativa a partir de camadas mais baixas.

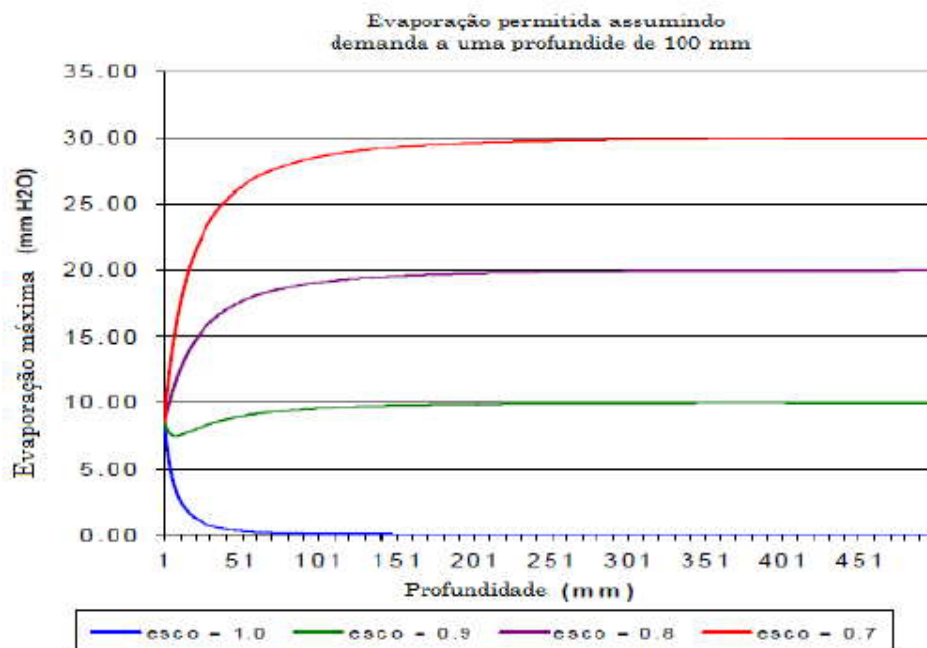


Figura 13 Distribuição da demanda evaporativa em relação à profundidade do solo

Fonte: Adaptado de Neitsch et al. (2005)

3.6 Delimitação das URHs

As Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) são definidas pelo *SWAT* em função da combinação das informações de uso, declividade e classe de solo. Cada URH representa uma combinação única dessas informações a fim de facilitar a simulação dos fenômenos físicos que ocorrem nela.

Neitsch et al. (2005) indicam que o *SWAT* simula com maior precisão o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica aplicando o conceito de URHs, pois o

modelo calcula os fluxos para cada URH, em seguida esses resultados são acumulados para gerar o balanço na sub-bacia, onde por fim são direcionados para a rede de drenagem até atingirem a seção de controle.

Neste trabalho, para delimitação das URHs foram utilizados dois critérios, a saber: área de drenagem mínima para originar a hidrografia e uso do solo.

No *SWAT*, a rede de drenagem é definida a partir do acúmulo de células que convergem para um mesmo ponto, sempre de cota inferior às células que drenam até ele, onde um valor mínimo é especificado para possibilitar a formação dos canais de drenagem.

Foram feitas simulações com dois níveis de discretização para ambas as bacias estudadas, sendo eles 10 hectares (0,1km²) e 100 hectares (1,0km²). Esse tipo de discretização permite ao modelo detalhar mais ou menos a hidrografia e, por conseguinte a divisão da bacia em subunidades.

O segundo critério empregado esteve associado às características da URH. O critério abordado foi o dominante que consiste na adoção do uso do solo, classe de declive e classe de solo que predominam na URH, onde os parâmetros desse nível serão transferidos para a respectiva sub-bacia tomando como base somente as informações da URH mais representativa da sub-bacia.

3.7 Análise de sensibilidade do *SWAT*

A análise de sensibilidade representa uma avaliação atribuída aos parâmetros empregados na modelagem em função da qualidade de suas respostas em relação a um conjunto de dados observados. O modelo *SWAT* emprega em sua análise de sensibilidade dois métodos de avaliação: o *Latin Hypercube (LH)* e o *One-factor-At-a-Time (OAT)*.

O *LH* tem sua concepção no método de Monte Carlo, contudo, utiliza um método de amostragem estratificada que permite a estimativa mais eficiente das estatísticas dos parâmetros de saída. O método subdivide a distribuição de cada parâmetro em *N* intervalos, cada qual com uma probabilidade igual a $1/N$. Os valores aleatórios dos parâmetros são gerados de forma que cada série seja amostrada uma única vez e o modelo é executado *N* vezes com a combinação aleatória dos parâmetros (VAN GRIENSVEN, 2005).

No método *OAT* apenas os parâmetros de entrada são modificados enquanto o modelo realiza a análise. Em cada rodada somente um parâmetro é mudado por vez, dessa maneira, com as mudanças no resultado em cada rodada, o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado (VAN GRIENSVEN, 2005).

O *SWAT* possui 20 parâmetros que podem vir a influenciar na vazão nas áreas estudadas. No Anexo B estão explicitados todos os parâmetros do *SWAT* que podem ser empregados para calibração do fluxo simulado nas áreas em estudo.

Van Griensven et al. (2006) sugerem uma classificação dos parâmetros avaliados na análise de sensibilidade em categorias de acordo com a sua posição relativa em relação ao conjunto de parâmetros aplicados na sensibilidade. Na Tabela 2 estão explicitadas tais categorias.

Tabela 2 Hierarquização do parâmetro no processo de calibração de acordo com a sua posição na análise de sensibilidade

Categoria	Posição do parâmetro
Muito importante	1
Importante	2 – 6
Ligeiramente importante	7 – 19
Sem importância	20 – 28

Fonte: Van Griensven et al. (2006)

Foi realizada a análise de sensibilidade para a BHRJ e para a MBHRM em ambos os níveis de discretização da rede de drenagem aplicados neste estudo.

3.8 Calibração e validação do modelo

O processo de calibração consiste no ajuste dos parâmetros até que os dados simulados sejam estatisticamente similares aos dados observados. Após a calibração, os mesmos parâmetros são aplicados a outro trecho da série para validar o processo de simulação.

O *SWAT* inclui um método de calibração automática baseado no algoritmo *Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)* desenvolvido pela Universidade do Arizona e descrito por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). O algoritmo *SCE-UA* opera com uma população de pontos que evolui em direção ao ótimo global de uma única função por meio de sucessivas interações e avaliações da função-objetivo. Na etapa inicial é gerada, de forma aleatória, uma população de pontos espalhados entre os limites máximos e mínimos definidos para cada parâmetro. Essa população é separada em conjuntos chamados de complexos que evoluem baseados no processo de “reprodução”. Quanto maior a população, maiores são as chances de se encontrar o ótimo global da função-objetivo, porém maior é o tempo de processamento e o número de interações necessárias para a convergência do algoritmo (BALOKOSKI, 2008).

Andrade (2011) aponta que na calibração automática os parâmetros podem ser modificados por substituição (1), adição absoluta (2) ou por uma multiplicação relativa (3). No método 1 o valor dos parâmetros, durante as etapas da otimização, substitui diretamente o valor inicial do parâmetro. No método 2 o valor obtido é adicionado ao valor inicial do parâmetro e no método 3 o valor obtido é multiplicado pelo valor inicial do parâmetro. Nessas opções, as alterações podem ser feitas para as URHs e/ou para a toda a bacia.

Para a BHRJ foi utilizado o período de 01 de setembro de 2007 a 31 de agosto de 2009 para calibração e de 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2007 para a validação, ambos com passo diário.

Para a MBHRM foi utilizado na calibração o período entre 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2009 e para validação o período entre 01 de setembro de 2009 a 31 de agosto de 2010, ambos com passo diário.

No processo de calibração, para ambas as bacias, foram testadas três configurações de parâmetros: calibração automática com dez parâmetros, calibração automática com quatro parâmetros e calibração manual com quatro parâmetros. No processo de validação foi utilizada a configuração que apresentou melhor eficiência estatística e valores dos parâmetros mais próximo da realidade física das bacias.

3.9 Estatísticas de precisão

Foram aplicadas, tanto na calibração quanto na validação, as seguintes estatísticas de precisão: coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (C_{NS}) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), coeficiente de determinação (R^2) (LEGATES; MACCBE, 1999) e P_{bias} (KUMAR, 2008).

O C_{NS} está expresso na Equação 35.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - Q_{SIM_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})^2} \quad (35)$$

Em que:

Q_{OBS_i} representa a vazão observada no dia i ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Q_{SIM_i} representa a vazão simulada no dia i ($m^3 \cdot s^{-1}$);

\bar{Q}_{OBS} representa a vazão média dos dados observados ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Gottschalk e Motovilov (2000) apresentam a seguinte classificação para esse coeficiente em aplicações da simulação hidrológica utilizando intervalos diários: C_{NS} igual a um corresponde a um ajuste perfeito; C_{NS} maior que 0,75 o modelo é considerado adequado e bom; e C_{NS} entre 0,36 e 0,75 o modelo é considerado aceitável. O C_{NS} está associado à eficiência de estimativa de vazões de pico do hidrograma.

De acordo com Legates e McCabe (1999), o R^2 (Equação 36) é um indicador da correlação entre os valores observados e simulados, com amplitude de variação entre 0 e 1, em que o valor 1 indica um ajuste perfeito. Esse coeficiente é considerado uma das estatísticas mais sensíveis a valores extremos, e muito pouco sensíveis às diferenças proporcionais entre séries observada e simulada (LEGATES; MCCABE, 1999).

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS}) \times (Q_{SIM_i} - \bar{Q}_{SIM})}{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS})^2 \right]^{0,5} \times \left[\sum_{i=1}^n (Q_{SIM_i} - \bar{Q}_{SIM})^2 \right]^{0,5}} \right\} \quad (36)$$

Onde \bar{Q}_{SIM} representa a vazão média dos dados simulados ($m^3 \cdot s^{-1}$);

Segundo Beskow (2009), o P_{bias} corresponde ao percentual de viés das vazões simuladas em relação às observadas (Equação 37). Valores negativos indicam que o modelo subestima a vazão simulada em relação à observada e positivo, superestima. Van Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para esse coeficiente em aplicações do *SWAT* utilizando intervalos diários: $|P_{bias}| < 10\%$, muito bom; $10\% < |P_{bias}| < 15\%$, bom; $15\% < |P_{bias}| < 25\%$, satisfatório e $|P_{bias}| > 25\%$, o modelo está inadequado.

$$P_{bias} = \left(\frac{\bar{Q}_{SIM} - \bar{Q}_{OBS}}{\bar{Q}_{OBS}} \right) \times 100 \quad (37)$$

O balanço hídrico foi avaliado com base na comparação da evapotranspiração, escoamento superficial e de base da série observada com a estimada para as bacias pelo *SWAT*.

A evapotranspiração foi avaliada em termos anuais em que a evapotranspiração observada foi obtida com um balanço hídrico simples conforme a Equação 38 e a estimada fornecida pelo modelo.

$$ET = P_{Tot} - ES_{Tot} \quad (38)$$

Em que:

ET representa a evapotranspiração total anual (mm);

P_{Tot} representa a precipitação pluvial total anual (mm);

ES_{Tot} corresponde ao escoamento total anual (mm).

A separação dos escoamentos foi realizada pelo método proposto por Barnes (1939) para os totais mensais das séries observadas. O método de Barnes consiste na análise gráfica do desempenho do hidrograma para identificar o período onde ocorre a contribuição superficial do escoamento.

Foram realizadas também análises complementares de caráter qualitativo dos hidrogramas simulados em relação aos observados para as bacias em estudo com base em curvas de permanência e indicadores que relacionam as vazões com a referida curva (TUCCI, 2002). As Equações 39, 40 e 41 representam o procedimento de cálculo da vazão específica e relações de permanência de 95 e 50% de probabilidade, respectivamente.

$$q = \left(\frac{Q_m}{A} \right) \times 1000 \quad (39)$$

$$rcp_{95} = \frac{Q_{95}}{Q_m} \quad (40)$$

$$rcp_{50} = \frac{Q_{50}}{Q_m} \quad (41)$$

Onde q representa a vazão específica ($l.s^{-1}.km^{-2}$), Q_m representa a vazão média do período observado ($m^3.s^{-1}$), A representa a área da bacia (km^2), rcp_{95} corresponde à relação de permanência com probabilidade de 95% (Adimensional), Q_{95} representa a vazão com probabilidade de ocorrência de 95% ($m^3.s^{-1}$), rcp_{50} corresponde à relação de permanência com probabilidade de 50% (Adimensional) e Q_{50} representa a vazão com probabilidade de ocorrência de 50% ($m^3.s^{-1}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir estão expressos e discutidos os resultados encontrados para ambas as bacias hidrográficas estudadas.

4.1 Avaliação do desempenho do *SWAT* na BHRJ com discretização da drenagem em 100 hectares

Com a definição de uma área de contribuição mínima de 100 hectares para o modelo originar a rede de drenagem e a sua associação com o modelo digital de elevação, o *SWAT* gerou para a BHRJ 21 sub-bacias com áreas variando entre $0,71\text{km}^2$ e $2,95\text{km}^2$ (FIGURA 14).

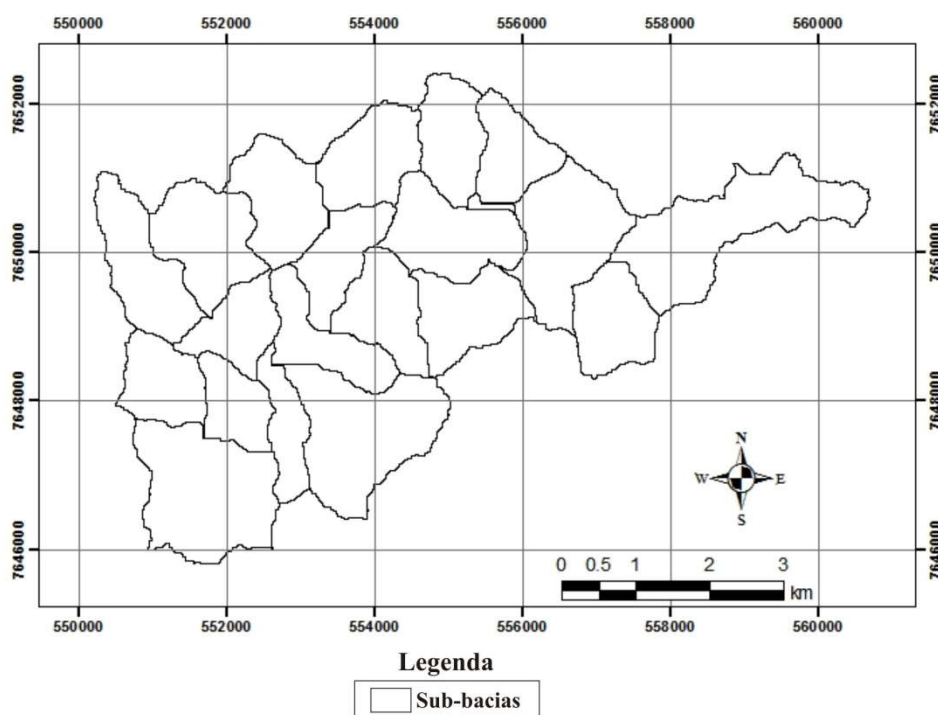


Figura 14 Divisão da BHRJ em sub-bacias com discretização de 100 hectares

Essa divisão da bacia permitiu ao modelo gerar 498 URH's das quais, para cada sub-bacia, foram selecionados os parâmetros da URH com a combinação do uso do solo, classe de solo e declividade mais representativa para simulação do escoamento em cada sub-bacia.

Foi aplicado o procedimento de análise de sensibilidade automático do *SWAT* para a BHRJ tanto para a discretização de uma quanto para três camadas de solo a fim de identificar os parâmetros mais sensíveis à simulação do escoamento na bacia. Na Tabela 3 está representada a classificação dos parâmetros associados à simulação de fluxo pelo *SWAT* na BHRJ.

Tabela 3 Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo *SWAT* para a BHRJ com discretização de 100 hectares em ambas discretizações do solo

Gradação de sensibilidade	Parâmetros	
	3 Camadas de solo	1 Camada de solo
1	Alpha_Bf	Alpha_Bf
2	CN2	Gwqmn
3	Gwqmn	CN2
4	Esco	Esco
5	Sol_Z	Sol_AWC
6	Sol_AWC	Blai
7	Blai	Gw_Revap
8	Canmx	Sol_Z
9	Sol_k	Canmx
10	Slope	Ch_N2
11	Gw_Revap	Ch_k2
12	Ch_k2	Gw_Delay
13	Ch_N2	Epc
14	Gw_Delay	Slope
15	Sol_Al	Sol_k
16	Epc	Revapmn
17	Revapmn	Sol_Al
18	Biomix	Biomix
19	Surlag	Surlag
20	Ssubsn	Ssubsn

Com base na análise de sensibilidade foram selecionados os parâmetros identificados como mais sensíveis para a BHRJ de acordo com o critério de classificação proposto por Van Griensven et al. (2006), sendo esse critério aplicado as três configurações de parâmetros utilizadas na calibração: automática com 10 parâmetros (AutoCal10), automática com 4 parâmetros (AutoCal4) e manual com 4 parâmetros.

Com a definição dos parâmetros, foi efetuado o processo de calibração para o período entre 01 de setembro de 2007 e 31 de agosto de 2009. Na Tabela 4 encontram-se os parâmetros utilizados com os valores calibrados pelo modelo.

Tabela 4 Parâmetros utilizados na calibração do modelo *SWAT* para a BHRJ com discretização de 100 hectares

Calibração automática com 10 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,983 (2,3 dias)	Alpha_Bf	0,982 (2,3 dias)
CN2	-24,8% *	Gwqmn	741,34 mm
Gwqmn	381,14 mm	CN2	-16,7%*
Esco	0,46 (Adimensional)	Esco	0,13 (Adimensional)
Sol_Z	-22,1%*	Sol_AWC	25,0%*
Sol_AWC	23,1%*	Blai	0,008 m ² .m ⁻²
Blai	0,01 m ² .m ⁻²	Gw_Revap	0,03 (Adimensional)
Canmx	2,33 mm	Sol_Z	11,8%*
Sol_K	23,0%*	Canmx	0,6 mm
Slope	23,4%	Ch_N2	0,119 (Adimensional)
Calibração automática com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,979 (2,3 dias)	Alpha_Bf	0,0 (∞ dias)
CN2	-25,0%*	Gwqmn	0,0 mm
Gwqmn	591,40 mm	CN2	-20,7%*
Esco	0,41 (Adimensional)	Esco	1,0 (Adimensional)

Tabela 4, conclusão

Calibração manual com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)	Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)
CN2	-20,0%*	Gwqmn	3,0 mm
Gwqmn	3,0 mm	CN2	-20,0%*
Esco	0,50 (Adimensional)	Esco	0,50 (Adimensional)

* O modelo calibra esses parâmetros com base em porcentagens variando seus valores iniciais que estão em função da classe, uso e camada do solo a que se referem

Dos parâmetros indicados como mais sensíveis pelo modelo para a BHRJ a maioria representa o comportamento da água no solo, a exceção dos parâmetros *CN2* e *Ch_N2* que estão diretamente ligados ao escoamento superficial e dos parâmetros *Esco*, *Blai* e *Canmx* que referem-se a evapotranspiração.

Esses parâmetros foram identificados como os mais sensíveis em diversos trabalhos científicos que verificaram o desempenho do modelo *SWAT* na simulação hidrológica, onde se destacam os trabalhos realizados por Andrade (2011), Durães, Mello e Naghettini (2011) e Lelis et al. (2012) no Estado de Minas Gerais. Neitsch et al. (2005), tratando da calibração do *SWAT*, destacam que os parâmetros *CN2*, *Esco* e *Alpha_Bf* são de ajuste prioritário em se tratando da simulação do escoamento pelo modelo.

Percebe-se que os valores calibrados no processo manual são distintos dos calibrados pelo modelo automaticamente. Isso ocorre pelo fato de que o algoritmo empregado pelo modelo busca uma otimização global da variável estudada (escoamento) com base em uma função-objetivo que avalia o efeito de cada parâmetro no processo de simulação, dessa maneira, a seleção incoerente de um determinado valor para o parâmetro pode ser compensada pelo valor de

outro parâmetro, provocando assim um efeito cascata de valores incoerentes em relação à realidade da bacia.

Vale ressaltar também que apesar de ser descrito como um modelo hidrológico distribuído, o *SWAT* não permite que informações associadas principalmente a características do solo, sejam inseridas no modelo em caráter distribuído e sim sob a forma de valores médios, fato que afeta substancialmente a simulação do escoamento e, por conseguinte do balanço hídrico na bacia estudada.

A afirmação acima é comprovada à medida que o modelo indica o aumento ou redução dos valores dos parâmetros que representam características reais da bacia como declividade (*slope*), profundidade das camadas de solo (Sol_Z), condutividade hidráulica do solo (Sol_K) e armazenamento de água no solo (Sol_AWC).

Seguindo esse raciocínio, a calibração manual torna-se eficiente à medida que permite ao analista inserir seus conhecimentos referentes à área em estudo e representar as características físicas da bacia de maneira mais acurada.

O valor ajustado para o parâmetro Alpha_Bf corresponde, de acordo com a Equação 19 (vide p. 51), a 200 dias de recessão. Esse parâmetro foi de difícil calibração devido à característica particular exercida pelo fluxo subterrâneo sobre a BHRJ. Há ocorrência de alguns eventos chuvosos de cunho isolado na bacia ao longo dos meses do período considerado seco (maio a setembro) que não contribuem de maneira substancial com a recarga do aquífero raso, mas dificultam a identificação do período de recessão propriamente dito.

O parâmetro Esco corresponde ao coeficiente de compensação da evaporação de água no solo. Esse parâmetro surge no modelo para corrigir uma deficiência conceitual em sua formulação. O *SWAT* admite que no primeiro centímetro 50% da demanda evaporativa é atendida e que aos 10 centímetros 95% dessa demanda é suprida. Esse conceito provocava no modelo uma redução

da evapotranspiração real haja vista que a demanda de água pela atmosfera não era atendida.

Dessa maneira, o Esco surge na formulação para permitir ao modelo retirar água de camadas inferiores para o atendimento da demanda evaporativa. O valor calibrado (0,50) indica que pelo menos 50% da demanda evaporativa do solo é atendida pelos centímetros superiores da camada, sendo o restante fornecido por camadas inferiores do solo.

O parâmetro Gwqmn representa o limite inferior onde abaixo do qual não há escoamento de base. O valor de três milímetros calibrado para a BHRJ foi considerado representativo, visto que ele permite uma maior movimentação de água no perfil do solo e, por conseguinte maior contribuição para o fluxo de base. Esse parâmetro foi de difícil calibração devido à falta de indicações diretas. O valor adotado tomou como referência o trabalho realizado por Andrade (2011) e devido ao efeito insignificante no desempenho da simulação com o aumento desse parâmetro.

O parâmetro CN2 foi o que apresentou maior sensibilidade durante o processo de calibração manual em ambas discretizações do perfil do solo. Por padrão, o *SWAT* recomenda uma variação de $\pm 25\%$ no valor do CN. O valor calibrado foi de -20% do valor inicial que depende da classe e uso do solo da bacia (Tabela 5). O CN médio inicial da BHRJ foi de 71 enquanto que o valor calibrado foi de 57.

Tabela 5 Valores de CN empregados na simulação da BHRJ com discretização de 100 hectares

Uso do solo	Grupo hidrológico B		Grupo hidrológico C	
	Valor inicial	Valor calibrado	Valor inicial	Valor calibrado
Milho	77	61,6	83	66,4
Pastagem	69	55,2	79	63,2
Mata nativa	55	44	70	56
Eucalipto	59	47,2	72	57,6
Solo exposto	82	65,6	87	69,6

O valor calibrado pode ser interpretado como representativo de uma mata secundária ou uma pastagem em boas condições de manejo. Contudo, cabe salientar que o parâmetro representa uma ponderação dos diferentes manejos e classes de solo com um dado uso do mesmo. A tentativa de inserir valores superiores ao de -20% no parâmetro depreciavam em muito a qualidade da simulação, sendo, portanto o limitante para definição do mesmo.

Diante da dificuldade apresentada pelo modelo em fornecer valores razoáveis nos processos de calibração automática dos parâmetros foram utilizados como base para validação os valores dos parâmetros do processo de calibração manual.

Na Tabela 6 estão expostos os resultados das estatísticas de precisão aplicadas na avaliação do desempenho do *SWAT* na simulação hidrológica da BHRJ tanto para o período de calibração quanto o de validação em ambas discretizações do perfil do solo.

Tabela 6 Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do *SWAT* aplicadas a BHRJ com discretização de 100 hectares

Perfil do solo	Fase	C_{NS}	R^2	P_{bias} (%)
3 Camadas	AutoCal10	0,75	0,88	-14,92
	AutoCal4	0,52	0,81	-40,62
	Manual	0,57	0,80	8,87
	Validação	0,48	0,69	-7,09
1 Camada	AutoCal10	0,59	0,82	-30,12
	AutoCal4	0,55	0,78	-35,52
	Manual	0,47	0,76	-34,82
	Validação	0,30	0,55	-1,49

Os valores do Coeficiente de *Nash-Sutcliffe* (C_{NS}) encontrados para as calibrações na BHRJ são considerados bons de acordo com a classificação de Gottschalk e Motovilov (2000). O C_{NS} é um índice estatístico que representa, principalmente, a resposta do modelo na simulação de vazões de pico. As calibrações automáticas tiveram seu bom desempenho associado a uma maior flexibilidade na variação dos parâmetros permitida pelo modelo. Já as calibrações manuais tiveram um desempenho inferior às automáticas, mas com desempenho satisfatório e com valores mais realistas dos parâmetros para a BHRJ. No tocante a validação, apenas a validação com discretização do perfil do solo em três camadas demonstrou resultado aceitável.

O Coeficiente de Determinação (R^2) tem sido bastante empregado na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos devido à sua sensibilidade em identificar diferenças entre valores extremos das séries observada e simulada. Os resultados obtidos para esse índice ressaltam o desempenho muito satisfatório do modelo na simulação das vazões tanto no processo de calibração quanto de validação para a BHRJ em ambas discretizações do perfil do solo.

O P_{bias} representa, em termos percentuais, a tendência de desvio das vazões simuladas em relação às observadas. Esse índice indica uma superestimativa média de 8,87% das vazões observadas no processo de

calibração manual e subestimativa de 7,09% na fase de validação na discretização do solo em três camadas. Van Liew et al. (2007) enquadra esses índices como de bom desempenho.

O restante dos processos de calibração e validação não apresentou desempenho satisfatório em relação ao P_{bias} , com tendências de fortes subestimativas em termo médios do escoamento na BHRJ.

O bom desempenho do *SWAT* na simulação do escoamento também foi referendado por diversos autores em várias bacias hidrográficas pelo mundo. White e Chaubey (2005) aplicaram o *SWAT* a três bacias no Estado de Arkansas-EUA obtendo valores de C_{NS} variando entre 0,5 e 0,89 no período de calibração e de 0,41 a 0,91 no período de validação.

Von Stackelberg et al. (2007) analisaram o comportamento da simulação do escoamento com o *SWAT* em duas microbacias no Uruguai obtendo C_{NS} entre 0,71 e 0,78 e coeficientes de determinação entre 0,92 e 0,94 para valores diários de vazão.

Wu e Johnston (2007) avaliaram os efeitos da resposta hidrológica frente a diferentes condições climáticas utilizando o *SWAT* em uma bacia hidrográfica no Estado de Michigan-EUA. Os referidos autores obtiveram resultados satisfatórios na simulação dos períodos climáticos distintos indicados pelos valores de C_{NS} (0,8 e 0,9) e desvios (2,9% e 3,4%) encontrados.

Machado, Vettorazzi e Cruciani (2003) aplicaram o *SWAT* a uma microbacia em Piracicaba para simulação do escoamento e obtiveram bons resultados indicados pelos índices estatísticos C_{NS} (0,92) e desvio (-0,7%).

Durães, Mello e Naghettini (2011) ao simularem o escoamento na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba obtiveram C_{NS} de 0,79 no processo de calibração, além de desvio de 5,02% apontando assim um bom desempenho do *SWAT* na representação do escoamento na bacia do Rio Paraopeba.

Blainski et al. (2011) avaliaram o desempenho do *SWAT* na bacia do Rio Araranguá e obtiveram coeficientes de *Nash-Sutcliffe* variando entre 0,78 e 0,94 e desvios entre as vazões observadas e simuladas entre 1,5% e 13,9%.

Andrade (2011) e Beskow, Mello e Norton (2011) trabalhando com os modelos LASH e *SWAT*, respectivamente, na BHRJ obtiveram índices estatísticos com desempenho similar aos encontrados neste trabalho, referendando dessa maneira os resultados aqui expressos.

Nos Gráficos 1 e 2 estão representados os hidrogramas observados e simulados na BHRJ para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada de solo, respectivamente.

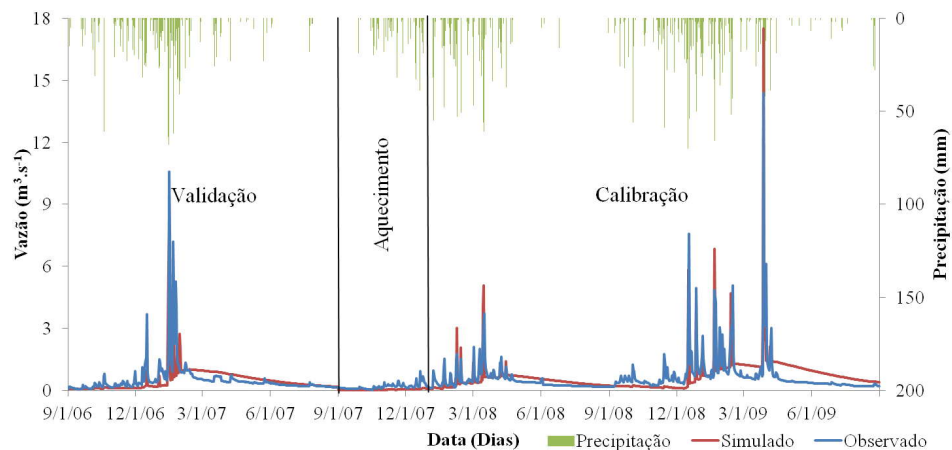


Gráfico 1 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil de solo em três camadas

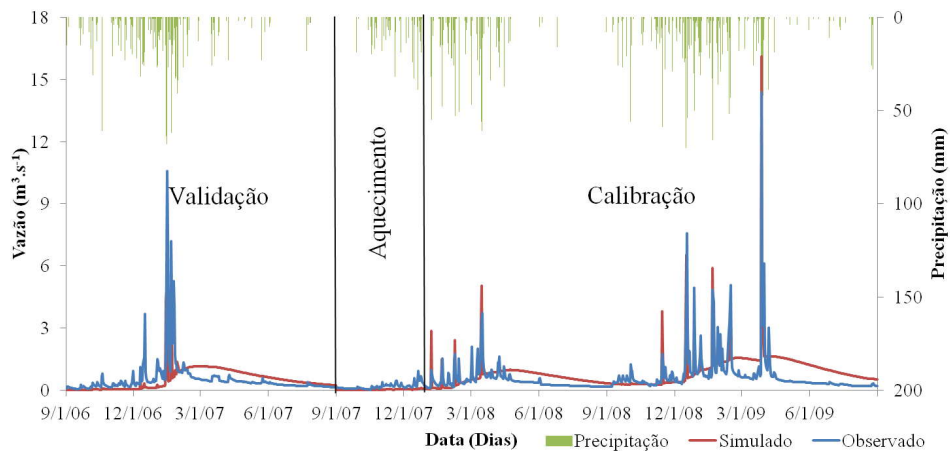


Gráfico 2 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em uma camada

Ao se realizar uma análise visual dos hidrogramas percebe-se que houve a superestimativa de alguns picos simulados na fase de calibração para ambas discretizações do perfil do solo. Já para o período de validação, em ambas discretizações do solo, houve subestimativas dos picos de vazão.

Outro ponto de destaque que pode ser observado nos hidrogramas é a dificuldade do modelo em representar a recessão após eventos com vazões de pico, onde há um retardamento do modelo a representar o decaimento da curva de recessão simulando um volume maior nesses períodos em relação à série observada.

Vale ressaltar também que a variação espacial da precipitação influencia diretamente na resposta do escoamento e na BHRJ há apenas uma estação monitorando tal variável, fato que pode dificultar o processo de simulação do modelo e causar os efeitos identificados acima.

Na Tabela 7 estão dispostos os valores de permanência comumente empregada na avaliação da disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas, bem

como índices representativos da relação vazão e permanência com os seus respectivos desvios.

Tabela 7 Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo *SWAT* para a BHRJ em ambas discretizações do perfil de solo

Índices	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Observado	Simulado	Desvio (%)	Observado	Simulado	Desvio (%)
Q5%	1,500	1,290	-14,0	1,500	1,550	3,3
Q10%	0,950	1,130	18,9	0,950	1,390	46,3
Q25%	0,570	0,726	27,4	0,570	0,965	69,3
Q50%	0,360	0,380	5,6	0,360	0,527	46,4
Q75%	0,210	0,141	-32,9	0,210	0,143	-31,9
Q90%	0,150	0,061	-59,3	0,150	0,032	-78,7
Q95%	0,100	0,026	-74,0	0,100	0,004	-96,0
Qm	0,550	0,551	0,1	0,550	0,654	18,8
rcp95	0,182	0,047	-74,0	0,182	0,006	-96,6
rcp50	0,654	0,689	5,4	0,654	0,806	23,2
q (l/s.km ²)	17,2	17,2	0,1	17,2	20,4	18,8

Observa-se que as vazões associadas às permanências de eventos máximos e médios foram bem simuladas para a discretização com três camadas, apresentando desvios pequenos tendendo a superestimativa dos eventos observados. Contudo, os valores referentes à permanência de eventos mínimos (Q75%, Q90% e Q95%) foram subestimados em até 74%.

Já para a discretização com uma camada de solo as relações de permanências apresentaram valores inadequados à exceção da Q5% que apresentou ligeira superestimativa de 3,3%.

A vazão média e a vazão específica foram bem representadas pelo *SWAT* para a BHRJ em ambas discretizações do perfil de solo. Fato também observado para a razão de permanência com probabilidade de 50% (rcp50), que expressa a relação entre a Q50% e a vazão média da série, com desvio de apenas

5,4% para discretização de três camadas e 23,2% para discretização com uma camada de solo.

O rcp50 denota a variabilidade natural da bacia em manter a vazão média no curso d'água por um período maior de tempo estando intrinsecamente ligado ao potencial de regularização natural da bacia.

O rcp95 representa a relação entre a vazão natural mínima e a média potencialmente regularizável. O desempenho não satisfatório desse índice está atrelado a Q95 que também apresentou um desempenho inadequado na estimativa do modelo para ambas discretizações do perfil do solo.

No Gráfico 3 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos de base separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo.

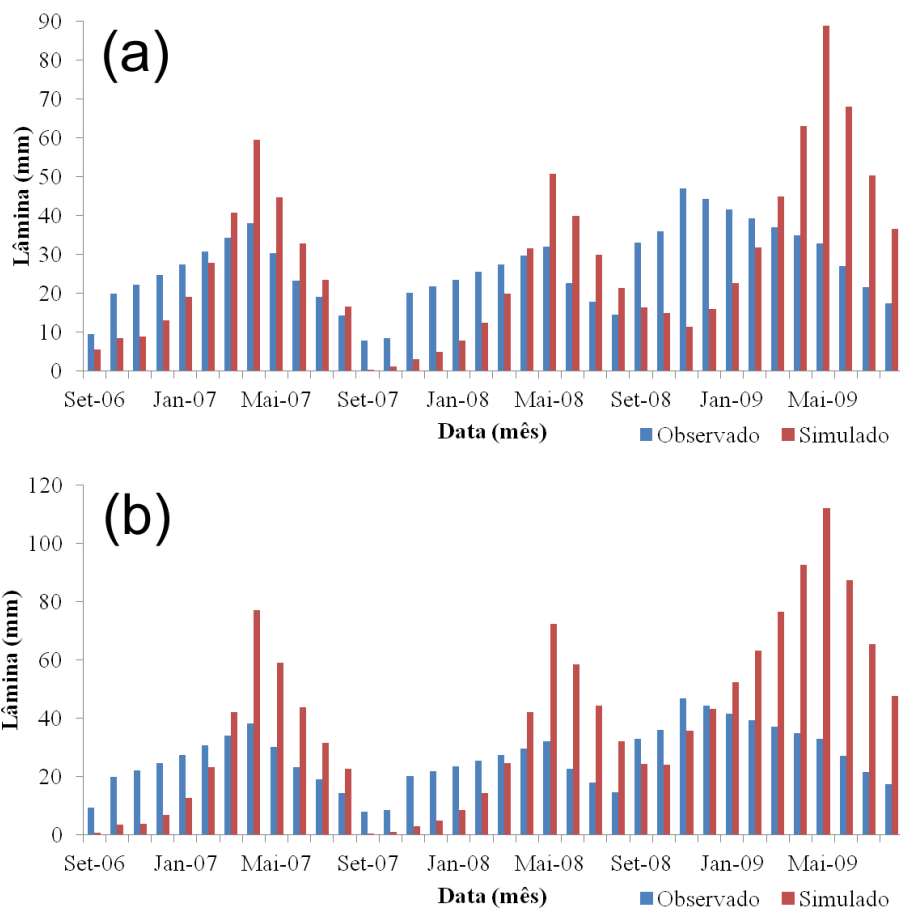


Gráfico 3 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b)

O escoamento de base, quando analisado seu total para o período, apontou uma superestimativa de 3,3% e 41,9% entre os valores observados e simulados para as discretizações de três, e uma camada de solo, respectivamente. Contudo, percebe-se que o modelo tem dificuldades de representar a água no solo, visto que no período de recessão esse tipo de escoamento tende a ser

superestimado e após o início do período de recarga o mesmo tende a ser subestimado.

No Gráfico 4 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos superficiais direto separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo.

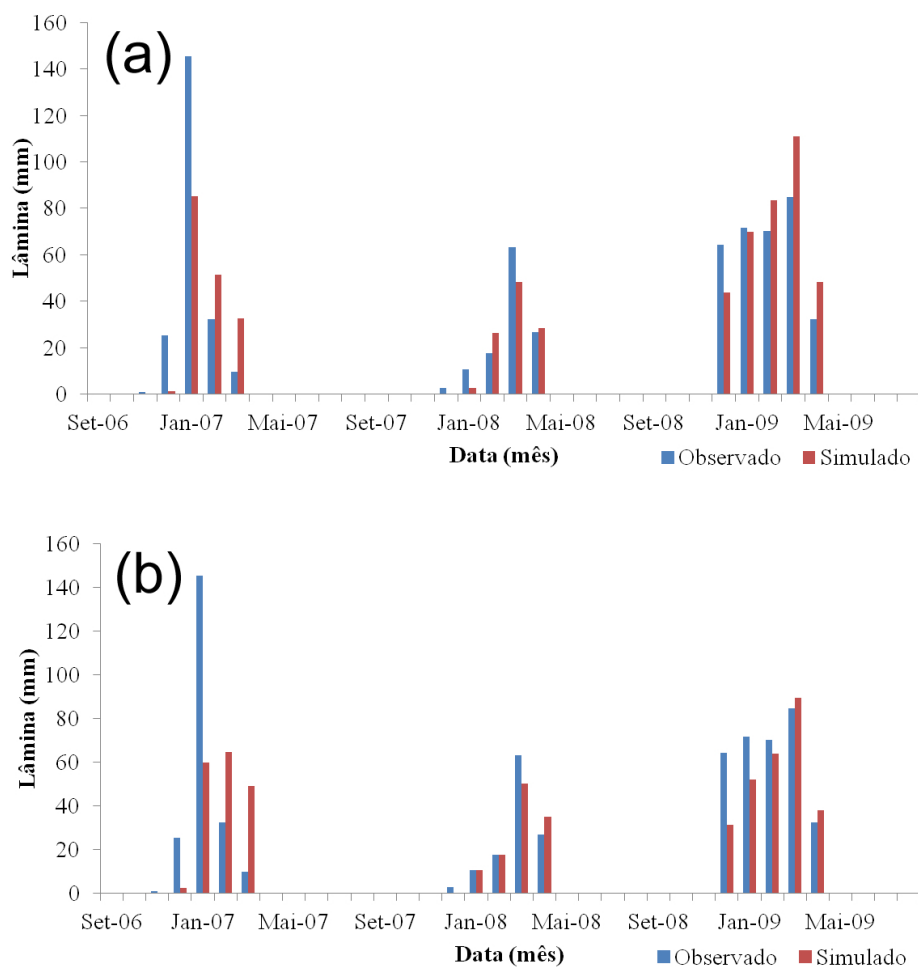


Gráfico 4 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b)

O desvio entre o escoamento superficial direto total simulado e o observado no período em estudo foi de -3,9% e -14,3% para as discretizações de três, e uma camada de solo, respectivamente. Esses desvios indicam uma boa simulação do escoamento superficial direto, principalmente no período de calibração para a BHRJ com a discretização espacial de 100 hectares.

Na Tabela 8 estão expressos os valores da evapotranspiração estimada pelo modelo e calculada pelo balanço hídrico simples para ambas discretizações do perfil do solo e com a discretização espacial de 100 hectares.

Tabela 8 Valores de evapotranspiração estimados e calculados para BHRJ com discretização de 100 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada

Ano hidrológico	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Calculado	Simulado	Desvio (%)	Calculado	Simulado	Desvio (%)
06/07	939,3	1097,6	16,9	939,3	801,0	-14,7
07/08	1008,7	1058,6	4,9	1008,7	792,7	-21,4
08/09	1112,8	787,9	-29,2	1112,8	712,8	-35,9
Média	1020,2	981,3	-3,8	1020,2	768,8	-24,6

No tocante a evapotranspiração, o total simulado foi subestimado em 3,8% e 24,0% para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente, quando comparado ao total calculado para o período. As maiores subestimativas estão associadas ao período de recessão. Uma possível justificativa para essa observação pode ser a dificuldade que o modelo tem em expressar a retirada de água do solo para atender a demanda evaporativa, promovendo como compensação a redução da evapotranspiração real ocorrida no período principalmente na discretização com uma camada de solo.

4.2 Discretização da drenagem em 10 hectares para a BHRJ

A partir de uma discretização mínima de 10 hectares como área de contribuição para originar a rede de drenagem o *SWAT* gerou para a BHRJ 130 sub-bacias com áreas variando entre 0,004km² e 0,96km² (FIGURA 15).

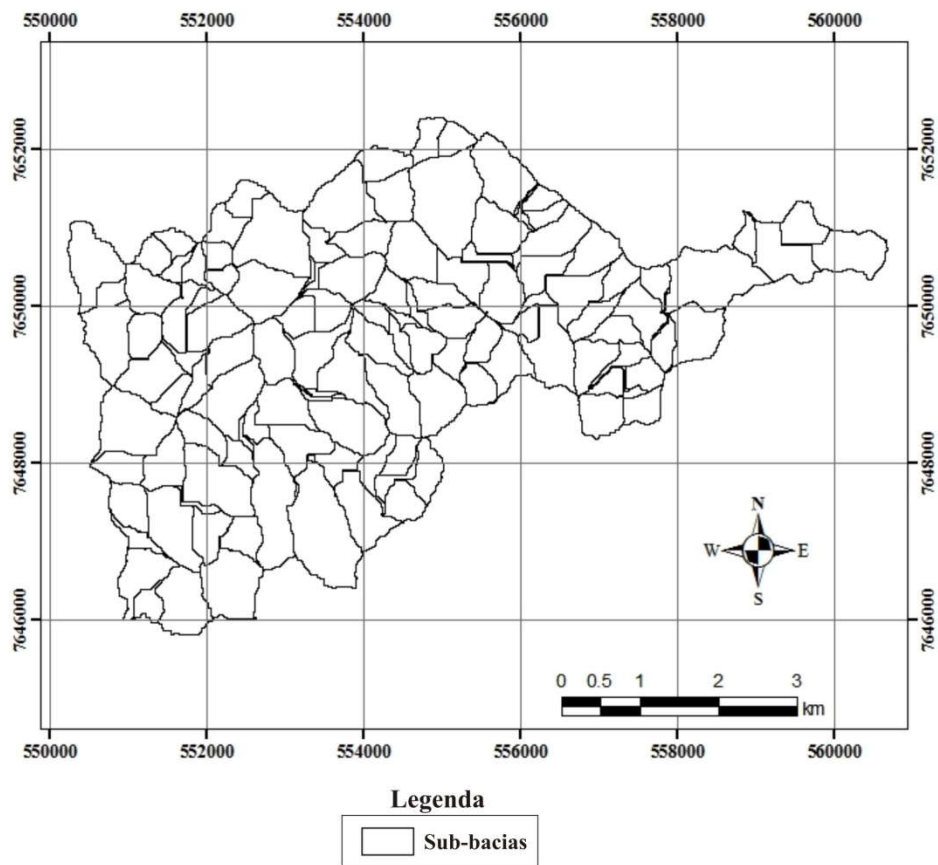


Figura 15 Divisão da BHRJ em sub-bacias com discretização de 10 hectares

Essa divisão da bacia permitiu ao modelo gerar 1608 URHs, produzindo em média 12 URHs para cada sub-bacia. Foram seleccionados os parâmetros da URH mais representativa para simulação do escoamento.

A análise de sensibilidade automática do *SWAT* foi executada a fim de identificar quais parâmetros são mais importantes no processo de simulação do escoamento na BHRJ. Na Tabela 9 está representada a classificação dos parâmetros associados à simulação de fluxo pelo *SWAT* na BHRJ para a discretização de 10 hectares.

Tabela 9 Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo *SWAT* para a BHRJ com discretização de 10 hectares em ambas discretizações do solo

Gradação de sensibilidade	Parâmetros	
	3 Camadas de solo	1 Camada de solo
1	Alpha_Bf	Alpha_Bf
2	CN2	Gwqmn
3	Gwqmn	CN2
4	Esco	Esco
5	Sol_Z	Ch_N2
6	Sol_Awc	Sol_Awc
7	Ch_N2	Sol_Z
8	Blai	Canmx
9	Canmx	Blai
10	Gw_Revap	Gw_Revap
11	Sol_K	Slope
12	Slope	Ch_K2
13	Ch_K2	Gw_Delay
14	Gw_Delay	Epc
15	Sol_Al	Sol_K
16	Revapmn	Revapmn
17	Epc	Sol_Al
18	Biomix	Biomix
19	Ssubbsn	Surlag
20	Surlag	Ssubbsn

Os quatro parâmetros mais sensíveis identificados pelo modelo com essa discretização espacial foram os mesmos identificados como mais sensíveis com a discretização de 100 hectares em ambas discretizações do perfil de solo. Esse resultado é explicado pela variabilidade espacial desses parâmetros, visto que

eles são fortemente influenciados pelas características do uso e classe de solo na bacia e como tais características não mudaram é de se esperar esse resultado.

Houve mudanças na classificação entre os parâmetros considerados de ligeira ou com pouca importância na análise de sensibilidade comparando os dois níveis de discretização espacial. Esses parâmetros refletem características mais generalizadas da bacia e, portanto com um maior grau de detalhamento sofrem alterações na magnitude de seus valores.

Com base na análise de sensibilidade foram selecionados os parâmetros identificados como mais sensíveis para a BHRJ de acordo com o critério de classificação proposto por Van Griensven et al. (2006), sendo esse critério aplicado as três configurações de parâmetros utilizadas na calibração: automática com 10 parâmetros, automática e manual com 4 parâmetros.

Foram realizados os processos de calibração para o período entre 01 de setembro de 2007 e 31 de agosto de 2009. Na Tabela 10 estão expostos os parâmetros utilizados com os valores calibrados pelo *SWAT* para discretização espacial de 10 hectares e ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 10 Parâmetros utilizados na calibração do modelo *SWAT* para a BHRJ com discretização de 10 hectares

Calibração automática com 10 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)	Alpha_Bf	0,973 (2,4 dias)
CN2	-25,0%*	Gwqmn	709,44 mm
Gwqmn	660,54 mm	CN2	-16,6%*
Esco	0,84 (Adimensional)	Esco	0,04 (Adimensional)
Sol_Z	-25,0%*	Ch_N2	0,118 (Adimensional)
Sol_Awc	23,2%*	Sol_Awc	25,0%*
Ch_N2	0,0 (Adimensional)	Sol_Z	10,8%*
Blai	0,0 m ² .m ⁻²	Canmx	0,52 mm
Canmx	0,98 mm	Blai	0,008 m ² .m ⁻²
Gw_Revap	0,036 (Adimensional)	Gw_Revap	0,035 (Adimensional)

Tabela 10, conclusão

Calibração automática com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,0 (∞ dias)	Alpha_Bf	0,0026 (884,6 dias)
CN2	-25,0%*	Gwqmn	0,0 mm
Gwqmn	0,0 mm	CN2	-25,0%*
Esco	0,0 (Adimensional)	Esco	0,87 (Adimensional)
Calibração manual com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)	Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)
CN2	-20,0%*	Gwqmn	3,0 mm
Gwqmn	3,0 mm	CN2	-20,0%*
Esco	0,50 (Adimensional)	Esco	0,50 (Adimensional)

* O modelo calibra esses parâmetros com base em porcentagens variando seus valores iniciais que estão em função da classe, uso e camada do solo a que se referem

Percebe-se que as calibrações automáticas com um maior grau de detalhamento espacial mantiveram a mesma dificuldade identificada na discretização espacial de 100 hectares em ajustar valores mais realísticos para a BHRJ. Esse fato corroborou mais uma vez pela opção da calibração e validação manual para realizar o ajuste do modelo.

Foram mantidos os valores ajustados manualmente na discretização espacial de 100 hectares visto que se trata da mesma bacia com as mesmas características físicas e de uso do solo e dessa maneira pode-se avaliar o real efeito do maior detalhamento espacial sobre o processo de simulação.

Na Tabela 11 estão representados os resultados das estatísticas de precisão aplicadas na avaliação do desempenho do *SWAT* na simulação hidrológica da BHRJ tanto para o período de calibração quanto o de validação com a discretização de 10 hectares.

Tabela 11 Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do *SWAT* aplicadas a BHRJ com discretização de 10 hectares

Perfil do solo	Fase	C_{NS}	R^2	P_{bias} (%)
3 Camadas	AutoCal10	0,71	0,86	-18,52
	AutoCal4	0,54	0,81	-49,50
	Manual	0,58	0,80	9,41
	Validação	0,46	0,68	-7,73
1 Camada	AutoCal10	0,60	0,82	-27,45
	AutoCal4	0,57	0,76	-1,85
	Manual	0,47	0,76	34,46
	Validação	0,30	0,55	-2,48

Os valores estatísticos encontrados com a discretização espacial de 10 hectares em três camadas de solo sofreram uma ligeira depreciação em comparação com os obtidos para mesma discretização do perfil de solo na discretização espacial de 100 hectares. Fato inverso foi observado com a discretização do perfil em uma camada de solo que apresentou ligeira melhora com um maior detalhamento espacial.

Os valores de C_{NS} e R^2 encontrados em ambas discretizações do perfil de solo e em todas as fases indicam um ajuste satisfatório do modelo de acordo com Gottschalk e Motovilov (2000), a exceção é do período de validação na discretização de uma camada de solo que apresentou um valor abaixo do referenciado por esses autores em processos de simulação. Já o P_{bias} apresentou desempenho satisfatório somente na discretização do perfil do solo em três camadas nas fases de calibração e validação manual segundo a classificação de Van Liew et al. (2007).

Andrade (2011) trabalhando com o *SWAT* na BHRJ e empregando uma discretização espacial intermediária as utilizadas neste estudo obtiveram valores de C_{NS} de 0,66 e 0,87 na calibração e validação, respectivamente, além de bom desempenho dos índices R^2 e P_{bias} . Um ponto de destaque do referido trabalho foi a opção por trabalhar com vários parâmetros associados às características

físicas do solo e aumentando as faixas de variação desses parâmetros, chegando até 50% de modificação dos valores iniciais.

Nos Gráficos 5 e 6 estão representados os hidrogramas observados e simulados pelo modelo *SWAT* para a BHRJ para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente.

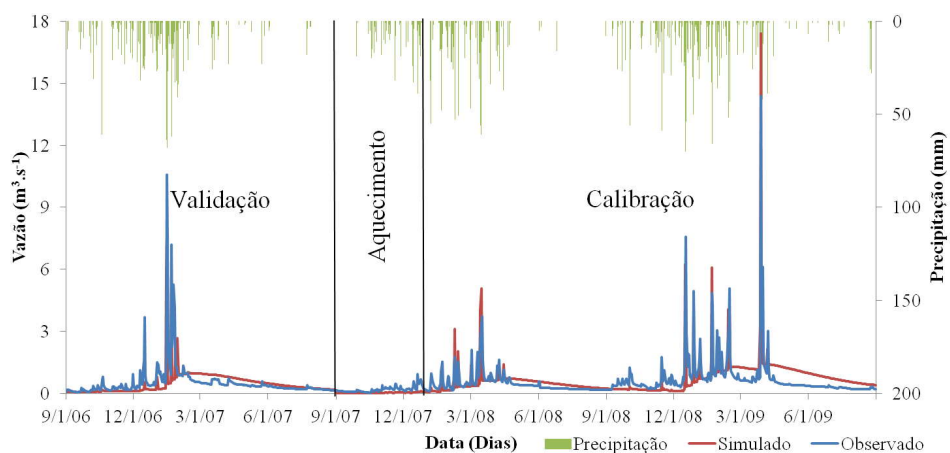


Gráfico 5 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil de solo em três camadas

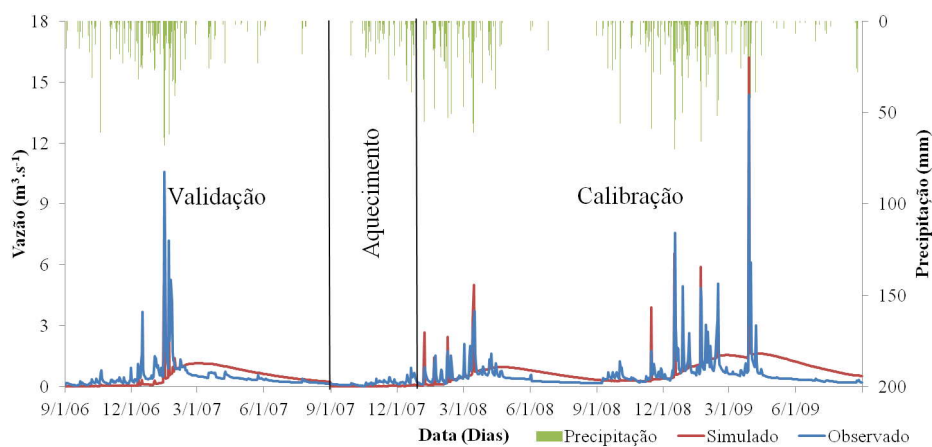


Gráfico 6 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em uma camada

O desempenho visual dos hidrogramas em ambas discretizações do perfil de solo foi similar ao detectado para a discretização de 100 hectares. Em ambos houve superestimativa das recessões e oscilação entre subestimativa e superestimativa das vazões de pico, ocorrendo subestimativa das respostas iniciais aos eventos chuvosos e superestimativa nos momentos em que houve ocorrência de grandes volumes precipitados.

Na Tabela 12 estão dispostos os valores das permanências analisadas bem como dos índices representativos da relação vazão e permanência com seus respectivos desvios.

Tabela 12 Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo *SWAT* para a BHRJ em ambas discretizações do perfil de solo

Índices	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Observado	Simulado	Desvio (%)	Observado	Simulado	Desvio (%)
Q5%	1,500	1,290	-14,0	1,500	1,540	2,7
Q10%	0,950	1,150	21,1	0,950	1,400	47,4
Q25%	0,570	0,729	27,9	0,570	0,958	68,1
Q50%	0,360	0,381	5,8	0,360	0,522	45,0
Q75%	0,210	0,140	-33,3	0,210	0,129	-38,6
Q90%	0,150	0,057	-62,0	0,150	0,028	-81,3
Q95%	0,100	0,023	-77,0	0,100	0,002	-98,0
Qm	0,550	0,552	0,3	0,550	0,651	18,2
rcp95	0,182	0,042	-77,1	0,182	0,003	-98,3
rcp50	0,654	0,690	5,5	0,654	0,802	22,6
q (l/s.km ²)	17,2	17,3	0,3	17,2	20,3	18,2

Observa-se desempenho similar dessa discretização da área de drenagem em relação à discretização de 100 hectares. Entretanto, houve um aumento na estimativa das vazões de caráter mediano, indicando uma possível regularização do fluxo com essa discretização de 10 hectares para a BHRJ em ambas discretizações do perfil do solo.

A vazão média e a vazão específica continuaram sendo bem representadas pelo *SWAT*, apresentando uma ligeira superestimativa de 0,3% e 18,2% para ambas nas discretizações de três e uma camada do perfil do solo, respectivamente. Fato também observado para a relação de permanência com probabilidade de 50% (rcp50), com desvio de 5,5% e 22,6% nas discretizações de três e uma camada do perfil do solo, respectivamente.

No Gráfico 7 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos de base separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 10 hectares.

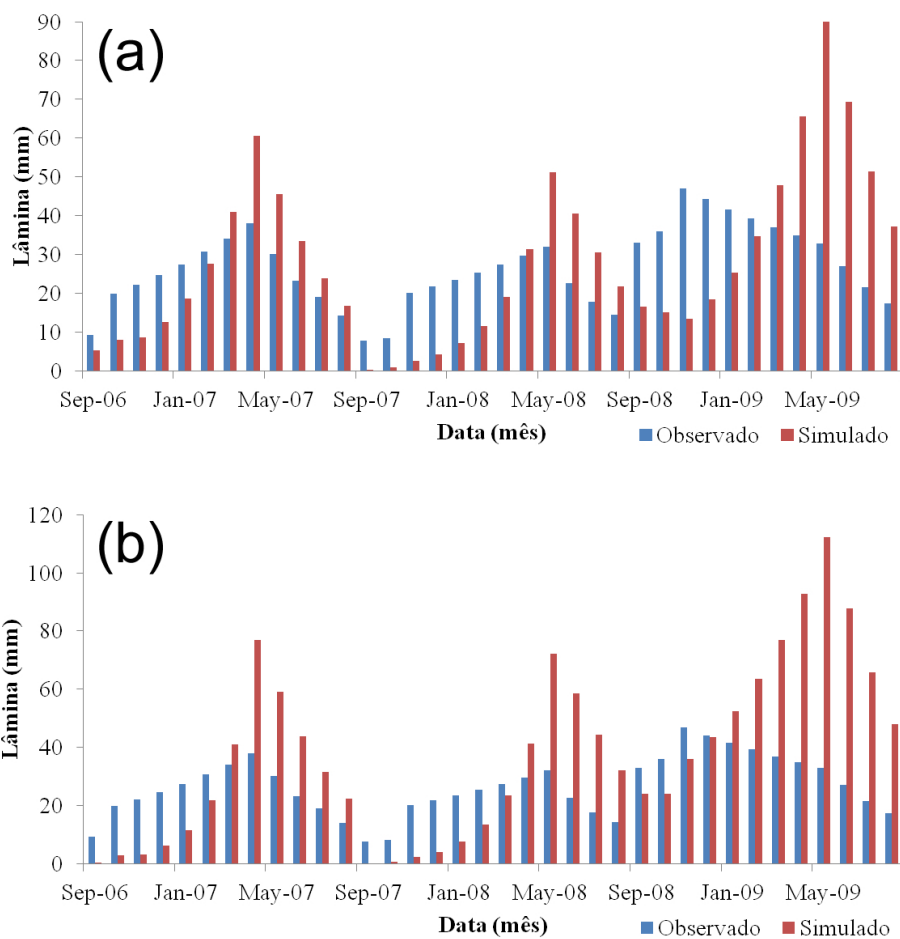


Gráfico 7 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares

No Gráfico 8 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos superficiais direto separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 10 hectares.

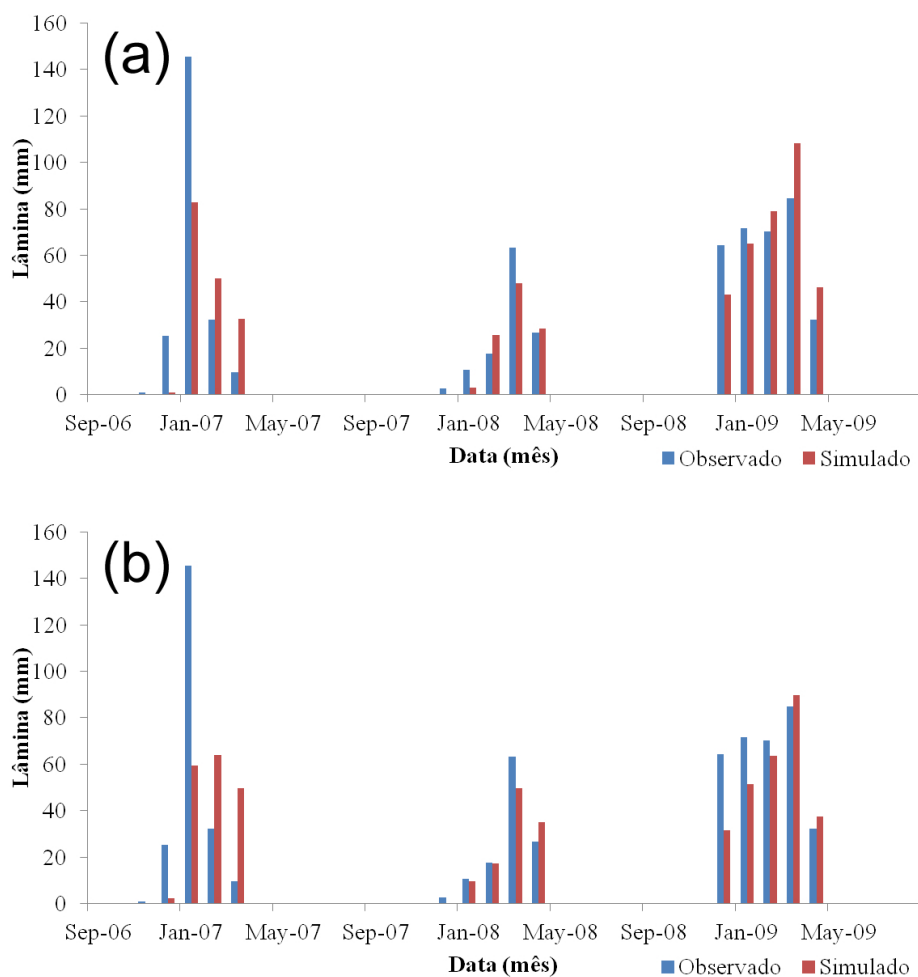


Gráfico 8 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a BHRJ com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares

O escoamento de base apontou uma superestimativa de 5,5% e 41,1% entre os valores observados e simulados no período para as discretizações de três e uma camada de solo, respectivamente. Desempenho similar à discretização anterior, mantendo-se a dificuldade de representar a água no solo para os

períodos de recessão, onde esse tipo de escoamento tende a ser superestimado e após o início do período de recarga em que o mesmo tende a ser subestimado.

O desvio entre o escoamento superficial direto total simulado e o observado no período foi de -6,8% e -14,7 para as discretizações de três e uma camada de solo, respectivamente. Esse desempenho foi similar a discretização de 100 hectares indicando uma boa representação do escoamento superficial direto na BHRJ.

Na Tabela 13 estão expressos os valores da evapotranspiração estimada pelo modelo e calculada pelo balanço hídrico simples para ambas discretizações do perfil do solo e com a discretização espacial de 10 hectares.

Tabela 13 Valores de evapotranspiração estimados e calculados para BHRJ com discretização de 10 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada

Ano hidrológico	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Calculado	Simulado	Desvio (%)	Calculado	Simulado	Desvio (%)
06/07	939,3	1080,0	15,0	939,3	804,2	-14,4
07/08	1008,7	1046,0	3,7	1008,7	797,4	-20,9
08/09	1112,8	784,8	-29,5	1112,8	709,0	-36,3
Média	1020,2	970,3	-4,9	1020,2	770,2	-24,5

A evapotranspiração total no período foi subestimada em 4,9% e 24,5% para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente, quando comparado ao total calculado. As maiores subestimativas ocorrem no período de recessão similar a discretização de 100 hectares.

4.3 Avaliação do desempenho do *SWAT* na MBHRM com discretização da drenagem em 100 hectares

Tomando-se como área de contribuição mínima para definição da rede de drenagem o valor de 100 hectares, o *SWAT* gerou para a MBHRM três sub-bacias, com áreas variando entre 0,94km² e 1,74km² (FIGURA 16). Com essa divisão o modelo conseguiu gerar 61 URHs, ficando em média 20 para cada sub-bacia.

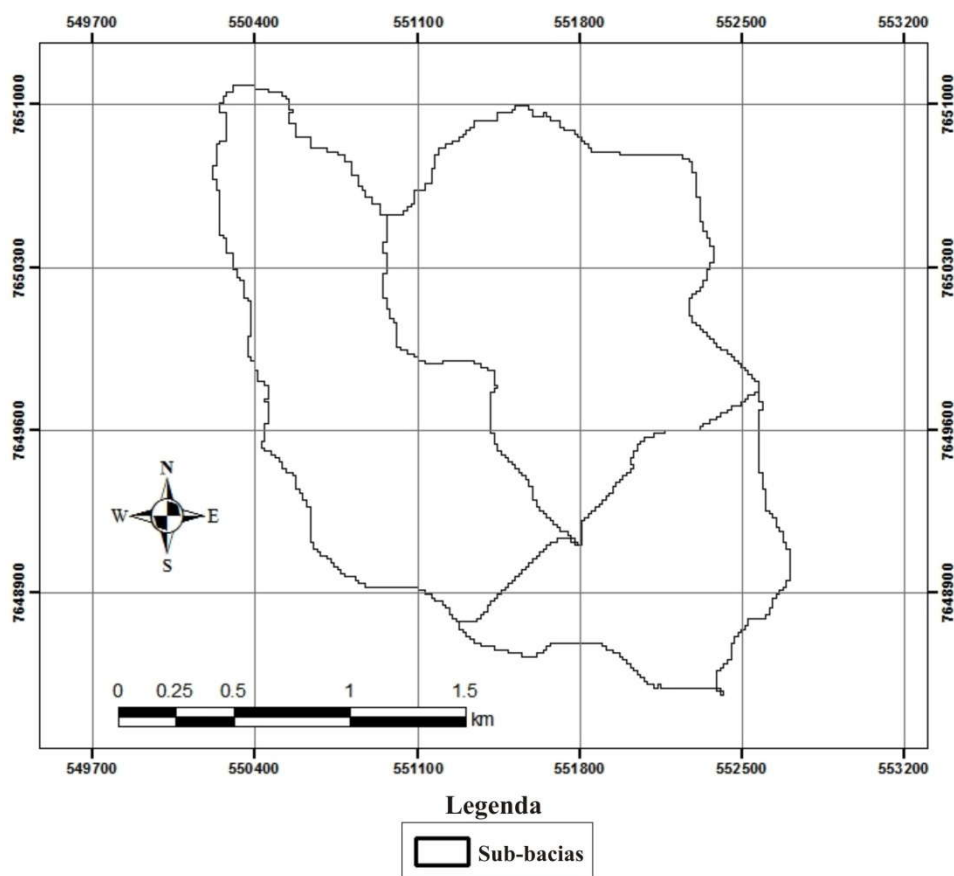


Figura 16 Divisão da MBHRM em sub-bacias com discretização de 100 hectares

Procedeu-se a análise de sensibilidade automática do *SWAT* na tentativa de distinguir os parâmetros mais sensíveis para a simulação hidrológica na MBHRM. Na Tabela 14 está representada a classificação dos parâmetros associados à simulação de fluxo pelo *SWAT* na MBHRM com discretização de 100 hectares e em ambas discretizações do perfil do solo.

Tabela 14 Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo *SWAT* para a MBHRM com discretização de 100 hectares em ambas discretizações do solo

Gradação de sensibilidade	Parâmetros	
	3 Camadas de solo	1 Camada de solo
1	Sol_Z	Alpha_Bf
2	Alpha_Bf	Gwqmn
3	Gwqmn	Esco
4	Esco	CN2
5	CN2	Sol_Awc
6	Sol_Awc	Gw_Revap
7	Blai	Sol_Z
8	Gw_Revap	Blai
9	Canmx	Canmx
10	Slope	Sol_K
11	Sol_K	Slope
12	Ch_K2	Ch_K2
13	Biomix	Revapmn
14	Epc	Epc
15	Sol_Al	Gw_Delay
16	Gw_Delay	Sol_Al
17	Revapmn	Biomix
18	Ch_N2	Ch_N2
19	Ssubsn	Surlag
20	Surlag	Ssubsn

Em comparação com a BHRJ a MBHRM mostrou-se sensível ao mesmo conjunto de parâmetros variando a sua ordem quanto à gradação de sensibilidade em ambas discretizações do perfil do solo para a discretização de 100 hectares.

Destaca-se a elevada sensibilidade ao parâmetro relacionado à profundidade do solo (Sol_Z) na discretização de três camadas de solo na MBHRM. Como a área é pequena, as variações no perfil, principalmente na profundidade das camadas, que são inerentes a essa discretização, influenciam diretamente no volume de água armazenado no solo e conseqüentemente no balanço hídrico como um todo.

Contudo, as características dos solos são inseridas no modelo em termos médios e permitir a calibração de tais informações pode incorrer em ajustes não realísticos para a MBHRM. Devido a isso, optou-se por descartar o Sol_Z do processo de calibração e utilizar o parâmetro posterior na ordem de sensibilidade.

Foram realizados os processos de calibração para o período entre 01 de setembro de 2006 e 31 de agosto de 2009 na MBHRM. Na Tabela 15 estão expostos os parâmetros utilizados com os valores calibrados pelo *SWAT* para discretização espacial de 100 hectares e ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 15 Parâmetros utilizados na calibração do modelo *SWAT* para a MBHRM com discretização de 100 hectares

Calibração automática com 10 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Sol_Z	-24,8% *	Alpha_Bf	0,0 (∞ dias)
Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)	Gwqmn	0,0 mm
Gwqmn	732,0 mm	Esco	0,0 (Adimensional)
Esco	0,66 (Adimensional)	CN2	-15,2%*
CN2	-24,9%*	Sol_Awc	25,0%*
Sol_Awc	25,0%*	Gw_Revap	0,008 (Adimensional)
Blai	0,21 m ² .m ⁻²	Sol_Z	20,9%*
Gw_Revap	0,0109 (Adimensional)	Blai	0,978 m ² .m ⁻²
Canmx	0,0 mm	Canmx	0,0 mm
Slope	24,9%*	Sol_K	24,9%*
Calibração automática com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)	Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)
Gwqmn	0,0 mm	Gwqmn	0,45 mm
Esco	0,0 (Adimensional)	Esco	0,0 (Adimensional)
CN2	-25,0%*	CN2	-25,0%*
Calibração manual com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)	Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)
Gwqmn	3,0 mm	Gwqmn	3,0 mm
Esco	0,50 (Adimensional)	Esco	0,50 (Adimensional)
CN2	-20,0%*	CN2	-20,0%*

* O modelo calibra esses parâmetros com base em porcentagens variando seus valores iniciais que estão em função da classe, uso e camada do solo a que se referem

Similarmente às simulações anteriores na BHRJ, os valores dos parâmetros calibrados automaticamente pelo modelo situam-se fora da realidade física da bacia, tornando necessária a calibração manual dos parâmetros para MBHRM.

Para a MBHRM o parâmetro CN2 mostrou-se o parâmetro mais sensível na calibração manual. A quantidade reduzida de URHs, que promove uma generalização maior na dinâmica do escoamento superficial, não propiciou uma

representação adequada do parâmetro optando-se por adotar o mesmo valor estabelecido para BHRJ (Tabela 16).

Tabela 16 Valores de CN empregados na simulação da MBHRM com discretização de 100 hectares

Uso do solo	Grupo hidrológico B		Grupo hidrológico C	
	Valor inicial	Valor calibrado	Valor inicial	Valor calibrado
Milho	77	61,6	83	66,4
Pastagem	69	55,2	79	63,2
Mata nativa	55	44	70	56
Eucalipto	59	47,2	72	57,6
Solo exposto	82	65,6	87	69,6

O CN médio inicial da MBHRM foi de 70 enquanto que o valor calibrado foi de 56. Apesar da dinâmica de uso e ocupação do solo diferenciada da MBHRM, os valores iniciais e calibrados são idênticos ao observado para a BHRJ. Isso ocorre devido à distribuição diferenciada em termos percentuais das classes de solo, com um predomínio de Latossolos (cerca de 10% maior que a BHRJ) favorecendo a melhora dos valores de CN na MBHRM e, por conseguinte os processos de infiltração na referida bacia.

O parâmetro Alpha_Bf foi ajustado com um valor similar ao já empregado nas simulações anteriores correspondendo a uma recessão de 200 dias. O comportamento dinâmico do escoamento na MBHRM é equivalente ao da BHRJ, desde que sejam mantidas as proporcionalidades espaciais.

O valor calibrado para o parâmetro Esco representa em termos físicos que pelo menos 50% da demanda evaporativa é extraída do perfil do solo nos 10 cm iniciais.

O parâmetro $Gwqmn$ foi calibrado com um valor de 3 mm, onde abaixo do qual não há escoamento de base. Esse parâmetro é de difícil determinação e, portanto, decidiu-se aplicar o mesmo valor adotado para a BHRJ na MBHRM.

Na Tabela 17 estão representados os resultados das estatísticas de precisão aplicadas na avaliação do desempenho do *SWAT* na simulação hidrológica da MBHRM tanto para ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 17 Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do *SWAT* aplicadas a MBHRM com discretização de 100 hectares

Perfil do solo	Fase	C_{NS}	R^2	P_{bias} (%)
3 Camadas	AutoCal10	0,54	0,74	-15,89
	AutoCal4	0,39	0,73	18,68
	Manual	0,26	0,60	19,84
	Validação	-1,36	0,51	28,43
1 Camada	AutoCal10	0,46	0,69	-13,0
	AutoCal4	0,32	0,71	44,43
	Manual	0,20	0,56	47,56
	Validação	-1,11	0,48	51,29

Os valores do C_{NS} encontrados nas fases de calibração apresentaram desempenho próximo do limite inferior daquilo que a literatura recomenda como aceitável ou, no caso da calibração manual, estiveram abaixo desse limite. O P_{bias} também apresentou valores elevados, o que indica desvios significantes entre as informações observadas e estimadas pelo modelo.

Os períodos de validação de ambas discretizações do perfil do solo foram os que apresentaram maiores incertezas em relação ao processo de simulação pelo *SWAT* na MBHRM. Todos os índices estatísticos apresentaram desempenho inadequado ou muito próximo dos limites inferiores recomendados na literatura.

O R^2 mostrou-se como um índice de pouca sensibilidade ao processo de simulação pelo *SWAT*, pois sempre denotou valores considerados aceitáveis enquanto que os outros índices apontavam o contrário.

Nos Gráficos 9 e 10 estão representados os hidrogramas observados e simulados pelo modelo *SWAT* para a MBHRM para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente.

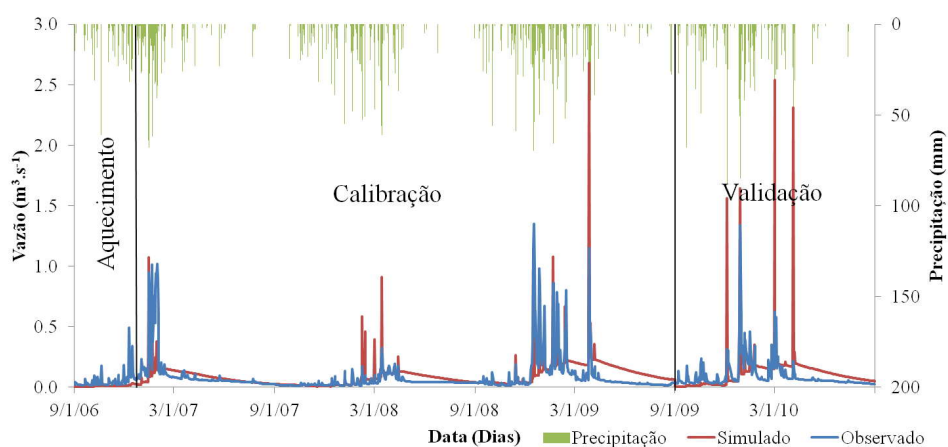


Gráfico 9 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas

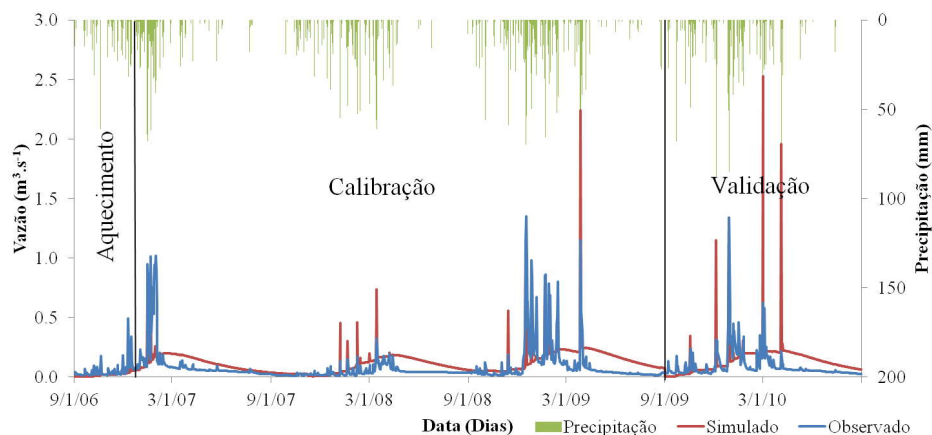


Gráfico 10 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em uma camada

Observa-se que em ambas discretizações do perfil do solo para MBHRM com 100 hectares de discretização da rede de drenagem ocorreram fortes superestimativas do período de recessão e de vários eventos de pico ao longo da série. Isso corrobora com a teoria aqui levantada sobre a dificuldade do modelo em representar o decaimento após vazões consecutivas de pico em escalas menores de bacias hidrográficas.

Outro ponto a ser destacado é a magnitude das vazões observadas no ano 07/08 que não apresentaram picos equivalentes aos outros anos da série. Nesse período as precipitações ficaram dentro da média, porém a sua distribuição foi mais uniforme, mantendo assim a regularização das vazões e dificultando a representação do escoamento pelo modelo.

Na Tabela 18 estão dispostos os valores das permanências analisadas, bem como, dos índices representativos da relação vazão média e permanência com seus respectivos desvios para a MBHRM com a discretização de 100 hectares em ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 18 Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo *SWAT* para a MBHRM em ambas discretizações do perfil de solo

Índices	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Observado	Simulado	Desvio (%)	Observado	Simulado	Desvio (%)
Q5%	0,274	0,211	-23,0	0,274	0,227	17,2
Q10%	0,165	0,183	10,9	0,165	0,210	27,3
Q25%	0,074	0,131	77,0	0,074	0,173	133,8
Q50%	0,043	0,069	60,5	0,043	0,099	130,2
Q75%	0,030	0,026	-13,3	0,030	0,050	66,7
Q90%	0,018	0,009	-50,0	0,018	0,019	5,6
Q95%	0,015	0,006	-60,0	0,015	0,008	-46,7
Qm	0,083	0,097	16,8	0,083	0,119	42,7
rcp95	0,180	0,062	-65,7	0,180	0,067	-62,6
rcp50	0,517	0,711	37,4	0,517	0,834	61,3
q (l/s.km ²)	17,7	20,7	16,8	17,7	25,3	42,7

Para a discretização do perfil de solo em três camadas as vazões máximas, média e específica foram bem representadas pelo modelo *SWAT* quando comparadas as observadas, no entanto as outras vazões estimadas apresentaram desempenho inadequado.

Observa-se que, no geral, a simulação com discretização do perfil de solo em uma camada não apresentou valores aceitáveis de permanências, fato já detectado por outros índices aplicados na avaliação de desempenho do modelo nessa situação. Apenas as vazões com 5% e 90% de permanência apresentaram valores satisfatórios.

No Gráfico 11 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos de base separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 100 hectares para a MBHRM.

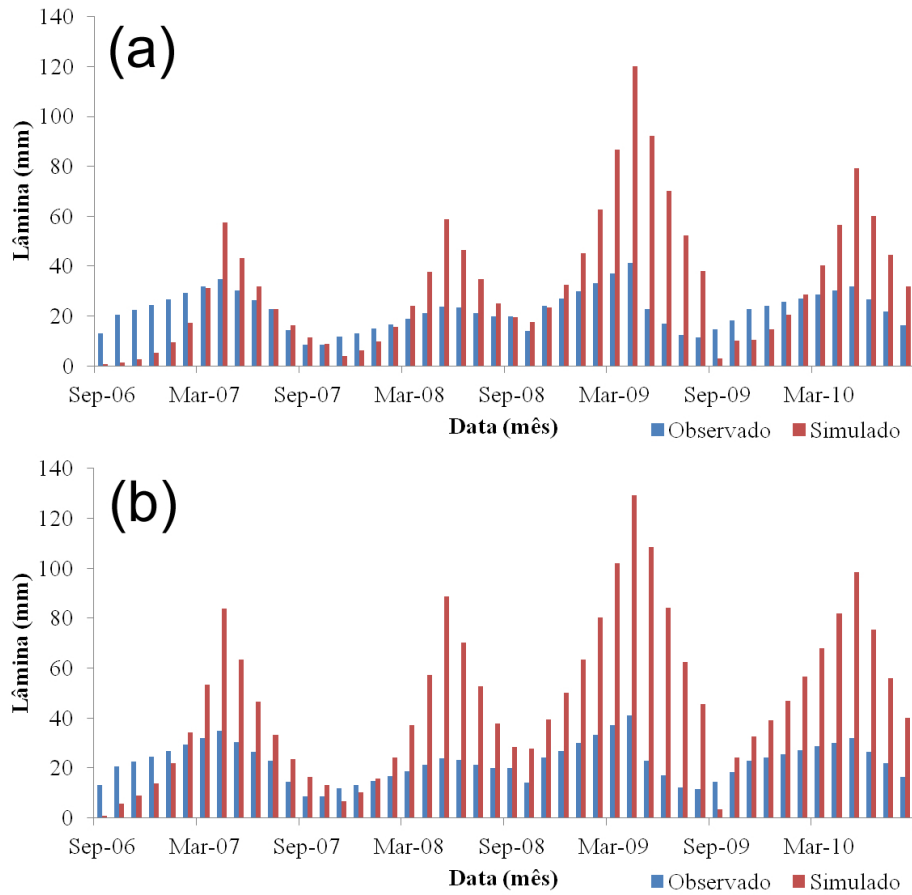


Gráfico 11 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 100 hectares

No Gráfico 12 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos superficiais direto separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 100 hectares para a MBHRM.

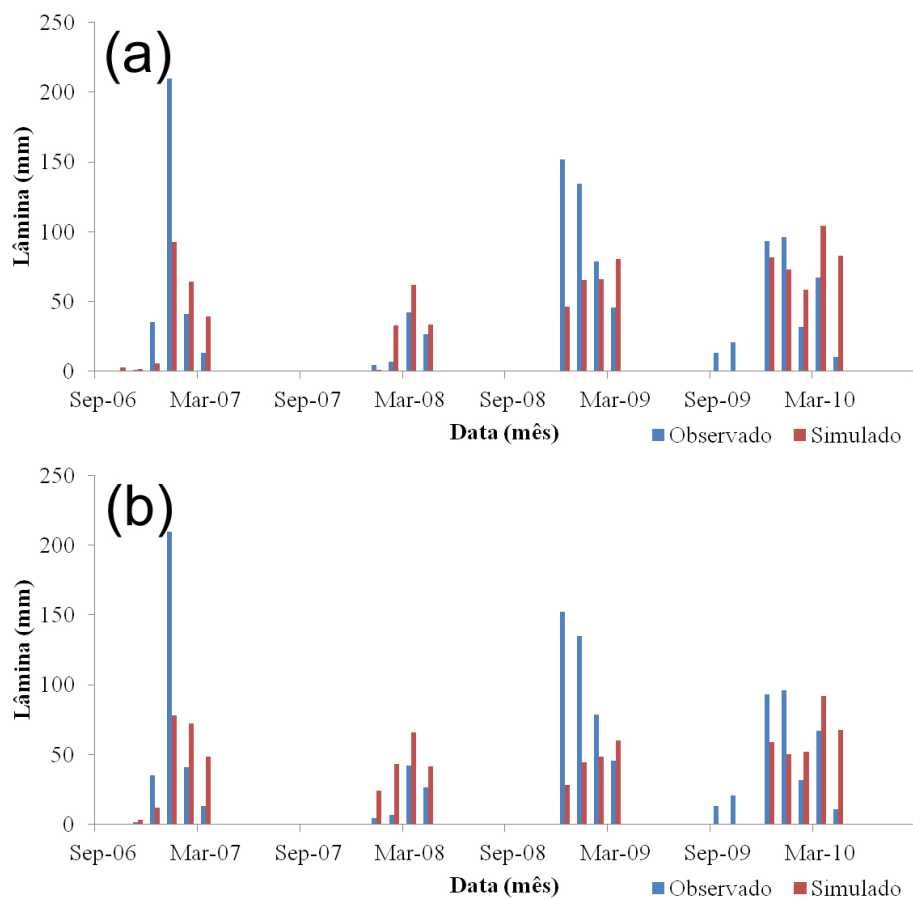


Gráfico 12 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 100 hectares

O escoamento de base apontou uma superestimativa de 47,1% e 110,3% entre os valores observados e simulados no período para as discretizações de três e uma camada de solo, respectivamente. Manteve-se a dificuldade de representar a água no solo para os períodos de recessão, onde esse tipo de escoamento tende a ser superestimado e após o início do período de recarga em que o mesmo tende a ser subestimado.

O desvio entre o escoamento superficial direto total simulado e o observado no período foi de -11,5% e -20,8% para as discretizações de três e uma camada de solo, respectivamente. Esse desempenho indica uma representação aceitável do escoamento superficial direto na MBHRM.

Na Tabela 19 estão expressos os valores da evapotranspiração estimada pelo modelo e calculada pelo balanço hídrico simples para ambas discretizações do perfil do solo e com a discretização espacial de 100 hectares.

Tabela 19 Valores de evapotranspiração estimados e calculados para MBHRM com discretização de 100 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada

Ano hidrológico	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Calculado	Simulado	Desvio (%)	Calculado	Simulado	Desvio (%)
06/07	846,9	1015,1	19,8	846,9	749,4	-11,5
07/08	1099,9	743,5	-32,4	1099,9	609,1	-44,6
08/09	1147,0	687,3	-40,1	1147,0	641,1	-44,1
09/10	1077,4	738,3	-31,5	1077,4	566,6	-47,4
Média	1042,8	796,0	-23,7	1042,8	641,6	-38,5

A evapotranspiração total simulada foi subestimada em 23,7% e 38,5% para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente, quando comparado ao total calculado para o período. Esses valores encontrados são uma consequência da dificuldade que o modelo tem em expressar a retirada de água do solo para atender a demanda evaporativa, promovendo como compensação a redução da evapotranspiração real, ocorrida no período, principalmente na discretização com uma camada de solo.

4.4 Discretização da drenagem em 10 hectares para a MBHRM

A partir de uma discretização mínima de 10 hectares como área de contribuição para originar a rede de drenagem o *SWAT* gerou 19 sub-bacias com áreas variando entre $0,005\text{km}^2$ e $0,49\text{km}^2$ (FIGURA 17).

Essa divisão da bacia permitiu ao modelo gerar 186 URHs, resultando em média 10 URHs para cada sub-bacia, de maneira que foram selecionados os parâmetros da URH mais representativa para simulação do escoamento em cada sub-bacia e propagação para a MBHRM.

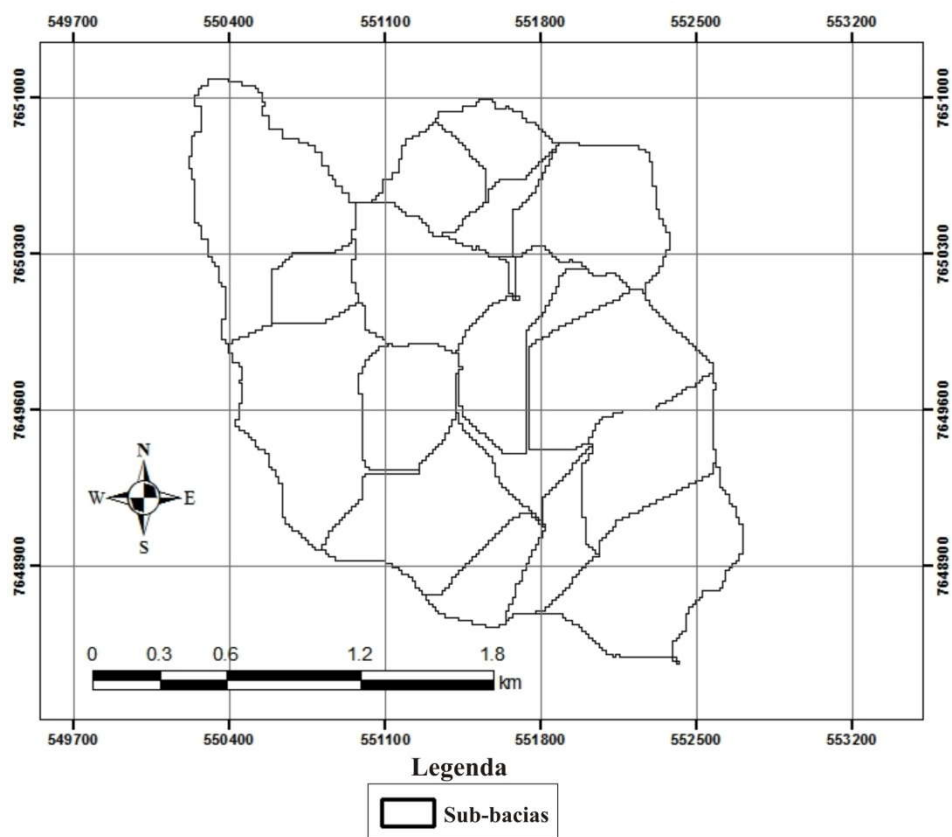


Figura 17 Divisão da MBHRM em sub-bacias com discretização de 10 hectares

A partir das definições de sub-bacias executou-se a análise de sensibilidade automática. Na Tabela 20 está representada a classificação dos parâmetros associados à simulação de fluxo pelo *SWAT* na MBHRM com discretização de 10 hectares para ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 20 Ordem de sensibilidade dos parâmetros do modelo *SWAT* para a MBHRM com discretização de 10 hectares em ambas discretizações do solo

Gradação de sensibilidade	Parâmetros	
	3 Camadas de solo	1 Camada de solo
1	Alpha_Bf	Alpha_Bf
2	Sol_Z	Gwqmn
3	Gwqmn	Esco
4	Esco	CN2
5	CN2	Sol_Awc
6	Sol_Awc	Gw_Revap
7	Blai	Sol_Z
8	Gw_Revap	Blai
9	Canmx	Canmx
10	Slope	Ch_K2
11	Sol_K	Sol_K
12	Ch_K2	Ch_N2
13	Gw_Delay	Slope
14	Ch_N2	Revapmn
15	Biomix	Gw_Delay
16	Sol_Alb	Epc
17	Epc	Sol_Alb
18	Revapmn	Biomix
19	Surlag	Surlag
20	Ssubbsn	Ssubbsn

Observou-se o mesmo desempenho da análise de sensibilidade registrada com a discretização de 100 hectares para a MBHRM. O parâmetro Sol_Z novamente foi desconsiderado no processo de calibração e substituído pelo parâmetro posterior na ordem de sensibilidade.

Foram realizados os processos de calibração para o período entre 01 de setembro de 2006 e 31 de agosto de 2009 na MBHRM. Na Tabela 21 estão expostos os parâmetros utilizados com os valores calibrados pelo *SWAT* para discretização espacial de 10 hectares e ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 21 Parâmetros utilizados na calibração do modelo *SWAT* para a MBHRM com discretização de 10 hectares

Calibração automática com 10 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,99 (2,3 dias)	Alpha_Bf	0,19 (12,1 dias)
Sol_Z	-24,9% *	Gwqmn	968,2 mm
Gwqmn	680,6 mm	Esco	0,0 (Adimensional)
Esco	0,68 (Adimensional)	CN2	-10,9%*
CN2	-25,0%*	Sol_Awc	25,0%*
Sol_Awc	25,0%*	Gw_Revap	0,033 (Adimensional)
Blai	0,21 m ² .m ⁻²	Sol_Z	23,9%*
Gw_Revap	0,029 (Adimensional)	Blai	0,002 m ² .m ⁻²
Canmx	0,0 mm	Canmx	3,2 mm
Slope	24,9%*	Ch_K2	150,0 mm.h ⁻¹
Calibração automática com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)	Alpha_Bf	1,0 (2,3 dias)
Gwqmn	0,0 mm	Gwqmn	0,0 mm
Esco	0,0 (Adimensional)	Esco	0,0 (Adimensional)
CN2	-25,0%*	CN2	-24,8%*
Calibração manual com 4 parâmetros			
3 Camadas de solo		1 Camada de solo	
Parâmetro	Valor calibrado	Parâmetro	Valor calibrado
Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)	Alpha_Bf	0,0115 (200 dias)
Gwqmn	3,0 mm	Gwqmn	3,0 mm
Esco	0,50 (Adimensional)	Esco	0,50 (Adimensional)
CN2	-20,0%*	CN2	-20,0%*

* O modelo calibra esses parâmetros com base em porcentagens variando seus valores iniciais que estão em função da classe, uso e camada do solo a que se referem

Novamente, os valores atribuídos pelo *SWAT* aos parâmetros nos processos de calibração automática fugiram de valores reais que de fato pudessem representar de forma satisfatória o escoamento na MBHRM.

Na Tabela 22 estão representados os resultados das estatísticas de precisão aplicadas na avaliação do desempenho do *SWAT* na simulação hidrológica da MBHRM tanto para ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 22 Estatísticas de precisão resultantes das calibrações e validação do *SWAT* aplicadas a MBHRM com discretização de 10 hectares

Perfil do solo	Fase	C_{NS}	R²	P_{bias} (%)
3 Camadas	AutoCal10	0,53	0,74	-13,58
	AutoCal4	0,39	0,73	18,61
	Manual	0,25	0,60	19,73
	Validação	-1,37	0,51	28,12
1 Camada	AutoCal10	0,55	0,77	-23,24
	AutoCal4	0,32	0,71	44,49
	Manual	0,19	0,55	47,40
	Validação	-1,12	0,48	51,06

O modelo apresentou ligeira melhora nas estimativas da MBHRM com discretização de 10 hectares da rede de drenagem e discretização de três camadas de solo em relação à mesma condição para 100 hectares de discretização da rede de drenagem na referida bacia.

Situação oposta aconteceu para a discretização do perfil do solo em uma camada que apresentou ligeira depreciação quando comparada a mesma situação na discretização de 100 hectares para MBHRM.

Os valores do C_{NS} e P_{bias} apresentaram desempenho semelhante à discretização de 100 hectares com valores próximos do limite inferior ou extrapolando este quando comparados a valores recomendados na literatura,

enquanto que o R^2 continuou demonstrando pouca sensibilidade em expressar o desempenho do modelo nos processos de simulação executados.

Nos Gráficos 13 e 14 estão representados os hidrogramas observados e simulados pelo modelo *SWAT* para a MBHRM para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente.

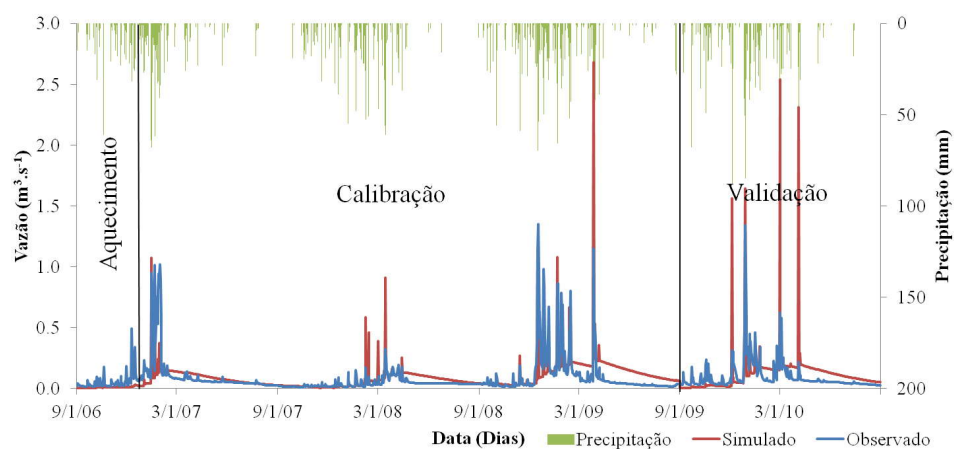


Gráfico 13 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas

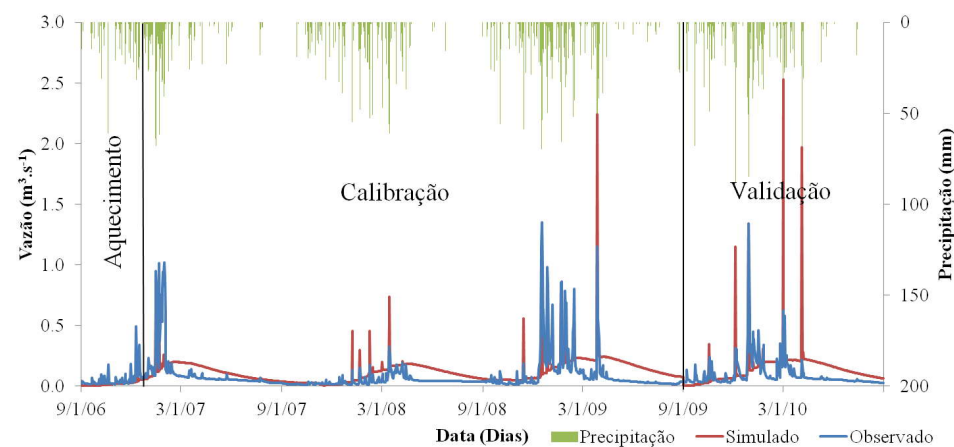


Gráfico 14 Hidrogramas observado e simulado pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em uma camada

Os hidrogramas em ambas discretizações do perfil do solo com 10 hectares de discretização da rede de drenagem foram semelhantes ao da discretização de 100 hectares para essa bacia não permitindo considerações diferentes das já expostas quando se discutiu este tema para a MBHRM na seção anterior.

Na Tabela 23 estão dispostos os valores das permanências analisadas, bem como, dos índices representativos da relação vazão média e permanência com seus respectivos desvios para a MBHRM com a discretização de 10 hectares em ambas discretizações do perfil de solo.

Tabela 23 Índices representativos de permanências e desvios das vazões observadas e simuladas pelo *SWAT* para a MBHRM em ambas discretizações do perfil de solo

Índices	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Observado	Simulado	Desvio (%)	Observado	Simulado	Desvio (%)
Q5%	0,274	0,210	-23,4	0,274	0,227	17,2
Q10%	0,165	0,184	11,5	0,165	0,211	27,9
Q25%	0,074	0,132	78,4	0,074	0,173	133,8
Q50%	0,043	0,069	60,5	0,043	0,099	130,2
Q75%	0,030	0,025	-16,7	0,030	0,050	66,7
Q90%	0,018	0,009	-50,0	0,018	0,019	5,6
Q95%	0,015	0,006	-60,0	0,015	0,007	-53,3
Qm	0,083	0,097	16,6	0,083	0,118	42,5
rcp95	0,180	0,062	-65,7	0,180	0,059	-67,3
rcp50	0,517	0,712	37,7	0,517	0,835	61,6
q (l/s.km ²)	17,7	20,6	16,6	17,7	25,2	42,5

A simulação na MBHRM com discretização de 10 hectares apresentou resultados semelhantes na estimativa das permanências em relação à discretização de 100 hectares para ambas discretizações do perfil do solo apresentando desempenho tendencioso na estimativa de tais índices.

A análise desses índices torna-se interessante à medida que eles fornecem base para avaliação da disponibilidade hídrica da bacia e são utilizados como instrumentos de gestão, sendo necessária a convergência entre os valores simulados e observados para a recomendação do modelo.

No Gráfico 15 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos de base separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 10 hectares para a MBHRM.

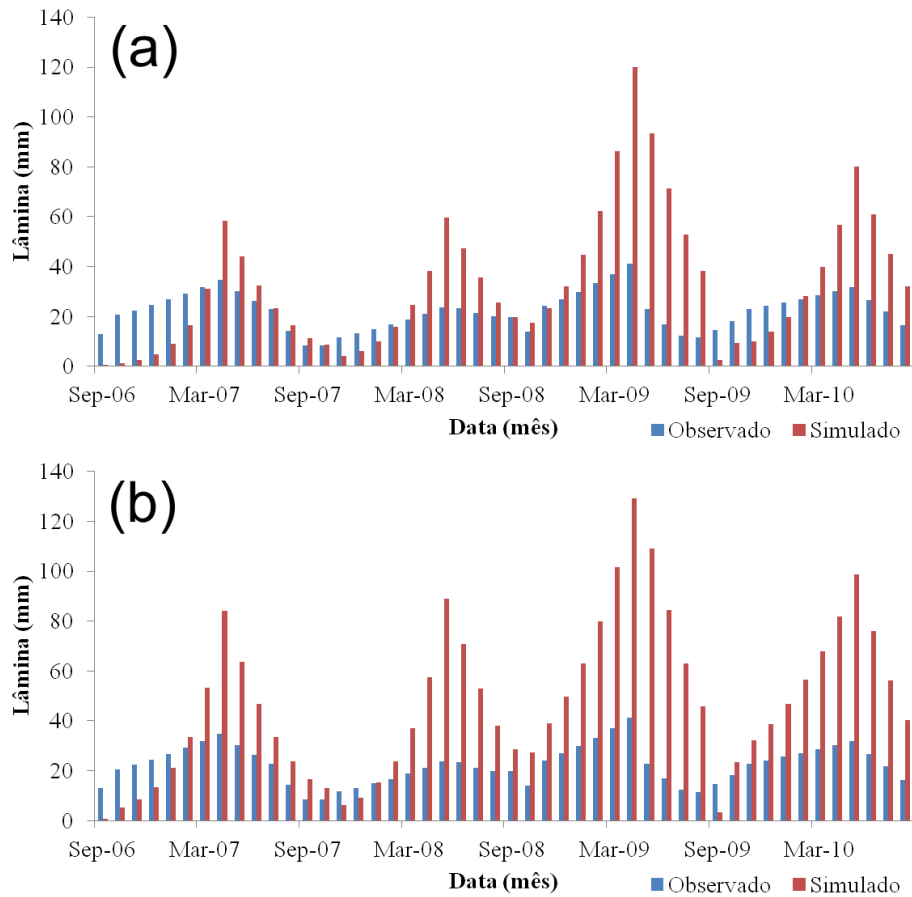


Gráfico 15 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento de base para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares

No Gráfico 16 estão representadas as lâminas totais mensais dos escoamentos superficiais direto separados pelo método de Barnes das séries observada e simulada para ambas discretizações do perfil de solo com a discretização de 10 hectares para a MBHRM.

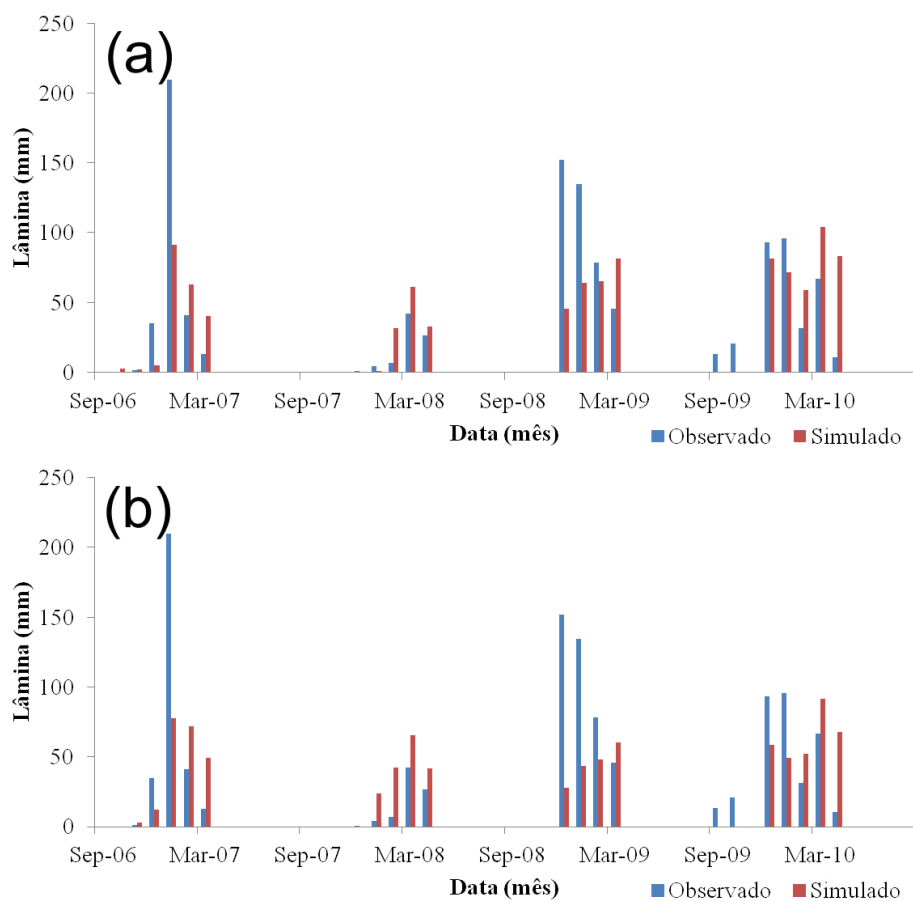


Gráfico 16 Lâminas totais mensais referentes ao escoamento superficial direto para as séries observada e simulada pelo *SWAT* para a MBHRM com discretização do perfil do solo em três camadas (a) e uma camada de solo (b) com a discretização de 10 hectares

O escoamento de base apontou uma superestimativa de 47,6% e 110,0% entre os valores observados e simulados no período para as discretizações de três e uma camada de solo, respectivamente, similar aos resultados encontrados para discretização de 100 hectares para a rede de drenagem.

O desvio entre o escoamento superficial direto total simulado e o observado no período foi de -12,4% e -21,1% para as discretizações de três e

uma camada de solo, respectivamente, mantendo também a similaridade com a discretização de 100 hectares.

Na Tabela 24 estão expressos os valores da evapotranspiração estimada pelo modelo e calculada pelo balanço hídrico simples para ambas discretizações do perfil do solo e com a discretização espacial de 10 hectares.

Tabela 24 Valores de evapotranspiração estimados e calculados para MBHRM com discretização de 10 hectares e discretização do perfil do solo em três e uma camada

Ano hidrológico	3 camadas de solo			1 camada de solo		
	Calculado	Simulado	Desvio (%)	Calculado	Simulado	Desvio (%)
06/07	846,9	1014,8	19,8	846,9	749,8	-11,5
07/08	1099,9	743,5	-32,4	1099,9	609,3	-44,6
08/09	1147,0	687,2	-40,1	1147,0	641,4	-44,1
09/10	1077,4	738,1	-31,5	1077,4	566,7	-47,4
Média	1042,8	795,9	-23,7	1042,8	641,8	-38,5

As dificuldades do modelo em representar a evapotranspiração na MBHRM persistiram apresentando uma tendência de subestimativa no período de 23,7% e 38,5% para as discretizações do perfil do solo em três e uma camada, respectivamente.

4.5 Avaliação do desempenho do *SWAT* em diferentes escalas espaciais

Na Tabela 25 estão expressos alguns resultados de destaque nos processos de simulação aplicados neste estudo para as duas bacias e em todas as discretizações abordadas.

Tabela 25 Resumo das principais informações obtidas para as duas bacias estudadas em todos os níveis de discretização abordados

Discretização com três camadas de solo				
Índices	BHRJ (32 km²)		MBHRM (4,7 km²)	
	100 hectares	10 hectares	100 hectares	10 hectares
C _{NS} *	0,57	0,58	0,26	0,25
P _{bias} *	-14,92	9,41	19,84	19,73
q (l/s.km ²)	17,2	17,3	20,7	20,6
rcp50*	5,4	5,5	37,4	37,7
rcp95*	-74,0	-77,1	-65,7	-65,7
Escoamento superficial direto**	-3,9	-6,8	-11,5	-12,4
Escoamento base**	3,3	5,5	47,1	47,6
Evapotranspiração***	-3,8	-4,9	-23,7	-23,7
Discretização com uma camada de solo				
Índices	BHRJ (32 km²)		MBHRM (4,7 km²)	
	100 hectares	10 hectares	100 hectares	10 hectares
C _{NS} *	0,47	0,47	0,20	0,19
P _{bias} *	-34,82	-34,46	47,56	47,40
q (l/s.km ²)	20,4	20,3	25,3	25,2
rcp50*	23,2	22,6	61,3	61,6
rcp95*	-96,6	-98,3	-62,6	-67,3
Escoamento superficial direto**	-14,3	-14,7	-20,8	-21,1
Escoamento base**	41,9	41,1	110,3	110,0
Evapotranspiração***	-24,0	-24,5	-38,5	-38,5

* Expressa a estatística de precisão entre os valores observados e simulados

** Expressa o desvio (%) entre os valores totais observados e simulados no período

*** Expressa o desvio (%) entre os valores totais calculados e simulados no período

As discretizações da rede de drenagem para a BHRJ (mesoescala) não apresentaram diferenças significativas dos volumes simulados. A discretização do perfil de solo em três camadas proporcionou melhor desempenho quando comparada à discretização com uma camada de solo apenas com base nas estatísticas de precisão.

No tocante ao desempenho do *SWAT* na microescala, pôde-se observar que o modelo apresentou grandes dificuldades em expressar alguns fenômenos, a saber: escoamento de base e evapotranspiração, fato que induziu a estimativas

divergentes das observadas na MBHRM. A discretização do perfil de solo em três camadas também favoreceu o processo de modelagem do escoamento na MBHRM. Contudo, ao simular o escoamento na MBHRM o modelo *SWAT* não representou de maneira adequada tal fenômeno, implicando na não recomendação de aplicação do modelo na referida bacia.

Na Tabela 26 estão expostos os tempos das melhores simulações para as fases de calibração automática e a quantidade de ciclos executados pelo modelo para achar a melhor resposta à função-objetivo.

Tabela 26 Tempo de simulação e quantidade de ciclos executados pelo *SWAT* para as bacias estudadas nas calibrações automáticas

Bacia	Camadas do solo	Parâmetros	Discretização (ha)	Tempo (horas)	Quantidade de ciclos
Jaguara	3	4	100	1.10	1987
			10	6.47	1905
		1	10	100	2.47
	10			14.90	4456
	4		100	100	1.27
		10		7.98	3996
10		100	100	2.13	2449
	10		16.52	5016	
	Marcela	3	4	100	0.15
10				0.70	963
1			10	100	0.57
		10		5.13	5658
		4	100	100	0.17
10				0.97	1335
10	100		100	0.45	3517
		10	3.65	5220	

Essa tabela apresenta um dado de grande relevância visto que uma maior discretização exige um maior esforço computacional e demanda um maior tempo para processar o volume de informação requerida.

Tripathi e Raghuwanshi (2006) ao analisarem o desempenho do *SWAT* na simulação do escoamento em bacias com áreas entre 21,3 e 17941km² verificaram a insensibilidade do modelo em melhorar a resposta da simulação ao variar a quantidade de URHs e sub-bacias.

Estudo realizado por Kumar (2008) com discretização em seis e oito níveis diferentes da rede de drenagem para duas bacias nos EUA indicou que não ocorreram mudanças significativas no desempenho do modelo na simulação dessas bacias.

O *SWAT* foi desenvolvido com o propósito de representar o escoamento em bacias de médio e grande portes não instrumentadas. Em grandes bacias há uma amortização dos fenômenos hidrológicos associados à dinâmica da água no solo e são mais destacados os fenômenos de propagação do escoamento sobre a superfície e na rede de drenagem. Já nas microbacias os fenômenos se processam de maneira mais instantânea com uma dinâmica maior, fato que pode ter provocado a instabilidade do modelo em representar o escoamento na MBHRM.

Outro ponto importante a ser destacado é a variabilidade temporal dos fenômenos climáticos (precipitação, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, etc.) que não foi objeto direto deste estudo, mas que promovem interferências significativas no âmbito da modelagem hidrológica.

Vale ressaltar que o processo de modelagem é cercado de incertezas inerentes tanto na conceituação do modelo quanto na identificação da variabilidade dos fenômenos naturais, sendo necessária uma sensibilidade apurada do analista para de fato identificar se o modelo aplica-se ou não para um estudo específico.

5 CONCLUSÕES

O modelo hidrológico *SWAT* representou de forma satisfatória o escoamento para a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara conforme expressaram os índices estatísticos aplicados na análise de precisão do modelo.

A discretização da rede de drenagem para a BHRJ não resultou em melhorias significativas na simulação do escoamento e, dessa maneira, recomenda-se a aplicação da discretização de 100 hectares para definição da rede de drenagem, visto que a mesma apresenta resultados adequados à bacia em questão.

Em relação à discretização do perfil do solo em camadas, recomenda-se para a simulação do escoamento com o *SWAT* na BHRJ o emprego de três camadas de solo, visto que essa discretização proporcionou melhoras significativas no desempenho do modelo.

O modelo *SWAT* não apresentou o mesmo desempenho expresso na mesoescala para a microescala. O modelo demonstrou-se deficiente na simulação do escoamento em todos os níveis de discretizações aplicados na microbacia hidrográfica do Ribeirão Marcela promovendo grandes desvios dos componentes do balanço hídrico e dos índices quali-quantitativos empregados neste estudo.

Por fim, o *SWAT* mostrou-se mais susceptível aos parâmetros associados ao solo e a cobertura vegetal para simulação do escoamento, fato demonstrado pelos resultados obtidos das análises de sensibilidade aplicadas às bacias em estudo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. B. **Análise comparativa do uso de estatística clássica e a geoestatística na espacialização da região semi-árida.** 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.
- ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio Claro, v. 33, p. 117-127, 2003.
- ANDRADE, M. A. **Simulação hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região do Alto Rio Grande.** 2011. 103 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ARAÚJO, A. R. **Levantamento de solos na bacia do Alto Rio Grande.** 2006. 268 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- ARAÚJO FILHO, P. F. et al. Modelagem hidrológica da bacia do Riacho Gameleira (Pernambuco) utilizando TOPSIMPL, uma versão simplificada do modelo TOPMODEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 61-72, 2005.
- ARCHFIELD, S. A. et al. **The Massachusetts sustainable-yield estimator: a decision support tool to assess water availability at ungaged stream locations in Massachusetts.** Reston: U. S. Geological Survey Scientific Investigations, 2010. 41 p.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, London, v. 142, n. 1-4, p. 47-69, 1993.

ARNOLD, J. G. et al. Large area hydrologic modeling and assessment: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998. Part I.

BALTOKOSKI, V. **Modelo SWAT2005 aplicado às sub-bacias dos rios Conrado e Pato Branco/PR**. 2008. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade do Oeste do Paraná, Cascavel, 2008.

BARNES, B. S. The structure of discharge recession curve. **Transaction of American Geophysis Union**, Oxford, v. 20, p. 721-725, 1939.

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F. **ANSWERS user's manual**. Chicago: United States Environmental Protection Agency, 1981. 54 p.

BESKOW, S. **LASH model**: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. 132 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 265-274, 2011.

BEVEN, K. et al. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer model of watershed hydrology**. Fort Collins: Water Resource, 1994. 1130 p.

BLAINSKI, E. et al. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do Rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 24, n. 1, p. 65-70, mar. 2011.

BRANDÃO, V. S. et al. **Infiltração da água no solo**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 120 p.

CALIJURI, M. C.; BUBEL, A. P. M. Conceituação de microbacias. In: LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. (Org.). **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: RiMA, 2006. 226 p.

CHAGAS, R. M. et al. Modelagem hidrológica da sub-bacia hidrográfica do Rio Piauitinga utilizando o modelo SMAP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009. 1 CD ROM.

CHAPLOT, V. Impacto of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO₃-N loads predictions. **Journal of Hydrology**, London, v. 312, p. 207-222, 2005.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 27-39, 2003.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

CRAWFORD, M.; LINSLEY, R. **Digital Simulation in hydrology**. Stanford: Stanford University, 1966. (Technical Report, 39).

DAHL, M. et al. Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction. **Journal of Hydrology**, London, v. 344, p. 1-16, Sept. 2007.

DI LUZIO, M.; SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution. **Transactions in GIS**, Cambridge, v. 8, n. 1, p. 113-136, 2004.

DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Washington: ARS - U. S. Department of Agriculture, 1973. (Technical Bulletin, 1948).

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 8, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

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

ECKHARDT, K. et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. **Physics and Chemistry of the Earth**, Bristol, v. 27, n. 9-10, p. 641-644, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro, 1979. 83 p.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 78 p.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A.; TOLEDO, J. H. Classificação de áreas irrigadas por pivôs centrais utilizando como base a segmentação. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 145-152, 2011.

FILL, H. D. et al. Balanço hídrico da bacia do Rio Birigui, PR. **Revista RA'E GA**, Curitiba, v. 9, p. 59-67, 2005.

FIGLIOLINI, A. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; FRANCO, A. P. B. Avaliação do desempenho de equações de regionalização de vazões na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, Goiás, Brasil. **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 3, n. 2, p. 1-16, 2008.

FOLEY, J. A. et al. Global consequences of land use. **Science**, London, v. 309, p. 570-574, 2005.

GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

GEZA, M.; MCCRAY, J. E. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. **Journal of Environmental Management**, Berkeley, v. 88, p. 393-406, 2008.

GIBSON, C. C.; OSTROM, E.; AHN, T. K. The concept of scale and the human dimensions of global change: a survey. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 32, p. 217-239, 2000.

GITAU, M. W.; CHAUBEY, I. Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds. **Water**, Oxford, v. 2, p. 849-871, 2010.

GITHUI, F.; THAYALAKUMARAN, K. The effect of discretization of hydrologic response units on the performance of SWAT model in simulating flow and evapotranspiration. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MODELLING AND SIMULATION, 19., 2011, Perth. **Anais...** Perth: [s. n.], 2011.

GOTTSCHALK, L.; MOTOVILOV, Y. Macro-scale hydrological modelling: a scandinavian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON: 'CAN SCIENCE AND SOCIETY SAVE THE WATER CRISIS IN THE 21ST CENTURY - REPORTS FROM THE WORLD', 21., 2000, Tokyo. **Anais...** Tokyo: Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p. 38-45.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 23, p. 422-434, 2008.

KRAUSKOPF NETO, R.; GUETTER, A. K.; MINE, M. R. M. Modelo hidrológico com atualização de estado:: modelagem hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 93-103, 2007. Parte I.

KRYSANOVA, V.; MULLER-WOHLFEIL, D. I.; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 106, n. 2/3, p. 261-289, 2005.

KUMAR, S. **Studying the effect of spatial scaling on hydrologic model calibration using soil and water assessment tool (SWAT)**. 2008. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Purdue University, West Lafayette, 2008.

LEGATES, D. R.; MACCBE, G. J. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 26, p. 69-86, 1999.

LELIS, T. A. et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 623-634, 2012.

LIMA, W. P.; ZAKIA M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES; R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. (Ed.). **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000. p. 33-43.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 147-155, jan./mar. 2003.

MAGALHÃES, L. P. C. **Modelo integrado para simulação de sistemas hídricos**. 2005. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

- MEDEIROS, N. C.; SILVA, E. A.; NOGUEIRA, J. R. Segmentação morfológica de imagens utilizando o gradiente morfológico multi-escala. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 54, p. 77-85, 2002.
- MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 9, n. 2, p. 384-394, 1973.
- MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Schaafein, v. 75, p. 235-247, 2008.
- MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas I: Conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 59-80, 1997.
- MENEZES, M. D. et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha- Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 82, p. 175-184, jun. 2009.
- MOTTA, P. E. F. et al. **Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras de microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/ Carmargos-MG**. Lavras: UFLA/CEMIG, 2001. 51 p.
- MORAES, J. M. et al. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.
- MOULTON, T. P.; SOUZA, M. L. Conservação com base em bacias hidrográficas. In: BERGALLO, H. G. et al. (Org.). **Biologia da conservação**. Rio de Janeiro: EUERJ, 2006. 25 p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

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

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool input/output file documentation**: version 2005. Temple: Blackland Research Center, 2004.

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

PAIM, J. B.; MENEZES, J. T. Estimativa do balanço sedimentar da bacia do Rio Tijucas (SC-Brasil) a partir da aplicação do modelo hidrológico SWAT. **Revista Geográfica Acadêmica**, Goiânia, v. 3, n. 2, p. 1-10, 2009.

PEDROTTI, A.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. **Avanços em ciência do solo**: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental. São Cristóvão: EdUFS, 2009. 212 p.

PINTO, D. B. F. et al. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for sediment transport simulation at headwater watershed in Minas Gerais state, Brazil. **Transactions of ASABE**, St. Joseph, v. 56, p. 1-13, 2012.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 87 p.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica**: aplicação a bacias hidrográficas. 2003. 148 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação:** estudo de caso na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco. 2005. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SANTANA, D. P. **Manejo integrado de bacias hidrográficas.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63 p.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para estimativa da chuva excedente cm o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos: Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. Parte 2.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos.** Brasília: Agência Nacional de Águas, 2000.

SILANS, A. M. P. et al. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD À bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.

SILANS, A. M. P. et al. Impacto da incerteza na representatividade da repartição espacial da precipitação sobre os hidrogramas e as curvas de permanência obtidos de um modelo chuva-vazão distribuído. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 59-71, 2009.

SILVA, A. M. et al. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006.

SLOAN, P. G.; MOORE, I. D. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 20, n. 12, p. 1815-1822, 1984.

SOIL CONSERVATION SERVICE. **SCS national engineering handbook**: section 4: hydrology. Minnesota: The Service, 1972.

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of basin-scale water quality model with GIS. **Water Resources Bulletin**, Baton Rouge, v. 30, p. 453-462, 1994.

SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL. ArcSWAT. College Station, 2007. Disponível em: <www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html>. Acesso em: 2 fev. 2012.

TEODORO, W. L. I. et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, Araraquara, n. 20, p. 137-156, 2007.

TRIPATHI, M. P.; RAGHUWANSHI, N. S.; RAO, G. P. Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 20, n. 5, p. 1137-1156, 2006.

TRIVELATO, G. C. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. São José dos Campos: INPE, 2003. 20 p. (Nota Técnica).

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia, ciências e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; ORDONEZ, J. S.; SIMÕES, M. L. Modelo matemático precipitação-vazão IPH-II: alguns resultados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 4., 1981, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABRH, 1981.

TUCCI, C. E. M. Processos hidrológicos e os impactos do uso do solo. In: TUCCI, C. E. M.; BRAGA, B. P. F. (Org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Brasília: ABRH, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: EdUFRGS, 2002. 256 p.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Revista Ciência e Cultura**, Campinas, v. 55, n. 4, p. 31-33, 2003.

TUNDISI, J. G. Limnologia e gerenciamento integrado de recursos hídricos: Avanços conceituais e metodológicos. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, n. 21, p. 9-20, 2001.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do código florestal nos recursos hídricos. **Biota Neotropica**, Campinas, v. 10, n. 4, p. 67-76, 2010.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Water for people, water for life: un world water development report (WWDR)**. Paris, 2003. 136 p.

VANDENBERGHE, V.; VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Sensitivity analysis and calibration of the parameters of ESWAT: application to the River Dender. **Water Science and Technology**, Vienna, v. 43, p. 295-300, 2001.

VAN GRIENSVEN, A. et al. Global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, London, v. 324, n. 1/4, p. 10-23, 2006.

VAN GRIENSVEN, A. **Sensitivity, auto-calibration, uncertainty and model evaluation in SWAT 2005**. 2005. Disponível em: <<http://groups.google.com/group/swatuser/files>>. Acesso em 17 fev. 2012.

VAN LIEW, M. W. et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: a comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrological Research**, London, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na Região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. 2011. 287 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

VON STACKELBERG, N. O. et al. Simulation of the hydrologic effects of forestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, p. 455-468, 2007.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration and validation for a multisite and multivariable SWAT model. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 41, p. 1077-1089, 2005.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.

WINCHELL, M. et al. **ArcSWAT 2.3.4 interface for SWAT2005: user's guide**. Temple: Blackland Research Center, 2009.

WU, K.; JOHNSTON, C. A. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes watershed: a case study with the SWAT model. **Journal of Hydrology**, London, v. 337, p. 187-199, 2007.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 2, p. 5-18, 1993.

ANEXOS

ANEXO A – Relação de parâmetros físico-hídricos do solo requeridos pelo *SWAT*

Camada	Z	Areia	Silte	Argila	Db	AWC	K	Porosidade	C	K_USLE	Albedo	Grupo hidrológico
Latossolo												
I	411	21,0	19,0	60,0	1,17	0,198	14,5		2,1	0,10		
II	1434	18,2	17,8	64,0	1,04	0,206	14,5	58	1,0	0,12	0,15	B
III	2422	17,0	19,0	64,0	1,14	0,208	14,5		0,5	0,13		
Cambissolo												
I	320	30,5	18,7	50,8	1,50	0,196	9,6		2,2	0,10		
II	703	24,8	19,8	55,4	1,35	0,212	9,6	49	0,8	0,13	0,15	C
III	1467	21,7	30,3	48,0	1,28	0,221	9,6		0,3	0,15		
Neossolo												
I	350	21	28	51	1,8	0,216	9,0	57	1,8	0,12	0,15	C

Em que z corresponde a profundidade do solo na camada (mm); *Areia*, *Silte* e *Argila* (% de peso do solo); *Db* corresponde à densidade do solo (g.cm^{-3}); *AWC* corresponde à capacidade armazenamento de água no solo ($\text{mmH}_2\text{O.mmSolo}^{-1}$); *K* corresponde à condutividade hidráulica saturada do solo (mm.h^{-1}); *C* corresponde ao teor de carbono no solo (% de peso do solo); e *K_USLE* corresponde ao fator de erodibilidade do solo

ANEXO B – Parâmetros passíveis de calibração do fluxo pelo *SWAT*

Processo	Parâmetro	Descrição	Unidades	Limite Inferior	Limite Superior
Evapotranspiração	BLAI	Índice de área foliar máximo	m ² .m ⁻²	0	10
	CANMX	Quantidade de água máxima interceptada pela vegetação	mm	0	10
	ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	-	0	1
	SOL_ALB	Albedo do solo	-	0	1
Manejo do solo	BIOMIX	Eficiência de mistura biológica do solo	-	0	1000
Escoamento superficial	CN2	Curva-Número inicial para a condição de umidade II	-	0	100
	SLOPE	Declividade média da sub-bacia	mm	0	0,6
	CH_N2	Número de <i>Manning</i>	-	0,01	0,50
	SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial	Dias	0	10
	SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta da sub-bacia	m	10	150
Água no solo	SOL_K	Condutividade hidráulica saturada do solo	mm.h ⁻¹	0	100
	SOL_AWC	Capacidade de armazenamento de água no solo	mmH ₂ O.mmSolo ⁻¹	0	1
Água subterrânea	SOL_Z	Profundidade da camada de solo	mm	0	300
	EPCO	Coefficiente de compensação de absorção de água pelas plantas	-	0	1
	GWQMN	Límite de água no aquífero raso para ocorrência de fluxo de base	mm	0	100
	ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base	Dias	0	1
	GW_REVAP	Coefficiente de ascensão da água à zona saturada	-	0,02	0,20
	REPAVPMN	Límite de água no solo para ocorrência da ascensão capilar à zona não saturada	mm	0	100
	GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero	Dias	0	50
	Perda de água por transmissão	CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva do canal	mm.h ⁻¹	0

Fonte: Adaptado de Andrade (2011)