



MÁRCIO ADALBERTO ANDRADE

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NUMA BACIA
HIDROGRÁFICA REPRESENTATIVA DOS
LATOSSOLOS NA REGIÃO ALTO RIO
GRANDE**

**LAVRAS – MG
2011**

MÁRCIO ADALBERTO ANDRADE

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NUMA BACIA HIDROGRÁFICA
REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NA REGIÃO ALTO RIO
GRANDE**

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

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

**LAVRAS – MG
2011**

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

Andrade, Márcio Adalberto.

Simulação hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos latossolos na região Alto Rio Grande / Márcio Adalberto Andrade. – Lavras : UFLA, 2011.

102 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. SWAT. 2. Modelos hidrológicos. 3. Alto Rio Grande. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 551.48

MÁRCIO ADALBERTO ANDRADE

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NUMA BACIA HIDROGRÁFICA
REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NA REGIÃO ALTO RIO
GRANDE**

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

APROVADA em 05 de agosto de 2011

Dr. Samuel Beskow	UFPEL
Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Dr. Athadeu Ferreira da Silva	Codevasf

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

**LAVRAS – MG
2011**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela graça da vida e por ter me concedido sabedoria para poder realizar este trabalho.

A minha mãe Gessi, pela dedicação, confiança e amor e ao meu pai Ademar pelo apoio e incentivo. Ao meu irmão, Paulo, pela amizade e por acreditar em mim.

A todos da minha família, principalmente, minhas avós, Ana Maria de Jesus (*in memoriam*) e Isaura, pelo exemplo de luta e vitória.

À Universidade Federal de Lavras e ao Setor de Engenharia de Água e Solo, pela oportunidade de realizar este trabalho.

À FAPEMIG, projeto PPM IV – 060/10 (Pesquisador Mineiro), pelo apoio a esta pesquisa.

À Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Parnaíba (Codevasf), pela oportunidade a mim concedida de realizar o Mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos de julho de 2008 a março de 2009.

Ao professor Carlos Rogério de Mello, orientador, pelo voto de confiança, pelos conhecimentos transmitidos e pela paciência.

Aos professores Antônio Marciano da Silva, Samuel Beskow, Gilberto Coelho, pela atenção, dedicação e orientação, em todos os momentos que precisei, desde os tempos de Iniciação Científica até o Mestrado.

Ao meu colega Mateus Fonseca Durães, pela ajuda disponibilizada para entender o correto funcionamento do modelo SWAT.

Aos amigos Pedro Lima, Rafael Teixeira, Mateus Bueno, Mateus Colares, Lidane Aparecida, Rosângela, Leo Ávila, Fábio Ponciano, Murilo Barros, Camila Alvarenga, pela convivência e amizade.

Minha gratidão às pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para minha formação profissional. A todos, sou eternamente grato.

RESUMO

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste numa das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos, devido à possibilidade de predição de impactos hidrológicos decorrentes de alterações no uso do solo. Neste sentido objetivou-se com este trabalho, aplicar o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrológica da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (BHRJ), localizada na região Alta Rio Grande (MG), a montante da Usina Hidrelétrica de Camargos/MG. A aplicação do modelo requer mapas georreferenciados de uso e tipos de solos, modelo digital de elevação (MDE), além de dados tabulares de clima, precipitação e vazão. Foi utilizada uma série histórica de 31 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2010, sendo que a mesma foi dividida em três períodos. O primeiro de 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2008, utilizado para a calibração do modelo e a validação do mesmo foi realizada de 01 de setembro de 2008 a 31 de agosto de 2009. O período de 01 de setembro de 2009 a 31 de agosto de 2010, foi gerada uma série sintética de vazão com base nos dados meteorológicos existentes na BHRJ. O modelo foi calibrado e validado para dados diários e mensais. Um dos coeficientes para verificar o desempenho do modelo, tanto na etapa de calibração quanto na de validação, foi o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS}). Para os dados diários, o C_{NS} foi de 0,660 e 0,872 respectivamente para calibração e validação, enquanto para os dados mensais, o C_{NS} foi de 0,939 para a calibração e 0,853 para a validação. Os resultados demonstraram que o modelo teve comportamento adequado e bom, tanto para os dados diários e mensais, de acordo com Moriasi et al. (2000). Nas análises das curvas de permanência pode-se concluir que o modelo superestimou as vazões nas menores permanências e subestimou as vazões nas maiores permanências. O uso do modelo SWAT para a extensão de séries de vazão, baseado nos bons resultados obtidos tanto na calibração quanto na validação, permitiu o desenvolvimento de séries históricas sintéticas, demonstrando sua capacidade para usos vinculados à gestão dos recursos hídricos em bacias desprovidas de monitoramento.

Palavras-chave: SWAT. Modelos Hidrológicos. Alto Rio Grande. Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT

The hydrologic simulation in watersheds consists is one of the most important water resources management tool, supporting the hydrologic impacts prediction due to changes in land use. This work aimed to calibrate and validate the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) for hydrological simulation of the Jaguara Creek Watershed (JCW), located at Alto Rio Grande region (MG). For application of model, it is necessary geo-referenced maps of soils and land-use, digital elevation model (DEM) and climate and stream discharge data sets. It was used a historic data sets from September 31th, 2006 to August 31th, 2010, divided into three periods. The first period, from September 1st, 2006 to August 31th, 2008, was used to calibrate the model; the period from September 1st, 2008 to August 31th, 2009 was used to validate the model. From September 1st, 2009 to August 31th, 2010 period was used to simulate a discharge synthetic data set based on meteorological data of JCW. SWAT model was calibrated and validated using mensal and daily time steps approaches. Nash-Sutcliffe (C_{NS}) performance coefficient was used to verify the model performance. SWAT model presented a C_{NS} value of 0.660 and 0.872 for calibration and validation, respectively, based on daily time step. Considering a monthly time step, the model presented a C_{NS} value of 0,939 and 0,853 to the calibration and validation respectively. The results showed that SWAT model had a good performance for both daily and monthly time step, according to specific literature about hydrological modeling. Yet, it was concluded that the permanent stream discharge curve simulated by the model overestimated the flows related to the smallest permanent and underestimated the flows related to the greatest permanent. Based on the good results for calibration and validation phases, the use of the SWAT model for generation of discharges series produced good estimates, characterizing it as a practical tool for water resources management in ungauged basins.

Keyword: SWAT. Hydrologic Models. Alto Rio Grande. Hydrographic Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização da Bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), com identificação da rede de drenagem, estação meteorológica, seção de controle e pontos amostragem de características de solos.....	37
Figura 2	Mapa de uso e ocupação dos solos da BHRJ.....	38
Figura 3	Modelo Digital de Elevação da BHRJ.....	39
Figura 4	Mapa de solos da BHRJ.....	40
Figura 5	Gráficos de dispersão, para dados com intervalos diários, para vazões observadas e simuladas nas fases de calibração (a) e validação (b), para a BHRJ.....	72
Figura 6	Gráficos de dispersão, para dados com intervalos mensais, para vazões observadas e simuladas nas fases de calibração (a) e validação (b), para a BHRJ.....	73
Figura 7	Hidrogramas observados e simulados pelo modelo SWAT, para dados com intervalos diários, para a BHRJ, na fase de calibração.....	75
Figura 8	Hidrogramas observados e simulados pelo modelo SWAT, para dados com intervalos diários, para a BHRJ, na fase de validação.....	76
Figura 9	Hidrogramas observado e simulado pelo modelo SWAT, para dados com intervalos mensais, para a BHRJ, nas fases de calibração (esquerda) e validação (direita).....	79
Figura 10	Curvas de permanência observada e simulada, no período de calibração do modelo SWAT, para a BHRJ.....	80
Figura 11	Curvas de permanência observadas e simuladas, no período de validação do modelo SWAT, para a BHRJ.....	82

Figura 12	Vazões máximas e mínimas mensal, observadas e simuladas no ano hidrológico de 2006/2007, pelo modelo SWAT para a BHRJ	85
Figura 13	Vazões máximas e mínimas mensal, observadas e simuladas no ano hidrológico de 2007/2008, pelo modelo SWAT para a BHRJ	86
Figura 14	Vazões médias máximas e mínimas mensais, observadas e simuladas, no ano hidrológico 2008/2009, pelo modelo SWAT para a BHRJ	88
Figura 15	Deflúvios totais mensais, observados e simulados no período de calibração, pelo modelo SWAT, para a BHRJ	90
Figura 16	Deflúvios totais mensais, observados e simulados no período de validação, pelo modelo SWAT, para a BHRJ	91
Figura 17	Hidrograma sintético simulado pelo modelo SWAT, com base em dados diários climatológicos para a BHRJ.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU's) para a BHRJ.....	52
Tabela 2	Parâmetros adotados pelo modelo SWAT na simulação da vazão.....	55
Tabela 3	Influência da posição do parâmetro na Análise de Sensibilidade no processo de Calibração.....	56
Tabela 4	Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com dados diários e mensais de vazão, para a BHRJ	63
Tabela 5	Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com os valores calibrados, para dados com intervalos diários, para a BHRJ	66
Tabela 6	Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com os valores calibrados, para dados com intervalos mensais, para a BHRJ	67
Tabela 7	Valores iniciais e calibrados do parâmetro CN2 para a BHRJ.....	67
Tabela 8	Estatísticas de precisão resultantes da calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica na BHRJ	68
Tabela 9	Permanências das vazões observadas e simuladas e a diferença percentual das vazões, no período de calibração do modelo SWAT, para a BHRJ	81
Tabela 10	Permanências das vazões observadas e simuladas e a diferença percentual das vazões, no período de validação do modelo SWAT, para a BHRJ	83
Tabela 11	Vazões máximas e mínimas anuais observadas e simuladas pelo modelo SWAT para a BHRJ	84

Tabela 12	Deflúvios anuais observados e simulados pelo modelo SWAT para a BHRJ	89
-----------	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Abordagem Introdutória	18
2.2	Modelos hidrológicos	19
2.3	Avaliação de desempenho dos modelos	22
2.3.1	Introdução	22
2.3.2	Análise de sensibilidade	22
2.3.3	Calibração	23
2.3.4	Validação	25
2.4	Aplicações de modelos hidrológicos	26
2.4.1	Estudo do comportamento hidrológico de bacias	26
2.4.2	Extensão de série histórica de vazões	27
2.5	O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT)	28
2.5.1	Introdução	28
2.5.2	Aplicações do modelo SWAT	31
2.5.3	Usos do modelo SWAT no Brasil	33
2.6	Considerações gerais	35
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Caracterização da bacia hidrografia do Ribeirão Jaguara (BHRJ)	36
3.2	Descrição do modelo SWAT	40
3.2.1	Teoria e estrutura	41
3.2.2.1	Fase terrestre	41
3.2.1.1	Balço hídrico	41
3.2.1.2	Componente climatológico	43
3.2.1.3	Componente hidrológico	44

3.2.1.4	Componente crescimento de plantas.....	50
2.3.2.2	Fase de propagação na rede hídrica	50
3.3	Delineamento de HRU's.....	50
3.3	Análise de sensibilidade do modelo.....	53
3.4	Calibração do modelo SWAT	56
3.6	Validação do modelo SWAT	58
3.7	Estatísticas de precisão.....	58
3.8	Análises complementares dos processos hidrológicos	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Análise de sensibilidade do modelo SWAT na BHRJ	62
4.2	Calibração e validação do modelo SWAT à BHRJ	66
4.3	Análise de algumas características hidrológicas observadas e simuladas pelo modelo SWAT na BHRJ	80
4.4	Extensão da série de vazão para BHRJ com o modelo SWAT.....	91
5	CONCLUSÕES	94
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das atividades humanas faz com que a cobertura natural do solo seja drasticamente modificada, alterando as características naturais de uma bacia hidrográfica. Entender os processos que direta ou indiretamente estão relacionados ao comportamento hídrico de uma bacia hidrográfica constitui uma importante etapa no gerenciamento ambiental da mesma. O ritmo de ocupação e uso do solo no espaço rural, nas últimas décadas, tem sido acelerado, sobretudo, por causa da crescente demanda por alimentos e pelas facilidades advindas da tecnologia rural no tocante às operações agrícolas. O que se tem visto é uma exploração irracional, feita sem planejamento real e com base em conhecimentos empíricos sobre a dinâmica dos recursos naturais.

O homem, ao adaptar as terras para as explorações agrícolas, não considerando suas reais aptidões, modifica as características dos solos e não observa os fatores limitantes ao seu uso e preservação, tornando-os degradados. As atividades humanas ocorrem em bacias hidrográficas (rurais ou urbanas) e vem contribuindo para a alteração do equilíbrio e da dinâmica dos recursos naturais nas mesmas. A ação antrópica retira a cobertura vegetal, expondo o solo à ação das chuvas, modificando as condições de infiltração de água, favorecendo o processo de assoreamento e poluição dos cursos d'água e, conseqüentemente, comprometendo a recarga dos aquíferos, além de causar perdas de solo e água com o escoamento superficial direto.

O regime hídrico é diretamente afetado pela dinâmica e manejo da vegetação, podendo contribuir tanto para sua manutenção quanto para sua circulação no planeta (VIEIRA, 2000). Segundo Linhares (2006), a dinâmica da vegetação inclui as mudanças naturais e as antrópicas. As mudanças naturais constituem fatos normais e habituais do ecossistema que não interferem de modo comprometedor na disponibilidade normal da água. As mudanças antrópicas são,

geralmente, muito mais impactantes e modificadoras da paisagem, sendo o desflorestamento, a prática mais comum.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento da água e seus possíveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água (MORO, 2005). O modelo hidrológico é uma das ferramentas desenvolvidas pelo homem, para melhor entender e representar o comportamento do ciclo hidrológico, para que seja possível prever condições diferentes daquelas observadas (TUCCI, 2005).

Modelos são ferramentas importantes para o entendimento dos processos hidrológicos, no desenvolvimento de práticas de manejo e na avaliação de riscos e benefícios de um determinado uso de solo ao longo dos anos (SPRUILL; WORKMAN; TARABA, 2000). Entretanto, modelos são simplificações da realidade, e não importa o quão sofisticado sejam, eles sempre sofrerão com aspectos de concepção e empirismo, e seus resultados serão tão realistas quanto à estrutura do modelo e aplicados pelos seus respectivos algoritmos, dependendo, sobretudo da qualidade dos dados de entrada para se estimar parâmetros confiáveis (MULETA; NICKLOW, 2005).

Um grande número de modelos tem sido desenvolvido nos últimos anos para auxiliar no entendimento dos sistemas hidrológicos. Tais modelos providenciam uma ferramenta em que os dados são analisados e as hipóteses são testadas. Modelos também são usados com ferramentas preditivas para testar mudanças no regime hidrológico provocada por modificações no uso do solo ou irrigação (ARNOLD; ALLEN, 1996).

Conforme Tucci (2005), a simulação é o processo de utilização do modelo. A simulação hidrológica pode ser utilizada para diversas aplicações, como na estimativa de disponibilidade de recursos hídricos, previsão de vazões de curto e médio prazo, análise da variabilidade hidrológica e das consequências

de mudanças no uso do solo (COLLISCHONN, 2001). O mesmo autor destaca que estes estudos podem ser realizados em pequenas bacias, de apenas alguns hectares até bacias com milhares de km².

Recentes avanços na capacidade dos computadores e o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) proporcionaram aos modelos hidrológicos um maior embasamento físico, incorporando os parâmetros de forma distribuída. No entanto, estas são representações inexatas do movimento de água em um sistema natural, que devem ser calibrados com os dados observados em campo. Enquanto o processo de calibração frequentemente minimiza os erros entre a saída do modelo e os dados observados, este processo se torna complicado devido ao grande número de parâmetros não mensuráveis que precisam ser estimados (VEITH et al., 2010).

A bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ) está localizada no estado de Minas Gerais, inserido na região do Alto Rio Grande. Esta bacia é representativa dos Latossolos na região, de modo que muitos estudos foram realizados na mesma por parte do Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras.

No contexto apresentado acima, objetivou-se com este trabalho, aplicar o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tools* (SWAT), explorando sua integração com um Sistema de Informações Geográficas, na Bacia do Ribeirão Jaguara, visando obter resultados associados à viabilidade do uso deste modelo na região do Alto Rio Grande, Sul de Minas Gerais. Em termos específicos, os objetivos foram:

- a) parametrizar o modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), na região Alto Rio Grande (MG), usando de forma integrada o modelo e o SIG;

- b) modelar os processos hidrológicos, na escala de tempo diária e mensal, para gerar estimativas de deflúvios mensais e anuais.
- c) estender, com os parâmetros calibrados e validados pelo SWAT, uma série histórica de dados de vazões diárias, com base nos dados meteorológicos coletados na BHRJ para o ano hidrológico de 2009/2010.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Abordagem Introdutória

A Hidrologia é uma ciência baseada em observações dos fenômenos naturais complexos do ciclo hidrológico no meio físico natural (bacia hidrográfica), desde sua ocorrência, sua circulação e sua distribuição. A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água das precipitações, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Compõe-se basicamente, de uma superfície de vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultarem em um leito único no exutório (TUCCI, 2005). É um sistema complexo constituído por vários processos hidrológicos, além de precipitação e escoamento, tais como a interceptação, escoamento superficial direto, infiltração, escoamento subterrâneo, percolação e evapotranspiração, os quais ocorrem em diferentes escalas espaciais e temporais.

A realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas vem da necessidade de se compreender o funcionamento do balanço hídrico, os processos que controlam o movimento de água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e a qualidade da água (WHITEHEAD; ROBINSON, 1993). O entendimento das inter-relações entre os complexos fenômenos naturais que envolvem o ciclo hidrológico, com o objetivo de descrever a dinâmica da água na bacia hidrográfica, desde a precipitação até a ocorrência do escoamento superficial, permitiu ao homem simular o comportamento da água na bacia hidrográfica, possibilitando a previsão de diferentes cenários hidrológicos em decorrência de alterações climáticas e de uso do solo (VIOLA, 2008).

Um modelo hidrológico procura representar de maneira simplificadora e de fácil compreensão, um complexo sistema (ciclo hidrológico numa bacia hidrográfica), com intuito de permitir a simulação e a previsão para estabelecer relações entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica (BLACK, 1991 citado por KUMAR, 2008).

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 2005). Entretanto, é impossível ou inviável traduzir todas as relações existentes, entre os diferentes componentes da bacia hidrográfica em termos matemáticos. De fato, ou essas relações são extremamente complexas a ponto de não existir uma formulação matemática capaz de descrevê-las completamente, ou apenas uma parte dos processos envolvidos nessas relações é parcialmente conhecida. Assim, na maioria dos casos, a modelagem hidrológica, torna-se somente uma representação aproximada da realidade (RENNÓ; SOARES, 2000).

2.2 Modelos hidrológicos

A necessidade de representar os processos físicos da natureza em relações analíticas para simulação fez surgir os modelos hidrológicos (CARVALHO NETO, 2011). O modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2005). Segundo Barth et al. (1987), modelo é uma representação do comportamento de um sistema natural possível de ser expresso através de equações matemáticas e que, dada a versatilidade que possui, pode-se facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas. Segundo Maidment (1993), um modelo hidrológico pode ser

definido como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes em alguma parte da superfície do solo e ou subsolo. Modelos hidrológicos diferem-se de acordo com algumas considerações, podendo ser classificados perante a sua análise espacial, quanto à representação dos dados, quanto às variáveis utilizadas e por fim, o tipo de relação entre estas variáveis (RENNÓ, 2003).

A análise espacial distingue um modelo hidrológico em concentrado, semidistribuído e distribuído. Um modelo concentrado considera que todos os dados de entrada, em consequência também, os de saída, são representativos da área estudada. Um modelo distribuído é capaz de enxergar peculiaridades que individualizam ou particularizam áreas semelhantes dentro daquela maior que é estudada, portanto, tais observações são expressas particularmente nos dados de entrada. Matematicamente, verifica-se que o modelo concentrado apresenta apenas o “tempo” como variável independente, sendo representado diretamente por uma equação diferencial ordinária. Por outro lado, modelos distribuídos, possuindo variáveis de “tempo e espaço” independentes, são representados por equações diferenciais parciais (TUCCI, 2005).

Os dados podem ser representados de maneira contínua ou discreta. Observa-se que os fenômenos naturais acontecem de maneira contínua no tempo, porém são representados pelos modelos através de um intervalo de tempo. Pode-se conceber modelos com diferentes representações do tempo, ao passo que, quanto menor o intervalo de tempo maior a precisão e consequentemente, maior custo computacional (RENNÓ, 2003). Esta classificação pode sugerir também modelos que podem trabalhar por evento de precipitação ou aqueles que exigem longos períodos para prover a simulação – discreto e contínuo, respectivamente.

A divisão entre modelo determinístico e estocástico refere-se às variáveis utilizadas. O primeiro diz respeito à extinção de probabilidade ligada a

um processo, de modo que um determinado dado de entrada favorecerá a um determinado dado de saída. Sendo assim, inversamente, um modelo estocástico considera as leis da probabilidade, de modo que um valor fixo de uma variável de entrada poderá gerar diferentes saídas (RENNÓ, 2003; TUCCI, 2005).

A relação entre as variáveis é observada sob duas maneiras básicas. Uma que considera de maneira simplista as relações entre as variáveis, baseando-se em observações para que ocorra o ajuste dos dados simulados aos observados, que são os modelos empíricos. E outra que se baseia nas leis físicas que regem os mais diversos processos de um determinado fenômeno, que são os modelos conceituais. Esta classificação sofre uma subdivisão (TUCCI, 2005), havendo os modelos semiconceituais e os de base física. Os modelos semiconceituais seguem a premissa da relação com as leis que regem os fenômenos, contudo ainda possuem algum grau de empirismo nos parâmetros das equações envolvidas. Os modelos de base física utilizam-se, efetivamente, das principais equações diferenciais que norteiam a realidade, e seus parâmetros possuem significado físico, sendo de difícil estimação. Os modelos de base física possuem como grande vantagem, a possibilidade de aplicação em áreas de pouco conhecimento, uma vez que a atribuição dos valores dos parâmetros físicos deve ser suficiente para estabelecer uma simulação razoável.

Os modelos procuram estabelecer relações entre dados de entrada a fim de obter respostas, geralmente na forma de vazão. Os modelos precipitação-vazão calculam as vazões que ocorrem em uma bacia hidrográfica a partir de uma série de dados de precipitação ocorrida sobre ela (FERRAZ; MILDE; MORTATI, 1999).

Para Wagener, Wheeler e Gupta (2004), esses modelos são aplicados para extensão de séries temporais de vazão no espaço e no tempo, para avaliar estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, a reposta de bacias hidrográficas a variações climáticas e no uso do solo, para o cálculo de cheias de

projeto, para previsões de cheia em tempo real e para fornecer condições de contorno para modelos de circulação atmosférica.

Para Tucci (2005), os modelos de precipitação-vazão representam a parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão, descrevendo a distribuição espacial da chuva, as perdas por interceptação, evaporação, infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio.

2.3 Avaliação de desempenho dos modelos

2.3.1 Introdução

A avaliação de desempenho do modelo pode ser considerada uma das etapas mais relevantes da modelagem, uma vez que ela consiste em se averiguar a confiabilidade dos resultados que são gerados e sua aplicabilidade para predições quanto ao comportamento futuro do sistema (CHAPRA, 1997).

As ações que visam aprimorar o modelo resultante da simulação, analisar sua adequação para representar um fenômeno real e quantificar o seu desempenho para representar as observações são importantes para a obtenção de um modelo mais representativo do evento em estudo (SILVA, 2010).

Para a avaliação de um modelo hidrológico são utilizadas ferramentas para melhor aplicação dos resultados. Essas ferramentas são a Análise de Sensibilidade, Calibração, Validação do Modelo e Estatísticas de Precisão.

2.3.2 Análise de sensibilidade

Conforme Silva (2010), a análise de sensibilidade é o estudo de como o modelo responde, quantitativa e qualitativamente, a diferentes variações nas

informações que o alimenta. Segundo o mesmo autor, a análise de sensibilidade estuda as relações entre os fluxos de informações que entram e saem do modelo, permitindo assim verificar a natureza da relação de dependência entre os resultados simulados e as incertezas existentes nos dados de entrada usados na modelagem.

A análise de sensibilidade tem como principal objetivo, investigar como um modelo computacional responde a variações nos valores dos parâmetros. A análise de sensibilidade permite identificar os parâmetros que influem significativamente nos resultados, ao tempo em que, torna possível verificar o reflexo das incertezas dos valores dos parâmetros nos resultados simulados (SILVA, 2010).

A função utilizada para a análise de sensibilidade não é necessariamente a resposta da bacia, pois o resultado será a relação da vazão de um determinado intervalo de tempo. Usualmente, a análise é realizada sobre uma variável que agrega os resultados de uma simulação. Sendo uma destas funções um grau de medida da aproximação do modelo aos dados observados, passa a ser importante para o usuário conhecer qual a sensibilidade que esta função tem com relação aos parâmetros utilizados no ajuste do modelo ao sistema modelado (TUCCI, 2005).

A análise de sensibilidade é recomendada para que se estabeleça uma priorização dos parâmetros responsáveis pelas maiores alterações dos resultados na etapa de calibração do modelo, tendo então, melhor entendimento do processo em estudo e melhor estimativa dos seus valores.

2.3.3 Calibração

A calibração de um modelo hidrológico é uma etapa fundamental e consiste na modificação dos parâmetros, dentro de um intervalo aceitável, para

obtenção de um modelo que replique condições previamente conhecidas do processo natural modelado (VIESSMAN; LEWIS, 2003). A calibração é um problema de infinitas soluções igualmente possíveis, já que existem mais equações do que incógnitas, havendo a possibilidade de ocorrerem soluções para o conjunto de equações que não representam os valores físicos possíveis aos parâmetros (COLLISCHONN, 2001).

As especificações e a estimação dos parâmetros são os dois mais importantes estágios da calibração. As especificações referem-se à fase em que os parâmetros a serem ajustados são selecionados, enquanto o segundo é posterior ao processo de identificação e trata da busca por valores ótimos ou quase ótimos dos parâmetros especificados. As dificuldades na realização destes dois estágios depende, entre outros fatores, do tipo e da complexidade da bacia em estudo (SOROOSHIAN; GUPTA, 1995 citado por MULETA; NICKLOW, 2005).

A calibração pode ser feita manual ou automaticamente. No processo manual o conhecimento do sistema que se quer modelar, bem como a estrutura do modelo são condições necessárias para o sucesso do ajuste. Quando se trata de um modelo complexo, calibração manual é bastante trabalhosa e, por vezes, infrutífera (SILVA, 2010).

Na calibração automática utiliza-se de técnicas de modelagem matemática em que os valores dos parâmetros são obtidos usando-se processos estatísticos, que ajustam os valores simulados aos valores observados do fenômeno em análise. A busca do conjunto de parâmetros que melhor ajusta os dados simulados aos dados medidos permite avaliar várias combinações de valores de parâmetros, no caso da calibração automática isso é alcançado por meio de uma função objetivo ou de um conjunto de funções objetivos (SILVA, 2010).

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 aos observados até que o valor ótimo da função seja atingido, sendo o mais frequente a minimização desta função que mede o desvio entre as séries de vazão observada e simulada (VIOLA, 2008).

No início da simulação é comum o desconhecimento das condições iniciais da bacia em estudo, esse fato possui como consequência aumento das discordâncias entre os valores observados e simulados no início da simulação. Uma forma de contornar esse problema é realizar um período de aquecimento do modelo. O período de aquecimento é uma parcela preespecificada do tempo de simulação, durante o qual os dados resultantes da simulação não são considerados. O propósito do período de aquecimento é isolar o período inicial da simulação e como isso reduzir o erro sistemático nas estimativas estatísticas.

2.3.4 Validação

A maioria dos métodos de calibração privilegiam a obtenção de um modelo que tenha uma boa aderência com os dados observados. Neste fato existe o problema de que, uma vez que os valores dos parâmetros obtidos são determinados para representar as características do período de calibração, a simulação de eventos para um cenário diferente (temporal ou espacial) pode ter um resultado insatisfatório (SOROOSHIAN; GUPTA, 1983).

No desenvolvimento de um modelo hidrológico é interessante incluir uma etapa de avaliação de desempenho nas tarefas os quais se destina. A avaliação da adequação de um modelo para representar a hidrologia de uma bacia pode ser realizada por meio da verificação do desempenho do modelo, esta

avaliação consiste de testes em que se verifica o quanto os resultados previstos com o modelo se aproximam da realidade observada (COLLISHONN, 2001).

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

2.4 Aplicações de modelos hidrológicos

As aplicações de modelos hidrológicos abrangem uma grande gama de estudos. Os modelos podem ser úteis para o melhor entendimento dos fenômenos hidrológicos na bacia, como estudos de vazões máximas, mínimas e deflúvios. São também aplicados na extensão de série histórica de vazão com base na precipitação.

Outra aplicação muito frequente de modelos chuva-vazão é em módulos de modelos de gerenciamento dos recursos hídricos em diferentes áreas, por exemplo: desenvolvimento urbano, energia, transporte, produção agrícola, controle ambiental, controle de calamidades, gerenciamento de recursos hídricos e sistemas de informação (TUCCI, 2005).

2.4.1 Estudo do comportamento hidrológico de bacias

O conhecimento acerca do regime de vazões em uma bacia hidrográfica é fundamental nos estudos hidrológicos, que servem como base para projetos de diferentes usos de água, tornando-se fator indispensável para um adequado gerenciamento dos recursos hídricos.

A verificação de vazões máximas, mínimas e de referência para outorga, além do deflúvio médio mensal e anual, propiciado pela série simulada, com relação à observada, possibilita a análise da aplicação do modelo como ferramenta de gestão e planejamento hidrológico (VIOLA, 2008).

Segundo Cruz e Tucci (2008), o hidrograma e a curva de permanência, são algumas das ferramentas para determinar a disponibilidade hídrica em uma bacia. A metodologia mais empregada é a curva de permanência, que representa a disponibilidade hídrica em função da frequência de ocorrência (CRUZ; SILVEIRA, 2007). A curva de permanência relaciona a vazão, ou nível de um rio, e a probabilidade de ocorrerem vazões maiores ou iguais ao valor da ordenada, em um período histórico definido (TUCCI, 2004).

Para Cruz e Tucci (2008), a curva de permanência não se refere à probabilidade das vazões em qualquer ano, mas sim, uma “garantia” de ocorrência das vazões num horizonte de planejamento.

2.4.2 Extensão de série histórica de vazões

De acordo com Viola (2008) é importante ressaltar que a gestão de recursos hídricos, no contexto da estimativa das vazões de referência para outorga encontra sérias limitações, quando se trata de bacias hidrográficas de pequeno porte, uma vez que é praticamente inexistente a disponibilidade de dados hidrológicos de vazão nesta escala, especialmente no Brasil. Assim, na maioria das vezes, são feitas inferências sobre vazões de referência nestas bacias, conduzindo, na maioria das vezes, a vazões de outorga subestimadas.

Deste modo, a aplicação da simulação hidrológica permite a geração de séries históricas sintéticas para bacias desprovidas de monitoramento, uma vez que todo o ciclo hidrológico está representado no modelo por alguma função

específica, permitindo melhor precisão nas estimativas das vazões de referência (VIOLA, 2008).

Geralmente, existem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Dessa forma, em região com dados insuficientes é possível estender as séries de vazão por meio de modelos hidrológicos precipitação-vazão e obter séries de vazões mais representativas (TUCCI, 2005).

De acordo com Alexandre et al. (2005), o modelo hidrológico chuva-vazão é uma das técnicas utilizadas para se obter dados sintéticos de vazão em locais com curtas séries de dados, visando estender ou corrigir as falhas existentes. Em ambos os casos, um problema comumente enfrentado por hidrólogos é a determinação de parâmetros destes modelos em região sem registros históricos, notadamente de vazão (ALEXANDRE et al., 2006).

2.5 O modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT)

2.5.1 Introdução

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido em 1996 nos EUA pelo *Agricultural Research Service* e pela *Texas A&M University*. O SWAT é um modelo matemático o qual permite que diferentes processos físicos sejam simulados na bacia hidrográfica, com o intuito de analisar os impactos oriundos das alterações no uso do solo sobre os escoamentos superficial e subterrâneo, em bacias hidrográficas não instrumentadas (ARNOLD; ALLEN, 1996).

De acordo com Neitsch et al. (2005), o SWAT é um modelo que tem como característica ser de base física, que requer informações quanto ao clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo e gerenciamento da terra para a sua devida execução. A primeira característica

denota sua capacidade de simulação em bacias sem monitoramento, ou seja, sem calibração, favorecendo resultados realistas. O modelo utiliza dados normalmente disponíveis, capaz de simular bacias de diferentes tamanhos com estabelecimento de diferentes cenários e é um modelo contínuo no tempo, favorecendo as simulações de longos períodos.

O modelo hidrológico SWAT agrega em si diversos fundamentos de outros modelos. Os modelos SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*), QUAL2E e ROTO (*Routing Outputs To Outlets*) foram diretamente adaptados para a origem do SWAT. O primeiro citado, SWRRB, foi originado através da junção das funcionalidades dos modelos GLEAMS (*Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems*), CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) e EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate Model*), além de diversas modificações que proporcionaram maior avanço para realizar as simulações. Com isso, é possível perceber que o modelo foi concebido já com uma vasta gama de experiência intrínseca, haja vista que tais modificações, agregadas pelos diversos modelos, foram realizadas visando um aperfeiçoamento do mesmo, com intuito de representar a enorme complexidade dos fenômenos que ocorre em uma bacia hidrográfica (GASSMAN et al., 2007).

Desde seu surgimento, o SWAT sofreu adaptações para algumas áreas específicas e foi integrado a um Sistema de Informações Geográficas. Em relação ao SIG, foi desenvolvido para a primeira versão do SWAT uma interface com o ArcView[®], possibilitando a entrada do banco de dados, a elaboração e edição de cenários ambientais e sua representação em forma de gráficos e mapas, controle e simulações, extrair e organizar as saídas do modelo (MARCHIORO, 2008).

O modelo requer, necessariamente, três diferentes arquivos geoespaciais: modelo digital de elevação, mapa de solos e de uso do solo. Dados

tabulares referentes às condições climáticas também são requisitos básicos para a simulação de uma determinada bacia (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT permite a divisão da bacia em sub-bacias, as quais podem ser parametrizadas usando o conceito de unidades de respostas hidrológicas (*Hydrologic Response Units – HRUs*), permitindo refletir as diferenças de tipo de solo, cobertura vegetal e topografia. Subdividir a bacia em áreas contendo combinações únicas possibilita ao modelo refletir diferenças na evapotranspiração e outras condições hidrológicas para diferentes culturas e solos (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT é baseado em uma estrutura de comandos para propagar o escoamento, sedimentos e agroquímicos através da bacia. O modelo requer dados diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (NEITSCH et al., 2005).

Em sua estrutura, o modelo SWAT incorpora oito componentes principais para prover suas simulações. São eles (DHAR, 2009 citado por CARVALHO NETO, 2011):

- a) Hidrologia: escoamento superficial, percolação, fluxo lateral, fluxo subterrâneo, evapotranspiração, neve e o fluxo da rede de drenagem. Incluindo ainda a análise em reservatórios.
- b) Aporte de sedimentos: abrange o ciclo hidrossedimentológico utilizando a Equação Universal de Perda do Solo Modificada (EUPS-M).
- c) Clima: precipitação, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar e temperatura do ar.
- d) Temperatura do solo: o modelo simula diariamente uma temperatura média no centro de cada camada do solo com objetivo

do uso nos processos hidrológicos e no declínio de resíduos orgânicos.

- e) Crescimento vegetal.
- f) Nutrientes: investiga os compostos minerais e orgânicos do nitrogênio e do fósforo.
- g) Pesticidas e bactérias: investiga o movimento de tais elementos, analisando a biodegradação e transformação dos pesticidas, além do declínio de bactérias. O modelo pode ainda acompanhar a existência de metais pesados, contudo sem analisar possíveis transformações.
- h) Práticas agrícolas: analisa o cultivo de cultura considerando a irrigação e o manejo de resíduos na terra.

2.5.2 Aplicações do modelo SWAT

Arnold e Allen (1996) utilizaram o SWAT para simular os processos hidrológicos em três bacias do centro do estado de Illinois (EUA), com áreas entre 122 Km² e 246 Km², cujo uso do solo era predominantemente milho, soja e pastagem, objetivando testar o desempenho do SWAT para prever escoamento superficial e subterrâneo, tanto mensal quanto anual. Verificaram que houve um bom ajuste do modelo, fato este comprovado pelo R² que atingiu 0,94 e pelo aspecto visual do hidrograma de saída. Porém, os autores apresentaram como problema do modelo, o fato de mesmo estimar o escoamento superficial, utilizando a precipitação total diária e não levando em consideração a sua intensidade e o fato do modelo considerar a condutividade hidráulica saturada como pontual, sendo que a mesma possui grande variabilidade espacial.

Avaliando o comportamento do modelo SWAT, para a descarga diária Spruill, Workman e Taraba (2000) estudaram uma pequena bacia no estado de

Kentucky (EUA), com geologia cárstica, relevo suave ondulado e com uso do solo dominado por tabaco e culturas anuais. Os autores encontraram um coeficiente de eficiência, proposto por Nash e Sutcliffe (1970), da ordem de 0,19 para dados diários e 0,89 para dados mensais. Os autores atribuíram esta diferença aos dados mensais, os quais suavizam os valores extremos. Observaram também que o modelo simulou picos de vazão com um dia de antecipação, além de picos que não ocorreram.

Van Liew e Garbrecht (2003) buscaram avaliar o comportamento do modelo SWAT para simular o escoamento superficial em três sub-bacias do sudoeste do estado de Oklahoma nos Estados Unidos, considerando diferentes condições climáticas – normais, com deficiência e com excesso hídrico. Seus resultados mostraram que o modelo foi capaz de simular de forma adequada o escoamento superficial em apenas uma sub-bacia, sendo que, para as demais, foi necessário utilizar o processo de calibração para conseguir resultados satisfatórios nas condições de clima normal e com deficiência hídrica. Para as condições de excesso hídrico, o escoamento superficial foi simulado de forma inadequada.

No mesmo sentido, Govender e Everson (2005), avaliando o comportamento hidrológico de duas pequenas bacias na África do Sul, encontraram em seus trabalhos melhores resultados com o SWAT para anos mais secos que anos úmidos. Um consenso entre os autores para explicar esses resultados é que o SWAT possui limitações para quantificar a água disponível no solo.

Von Stackelberg et al. (2007) empregaram o modelo na simulação dos impactos hidrológicos, decorrentes da introdução da cultura do pinus (*Pinus taeda*) na bacia do rio Tacuarembó, no Uruguai, a qual apresenta 107,7 ha de área de drenagem, em substituição à pastagem, estimando uma redução no deflúvio de 23%, aproximadamente.

Geza e McGray (2008) em um estudo avaliaram a produção de escoamento na bacia do ribeirão Turkey, no sudoeste do estado de Denver (EUA), utilizando, para o mesmo local, dois mapas de solos com diferentes resoluções espaciais. Os resultados obtidos demonstraram que a resolução espacial mais detalhada promoveu um valor de C_{NS} de 0,70, comparada com a de menor resolução que obteve um resultado de 0,61. Com esse resultado, os autores concluíram que a resolução pode influenciar na produção do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica.

Kim, Shin e Lee (2010) realizaram um estudo para verificar a componente de propagação da vazão do SWAT 2005 e sua modificação, o SWAT-NSR (*Nonlinear Storage*). O SWAT 2005 utiliza duas técnicas para propagar o escoamento, sendo estas, o Armazenamento Variável (WILLIAMS, 1969) e o modelo Muskingum (OVERTON, 1966). O SWAT-NSR utiliza de uma técnica modificada da propagação da onda por um modelo não linear. Os resultados de C_{NS} foram de 0,51 e 0,80, para o SWAT 2005 e SWAT-NSR, respectivamente. Os autores justificaram o resultado argumentando que a causa do baixo C_{NS} do SWAT 2005 se deu pela utilização do método Muskingum, o qual permite que sejam atribuídos valores negativos às variáveis do método, provocando subestimação e atraso nas vazões de pico, problemas estes superados pelo procedimento adotado pelo SWAT-NSR.

2.5.3 Usos do modelo SWAT no Brasil

Machado, Vettorazzi e Xavier (2003) utilizaram o modelo SWAT para simular cenários alternativos de uso do solo na microbacia do ribeirão Marins em Piracicaba (SP), obtendo uma redução na produção de sedimentos pela bacia de 10,8% no cenário 1, quando foram respeitadas as áreas de preservação permanente nas margens de rios e em lagoas e uma redução de 94% no aporte de

sedimentos no cenário 2, quando a área de pastagem foi substituída por vegetação nativa, mostrando dessa forma a necessidade de se tratar a paisagem da bacia num aspecto global, identificando as áreas sensíveis, onde são necessárias práticas de controle do processo erosivo.

Moro (2005) utilizou o SWAT para avaliar a produção de escoamento superficial em uma microbacia na região Piracicaba, SP. Os resultados encontrados mostram-se satisfatórios indicados pelo alto C_{NS} (0,90) na simulação do volume de escoamento superficial.

Uzeika (2009) utilizou o modelo SWAT na simulação da produção de sedimentos em uma bacia rural com 1,19 km² no município de Arvorezinha (RS), sob 3 condições de uso e manejo do solo, resultando em uma não diferenciação para o escoamento superficial e uma redução de até 30% do aporte de sedimentos, quando o cenário foi o de cultivo mínimo, comparando com o sistema convencional.

Bonumá et al. (2010) avaliaram o balanço hídrico e a produção de sedimentos na bacia do Arroio Lino, localizada no Sul do Brasil, utilizando o modelo SWAT. Os resultados da simulação da vazão e da produção de sedimentos, a nível mensal, obtiveram valores de C_{NS} de 0,87 e 0,7; para o escoamento e produção de sedimentos, respectivamente, indicando um bom ajuste dos dados simulados comparados aos observados.

Para a estimativa do estresse hidrológico em bacias hidrográficas, Durães (2010) utilizou o modelo SWAT na bacia do rio Paraopeba (MG). O autor obteve C_{NS} superior a 0,75 tanto para a calibração quanto validação, demonstrando que o modelo simulou adequadamente os impactos hidrológicos causados pelas alterações no uso do solo, enquanto os resultados referentes ao estresse hidrológico foram baixos nas sub-bacias existentes na mesma, em todos os cenários simulados.

Pinto (2011) aplicou o modelo SWAT na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinhas, região da Serra da Mantiqueira (MG). O autor obteve um C_{NS} acima 0,80 nas etapas de simulação e calibração para a variável vazão, tendo concluído que o modelo foi capaz de simular com precisão as variáveis envolvidas no processo, mostrando ser uma ferramenta adequada para a gestão dos recursos hídricos.

2.6 Considerações gerais

A BHRJ é uma bacia hidrográfica rural que apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos, típicas da região do Alto Rio Grande, em Minas Gerais. Essa região se destaca pela importância na produção de energia elétrica no contexto estadual e nacional. Estudos na BHRJ que visam avaliar o seu comportamento são relevantes na compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico e no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade dos recursos naturais. Assim torna-se importante a introdução de ferramentas (modelos) que permitam, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento da mesma. Por isso, o uso do modelo SWAT pode contribuir para o planejamento do uso racional dos recursos naturais e, posteriormente, servir de suporte à implementação de modelos de gestão ambiental na BHRJ.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da bacia hidrografia do Ribeirão Jaguara (BHRJ)

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara, localizada na região do Alto Rio Grande, Sul de Minas Gerais (Figura 1). A bacia possui área total de 32 km². Está inserida na unidade geomorfológica Planalto Campos das Vertentes e Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos GD1, no município de Nazareno (BESKOW, 2009). O ribeirão Jaguara deságua diretamente no reservatório da UHE de Camargos/CEMIG, com capacidade de geração de energia de 52 MW (PINTO, 2011).

A BHRJ é uma bacia hidrográfica rural que apresenta características pedológicas, hidrológicas e de ocupação dos solos, típicas da região do Alto Rio Grande – MG. Estudos que visam avaliar o comportamento da BHRJ em diferentes situações são relevantes na compreensão da dinâmica do ciclo hidrológico e no auxílio à tomada de decisões no que tange ao uso, conservação e preservação da qualidade dos recursos naturais em bacias com predominância de Latossolos.

O clima, de acordo com classificação de Köppen, é Cwa, caracterizado por verões amenos 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 (MELLO et al., 2008).

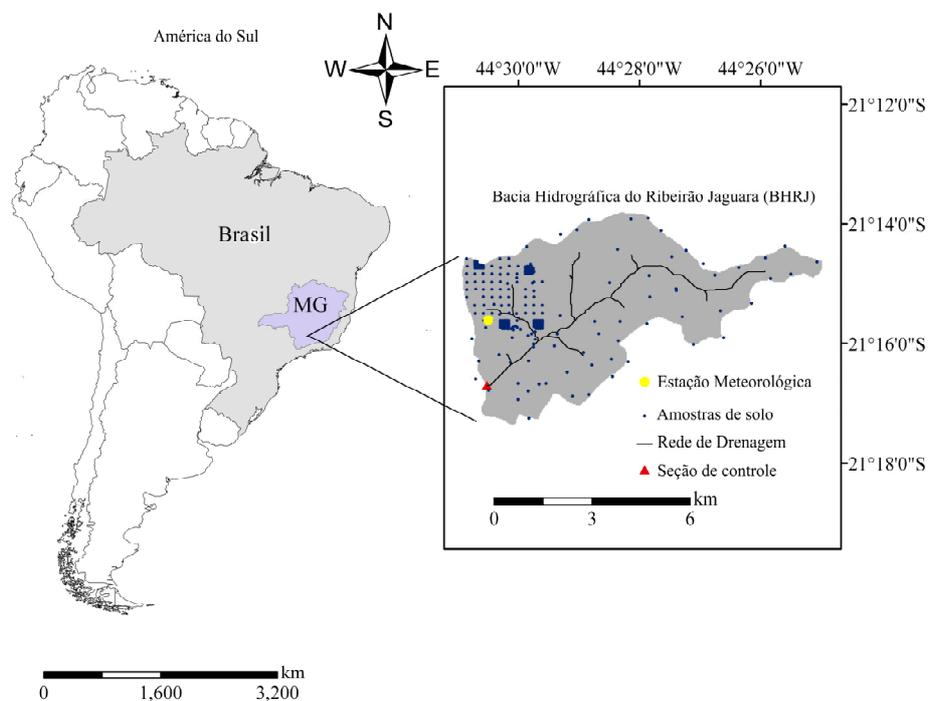


Figura 1 Localização da Bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguará (BHRJ), com identificação da rede de drenagem, estação meteorológica, seção de controle e pontos amostragem de características de solos

As variáveis meteorológicas foram monitoradas a cada 30 minutos, por meio de uma estação meteorológica automática, armazenando dados de temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação. Os dados de vazão foram obtidos a partir de monitoramento limimétrico (altura da lâmina d'água), por meio de um linígrafo automático, e correspondente curva-chave. Para o presente estudo foram utilizados dados de vazão relativos ao período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de agosto de 2009 e meteorológicos relativos ao período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de agosto de 2010.

Para obtenção do uso e ocupação do solo na bacia, foi utilizada uma imagem de satélite ALOS de maio de 2008, que fornece imagens multiespectrais com resolução de 10 metros, identificando-se a presença de eucalipto (7,68%), café (4,11%), solo exposto (9,63%), milho (22,85%), vegetação nativa (13,13%) e pastagem (42,60%) (BESKOW, 2009). O mapa de uso de solo é representado na Figura 2.

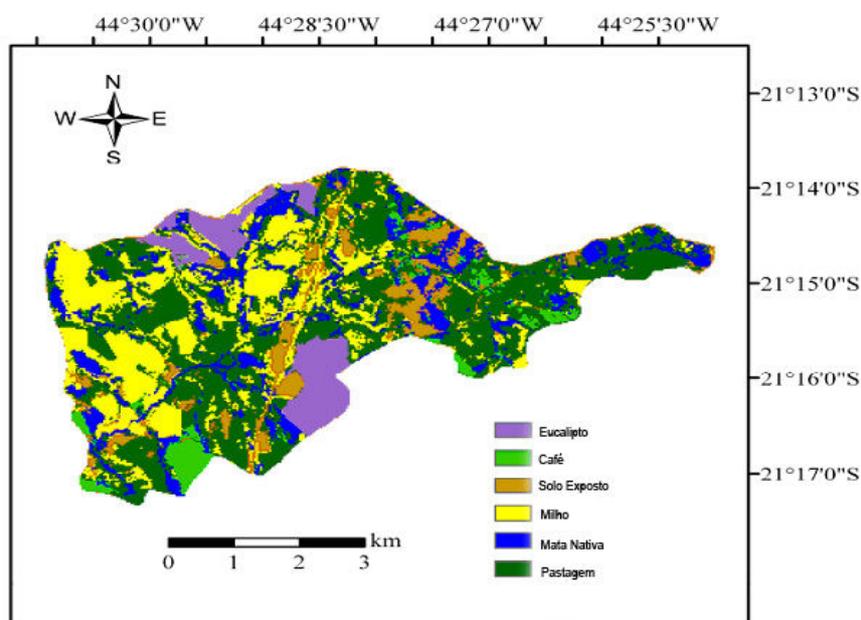


Figura 2 Mapa de uso e ocupação dos solos da BHRJ

O modelo digital de elevação (DEM) da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (Figura 3), foi extraído por meio de interpolação de um mapa obtido junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Foi interpolado com base em células de resolução de 30 metros, utilizando técnicas de geoprocessamento disponíveis no *software* ArcGIS®, os valores de altitude variam de 956 a 1073m. Foram obtidas declividades, consideravelmente,

íngremes em alguns trechos da bacia (até 46,9%), sendo que seu valor médio é de 11,6%.

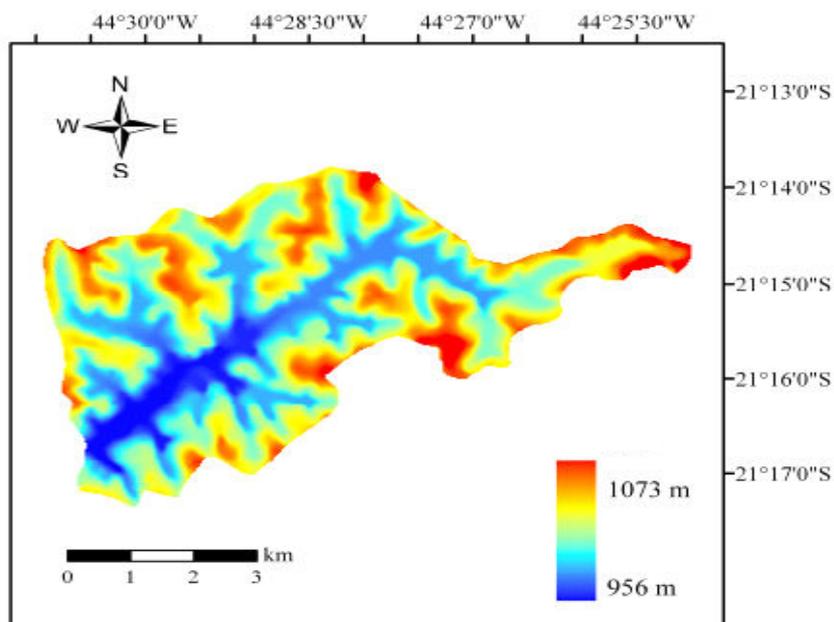


Figura 3 Modelo Digital de Elevação da BHRJ

O mapa de solos da BHRJ está representado na Figura 4 e sua distribuição percentual é: Latossolos (59,8%), Cambissolos (23,4%) e Neossolos Flúvicos (16,8%) (ARAÚJO, 2006). A ocorrência dos Latossolos foi observada em locais com declividades inferiores a 18%. A concentração de argila e alta porosidade são as principais características físicas dos Latossolos da região. Os cambissolos da região são solos rasos e foram encontrados em locais com declividade entre 18% e 35%, os quais possuem alta concentração de partículas finas (*silte*), o que os faz suscetíveis ao encrostamento superficial. Verificou-se que esses solos também não possuíam uma boa cobertura vegetal, sendo normalmente, de pastagens extensivas. Os Neossolos flúvicos são encontrados

ao longo da rede de drenagem, onde a paisagem tem topografia quase plana, uma vez que sua origem está associada à deposição de sedimentos oriundos de inundações periódicas (BESKOW, 2009).

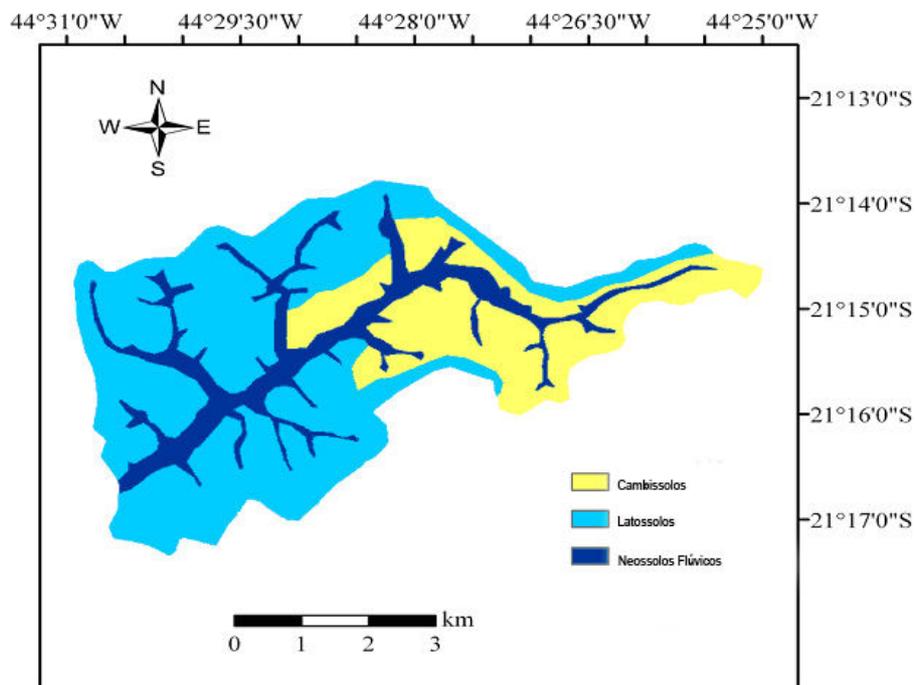


Figura 4 Mapa de solos da BHRJ

Fonte: Adaptado de Araújo (2006)

3.2 Descrição do modelo SWAT

Conforme Neitsch et al. (2005), a concepção utilizada pelo SWAT distingue os fenômenos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica em duas partes. Na primeira estão aqueles que pertencem à fase terrestre do ciclo hidrológico. Nessa fase são definidas as quantidades de água, sedimentos, nutrientes e cargas de pesticidas que serão carregadas para a calha do rio em cada sub-bacia. Na segunda, a chamada fase de propagação na rede hídrica, os

processos se referem ao movimento da água e sedimentos através da rede hídrica, do ponto de lançamento até o exutório da bacia.

3.2.1 Teoria e estrutura

2.3.2.1 Fase terrestre

Na fase Terrestre, o clima é considerado o principal agente indutor. Portanto, nessa fase são consideradas: a precipitação, temperatura, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Também fazem parte dessa fase as simulações do crescimento e de demanda por água e nutrientes das culturas agrícolas (SILVA, 2010).

A concepção do ciclo hidrológico utilizada no SWAT considera que quando a chuva alcança a superfície terrestre, parte dela é retida pela vegetação. Da parte remanescente, um percentual infiltra e outra escoar pela superfície. A parte que infiltra e outra escoar pela superfície. A parte que infiltra será redistribuída pelo perfil do solo, podendo ser utilizada pela vegetação, evapotranspirar, contribuir com o fluxo lateral (escoamento subsuperficial), percolar para as camadas inferiores do solo ou, ainda, ser armazenada no aquífero, pode fluir para o rio, permanecer num aquífero. A água estocada no aquífero pode fluir para o rio, permanecer no aquífero profundo ou evaporar (SILVA, 2010).

3.2.1.1 Balanço hídrico

O presente modelo considera quatro volumes de controle para basear sua estrutura no balanço hídrico. São os reservatórios: superficial, subsuperficial,

subterrâneo raso ou livre e subterrâneo profundo. O balanço hídrico fica assim representado:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{surf_i} - ET_i - P_i - QL_i) \quad (1)$$

em que:

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

SW_0 = 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 direto (mm);

ET_i = evapotranspiração real (mm);

P_i = percolação da água na camada simulada para a camada inferior (mm);

QL_i = escoamento lateral (subsuperficial) (mm).

O balanço hídrico é efetuado para cada HRU identificada, favorecendo melhor precisão e resultando em uma melhor descrição física dos processos. Esta equação permite estimar o balanço de água ao longo do perfil de solo em um dia, levando em consideração características do crescimento vegetal, escoamento superficial e percolação no perfil entre outros, contribuindo para estimar o fluxo de água no canal fluvial da bacia em questão (NEITSCH et al., 2005).

3.2.1.2 Componente climatológico

As condições climatológicas em uma bacia hidrográfica são provenientes da umidade e energia que controlam o balanço hídrico e assume uma importância relativa no ciclo hidrológico. As variáveis climáticas requeridas pelo SWAT são: precipitação diária, temperatura do ar máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Em caso de falhas, o modelo gera um conjunto de valores de dados climáticos para cada sub-bacia não havendo nenhuma correlação espacial com outras sub-bacias que estão localizadas na mesma bacia em estudo.

- a) Precipitação: o gerador climático utilizado pelo modelo foi desenvolvido por Nicks (1974) para gerar precipitações diárias quando não houver dados medidos ou para preenchimento de falhas. O gerador de precipitação usa o modelo de cadeia de Markov de primeira ordem para definir um dia como seco ou úmido, utilizando um número randômico (0.0 – 1.0). Se um dia é classificado como úmido, a quantidade de precipitação é gerada para uma distribuição assimétrica ou uma distribuição exponencial.
- b) Temperatura do ar e Radiação Solar: as temperaturas máximas, mínimas e a radiação solar são geradas a partir de uma distribuição normal. Uma equação da continuidade foi incorporada dentro do gerador para contabilizar as variações das temperaturas e da radiação solar, causadas por dias secos ou chuvosos.
- c) Velocidade do vento e Umidade relativa do ar: a velocidade do vento e a umidade relativa do ar são geradas por uma equação exponencial modificada tendo como entrada a velocidade média mensal do vento. O modelo utiliza uma distribuição triangular para

simular a umidade relativa do ar média diária relativa à média mensal da umidade. Com a temperatura e a radiação, a umidade relativa média diária é ajustada para levar em consideração os efeitos dos dias secos e úmidos.

- d) Temperatura do solo: a temperatura média diária do solo é simulada no centro de cada camada, sendo esta calculada na superfície e estimada usando a temperatura máxima e mínima do ar, levantando em consideração a cobertura vegetal e o solo exposto. A temperatura do solo é simulada usando uma função do amortecimento da profundidade de cada camada e dependente da densidade do solo e conteúdo de água no solo.

3.2.1.3 Componente hidrológico

O escoamento superficial é estimado separadamente para cada HRU e encaminhado para se obter o escoamento total para a bacia. Isso aumenta a precisão e fornece melhor descrição física do balanço hídrico (ARNOLD et al., 1998).

- a) Escoamento Superficial direto: o escoamento superficial é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida (TUCCI, 2005). Este escoamento ocorre quando a taxa de água que atinge o solo é superior à capacidade do mesmo em absorvê-la. Quando o volume de água aplicado é superior à capacidade de infiltração, parte será absorvida pelo solo e a outra iniciará o preenchimento das microdepressões no solo, e se persistir a precipitação, inicia-se o escoamento superficial direto (NEITSCH et al., 2005). O SWAT

utiliza para o cálculo do escoamento superficial direto o CN-SCS (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 1972), no presente trabalho foi realizada a modificação da classificação hidrológica de solos para as condições brasileiras proposta por Sartori, Lombardi Neto e Genovez. (2005) e utilizada por Durães (2010).

- b) Armazenamento no dossel: o armazenamento no dossel é a água interceptada pelas superfícies das plantas onde é armazenada e disponibilizada para evaporação. O SWAT considera a máxima quantidade de água armazenada no dossel aquela permitida pelo índice foliar máximo de cada uso do solo. Esse valor e o índice de área foliar são utilizados pelo modelo para calcular o armazenamento máximo a cada período do ciclo de crescimento das plantas. Quando a evaporação é calculada, a água primeiramente removida é a que está no dossel, e depois a demanda evaporativa restante é atendida pela transpiração das plantas e evaporação da umidade do solo (NEITSCH et al., 2005).
- c) Infiltração: a infiltração refere-se à entrada de água no perfil do solo proveniente da precipitação. Com a continuação da infiltração, o solo torna-se cada vez mais úmido, provocando um decaimento na taxa de infiltração até ela se tornar estável. A taxa inicial de infiltração depende da umidade contida no solo, antes do início do escoamento superficial e a taxa final é equivalente a condutividade hidráulica saturada do solo. O método CN-SCS é usado para calcular o escoamento superficial diariamente, mas é incapaz de calcular a taxa de infiltração. Por isso, o modelo calcula a água que entra no perfil do solo pela diferença entre a quantidade de

precipitação e o escoamento superficial direto (NEITSCH et al., 2005).

- d) Fluxo Subsuperficial Lateral: o escoamento subsuperficial ocorre nas camadas que se encontram entre 0 e 2m. Pode ser significativo em áreas onde os solos possuem alta condutividade hidráulica nas camadas superficiais e uma base impermeável ou semipermeável. Neste caso, a precipitação irá percolar verticalmente até encontrar a camada impermeável. A água que fica retida acima da camada impermeável forma a zona saturada, sendo essa zona, a fonte de água para o escoamento lateral ou subsuperficial (NEITSCH et al., 2005).

O modelo SWAT incorpora um modelo de onda cinemática para o escoamento subsuperficial desenvolvido por Sloan et al. (1983) e resumido por Sloan e Moore (1984). Este modelo de onda cinemática é baseado na equação do balanço de massa, onde o segmento em declive é utilizado como volume de controle, calculando dessa forma, o escoamento lateral em cada camada, além da declividade o modelo leva em consideração a variação de condutividade hidráulica e o conteúdo de água no solo. No perfil do solo, o SWAT calcula esta contribuição simultaneamente com a redistribuição (NEITSCH et al., 2005).

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

- e) Redistribuição: a redistribuição refere-se ao movimento contínuo da água através do solo depois que a infiltração cessa. A redistribuição é causada por diferenças no conteúdo de água no perfil do solo.

Quando volume de água, contido nos perfis do solo está uniforme, a redistribuição cessa. O componente responsável pela redistribuição no SWAT usa uma técnica de armazenamento para prever o fluxo através de cada camada do solo na zona radicular.

- f) Percolação de água no solo: este processo combina duas condições, a primeira através da propagação do armazenamento e a segunda pelo fluxo por fendas existentes no solo. O solo é dividido em várias camadas e assume-se que a água infiltra-se por estas camadas dependendo da condição da umidade, para chegar ao aquífero raso. Quando a umidade do solo presente em cada camada apresentar-se superior a capacidade de campo, ocorre a percolação da água, desde que a camada seguinte não esteja saturada. A taxa de percolação é máxima (condutividade hidráulica saturada) na saturação e diminui a zero quando a umidade do solo atingir a capacidade de campo. A água que percola através de todas as camadas torna-se parte do volume armazenado como água subterrânea ou surge como contribuição no curso d'água por meio do escoamento de base (KUMAR, 2008; NEITSCH et al., 2005).
- g) Evapotranspiração: a evapotranspiração é o conjunto de processos responsáveis pela transformação da água na fase líquida em vapor d'água. A evapotranspiração inclui os processos de evaporação de rios e lagos, solo nu e superfícies das vegetações e a transpiração é ocasionada pela folhas das plantas. O modelo calcula a evaporação dos solos e a transpiração das plantas separadamente, assim como descrito por Ritchie (1972). A evaporação potencial dos solos é estimada como uma função da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar (IAF em relação área da HRU). A evaporação real é estimada usando uma função exponencial da profundidade do

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

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

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

- h) Escoamento subterrâneo: o componente de simulação do escoamento subterrâneo no SWAT, particiona o aquífero em dois: o aquífero raso (não confinado) e profundo (confinado). A recarga do aquífero raso provém da percolação e é dividido em duas partes: uma parte vai para o aquífero profundo e não retorna mais para o curso d'água, enquanto a parte remanescente no aquífero raso contribui para o escoamento no canal ou trecho das sub-bacias, sendo a contribuição da água subterrânea para as seções de controle, feita criando-se um armazenamento no aquífero não confinado (ARNOLD et al., 1998).

O tempo em que a água sai da zona radicular e recarrega o aquífero raso é modelado, através de um fator de atraso do escoamento subterrâneo, (*Gw_delay*) como proposto por Venetis (1969). Para dividir a recarga total do

aquífero raso e subterrâneo, o modelo considera um coeficiente de percolação ($Rchg_{dp}$). Se a água no aquífero raso é maior que o valor limite definido pelo modelo ($Gwqmn$), então ele contribui para o escoamento de base.

A água pode mover-se do aquífero raso para zona não saturada adjacente. Em períodos quando essa camada do aquífero está seca, a água da franja capilar, que separa as zonas saturadas e não saturadas vai evaporar e mover para cima de forma difusa. Como a água é removida da franja capilar por evaporação, ela é repostada pela água do aquífero subjacente. A água também pode ser retirada do aquífero por plantas com raízes profundas, frequentemente observadas em regiões de descarga de aquíferos, como em matas ciliares, onde o solo encontra-se normalmente saturado (DURÃES, 2010; NEITSCH et al., 2005; VIOLA 2008).

No caso do aquífero profundo ou confinado, admite-se que o mesmo contribui para o escoamento de água para fora da bacia hidrográfica simulada (ARNOLD et al., 1998).

- i) *Revap*: o SWAT modela o movimento de água para as camadas adjacentes não saturadas como uma função da demanda de água para a evapotranspiração. Para evitar algum equívoco com a evaporação do solo e a transpiração, esse processo dentro do SWAT é chamado de “*revap*”. Este processo é significativo em bacias onde a zona saturada não está muito abaixo da superfície ou em locais onde plantas com raízes profundas se desenvolvem. Como o tipo da cobertura vegetal irá afetar a importância do “*revap*” no balanço de água, os parâmetros que governam essa variável, geralmente, variam com o uso do solo. Esse processo possibilita reger a quantidade de água que recarrega os aquíferos (NEITSCH et al, 2005).

3.2.1.4 Componente crescimento de plantas

O modelo SWAT simula o crescimento das plantas através de uma versão simplificada do modelo EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate Model*), desenvolvido por Williams (1995).

Neste modelo, o desenvolvimento das plantas se dá como função de unidades de calor ou Graus-Dias, assumindo que cada espécie possui uma temperatura de base, abaixo da qual não se desenvolve, e uma temperatura máxima, que quando alcançada, também faz cessar o crescimento. Um valor de Graus-Dias é estipulado para que a planta alcance a maturidade. A maturidade será atingida quando a soma das diferenças entre as temperaturas médias diárias e a temperatura de base da planta alcançar o valor de unidade de calor estabelecido.

2.3.2.2 Fase de propagação na rede hídrica

O fluxo de água no curso d'água principal é simulado por meio do método de Armazenamento Variável, desenvolvido por Williams (1969). Este método considera o canal de seção trapezoidal e sua vazão e velocidade calculadas através da equação de Manning, sendo o tempo de propagação calculado pela divisão do comprimento do curso d'água pela velocidade. O fluxo no canal é submetido a perdas por transmissão e evaporação.

3.3 Delineamento de HRU's

O SWAT executa o cruzamento dos planos de informações para gerar as unidades de respostas hidrológicas (*Hydrologic Response Units – HRUs*). A

modelagem é realizada de acordo com as seguintes etapas: primeiramente, o programa calcula os fluxos de cada HRU por unidade de área. Na sequência esses resultados são agregados para computar o que foi gerado pela sub-bacia, de acordo com as frações da HRU existentes. Em seguida, as respostas geradas pelas sub-bacias são então direcionadas para as calhas dos rios, de acordo com a rede hídrica existente na bacia. Isso aumenta a precisão das predições e fornece melhor descrição física do balanço de água na bacia (NEITSCH et al., 2005).

Neste trabalho, para a geração das HRU's foi adotada uma divisão que contemplasse uma combinação entre as classes de solos mais representativas presentes na bacia, em conjunto com suas respectivas declividade. Com isto se fez uma divisão em que a classe de declividade de 0-18%, contemplou os Latossolos e os Neossolos e 18-35% os Cambissolos. A última classe e menor é aquela com declividades maiores que 35%. Quanto ao uso do solo, foi definido que apenas os usos que ocupassem uma área maior que 10% da área total da bacia fossem considerados para as definições das HRU's. Isso se deve ao fato que estes usos são os mais influentes no balanço hídrico, tanto no escoamento como na evapotranspiração da bacia.

Para a confecção das HRU's foi utilizada as combinações especificadas anteriormente. Com isso, obteve uma combinação de três classes de declividade, três classes de uso e três tipos de solos sendo obtidas 27 HRU's. Na Tabela 1 é apresentada as HRU's com as respectivas combinações de usos, tipos de solo e declividade com as respectivas áreas.

Tabela 1 Unidades de Respostas Hidrológicas (HRU's) para a BHRJ

HRU's	TIPO DE SOLO	USO DO SOLO	CLASSE DE DECLIVIDADE	ÁREA (Km ²)	ÁREA (%)
1	Cambissolos	Milho	0-18	2,4318	7,407
2	Cambissolos	Milho	18-35	1,1483	3,498
3	Cambissolos	Pastagem	0-18	2,8702	8,743
4	Cambissolos	Vegetação nativa	0-18	0,6313	1,923
5	Cambissolos	Milho	>35	0,0828	0,252
6	Cambissolos	Vegetação nativa	18-35	0,3964	1,207
7	Cambissolos	Pastagem	18-35	0,9952	3,031
8	Cambissolos	Pastagem	>35	0,1468	0,447
9	Cambissolos	Vegetação nativa	>35	0,0325	0,099
10	Latossolos	Vegetação nativa	0-18	1,5562	4,740
11	Latossolos	Pastagem	0-18	6,7481	20,555
12	Latossolos	Milho	0-18	3,1837	9,698
13	Latossolos	Milho	18-35	0,0975	0,297
14	Latossolos	Vegetação nativa	18-35	0,9427	2,872
15	Latossolos	Vegetação nativa	>35	0,2223	0,677
16	Latossolos	Milho	>35	0,3932	1,198
17	Latossolos	Pastagem	18-35	2,6825	8,171
18	Latossolos	Pastagem	>35	0,6187	1,885
19	Neossolos	Milho	0-18	2,004	6,104
20	Neossolos	Milho	18-35	1,3653	4,159
21	Neossolos	Pastagem	0-18	2,7779	8,462
22	Neossolos	Pastagem	18-35	0,2538	0,773
23	Neossolos	Vegetação nativa	0-18	1,1504	3,504
24	Neossolos	Vegetação nativa	18-35	0,064	0,195
25	Neossolos	Pastagem	>35	0,0325	0,099
26	Neossolos	Vegetação nativa	>35	0,0007	0,002
27	Neossolos	Milho	>35	0,0007	0,002

3.3 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade é um instrumento para previsão dos parâmetros que possuem maior impacto sobre as simulações hidrológicas, proporcionando um conhecimento da influência do parâmetro sobre o modelo, o que possibilita a racionalização de etapas de calibração (DURÃES, 2010).

Para a análise de sensibilidade, o modelo SWAT utiliza a combinação do *Latin Hypercube* (LH) e o *One-Factor-At-a-Time* (OAT). O LH utiliza o método de Monte Carlo, permitindo uma análise mais robusta da sensibilidade, pois requer um grande número de variáveis associadas (NEITSCH et al., 2005), porém, utiliza um método de amostragem estratificada que permite a estimação mais eficiente das estatísticas dos parâmetros de saída. O método subdivide a distribuição de cada parâmetro em “N” intervalos, cada qual com a probabilidade de ocorrência igual a $1/N$. Os valores aleatórios dos parâmetros são gerados de forma que cada série é amostrada apenas uma única vez e então, o modelo é executado “N” vezes com a combinação aleatória dos parâmetros (VAN GRIENSVEN, 2005).

No OAT, apenas os parâmetros de entrada são modificados durante o processamento da análise. Em cada simulação somente um parâmetro é mudado por vez, assim, com as mudanças no resultado em cada simulação, o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado (VAN GRIENSVEN, 2005). Depois de todos os parâmetros terem sido variados, o algoritmo do LH localiza uma nova área de amostragem para realizar uma modificação em todos os parâmetros (VEITH; GHEBREMICHAEL, 2009)

Possivelmente, a mais importante tarefa que precisa ser realizada durante a especificação dos parâmetros é reduzir o número de parâmetros para o estágio de calibração do modelo. O SWAT possui 21 parâmetros que podem vir

a exercer influência na vazão da bacia em estudo, com isso, determinar valores realistas para um número tão grande de parâmetros se torna inviável, necessitando a redução dos mesmos (MULETA; NICKLOW, 2005). Na Tabela 2 são abordados todos os parâmetros que influenciam o escoamento na bacia.

Tabela 2 Parâmetros adotados pelo modelo SWAT na simulação da vazão

PROCESSO	PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	UNIDADES
ÁGUA DO SOLO	SOL_AWC	Armazenamento de Água no Solo	0	1	mm H ₂ O/ mmsolo
	SOL_K	Condutividade Hidráulica Saturada do solo	0	100	mm/h
ÁGUA SUBTERRÂNEA	ALFHA_BF	Constante de Recessão do Escoamento Básico	0	1	dias
	GWQMN	Nível Limite de Água no Aquífero Raso para a Ocorrência de Fluxo de Base	0	5000	mm
	GW_REVAP	Coefficiente de Ascensão da Água à Zona de Saturação	0,02	0,2	Adm*
	REVAPMN	Produtividade Limite da Água no Solo para a Ocorrência da Ascensão da Água à Zona não Saturada	0	500	mm
	GW_DELAY	Intervalo de Tempo para a Recarga do Aquífero	0	50	Dias
	EPCO	Coefficiente de Compensação de Absorção de Água pelas plantas	0	1	Adm*
	RCHRG_DP	Coefficiente de Percolação da água para o Aquífero Profundo	0	1	mm
	SOL_Z	Profundidade da Camada do Solo	0	300	mm
ESCOAMENTO SUPERFICIAL	CN2	Curva Número Inicial para a Condição de Umidade II	0	100	Adm*
	SURLAG	Coefficiente de Atraso do Escoamento Superficial	0	10	Dias
	CH_N2	Número Manning	0,01	0,5	Adm*
	SLOPE	Declividade Média da Sub-Bacia	0	0,6	mm
	SLSUBBSN	Comprimento Médio da Encosta da Sub-Bacia	10	150	m
EVAPOTRANS-PIRAÇÃO	BLAI	Índice de Área Foliar Máximo	0	10	m ² /m ²
	CANMX	Quantidade de Água Máxima Interceptada pela Vegetação	0	10	mm
	ESCO	Coefficiente de Compensação de Evaporação de Água no Solo	0	1	Adm*
PERDA DE ÁGUA POR TRANSMISSÃO	SOL_ALB	Albedo do Solo	0	1	Adm*
PERDA DE ÁGUA POR TRANSMISSÃO	CHK2	Condutividade Hidráulica Efetiva do Canal	0	150	mm/h
MANEJO DO SOLO	BIOMIX	Eficiência da Mistura Biológica do Solo	0	1000	Adm*

Adm* = Adimensional

Van Griensven et al. (2006) sugerem uma classificação em diferentes categorias de sensibilidade dos parâmetros relativos a posição do parâmetro na análise de sensibilidade. Na Tabela 3 são representadas as categorias.

Tabela 3 Influência da posição do parâmetro na Análise de Sensibilidade no processo de Calibração

CATEGORIA	POSIÇÃO DO PARÂMETRO
Muito importante	1
Importante	2 - 6
Ligeiramente importante	7 - 19
Sem importância	20 - 28

3.4 Calibração do modelo SWAT

No início da simulação ocorrem incertezas, devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente a umidade do solo, justificando a utilização de um período de aquecimento do modelo, para que, ao iniciar a simulação, as variáveis de estado estejam livres da influência das condições iniciais (MELLO et al., 2008). No presente trabalho foram utilizados no período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de agosto de 2006, para o aquecimento do modelo SWAT.

O SWAT inclui uma função multiobjetivo para o procedimento de calibração automática que foi desenvolvido por Van Griensven e Bauwens (2003). O procedimento de calibração é baseado no algoritmo Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) desenvolvido na Universidade do Arizona e é descrito por Duan, Sorooshian e Gupta (1992). No SCE-UA, as variáveis são otimizadas a partir dos dados de entrada que compõem a calibração do modelo. De acordo com Van Liew e Veith. (2010), 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 iterações necessárias para a convergência do algoritmo.

No esquema desenvolvido para a otimização do SWAT, os parâmetros do modelo que afetam o ciclo hidrológico podem ser alterados sobre toda bacia hidrográfica ou distribuídos (por sub-bacias ou HRUs).

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 HRU's e/ ou para a toda a bacia.

O usuário pode especificar uma função objetivo específica que será minimizada. A função objetivo é um indicador do desvio entre uma série medida e uma série simulada (VAN GRIENSVEN; BAUWENS, 2003). As opções disponíveis para função objetivo na ferramenta de autocalibração do modelo SWAT inclui a soma de quadrados dos resíduos e a soma dos quadrados dos resíduos classificados. O SWAT permite que a função objetivo se enquadre em um intervalo de confiança de "90%", "95%", ou "97,5%" de probabilidade correspondente a estatística da distribuição Qui-quadrado (χ^2) e Bayesiana (VEITH; GHEBREMICHAEL, 2009).

O processo de calibração do presente trabalho se deu no período de 01 de setembro de 2006 a 31 de agosto de 2008. Utilizou-se como função objetivo a soma dos quadrados dos resíduos, com distribuição χ^2 , no intervalo de confiança de 97,5%.

3.6 Validação do modelo SWAT

O processo de validação de modelos hidrológicos depende das aplicações pretendidas. Klemes (1986) descreve uma série de testes para validar modelos hidrológicos para distintas aplicações. No entanto, para se obter uma medida do desempenho do modelo nos testes, são empregadas estatísticas de precisão, como coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (CNS), entre outros.

Na primeira etapa de validação foi realizada a verificação (split simple test) do SWAT. Para isso, os modelos previamente calibrados, no período de setembro de 2006 a agosto de 2007, foram aplicados ao período de 01 de setembro de 2008 a 31 de agosto de 2009. Essa validação, de acordo com Klemes (1986), permite checar a acurácia do modelo para a simulação de processos estacionários, em bacias hidrográficas com monitoramento hidrológico.

3.7 Estatísticas de precisão

Para avaliar o desempenho do modelo, tanto nas fases de calibração quanto na validação, foram utilizadas as seguintes estatísticas de precisão: coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) e sua versão logarítmica ($\log(C_{NS})$) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), coeficiente de determinação (R^2) (LEGATES; MCCABE, 1999) e P_{bias} (KUMAR, 2008).

O C_{NS} traduz a eficiência das aplicações do modelo para previsões mais acertadas nas cheias, ou seja, quando o aproveitamento encontra-se com vazões bastante elevadas. Quanto maior a eficiência, ou seja, maior o valor do índice, melhores serão as previsões (GUILHON; ROCHA, 2007). Santhi et al. (2001 citado por MORIASI et al., 2007) apresentam a seguinte classificação para este

coeficiente em aplicações do SWAT, utilizando intervalos diários: $C_{NS} > 0,65$ o modelo é considerado muito bom; $0,54 < C_{NS} < 0,65$ o modelo é considerado bom e entre 0,5 e 0,54 satisfatório. Para intervalos mensais, Moriasi et al. (2007) classificam o C_{NS} aplicado ao modelo SWAT da seguinte forma: $0,75 < C_{NS} < 1,00$, muito bom; $0,65 < C_{NS} < 0,75$, bom; $0,5 < C_{NS} < 0,65$, satisfatório e abaixo de 0,5 inadequado.

O coeficiente C_{NS} é calculado conforme equação 2.

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

em que:

Q_{OBS} = vazão observada;

Q_{SIM} = vazão simulada;

\bar{Q}_{OBS} = vazão média observada e

n = número de eventos.

A versão logartímica do C_{NS} é calculada conforme equação 3, consistindo do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos, o qual valoriza mais as vazões de recessão que o coeficiente Nash-Sutcliffe, tornando-se menos sensível a cheias. Quanto maior a eficiência, ou seja, maior o valor do índice, melhores serão as previsões. Esse índice é limitado em 1.

$$\log(C_{NS}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{OBS_i}) - \log(Q_{SIM_i}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{OBS_i}) - \log(\bar{Q}_{OBS_i}))^2} \quad (3)$$

em que:

$\log(Q_{OBS})$ = vazão observada logaritimizada;

$\log(Q_{SIM})$ = vazão simulada logaritimizada;

$\log(\bar{Q}_{OBS})$ = média da vazão observada logaritimizada e

n = número de eventos.

O valor do R^2 de acordo com Legates e McCabe (1999) é um indicador da correlação entre os valores observados e simulados, com amplitude de variação de 0 a 1, em que o valor 1 indica um ajuste perfeito. Santhi et al. (2001 citado por MORIASI et al., 2007) consideram acima de 0,5 como aceitável o modelo. O R^2 é considerando uma das estatísticas mais sensíveis a valores extremos (outliers) e muito pouco sensível a diferenças proporcionais entre séries observadas e simuladas (LEGATES; MCCABE, 1999).

$$R^2 = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS_i}) * (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS_i})}{[\sum_{i=1}^n (Q_{OBS_i} - \bar{Q}_{OBS_i})^2]^{0.5} * [\sum_{i=1}^n (Q_{SIM_i} - \bar{Q}_{SIM_i})^2]^{0.5}} \right\} (4)$$

em que:

Q_{OBS} = vazão observada;

Q_{SIM} = vazão simulada;

\bar{Q}_{OBS} = vazão média observada e

n = número de eventos.

O P_{bias} (BESKOW, 2009) é o percentual de viés das vazões simuladas em relação às observadas e é calculado de acordo com a equação 5. Quanto mais próximo de zero, melhor o modelo representa a realidade, ou seja, sem tendência nas estimativas. Valores negativos indicam que o modelo subestima a vazão

simulada em relação à observada e positivo, superestima. Conforme Moriasi et al. (2007), o P_{bias} , é recomendado por quantificar erros no balanço hídrico, além de indicar se o modelo é pobre em representatividade. Van Liew et al. (2007) apresentam a seguinte classificação para este 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. Segundo Moriasi et al. (2007), esta classificação se repete para dados mensais.

$$P_{BIAS} = \left(\frac{\bar{Q}_{SIM_i} - \bar{Q}_{OBS_i}}{\bar{Q}_{OBS_i}} \right) * 100 \quad (5)$$

em que:

\bar{Q}_{SIM} = vazão simulada;

\bar{Q}_{OBS} = vazão média observada e,

3.8 Análises complementares dos processos hidrológicos

Complementarmente, aos estudos estatísticos foram realizadas análises sobre informações frequentemente extraídas do hidrograma, abrangendo a curva de permanência, vazões máximas e mínimas diárias anuais, vazão média de longo termo e deflúvio.

Uma vez ajustado modelo e verificado o seu ajuste, foi produzida uma nova série histórica de vazão para BHRJ, a partir dos dados meteorológicos disponíveis para o ano hidrológico de setembro de 2009 a agosto de 2010.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de sensibilidade do modelo SWAT na BHRJ

Devido à complexidade do modelo SWAT é imprescindível para a sua adequada utilização a realização de uma análise de sensibilidade, com o objetivo de encontrar os parâmetros mais influentes na obtenção dos modelos. Esses parâmetros disponibilizados para serem calibrados automaticamente possuem relação com o comportamento hidrológico do modelo (DURÃES, 2010).

Na Tabela 4 é representada a gradação de sensibilidade dos parâmetros, para os dados diários e mensais, relacionado ao modelo hidrológico para a BHRJ.

Para os dados diários de vazão, o parâmetro considerado com maior sensibilidade no modelo foi o CN2, o qual foi considerado “muito importante” pelo critério apresentado por Van Griensven et al. (2006). Os parâmetros considerados importantes para a calibração foram ALPHA_BF, RCHRG_DP, ESCO, SOL_Z e SOL_AWC. Estes parâmetros foram utilizados para a calibração juntamente com SOL_K, que apesar ser considerado ligeiramente importante, este foi calibrado juntamente com os demais.

Para os dados mensais de vazão, o parâmetro considerado com maior sensibilidade foi o CN2, segundo critério de van Griensven et al. (2006). Os parâmetros considerados importantes para a calibração foram ALPHA_BF, RCHRG_DP, ESCO, SOL_K e SOL_Z. Esses parâmetros foram utilizados para a calibração juntamente com SOL_AWC, que apesar ser considerado ligeiramente importante, este foi calibrado juntamente com os demais.

Tabela 4 Resultado da Análise de Sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT com dados diários e mensais de vazão, para a BHRJ

GRADAÇÃO DE SENSIBILIDADE	PARÂMETROS	PARÂMETROS
	DADOS DIÁRIOS	DADOS MENSAIS
1	CN2	CN
2	ALPHA_BF	ALPHA_BF
3	RCHRG_DP	RCHRG_DP
4	ESCO	ESCO
5	SOL_Z	SOL_Z
6	SOL_AWC	SOL_AWC
7	SOL_K	SOL_K
8	SURLAG	GWQMN
9	CH_K2	GW_DELAY
10	CH_N2	BLAI
11	BLAI	SLOPE
12	GWQMN	CH_K2
13	CANMX	EPCO
14	GW_DELAY	REVAPMN
15	SLOPE	SURLAG
16	EPCO	CANMX
17	REVAPMN	BIOMIX
18	SLSUBBSN	CH_N2
19	SOL_ALB	GW_DELAY
20	BIOMIX	SOL_ALB
21	GW_REVAP	SLSUBBSN

Os parâmetros mais sensíveis da BHRJ estão envolvidos nos processos de escoamento superficial direto, evapotranspiração, movimentação de água no solo e contribuição da água subterrânea. Uma breve discussão sobre a importância dos parâmetros mais sensíveis apresentados no SWAT.

- a) O parâmetro CN2 é importante no cálculo do deflúvio superficial e está relacionado com as propriedades da bacia, tais como tipo de solo, uso do solo e condições de umidade antecedente.
- b) O parâmetro ESCO é o fator de compensação da evaporação da água no solo. Esse parâmetro é importante para o cálculo da demanda de evaporação para uma determinada camada de solo. Os valores ESCO representam um percentual aplicado à evaporação da

camada superior do solo. Por outro lado, valores reduzidos de ESCO permitem mais evaporação da camada inferior do solo. A evaporação total da camada de solo é determinada pela diferença entre as camadas: inferior e superior do solo.

- c) O SOL_K é um parâmetro que relacionado ao movimento de água no solo e influencia na taxa de infiltração de água no solo. No SWAT, o parâmetro é utilizado para calcular o tempo de percolação de água, numa dada camada de solo e a quantidade de água que percola para a camada de solo inferior. O SOL_K tem relação direta com o escoamento de base, quando este se encontra alto o escoamento de base é baixo e quando é baixo o fluxo fluvial é alto. O efeito deste parâmetro no escoamento é baixo.
- d) O SOL_Z, que define a espessura da camada de solo, influencia o movimento da água no solo, nos processos de redistribuição e evaporação da água do solo.
- e) O SOL_AWC é a capacidade de armazenamento de água no solo, sendo este a diferença entre a umidade na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente. O parâmetro SOL_AWC tem uma relação inversamente proporcional com vários componente do balanço hídrico, tais como o escoamento de base e superficial.
- f) O parâmetro ALPHA_BF está diretamente relacionado com o número de dias necessários para que o fluxo subterrâneo atinja o canal principal, isto é, aumentando-se o valor do parâmetro será aumentando a recarga do aquífero e diminuindo o fluxo de base. Portanto, seu ajuste implica em modificações na quantidade da descarga líquidas no corpo d'água.

- g) O RCHRG_DP corresponde à fração percolada que abastecerá o aquífero subterrâneo profundo e que, portanto, não fará parte do balanço hídrico da BHRJ. Quanto maior o valor desse parâmetro, mais água contribui para o aquífero profundo e menor é o volume de água proveniente do fluxo de base para o curso d'água principal.

Alguns dos parâmetros identificados como mais sensíveis, não são facilmente mensuráveis ou estimáveis para a BHRJ, devido ao fato que valores realísticos não estavam disponíveis, sendo estes o ALPHA_BF, CN2, ESCO e RCHRG_DP. Entretanto, parâmetros com estimativas adequadas, tais como SOL_AWC, SOL_K e SOL_Z, foram incluídos na calibração, porque a análise de sensibilidade mostrou que eles influenciavam consideravelmente a resposta do modelo. É importante ressaltar que esta é uma limitação importante do modelo SWAT, uma vez que este não permite que dados distribuídos no espaço da bacia, associados à hidrologia do solo (armazenamento de água e condutividade hidráulica) sejam alimentados no modelo com esta condição. Contudo, essas variáveis hidrológicas são altamente sensíveis, no tocante à geração do escoamento superficial direto e conseqüentemente, em todo o balanço hídrico executado pelo modelo.

A sensibilidade das variáveis encontradas nesse trabalho foram também verificadas em outros trabalhos, tais como o trabalho de Lino (2009), para a bacia do rio Preto em Santa Catarina, o qual verificou as variáveis ALPHA_BF, CN2 e ESCO como as mais sensíveis; Durães (2010), na bacia do rio Paraopeba, que encontrou como variáveis mais sensíveis a ESCO, ALPHA_BF, SOL_Z, SOL_AWC e CN2. Kannan, White e Whelan (2007) em uma bacia do rio Sharnbrook no Reino Unido, os quais encontraram maior sensibilidade nas variáveis CN2, ESCO e SOL_AWC. Stratton et al. (2009), em uma bacia do

semiárido de Idaho (EUA), verificaram que os parâmetros mais sensíveis foram ESCO, ALPHA_BF, SOL_K, SOL_AWC, CN2 e RCHRG_DP.

4.2 Calibração e validação do modelo SWAT à BHRJ

No processo de calibração automática, foram escolhidos os parâmetros mais influentes na simulação, de acordo com a Análise de Sensibilidade realizada previamente (Tabela 4).

Os valores iniciais dos parâmetros CN2, SOL_Z, SOL_AWC e SOL_K são determinados a partir de características da bacia informadas nos mapas temáticos de uso e ocupação do solo e de dados tabulares, por meio do delineamento da bacia, foi indicado o método de variação 3 para o ajuste destes valores, ou seja, o valor inicial foi ajustado com base nestas alterações percentuais.

Os parâmetros calibrados, as suas respectivas faixas de variação, método de calibração e o valor calibrado, para os dados com intervalos diários, adotados na BHRJ estão representados na Tabela 5.

Tabela 5 Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com os valores calibrados, para dados com intervalos diários, para a BHRJ

ORIGEM DE SENSIBILIDADE	PARÂMETROS	UNIDADES	FAIXA DE VARIAÇÃO	MÉTODO DE VARIAÇÃO	VALOR CALIBRADO
1	CN	Adm	0-1	1	-38,18%
2	ALPHA_BF	dias	± 50%	3	0,01
3	RCHRG_DP	mm	0-1	1	0,484
4	ESCO	Adm	0-1	1	0,043
5	SOL_Z	mm	± 50%	3	-49,75%
6	SOL_AWC	mm	± 50%	3	-44,03%
7	SOL_K	mm/h	± 50%	3	50,00%

Os parâmetros calibrados, as suas respectivas faixas de variação, método de calibração e o valor calibrado, para os dados com intervalos mensais, adotados na BHRJ estão representados na Tabela 6.

Tabela 6 Parâmetros utilizados na calibração do modelo SWAT com os valores calibrados, para dados com intervalos mensais, para a BHRJ

GRADAÇÃO DE SENSIBILIDADE	PARÂMETROS	UNIDADES	FAIXA DE VARIAÇÃO	MÉTODO DE VARIAÇÃO	VALOR CALIBRADO
1	CN	Adm	0-1	1	30,00%
2	ALPHA_BF	dias	± 50%	3	0,01
3	RCHRG_DP	mm	0-1	1	0,2
4	ESCO	Adm	0-1	1	0,02
5	SOL_Z	mm	± 50%	3	-1,98%
6	SOL_AWC	mm	± 50%	3	-26,00%
7	SOL_K	mm/h	± 50%	3	-2,00%

Os valores para o parâmetro CN2, o mais importante na calibração, para os dados com intervalos diários e mensais, antes e após a calibração estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 Valores iniciais e calibrados do parâmetro CN2 para a BHRJ

HRU's	VALORES DE CN2 NAS HRU's		
	VALORES INICIAIS	DADOS DIÁRIOS CALIBRADOS	DADOS MENSAIS CALIBRADOS
1	83	51	58
2	83	51	58
3	79	49	55
4	77	48	54
5	83	51	58
6	77	48	54
7	79	49	55
8	79	48	55
9	77	48	54
10	45	28	32
11	49	30	34
12	67	41	47
13	67	41	47
14	45	28	32
15	45	28	32
16	67	41	47
17	49	30	34
18	49	30	34
19	83	51	58

20	83	51	58
21	79	48	55

“continua”

Tabela 7 “conclusão”

VALORES DE CN2 NAS HRU's			
HRU's	VALORES INICIAIS	DADOS DIÁRIOS CALIBRADOS	DADOS MENSIS CALIBRADOS
22	79	48	55
23	77	48	54
24	77	48	54
25	79	49	55
26	77	48	54
27	83	51	58

Na Tabela 8 estão representados os resultados das estatísticas de precisão aplicados na avaliação do desempenho da simulação hidrológica nas etapas de calibração e validação do modelo SWAT à BHRJ.

Tabela 8 Estatísticas de precisão resultantes da calibração e validação do modelo SWAT para simulação hidrológica na BHRJ

Aplicação	Intervalo	C_{NS}	$\text{Log}(C_{NS})$	$P_{BIAS}(\%)$	R^2
Calibração	Diário	0,66	0,728	4,329	0,814
Validação	Diário	0,872	0,741	-1,588	0,939
Calibração	Mensal	0,939	0,854	6,622	0,935
Validação	Mensal	0,853	0,734	7,095	0,749

Os valores do coeficiente Nash-Sutcliffe (C_{NS}), os quais indicam a boa precisão do modelo, principalmente, na estimativa de vazões de pico, foram 0,660 e 0,872, respectivamente, nas fases de calibração e validação do modelo SWAT, com passo de simulação diário. Tais estatísticas permitem enquadrar o modelo na categoria “muito bom” em ambas as fases, conforme classificação proposta por Saleh et al. (2000). O valor de C_{NS} relativo à fase de validação é maior que o valor obtido para calibração, sendo este aspecto, indicativo do bom ajuste do modelo à BHRJ.

Com relação aos dados mensais, o modelo apresentou um desempenho de 0,939 e 0,853, para calibração e validação, respectivamente. Este desempenho do modelo SWAT é considerado “muito bom” de acordo Moriasi et al. (2007), para a bacia em estudo.

São vastos os trabalhos na literatura que utilizaram o C_{NS} para testar a eficiência do SWAT e de outros modelos hidrológicos para avaliar o comportamento das vazões em bacias hidrográficas.

Pinto (2011) aplicou o modelo SWAT a uma bacia hidrográfica de cabeceira da Serra da Mantiqueira, com 688 hectares, obtendo C_{NS} para a calibração de 0,81 e para validação de 0,79, sendo estes considerados muito bons. Sexton et al. (2010) obtiveram resultados para a calibração, para duas bacias estudadas, entre 0,46 e 0,58 e, durante a validação, entre 0,68 e 0,78, para passo de simulação diário, concluindo que os resultados são aceitáveis e qualificam o modelo SWAT para aplicação às bacias hidrográficas estudadas.

Du et al. (2005) trabalhando com dados diários de vazão em uma bacia hidrográfica do estado de Iowa (EUA), com dois postos fluviométricos diferentes, obtiveram C_{NS} para o período de calibração na ordem de 0,39 e 0,47 e, na validação, 0,32 e 0,35. Quando aplicou a dados mensais, os seus resultados foram de 0,36 e 0,72 para a calibração e de 0,13 e 0,56 para a validação. Srinivasan et al. (2010) conseguiram C_{NS} entre 0,74 e 0,69, respectivamente, nas fases de calibração e validação, trabalhando em uma bacia hidrográfica na cabeceira do Rio Mississippi (EUA).

Tendo-se como base vários trabalhos sobre aplicação do modelo SWAT, em várias partes do mundo, pode-se observar que, os valores de C_{NS} , obtidos para BHRJ, são bons o suficiente para qualificarem o modelo como apto à simulação hidrológica na referida bacia.

O coeficiente Nash-Sutcliffe, empregado aos logaritmos das vazões ($\log(C_{NS})$), o qual reflete a precisão do modelo, especialmente na simulação de

períodos de recessão do hidrograma, resultou em um coeficiente de 0,728 na etapa de calibração e 0,741 na etapa de validação. De acordo com Moriasi et al. (2007) podem ser considerados como “muito bons”. Estes resultados ratificam o bom ajuste do modelo à BHRJ, indicando que o modelo também se ajustou bem para vazões mínimas, sendo esta análise fundamental para a gestão dos recursos hídricos (VIOLA, 2008).

Na classificação por Moriasi et al. (2007), com relação aos dados mensais, o modelo apresentou um desempenho de 0,854 para calibração, indicando um desempenho “muito bom”. Porém, o mesmo não ocorre com os dados da validação que apresentaram um desempenho considerado “bom”, com o valor de 0,734.

No intervalo diário, o P_{bias} , que é o percentual de viés das vazões simuladas com relação às vazões observadas, apresentou pequenos desvios, resultando em uma superestimação da vazão na ordem 4,329% no período de calibração e uma subestimação de -1,588%, durante a validação. De acordo com Van Liew et al. (2007), este resultado indica boa representatividade do modelo SWAT a esta bacia, ou seja, além de estimativas com boa precisão, dados pelos coeficientes C_{NS} e $\log(C_{NS})$, estas não apresentam tendência significativa nas estimativas, significando que os parâmetros foram devidamente ajustados à BHRJ e não produzirão estimativas enviesados.

Com relação aos dados mensais, o P_{BIAS} apresentou um desempenho de 6,622% e 7,095% para calibração e validação, respectivamente. Este desempenho do modelo SWAT para dados mensais é considerado bom, de acordo Moriasi et al. (2007). Porém, deve-se ressaltar que, pelo resultado apresentado, há uma superestimativa dos dados simulados em relação aos observados.

Na figura 5 (a e b) estão representados os gráficos de dispersão dos valores de vazão, estimados em relação aos observados. De forma geral, há boa

distribuição dos pontos ao redor da reta 1:1, tanto para as fases de calibração quanto para validação. No entanto, observa-se maior concentração dos pontos acima da reta para a fase de calibração, em relação à fase de validação, significando ligeira tendência de superestimativa nesta fase, o que pode ser analiticamente identificado pelo valor de P_{bias} (Tabela 8). Na figura 5b, a dispersão dos pontos ao redor da reta representa melhor distribuição, demonstrando menor tendência nesta situação.

Na figura 6 (a e b) estão representados os gráficos de dispersão dos valores de vazão estimados em relação aos observados para a simulação mensal. Pode-se observar que a distribuição dos pontos ao redor da reta 1:1, tanto para as fases de calibração quanto para validação, não possui uma boa distribuição. Verifica-se que em ambos os casos os pontos se concentram abaixo da reta, significando que o modelo apresentou uma tendência de superestimativa das vazões, o que pode ser analiticamente identificado pelo valor de P_{bias} (Tabela 8).

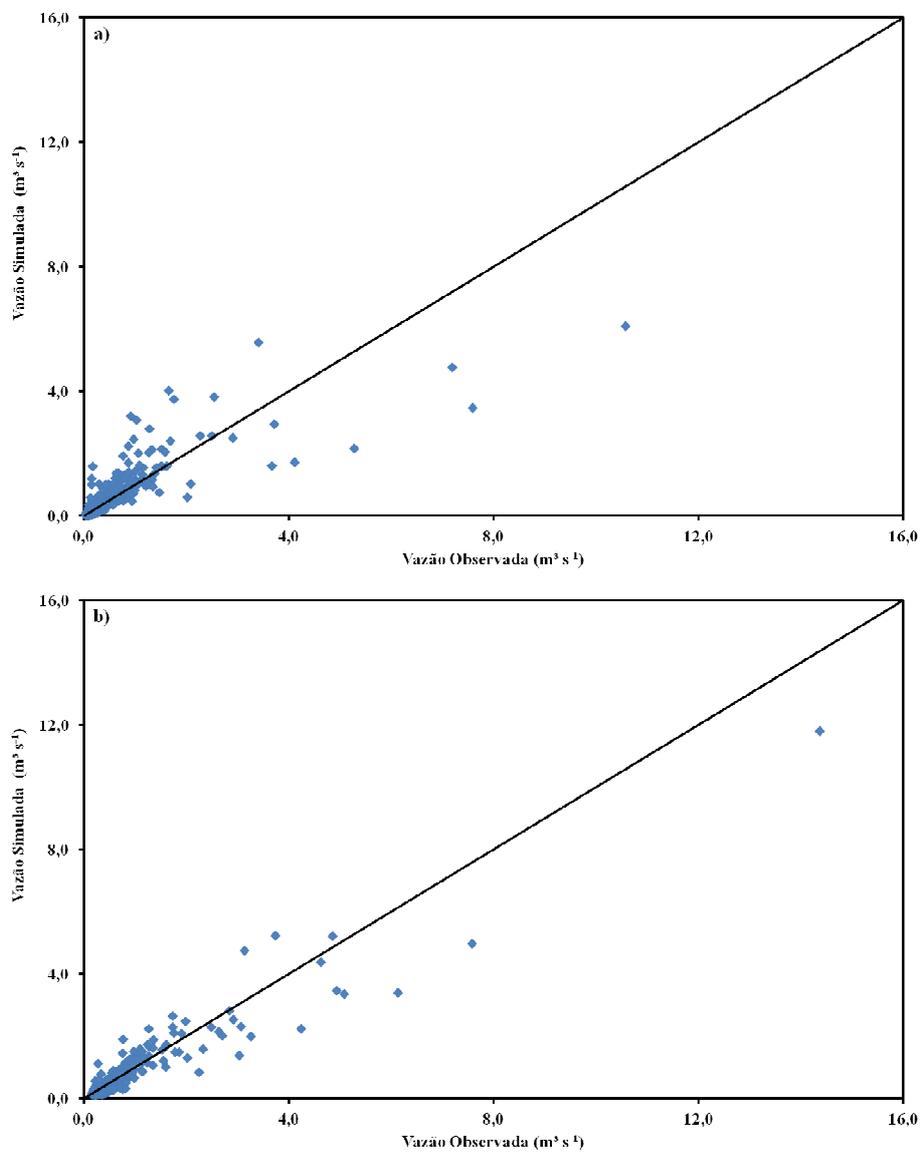


Figura 5 Gráficos de dispersão, para dados com intervalos diários, para vazões observadas e simuladas nas fases de calibração (a) e validação (b), para a BHRJ

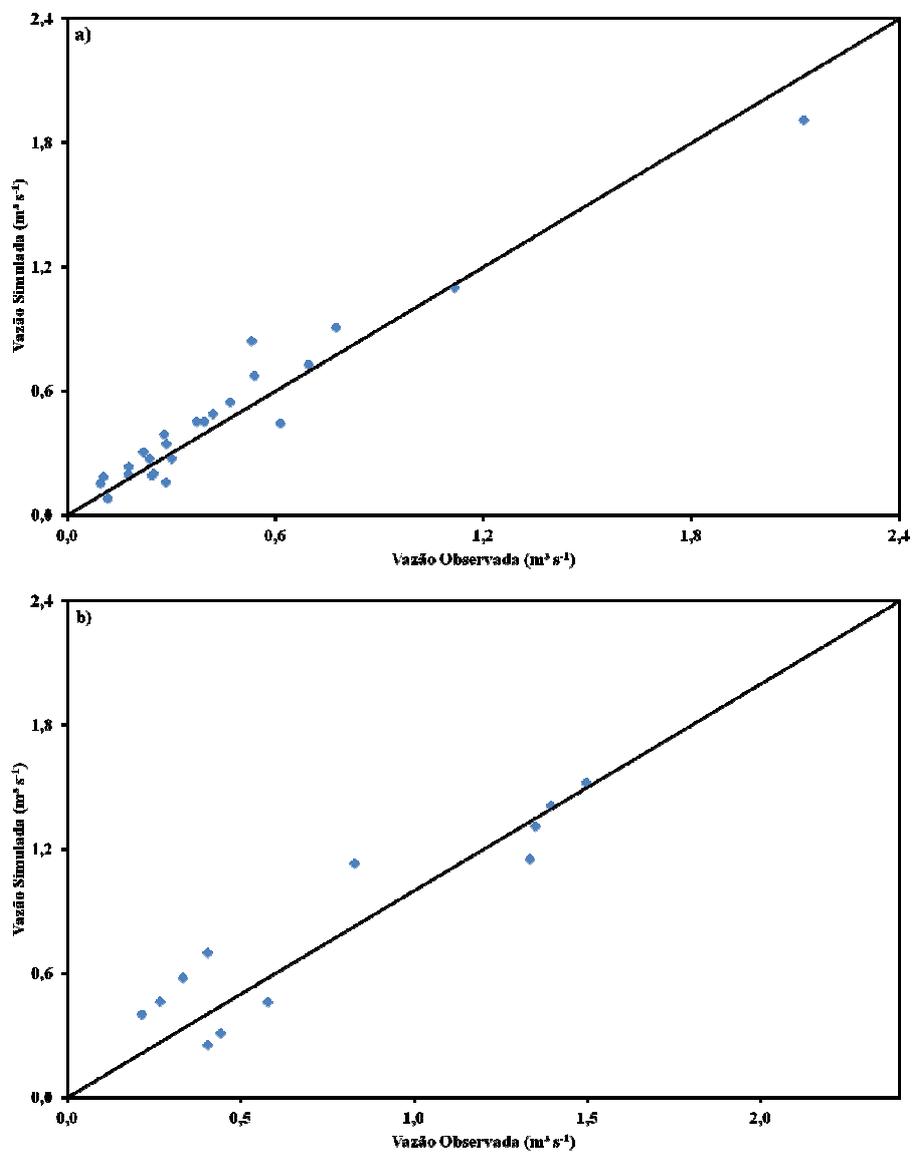


Figura 6 Gráficos de dispersão, para dados com intervalos mensais, para vazões observadas e simuladas nas fases de calibração (a) e validação (b), para a BHRJ

O coeficiente de determinação (R^2), para dados diários, apresentou valores, variando de 0,814 e 0,939 para a calibração e validação, respectivamente. Para as vazões mensais, os resultados foram 0,935 para a calibração e de 0,749 para a validação.

Conforme Santhi et al. (2001) citado por MORIASI et al. (2007), valores acima de 0,5 são aceitáveis. O R^2 é considerado uma das estatísticas mais sensíveis a valores extremos e muito pouco sensível a diferenças proporcionais entre séries observadas e simuladas (LEGATES; MCCABE, 1999), auxiliando de forma importante na análise de desempenho de modelos hidrológicos.

Setegn (2010), em estudos realizados com dados diários de vazão em quatro rios da Etiópia, encontrou R^2 variando de 0,2 a 0,8 para a calibração e de 0,31 a 0,78 para validação. El-Nasr et al. (2005), em estudos realizados na Bélgica, no rio Jeker, relataram R^2 para a calibração de 0,45 e para a validação, 0,55. Chaplot (2005), utilizando o modelo SWAT na bacia do ribeirão Walnut na Califórnia (51,3 Km²), obtiveram R^2 de 0,73 na calibração de dados mensais. Bonumá et al. (2010) conseguiram resultados na ordem de 0,9 para dados mensais, em um período de 2 anos de calibração. Dessa forma pode-se dizer que o modelo SWAT, tanto para simulação diária quanto mensal, apresenta desempenho semelhante ou superior a de outras situações ao redor do mundo.

A análise visual do hidrograma, simulado frente ao observado consiste em uma importante ferramenta de avaliação do ajuste, sendo segundo Legates e McCabe (1999), essencial para uma correta avaliação do modelo. Nas figuras 7 e 8 estão representados os hidrogramas observados e simulados pelo modelo SWAT, considerando passo de simulação diário, respectivamente, nas fases de calibração e validação.

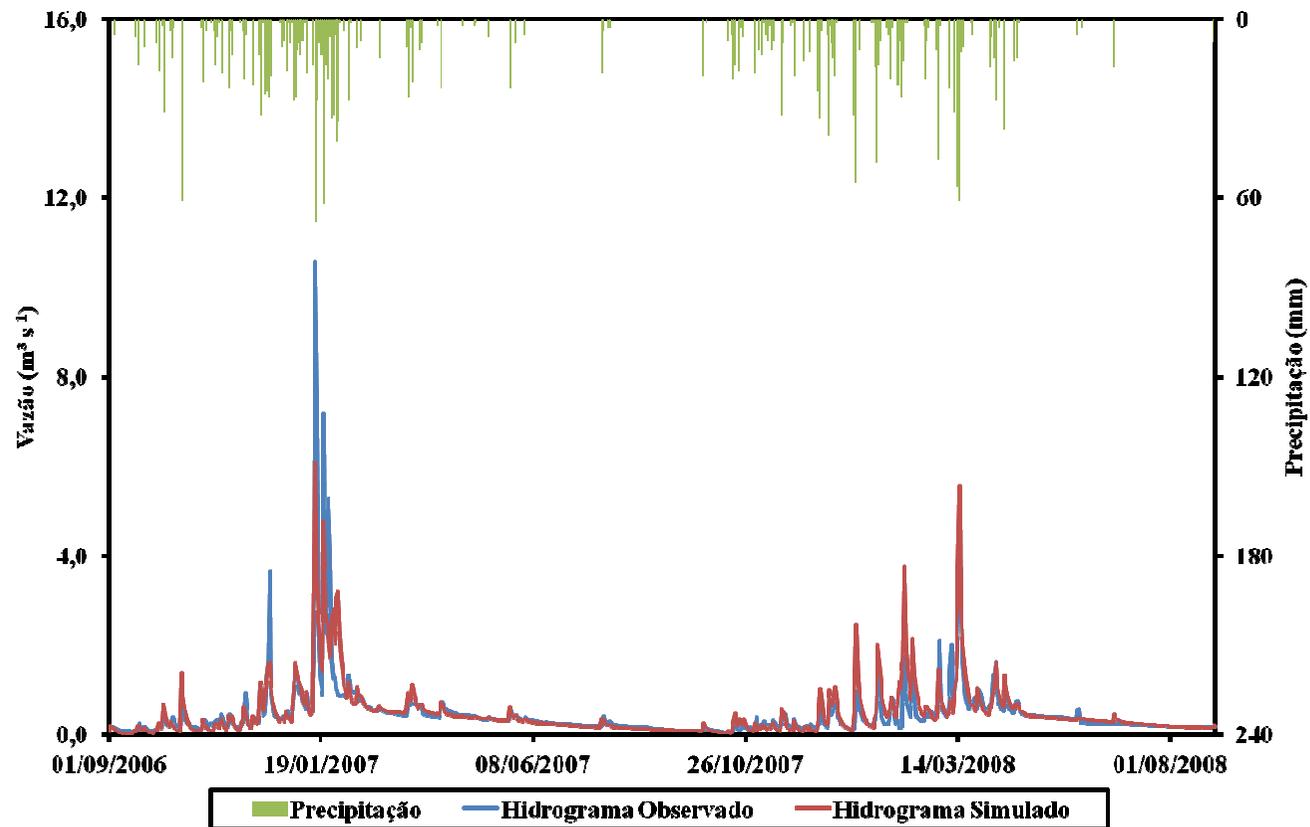


Figura 7 Hidrogramas observados e simulados pelo modelo SWAT, para dados com intervalos diários, para a BHRJ, na fase de calibração

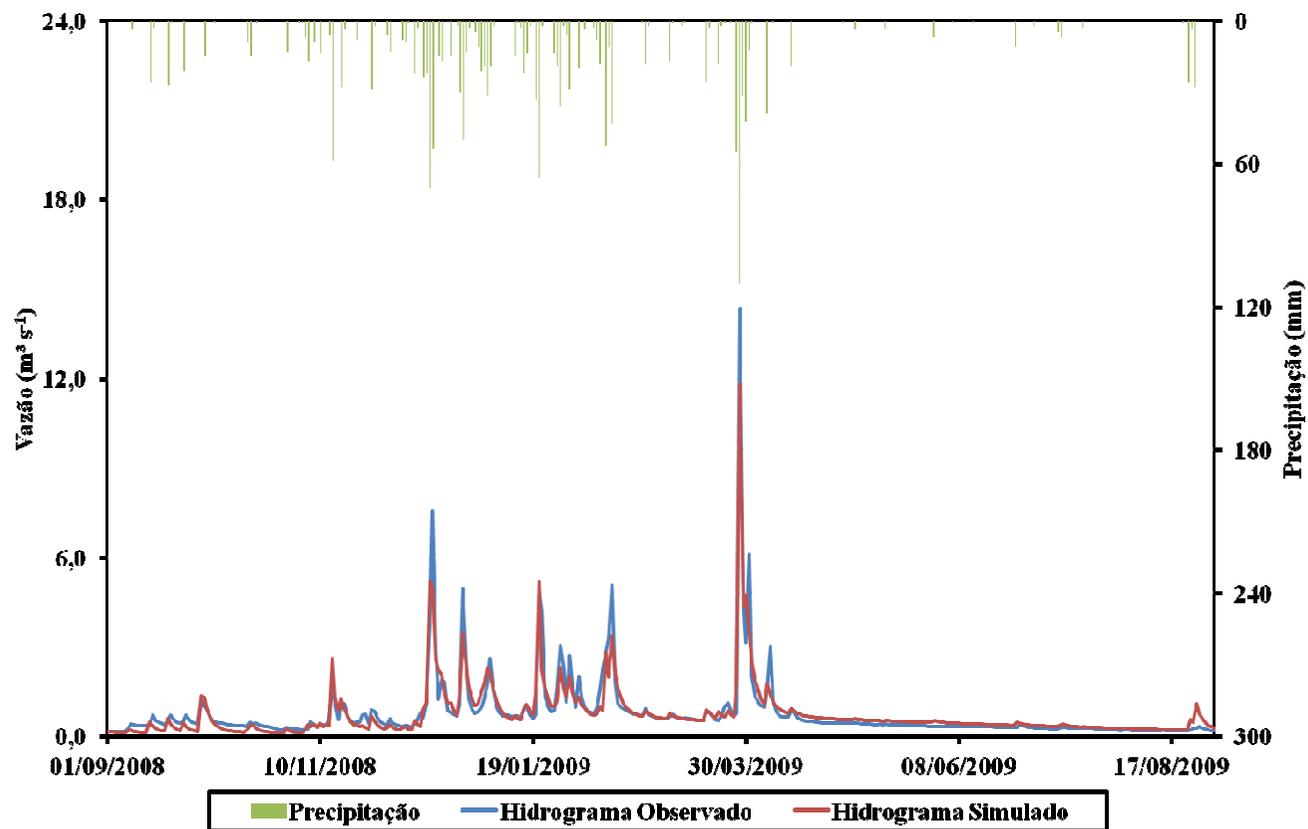


Figura 8 Hidrogramas observados e simulados pelo modelo SWAT, para dados com intervalos diários, para a BHRJ, na fase de validação

Nos períodos de recessão, visualizam-se bons ajustes tanto na calibração quanto na validação. Isto reforça os resultados obtidos pelo coeficiente $\log(C_{NS})$, caracterizando o bom desempenho do modelo na simulação de vazões mínimas. Pode-se observar também, que no período de validação, com intervalo diário, a aderência do hidrograma simulado ao observado foi melhor que para a fase de calibração, refletindo em um C_{NS} superior para essa fase.

Ao analisar o hidrograma observado na fase de calibração, é possível observar grande concentração das vazões de pico no mês de janeiro de 2007, fruto de intensa concentração da precipitação neste mês (583 mm para uma média de 230 mm), com mais de 10 dias seguidos com precipitação superior a 35 mm. Esta situação resulta em maior dificuldade para ajustamento do modelo, devido à resposta mais rápida da bacia aos eventos consecutivos de precipitação e conseqüentemente picos seguidos de vazão. Esta concentração excessiva de precipitação no mês de janeiro de 2007 está associada à presença de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre o Sudeste do Brasil neste período (CLIMANÁLISE, 2007).

Durante o período utilizado para validação do modelo SWAT (ano hidrológico 2008-2009), verifica-se, pelo hidrograma da figura 10, que o período chuvoso (dezembro-março) não apresentou a mesma concentração de chuvas, registrado em janeiro de 2007, e como consequência, menor concentração de picos seguidos. Esta situação facilita a aplicabilidade do modelo, melhorando suas estimativas das vazões de pico, com elevação do C_{NS} .

Na Figura 9 está representado o hidrograma da série de dados observados e simulados para a BHRJ, nas fases de calibração (esquerda) e validação (direita), considerando passo de simulação mensal. O uso de dados mensais possui característica de suavizar os picos de vazão, tornando a série mais homogênea, pois elimina o impacto de chuvas intensas no deflúvio da bacia, principalmente no caso da bacia em estudo, que possui um tamanho

relativamente pequeno. No período de recessão, visualiza-se que o hidrograma simulado se apresentou acima do observado, tanto na fase de calibração quanto na validação. Isto reforça os resultados obtidos pelo coeficiente $\log(C_{NS})$, que foram inferiores aos obtidos pelo C_{NS} , ou seja, o modelo conseguiu melhores resultados para os meses mais úmidos do que para os meses secos. Com relação ao fato de dados simulados estarem superiores aos observados, isto foi verificado analiticamente (Tabela 8), pelos valores P_{bias} , que demonstraram, de um modo geral, que o SWAT superestimou as vazões para a BHRJ, nos intervalos de dados mensais.

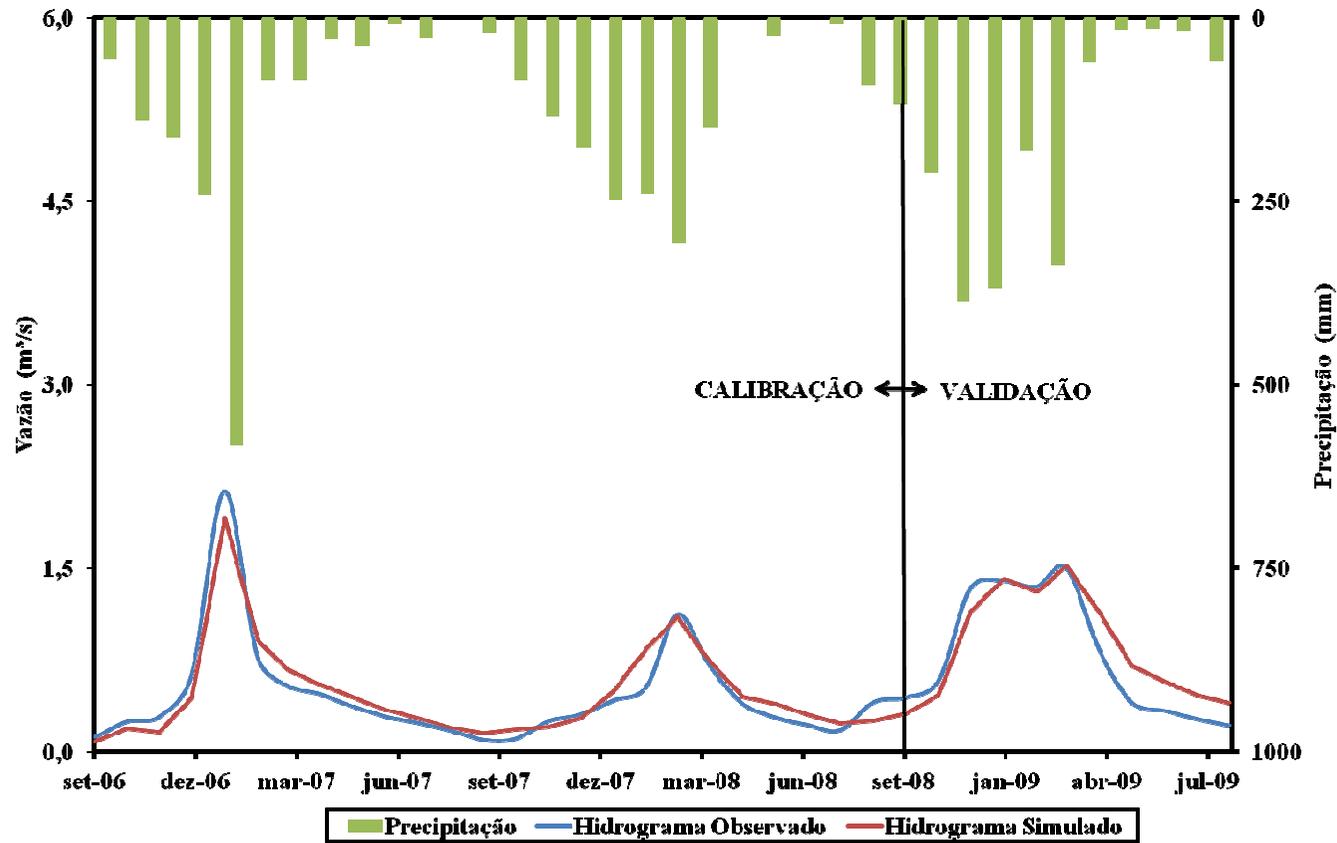


Figura 9 Hidrogramas observado e simulado pelo modelo SWAT, para dados com intervalos mensais, para a BHRJ, nas fases de calibração (esquerda) e validação (direita)

4.3 Análise de algumas características hidrológicas observadas e simuladas pelo modelo SWAT na BHRJ

A curva de permanência fornece a frequência com que determinada vazão é igualada ou excedida, sendo frequentemente empregada na gestão dos recursos hídricos para determinação de valores de referência, especialmente no contexto de vazões mínimas. Na figura 10 estão representadas as curvas de permanência, observadas e simuladas pelo modelo na etapa de calibração.

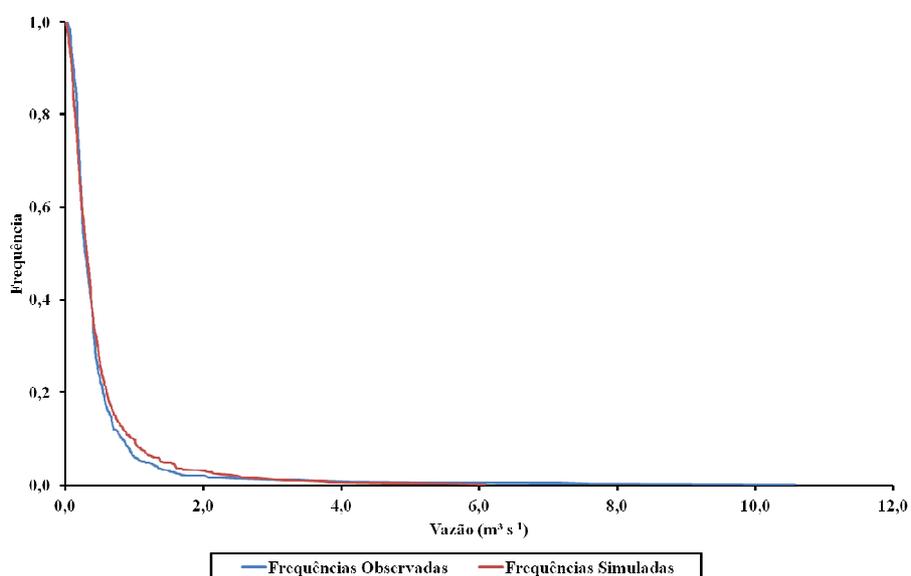


Figura 10 Curvas de permanência observada e simulada, no período de calibração do modelo SWAT, para a BHRJ

Na Tabela 9 estão representados os resultados das permanências de 10 a 95%, para os dados de vazões observadas e simuladas, para a etapa de calibração e as respectivas diferenças percentuais.

Tabela 9 Permanências das vazões observadas e simuladas e a diferença percentual das vazões, no período de calibração do modelo SWAT, para a BHRJ

PERMANÊNCIAS	VAZÕES ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		ΔQ (%)
	OBSERVADAS	SIMULADAS	
Q _{10%}	0,825	0,992	20,30
Q _{20%}	0,544	0,602	10,58
Q _{30%}	0,430	0,469	9,07
Q _{40%}	0,374	0,378	1,20
Q _{50%}	0,286	0,314	9,94
Q _{60%}	0,239	0,241	0,71
Q _{70%}	0,209	0,188	-9,88
Q _{80%}	0,173	0,142	-17,73
Q _{90%}	0,122	0,091	-24,90
Q _{95%}	0,087	0,058	-33,14

A análise visual da curva de permanência, em conjunto com as permanências de 10% a 95% permitem a constatação de que no período de calibração, as vazões simuladas abaixo de 60% estão superestimadas, principalmente nas permanências mais baixas, fato este evidenciado na Figura 10. Com relação às vazões nas permanências superiores a 70%, ou seja, as menores vazões, o modelo subestimou as vazões em até 33,14% a Q_{95%}.

Um valor de referência frequentemente extraído desta curva é o de 90% de permanência (Q_{90%}), que representa a vazão superada ou igualada em 90% do tempo. Na curva observada da etapa de calibração, o valor de Q_{90%} foi de 0,122 m^3s^{-1} e na simulada foi de 0,091 m^3s^{-1} . Este resultado indica que o modelo subestimou a vazão de recessão em aproximadamente 24,90%.

Na Figura 11 estão representadas as curvas de permanência observadas e simuladas pelo modelo na etapa de validação.

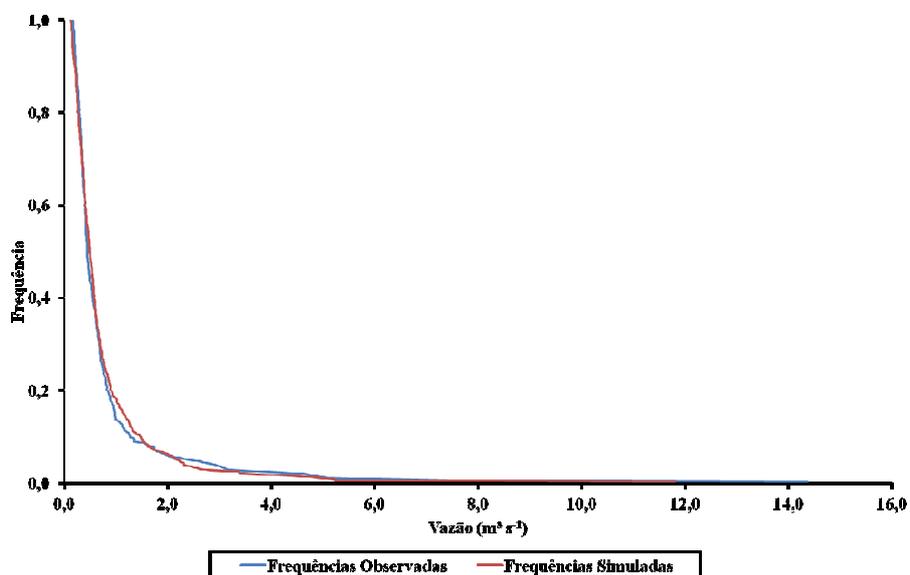


Figura 11 Curvas de permanência observadas e simuladas, no período de validação do modelo SWAT, para a BHRJ

Na Tabela 10 estão representados os resultados das permanências de 10 a 95%, para os dados de vazões observadas e simuladas, para a etapa de validação e as respectivas diferenças percentuais.

A análise visual da curva de permanência em conjunto com as permanências de 10% a 95% permitem a constatação de que no período de calibração, as vazões simuladas abaixo de 60% estão superestimadas, principalmente nas permanências mais baixas, fato este evidenciado na Figura 12. Com relação às vazões nas permanências superiores a 70%, ou seja, as menores vazões, o modelo subestimou as vazões em até 20,49% a $Q_{95\%}$.

Um valor de referência frequentemente extraído dessa curva é o de 90% de permanência ($Q_{90\%}$), que representa a vazão superada ou igualada em 90% do tempo. Na curva observada da etapa de calibração, o valor de $Q_{90\%}$ foi de 0,219

m^3s^{-1} e na simulada foi de $0,208 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Esse resultado indica que o modelo subestimou a vazão de recessão em aproximadamente 4,89%.

Tabela 10 Permanências das vazões observadas e simuladas e a diferença percentual das vazões, no período de validação do modelo SWAT, para a BHRJ

PERMANÊNCIAS	VAZÕES ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)		ΔQ (%)
	OBSERVADAS	SIMULADAS	
Q _{10%}	1,266	1,460	15,35
Q _{20%}	0,843	0,914	8,42
Q _{30%}	0,675	0,691	2,39
Q _{40%}	0,552	0,576	4,31
Q _{50%}	0,442	0,491	11,11
Q _{60%}	0,393	0,408	3,92
Q _{70%}	0,340	0,338	-0,59
Q _{80%}	0,290	0,264	-8,97
Q _{90%}	0,219	0,208	-4,89
Q _{95%}	0,196	0,156	-20,49

Com base nesses erros, os quais são de pequena magnitude, o modelo SWAT conseguiu simular, adequadamente, bem a curva de permanência de vazões para a BHRJ, demonstrando sua qualidade como ferramenta de gestão dos recursos hídricos.

Kim, Shin e Lee (2010) calibraram o modelo SWAT para a bacia hidrográfica do rio Chungju Dam, na China. No estudo, os autores desenvolveram curvas de permanência Q_{95} , Q_{185} , Q_{275} e Q_{355} (sendo que “95” é a vazão mínima do rio em 95 dias do ano) e encontraram valores simulados de 0,46 a 3,41 vezes superiores aos observados. As justificativas apresentadas pelos autores foram que o SWAT superestima a vazão de pico e o tempo de pico.

A gestão dos recursos hídricos tem na simulação hidrológica uma ferramenta viável na previsão de vazões. Assim, a validação do comportamento hidrológico frente às vazões máximas, empregadas no controle de cheias, e mínimas, com múltiplas funcionalidades, é de fundamental importância (VIOLA, 2008).

Na Tabela 11 estão representadas as vazões máximas e mínimas observadas e simuladas, sendo possível observar claramente que o ano hidrológico de 2006/2007 e 2008/2009 foram anos mais úmidos e que 2007/2008 um ano mais seco.

Tabela 11 Vazões máximas e mínimas anuais observadas e simuladas pelo modelo SWAT para a BHRJ

ANO HIDROLÓGICO	TIPO	VAZÕES ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		ΔQ (%)	PERÍODO
		OBSERVADO	SIMULADO		
2006/2007	MÁXIMO	10,58	6,09	-42,422	CALIBRAÇÃO
	MÍNIMA	0,06	0,02	-69,965	
2007/2008	MÁXIMO	3,72	5,56	49,434	
	MÍNIMA	0,03	0,02	-34,828	
2008/2009	MÁXIMO	14,37	11,80	-17,871	VALIDAÇÃO
	MÍNIMA	0,17	0,12	-27,624	

Pela Tabela 11, nota-se que a relação entre as vazões máximas anuais simuladas e as observadas foram subestimadas nos anos de 2006/2007 e 2008/2009, apenas no de 2007/2008 que foi o ano mais seco da série o modelo superestimou os valores. Nas vazões mínimas anuais, observa-se que o modelo subestimou as vazões mínimas em todos os anos do estudo.

As vazões máximas e mínimas, ocorridas em cada mês, observadas e simuladas para os anos hidrológicos calibrados estão representados na Figura 12 (2006/2007) e na Figura 13 (2007/2008).

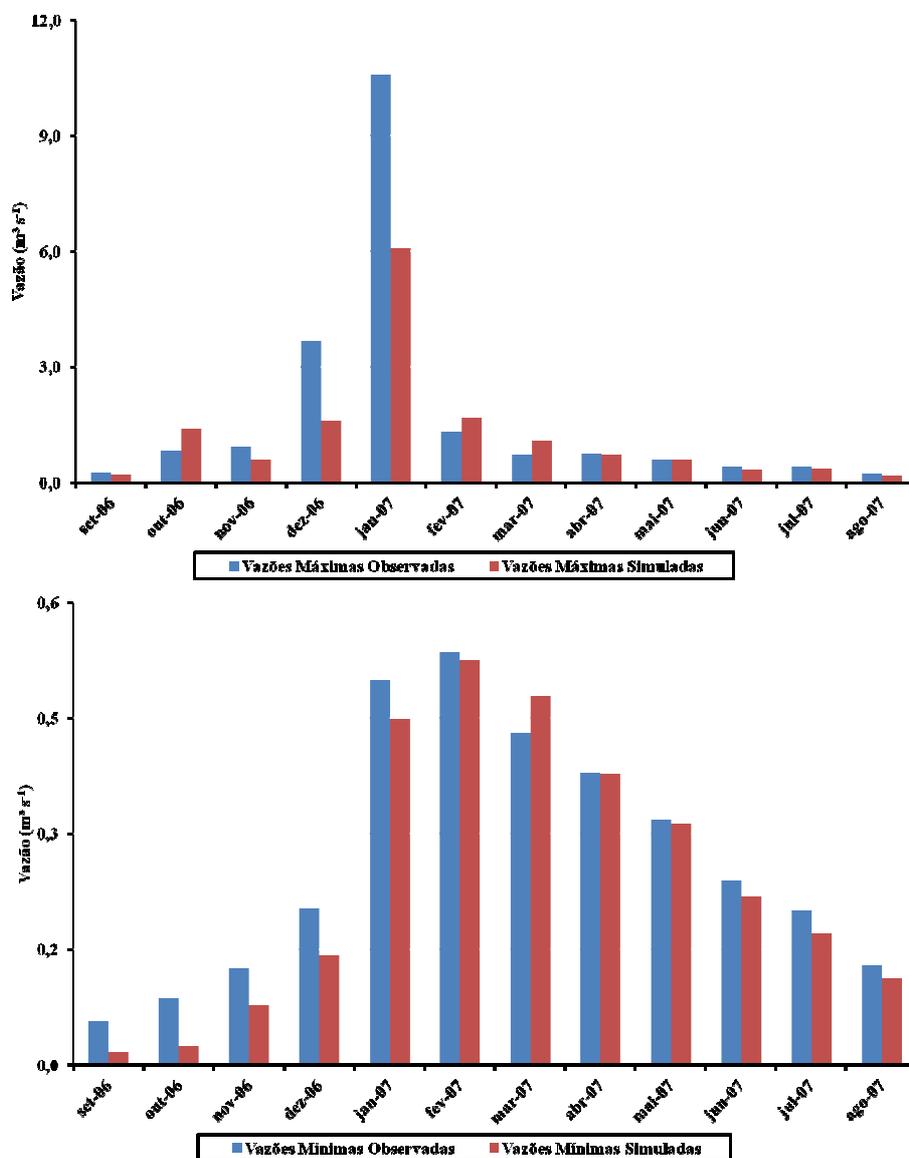


Figura 12 Vazões máximas e mínimas mensal, observadas e simuladas no ano hidrológico de 2006/2007, pelo modelo SWAT para a BHRJ

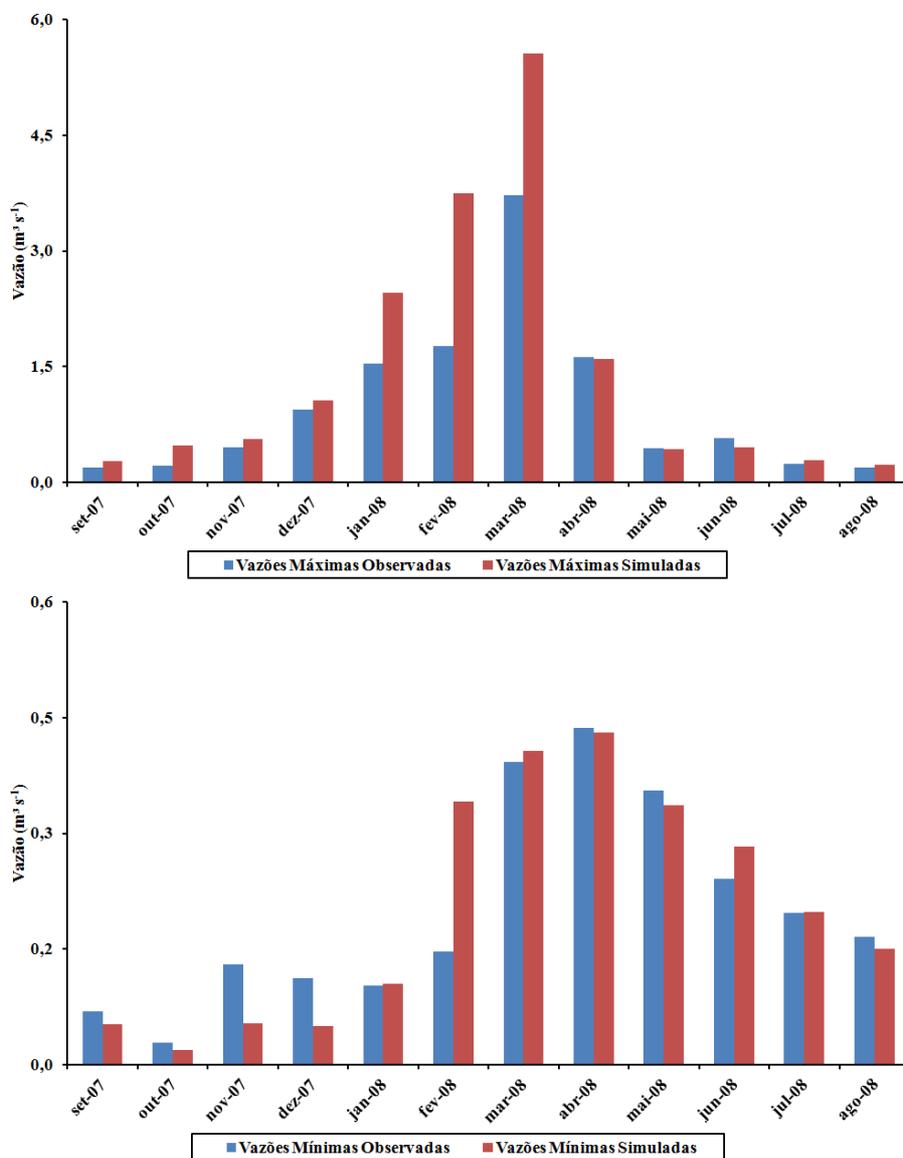


Figura 13 Vazões máximas e mínimas mensal, observadas e simuladas no ano hidrológico de 2007/2008, pelo modelo SWAT para a BHRJ

Com relação às vazões máximas mensais pode-se observar que para o ano hidrológico de 2006/2007, os dados simulados foram superiores em três meses aos observados. No ano 2007/2008 foi possível observar a superestimativa do modelo, com relação à vazão em nove meses do ano, sendo que nos meses de abril a junho, a vazão máxima simulada foi inferior a vazão máxima observada. No que diz respeito às vazões mínimas mensais, no ano hidrológico de 2006/2007 o modelo simulou um mês com vazão superior a observada. No ano de 2007/2008 o modelo superestimou a vazão mínima em cinco meses do ano.

De um modo geral, pode-se observar que na fase de calibração, o SWAT superestimou as vazões máximas mensais no ano mais seco e subestimou no ano mais úmido. Nas vazões mínimas mensais, o modelo subestimou as vazões mínimas, na maioria dos meses, em ambos os anos. Ressalta-se que a dificuldade do modelo em simular vazões máximas não pode ser atribuída única e exclusivamente a sua concepção, pois há problemas relacionados a erros na coleta de dados, na extrapolação da curva-chave além do fato de haver apenas uma estação meteorológica na BHRJ, o que prejudica a coleta de dados de precipitação devido à variabilidade espacial da mesma na bacia não ser identificada.

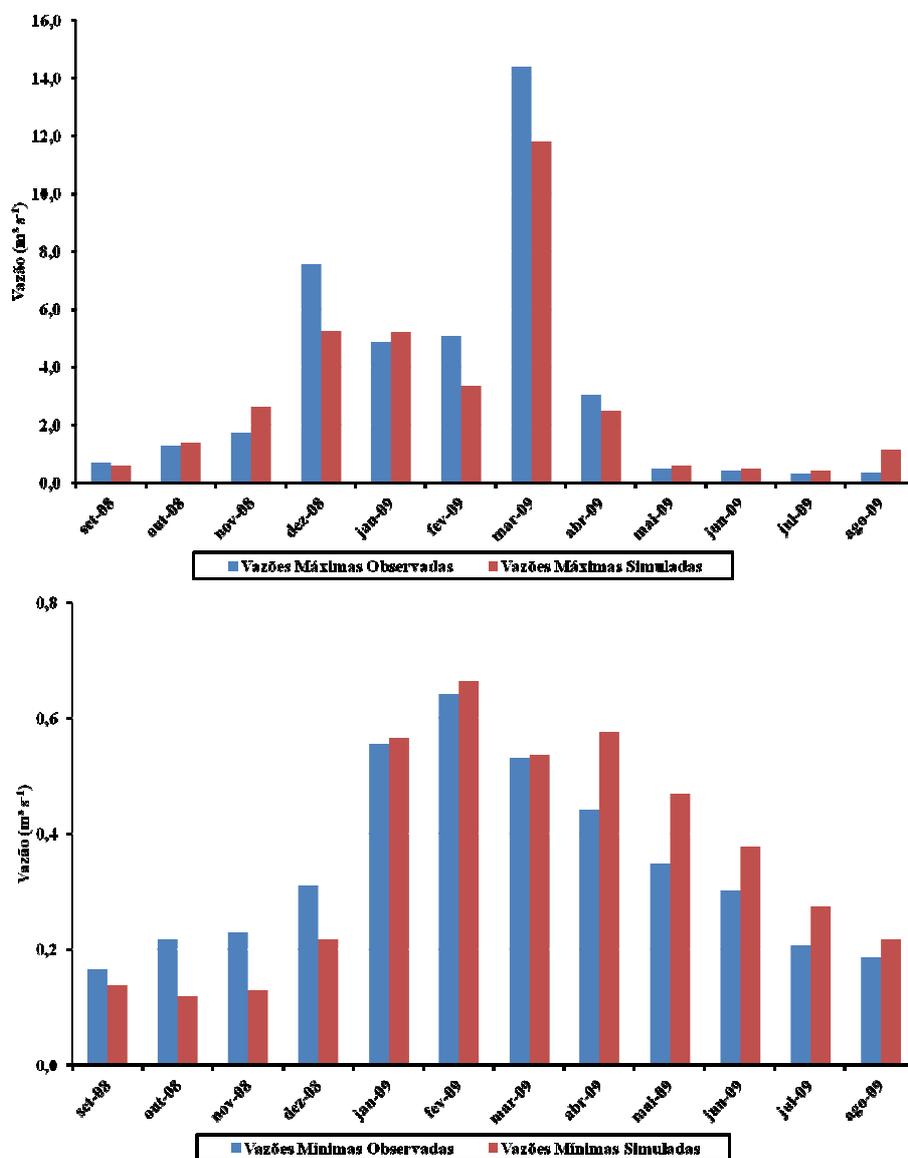


Figura 14 Vazões médias máximas e mínimas mensais, observadas e simuladas, no ano hidrológico 2008/2009, pelo modelo SWAT para a BHRJ

Na FIGURA 14 estão representadas as vazões médias máximas e mínimas mensais, observadas e simuladas para ano hidrológico 2008/2009, o qual foi utilizado para validação do modelo SWAT. Com relação às vazões máximas mensais, pode-se observar que os dados simulados foram superiores, em oito meses, aos observados. No que diz respeito às vazões médias mínimas mensais, o modelo simulou sete meses com vazão superior a observada.

A avaliação da simulação do escoamento em diferentes escalas temporais, geralmente realizada na forma de lâmina, ou seja, deflúvio é essencial para se analisar a precisão da simulação (VIOLA, 2008). Neste contexto, foi realizada uma abordagem abrangendo o deflúvio total mensal, visando analisar a coerência entre as lâminas observadas e simuladas ao longo dos meses.

Na Tabela 12, estão representados os deflúvios totais anuais observados e simulados, para a bacia do ribeirão Jaguara, no Alto Rio Grande.

Tabela 12 Deflúvios anuais observados e simulados pelo modelo SWAT para a BHRJ

ANO HIDROLÓGICO	DEFLÚVIOS (mm)		Δ DEF. (%)	PERÍODO
	OBSERVADOS	SIMULADOS		
2006/2007	498,84	477,63	-4,25	CALIBRAÇÃO
2007/2008	366,97	425,66	15,99	
2008/2009	721,22	709,77	-1,59	

Nota-se que com relação ao deflúvio, os anos de 2006/2007 e 2008/2009 apresentaram diferenças na ordem de -4,25% e -1,59% respectivamente, em relação aos dados observados. Porém, no ano de 2007/2008, o modelo superestimou os resultados na ordem de 15,99%. Esse ano foi o ano mais seco do estudo, reforçando a indicação de que este modelo pode apresentar dificuldades em simular períodos secos.

Nas figuras 15 e 16 estão representados os deflúvios médios mensais observados e simulados pelo modelo SWAT, para a bacia do ribeirão Jaguara.

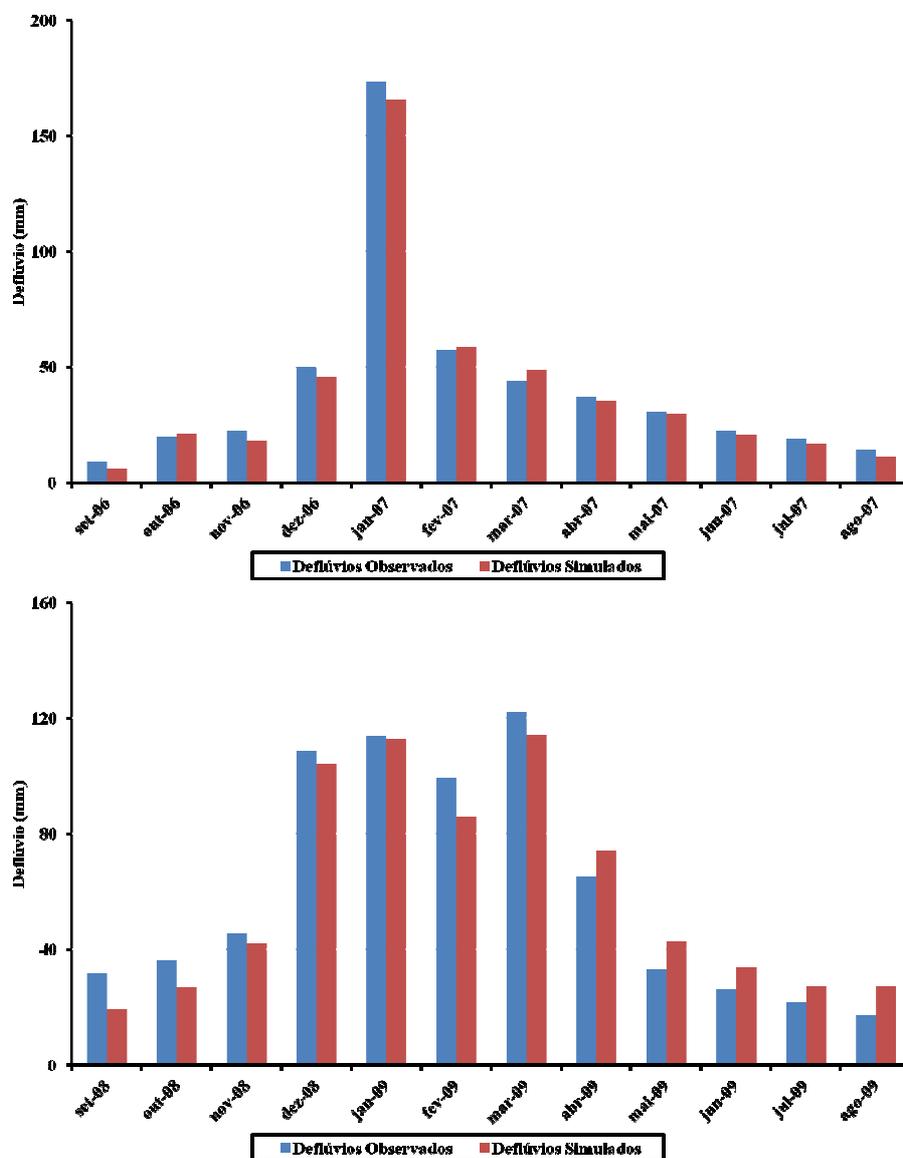


Figura 15 Deflúvios totais mensais, observados e simulados no período de calibração, pelo modelo SWAT, para a BHRJ

Pode-se observar, de maneira geral, coerência entre os deflúvios médios mensais observados e simulados, o que destaca a capacidade do modelo hidrológico em simular adequadamente o hidrograma ao longo de dois períodos característicos presentes na região em estudo, que são invernos secos e verões chuvosos.

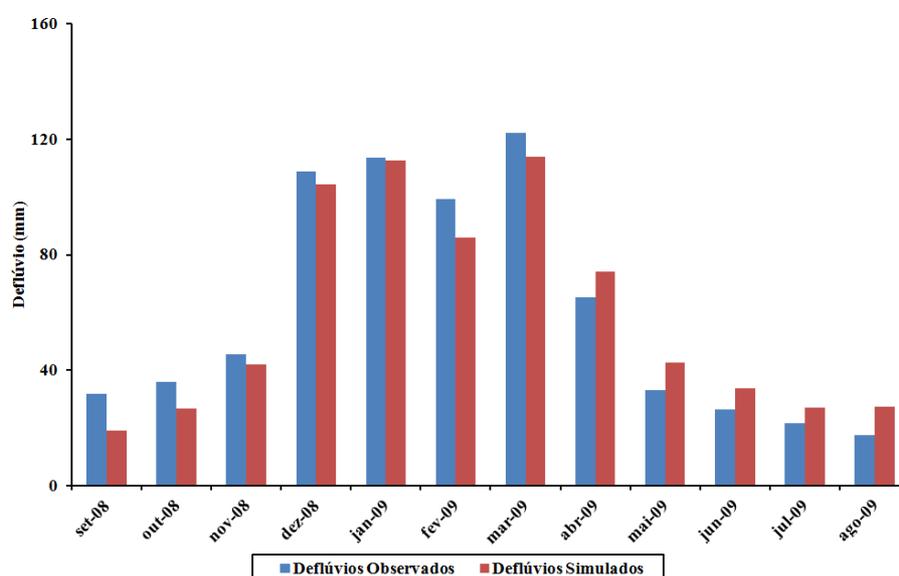


Figura 16 Deflúvios totais mensais, observados e simulados no período de validação, pelo modelo SWAT, para a BHRJ

4.4 Extensão da série de vazão para BHRJ com o modelo SWAT

Uma das diversas aplicações da simulação hidrológica consiste na geração de séries históricas sintéticas, a partir de dados meteorológicos coletados na bacia. Como na BHRJ a série de precipitações é mais longa do que de vazões, foi utilizado o modelo SWAT, calibrado e validado para gerar uma extensão da série de vazões na bacia. A nova série para BHRJ foi gerada a partir

dos dados de precipitação disponíveis para o ano hidrológico de setembro de 2009 a agosto de 2010.

Na Figura 17 está representada a série sintética de vazões geradas para a BHRJ. O modelo permitiu a transformação da série de precipitações em vazões com base nos parâmetros ajustados na fase de calibração e verificados. Observa-se pela análise visual, a boa correlação no período úmido das vazões com as precipitações ocorridas.

Dessa forma considera-se que a aplicação da modelagem, na extensão de dados de vazões, pode ser uma ferramenta útil nos estudos de gestão de recursos hídricos, facilitando o conhecimento do comportamento dos rios e permitindo assim um aproveitamento consciente dos recursos, seja para irrigação, seja para outros usos que se fizerem necessários.

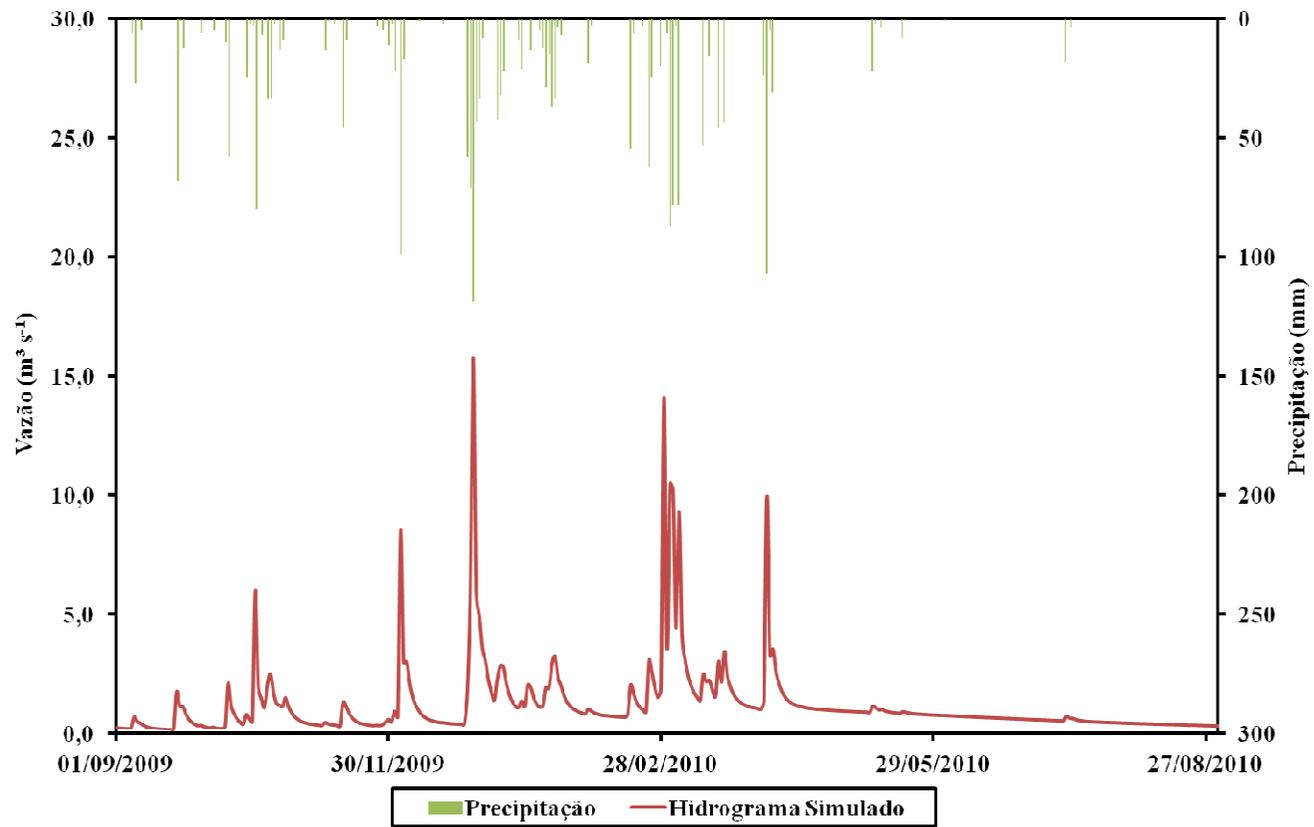


Figura 17 Hidrograma sintético simulado pelo modelo SWAT, com base em dados diários climatológicos para a BHRJ

5 CONCLUSÕES

- a) O modelo hidrológico SWAT possibilitou a simulação hidrológica com êxito da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara, mostrando ser uma ferramenta útil para a gestão e o planejamento dos recursos hídricos nesta bacia.
- b) Os valores do C_{NS} foram de 0,660 e 0,872, para as etapas de calibração e validação, para os intervalos diários e C_{NS} de 0,939 e 0,853 no período de calibração e validação, para os intervalos mensais. Com isso, verificou-se que os valores de C_{NS} obtidos para BHRJ, são bons o suficiente para qualificarem o modelo como apto à simulação hidrológica na referida bacia.
- c) Nas análises das curvas de permanência pode-se concluir que o modelo superestimou as vazões nas menores permanências e subestimou as vazões nas maiores permanências.
- d) A aplicação do modelo SWAT permitiu a geração de uma série sintética de vazão para a BHRJ, baseada nos bons resultados do modelo, tanto na calibração quanto na validação, permitindo assim, uma boa precisão nas estimativas das vazões.
- e) Apesar do modelo SWAT ter obtido bons resultados é necessário continuar o estudo com o mesmo, na BHRJ, à medida que a série histórica se torne mais representativa da região.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, A. M. B. et al. **Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos**. Fortaleza: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2006. 17 p.

ALEXANDRE, A. M. B. et al. “Regionalização de parâmetros de modelos hidrológicos”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: [s. n.], 2005. CD ROM.

ARAÚJO, A. R. **Solos da bacia do Alto Rio Grande (MG): base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola**. 2006. 345 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

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

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.

BARTH, F. T. et al. **Modelo para gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel, 1987. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1).

BLACK, P. E. **Watershed hydrology**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991. 408 p.

BESKOW, S. **LASH model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. 2009. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

BONUMÁ, N. B. et al. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 1., 2010, Brasília. **Anais...** Brasília: [s. n.], 2010. v. 1, p. 236.

CARVALHO NETO, J. G. **Simulação hidrossedimentológica da Bacia do Riacho dos Namorados com o modelo SWAT**. 2011. 216 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

CHAPLOT, V. Impact 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.

CHAPRA, S. **Surface water quality modeling**. New York: McGraw-Hill, 1997.

CLIMANÁLISE. São José dos Campos: CPTEC/INPE, 2007. 41 p. (Boletim Climatológico e Análise Climática, 22).

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. 194 p.

CRUZ, J. C.; SILVEIRA, G. L. Disponibilidade hídrica para outorga (I): avaliação por seção hidrológica de referência. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 51- 64, 2007.

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

DHAR, S.; MAZUMDAR, A. Hydrological modeling of the Kangsabati river under changed climate scenario: case of study in India. **Hydrological Processes**, Malden, v. 23, p. 2394-2406, 2009.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

DU, B. et al. Development and application of SWAT to landscape with tiles and potholes. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 48, n. 3, p. 1121-1133, 2005.

DURÃES, M. F. **Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo distribuído**. 2010. 147 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

EL-NASH, A. J. G. et al. Modeling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. **Hydrological Process**, Malden, v. 19, n. 3, p. 573-587, 2005.

FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. D. E.; MORTATI, J. Modelos hidrológicos acoplados a sistemas de informações geográficas: um estudo de caso. **Revista de Ciência & Tecnologia**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 56, 1999.

GASSMAN, P. W. et al. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 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 predictions. **Journal of Environmental Management**, Oxford, v. 88, n. 3, p. 393-406, 2008.

GOVENDER, M.; EVERSON, C. S. Modeling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. **Hydrological Processes**, Malden, v. 19, p. 683-692, 2005.

GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F. Comparação de métodos de previsão de vazões naturais afluentes a aproveitamentos hidroelétricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 13-20, jul./set. 2007.

KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WHELAN, M. J. Predicting diffuse-source transfers of surfactants to surface waters using SWAT. **Chemosphere**, Los Angeles, v. 66, n. 7, p. 1336-1345, 2007.

KLEMES, V. Dilettantism in hydrology: transition or destiny? **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 22, n. 9, p. 177-188, 1986.

KUMAR, S. **Studying the effect of spatial scaling on hydrologic model calibration using soil and water assessment tool (SWAT)**. 2008. 124 p. Master's Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – Purdue University, West Lafayette, 2008.

LEGATES, D. R.; MCCABE, 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.

LINHARES, C. A. **Influência do desflorestamento na dinâmica da resposta hidrológica na Bacia do Rio Ji-Paraná / RO**. 2006. 219 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.

LINO, J. F. L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. 2009. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

KIM, N. W.; SHIN, A. H.; LEE, J. Effects of streamflow routing schemes on water quality with SWAT. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 53, n. 5, p. 1457-1468, Sep. 2010.

MAIDMENT, D. R. Hydrologic cycle. In: _____. **Handbook of hydrology**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 1-15.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 4, p. 727-733, jul./ago. 2003.

MARCHIORO, E. **Modelagem hidrossedimentológica na bacia do córrego Santa Maria**: subsídios à aplicação de práticas de conservação de água e solo no noroeste fluminense. 2008. 189 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MELLO, C. R. et al. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Schaaflheim, v. 75, p. 235-247, 2008.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORO M. **A utilização da interface SWAT-SIG no estudo da produção de sedimentos e do volume de escoamento superficial com simulação de cenários alternativos**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MULETA, M. K.; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Journal of Hydrology**, London, v. 306, p. 127-145, 2005.

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

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

NICKS, A. D. Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. **Proc. Symp. Statistical Hydrology**, Tuscon, v. 1, n. 1, p. 154-171, Aug. /Sep. 1974.

OVERTON, D. E. "Muskingum flood routing of upland stream flow", **Journal of Hydrology**, London, v. 4, p. 185-200, 1966.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira**. 2011. 225 p. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

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

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para a gestão ambiental**. São José dos Campos: INPE, 2000. 59 p. Relatório.

SALEH, A. J. G. et al. Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n. 5, p. 1077-1087, 2000.

SANTHI, C. et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005.

SETEGN, S. G. **Modeling hydrological and hydrodynamic processes in Lake Tana Basin, Ethiopia**. 2010. 66 p. Thesis (PhD) – Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, 2010.

SEXTON, A. M. et al. Using NEXRAD and rain-gauge precipitation data for hydrologic calibration of SWAT in northeastern watershed. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 53, n. 5, p. 1501-1510, 2010.

SILVA, L. R. S. **Análise de Incertezas e Avaliação dos Fatores Influentes no Desempenho do Modelo de Simulação de Bacias Hidrográficas**. 2010. 241 p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

SLOAN, P. G. et al. **Modeling surface and subsurface storm flow on steeply-sloping forested watersheds**. Lexington: Water Resources Institute, University of Kentucky, 1983. Report 142.

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.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 19, p. 260-268, 1993.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Model calibration. In: SINGH, V. P. **Computer model of watershed hydrology**. Highlands Ranch: WRP, 1995. p. 23-68.

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, 2000.

STRATON, B. T. et al. Modeling the spatially varying water balance process in a semiarid mountainous watershed of Idaho. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 45, n. 6, p. 1390-1408, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. rev. e aum. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

USDA. **National Engineering Handbook**. Washington, 1972. 42 p. Part 630 hydrology.

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VAN GRIENSVEN, A.; BAUWENS, W. Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. **Water Resources Research**, Ann Arbor, v. 39, n. 12, p. 1348, 2003.

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: 30 mar. 2011.

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.

VAN LIEW, M. W.; GARBRECHT, J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 39, n. 4, p. 977-986. 2003.

VEITH, T.L. et al. Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: A comparison across five USDA-ARS watersheds. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 53, n. 5, p.1477-1486, 2010.

VEITH, T. L.; GHEBREMICHAEL, L. T. How to: applying and interpreting the SWAT Auto-calibration tools. In: INTERNATIONAL SWAT CONFERENCE, 15, 2009, Boulder. **Proceedings...** Boulder: [s. n.], 2009. p. 26-33.

VENETIS, C. A study of the recession of unconfined aquifers. **Bulletin International Association Science Hydrology**, New York, v. 14, n. 4, p.119-125, 1969.

VIEIRA, C. P. Alterações na cobertura vegetal: interferência nos recursos hídricos. **Silvicultura**, São Paulo, v. 20, n. 82, p. 26-27, 2000.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003.

VIOLA M. R. **Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do Reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

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

WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. **Rainfall-Runoff modeling in gauged and ungauged catchments**. London: Imperial College, 2004. 306 p.

WHITEHEAD, P. G.; ROBINSON, M. Experimental basin studies-an international and historical perspective of forest impacts. **Journal of Hydrology**, London, v. 145, p. 217-230, 1993.

WILLIAMS, J. R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 12, p. 100-103, 1969.

WILLIAMS, J. R. The EPIC model. In: SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Littleton: Water Resources, 1995. p. 909-1000, chapter 25.