



LUCAS MACHADO PONTES

**AVALIAÇÃO E USO DO MODELO DE
BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO - BALSEQ PARA
ESTIMATIVA DA RECARGA POTENCIAL**

LAVRAS - MG

2013

LUCAS MACHADO PONTES

**AVALIAÇÃO E USO DO MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO -
BALSEQ PARA ESTIMATIVA DA RECARGA POTENCIAL**

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

Orientador

Dr. Gilberto Coelho

Coorientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

LAVRAS – MG

2013

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Pontes, Lucas Machado.

Avaliação e uso do modelo de balanço hídrico diário – BALSEQ
para estimativa da recarga potencial / Lucas Machado Pontes. –
Lavras : UFLA, 2013.

104 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Gilberto Coelho.

Bibliografia.

1. Modelagem hidrológica. 2. Modelos hidrológicos – Avaliação.
3. Recarga do aquífero livre. I. Universidade Federal de Lavras. II.
Título.

CDD – 551.48

LUCAS MACHADO PONTES

**AVALIAÇÃO E USO DO MODELO DE BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO -
BALSEQ PARA ESTIMATIVA DA RECARGA POTENCIAL**

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

APROVADA em 27 de setembro de 2013.

Dr. Antônio Marciano da Silva UFLA

Dr. Geraldo César de Oliveira UFLA

Dr. Gilberto Coelho
Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello
Coorientador

LAVRAS – MG
2013

Agradecimentos

A Deus, sobre todas as coisas.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia (DEA) e ao Núcleo de Engenharia de Água e Solo, pela oportunidade concedida para realização do mestrado, juntamente com a Capes, que cedeu a bolsa de estudos para realizar este trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia da UFLA, pelos ensinamentos transmitidos e proveitosa convivência.

Ao professor Dr. Gilberto Coelho, pela orientação, paciência, amizade e bom humor, dedicação e seus ensinamentos, que foram de grande valia na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Carlos Rogério de Mello, pela coorientação, boa vontade e disponibilidade para acrescentar colaborações indispensáveis a este trabalho.

Ao professor Dr. Antônio Marciano da Silva, pelas inúmeras contribuições e ao professor Dr. Geraldo Cesar, pela grande ajuda na revisão e melhoria do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, Marcelo Linon, Vinícius, José Neto, Léo Ávila, José Alves, João Paulo, Lívia, Anita e Geovane, pela boa convivência, troca de saberes e assistências.

Aos meus pais, Paulo e Mariíinha e a todos familiares, pelo grande apoio, desde sempre.

A minha esposa, Priscila Caon e filha, Laís Caon Pontes, pelo amor incondicional e benevolente presença na minha vida.

GRATIDÃO!

Epígrafe

“Louvado seja meu Senhor,
Pela irmã Água, que é muito útil e humilde,
Pura e casta.”

Cântico das criaturas –
Irmão Francisco de Assis.

"Estudar as manifestações da natureza é trabalho que agrada a Deus.
É o mesmo que rezar, que orar.
Procurar conhecer as leis naturais,
Glorificando o primeiro inventor,
O Artista do Universo,
Se aprende a amá-lo,
Pois que um grande amor a Deus
Nasce de um grande saber."

Citação atribuída à
Leonardo Da Vinci

RESUMO

A recarga do aquífero livre é um dos processos mais importantes na hidrologia das águas subterrâneas, pois ele constitui a reserva renovável deste manancial. Portanto, uma boa estimativa desta variável é fundamental para uma gestão adequada dos recursos hídricos, sobretudo com o avanço da poluição das águas superficiais e o aumento da demanda por águas subterrâneas de boa qualidade. No presente trabalho, foi utilizado um modelo de balanço hídrico no solo conhecido como BALSEQ, para estimar a recarga potencial (R_p) do aquífero livre e os demais componentes do ciclo hidrológico. O modelo foi aplicado em duas bacias hidrográficas do rio Grande, em Minas Gerais, a bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (BHRL) e a bacia hidrográfica do ribeirão Marcela (BHRM). Também foi realizada uma avaliação criteriosa dos resultados obtidos com a simulação pelo BALSEQ, por meio de coeficientes de eficiência (Cns) e comparações gráficas entre dados simulados e dados medidos em campo. Para a BHRL, o BALSEQ apresentou resultados médios não satisfatórios na predição do escoamento superficial (ES), com Cns de validação igual a -0,30. Já na BHRM, a modelagem alcançou bons resultados, com Cns de validação médio de 0,67. Quanto às estimativas da R_p , estas foram comparadas graficamente ao escoamento base (EB) obtido com a separação dos componentes da hidrógrafa. Este procedimento evidenciou que as estimativas de R_p estão coerentes com o EB em ambas as bacias. O protocolo de avaliação utilizado permitiu a compreensão e a avaliação mais ampla da modelagem com o BALSEQ, identificando suas potencialidades e limitações, e, de modo geral, uma validação positiva para o modelo BALSEQ, nas condições estudadas.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Recarga de aquífero livre. Avaliação de modelos hidrológicos.

ABSTRACT

The free aquifer recharge is one of the most important processes in groundwater hydrology, because it is the reserve of this renewable source. Therefore, a good estimate of this variable is essential for proper management of water resources, especially with the advancement of surface water pollution and increased demand for good quality groundwater. In this study, it was used a model of the soil water balance known as BALSEQ to estimate the recharge potential (R_p) of unconfined aquifers, and the other components of the hydrological cycle. The model was applied in two watersheds of the Rio Grande basin, in Minas Gerais state, Lavrinha creek watershed (BHRL) and Marcela creek watershed (BHRM). It was performed an thorough evaluation of the results obtained with the simulation by BALSEQ, through efficiency ratios (Cns) and graphical comparisons between simulated and measured data in the field. For BHRL the BALSEQ showed average results unsatisfactory in predicting runoff (ES) with Cns validation equal to -0.30. Already in BHRM, modeling achieved good results with Cns validation average of 0.67. As for the estimates of R_p , these were compared graphically to the flow base (EB) obtained from the separation of the components of the hydrograph. This procedure showed that the R_p estimates are consistent with the EB in both basins. The assessment protocol used allowed the understanding and broader assessment of modeling with BALSEQ, identifying their strengths and limitations, and generally a positive validation for BALSEQ model under the conditions studied.

Keywords: Hydrologic modeling. Free aquifer recharge. Evaluation of hydrological models.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Recursos hídricos	13
2.2	Água subterrânea	14
2.3	Recarga de aquíferos	17
2.4	Modelagem hidrológica	19
2.5	BALSEQ	22
2.6	Avaliação de modelos hidrológicos	24
3.	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Caracterização das áreas de estudo	27
3.1.1	Geologia, solos e cobertura vegetal	29
3.1.2	Parâmetros do solo e da vegetação	34
3.1.3	Dados meteorológicos	38
3.1.4	Dados de vazão	39
3.2	Modelo BALSEQ	39
3.3	Análise da hidrógrafa e separação do escoamento base	44
3.4	Calibração	45
3.5	Avaliação do modelo	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Análise e separação da hidrógrafa	50
4.2	Balço hídrico e estimativa da recarga potencial	58
4.3	Avaliação do modelo BALSEQ	71

4.3.1	Avaliação qualitativa.....	72
4.3.2	Validação numérica.....	79
4.3.3.	Análise da estrutura do modelo	81
4.3.3.1	Análise de sensibilidade.....	82
4.3.3.2	Matriz SWOT	86
5	CONCLUSÕES	88
	ANEXOS	99

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são o principal manancial de águas doces no mundo, devido ao grande volume de água, mas, sobretudo, pela qualidade, geralmente, ser superior à das águas superficiais. Tal fato torna o manancial subterrâneo fonte estratégica, mesmo em regiões de alta pluviosidade e boa disponibilidade hídrica superficial, como ocorre na bacia hidrográfica do rio Grande, principalmente no Alto Rio Grande, onde há grande oferta de água, porém, com gradual degradação dos cursos d'água, o que induz a um aumento na exploração das águas subterrâneas sem uma gestão apropriada.

Uma gestão adequada dos recursos hídricos é função da disponibilidade de dados e informações consistentes sobre as variáveis hidrológicas e, portanto, da compreensão dos processos hídricos nas bacias hidrográficas manejadas. Compreensão esta que deve abranger as águas subterrâneas e superficiais, bem como a interação entre estas, que pode ser resumida como o balanço entre os processos de recarga e descarga. Para isso, além da medição das variáveis hidrológicas e das características morfométricas da bacia hidrográfica, é necessário estabelecer as relações existentes entre essas informações, o que pode ser feito com o uso de formulações matemáticas conhecidas como modelos hidrológicos.

A modelagem hidrológica tem avançado muito com o recente desenvolvimento computacional. Modelos cada vez mais complexos e robustos são desenvolvidos para diversas finalidades. Entretanto, esta complexificação aumenta a demanda por informações onerosas ou de difícil aquisição, inviabilizando sua aplicação na maioria das bacias hidrográficas brasileiras. Além disso, usualmente, tais modelos utilizam uma interface gráfica que, muitas vezes, atua como uma caixa preta, em que os processos matemáticos ficam ocultos. Isso dificulta a realização de um dos objetivos mais importantes da

modelagem, que é o ganho de experiência e a compreensão do comportamento hidrológico pelo usuário.

Entre os modelos mais simples estão os de balanço hídrico, que consistem no saldo entre as entradas e as saídas da água no sistema. O BALSEQ é um modelo de balanço hídrico sequencial diário, com ênfase no solo e na estimativa da recarga do aquífero livre. Sua simplicidade e versatilidade permitiram que ele fosse aplicado em diversas condições de clima, solo e vegetação na Europa, África, Ásia e América do Sul. Faltam, no entanto, trabalhos que verifiquem a qualidade de seus resultados nestas condições diversas.

A avaliação, ou validação, de modelos hidrológicos é uma parte fundamental da modelagem, que visa aferir a qualidade das informações geradas nas simulações hidrológicas. Isso, normalmente, é feito com o uso de coeficientes de eficiência, que comparam dados simulados com os dados medidos em campo. Porém, medidas diretas de recarga permanecem tecnicamente inviáveis para bacias hidrográficas reais, mesmo que pequenas. Assim, a validação dos dados estimados com modelos como o BALSEQ tem que ser feita por meio de comparações indiretas entre a estimativa da recarga e os dados de vazão do curso d'água ou medidas de variação do nível freático, entre outros.

Nessa perspectiva, os objetivos primários, neste trabalho, foram estimar a recarga do aquífero livre para duas bacias hidrográficas características da região do Alto Rio Grande, no bioma Mata Atlântica e avaliar o modelo BALSEQ como instrumento de predição da recarga potencial e demais componentes do balanço hídrico, para diferentes condições climáticas, geológicas, pedogeomorfológicas e de uso e ocupação do solo. Outro objetivo é testar um protocolo de validação de modelos hidrológicos, especialmente

necessário quando os resultados estimados não podem ser diretamente comparados com dados medidos, como é o caso da recarga direta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Recursos hídricos

Apesar de ser um recurso naturalmente renovável, a água, por ser agente nas mais diversas funções e servir para múltiplos usos nas atividades humanas, torna-se um recurso limitado e de valor econômico (BRASIL, 1997; PORTO; PORTO, 2008). A crise da água neste século é resultado de um conjunto de fatores, diferentes para cada região, mas que, de modo geral, podem ser sintetizados em: escassez, aumento da demanda, intensa urbanização, mau uso da terra, contaminação das águas superficiais e mau gerenciamento (TUNDISI, 2008).

Um dos maiores desafios da humanidade atual é o desenvolvimento de práticas, conceitos éticos e de gestão e também tecnologias para otimizar os usos múltiplos da água com o mínimo de impacto sobre os mananciais desse recurso, ou, mesmo, para remediar situações de poluição. Ressalta-se a importância de uma gestão descentralizada e participativa, com abordagem sistêmica, integrada e preditiva (TUNDISI; MATSUMURA-TUNDISI, 2008), a partir da qual se poderá equalizar o desenvolvimento e a conservação ambiental, de modo a garantir, para as gerações futuras, melhores condições de vida e evolução.

Nessa perspectiva, as águas subterrâneas desempenham papel fundamental, já que a quantidade e, sobretudo, a qualidade dos aquíferos, normalmente, são superiores aos recursos hídricos superficiais. Sua importância não fica restrita a regiões áridas e semiáridas por dois motivos: a proteção natural à poluição e a possibilidade de descentralizar o abastecimento, com menores custos de tratamento, armazenamento e transporte. A questão é a dificuldade de conhecer suficientemente bem cada formação aquífera, para

poder usá-las de uma maneira econômica, ambiental e socialmente sustentável (ALBUQUERQUE, 2007; ALBUQUERQUE FILHO et al., 2011).

2.2 Água subterrânea

Água subterrânea é toda água presente no subsolo, seja na forma de umidade do solo ou na zona saturada do solo e da matriz rochosa, ou, ainda, como constituinte do fluxo de base dos cursos d'água superficiais (COSTA et al., 2011). Assim, o meio poroso conhecido como solo é parte integrante do ciclo hidrológico (Figura 1).

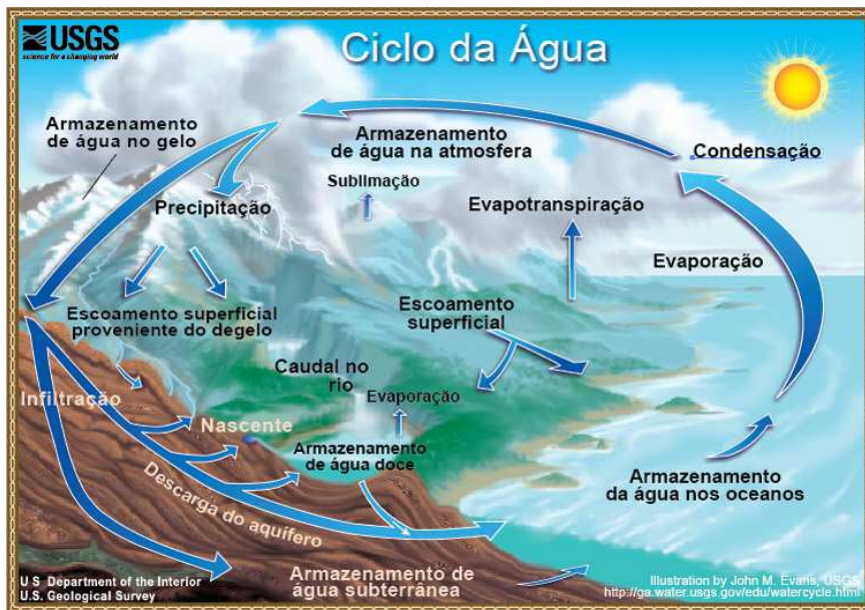


Figura 1 Ciclo hidrológico completo
Fonte: Science for a Changing World (2013)

A água subterrânea é o principal manancial de água doce no planeta, em termos volumétricos, o que a torna um importante recurso natural disponível

para as atividades antrópicas. No entanto, sua utilização, normalmente, está sujeita à extração do subsolo através de poços, os quais, para serem técnica e economicamente viáveis, devem ter uma taxa de extração relativamente alta, de modo que o volume produzido satisfaça à demanda. As formações capazes de prover água em taxas relativamente altas são conhecidas como aquíferos (PINDER; CELIA, 2006).

Conceitualmente, aquíferos são as camadas de solos ou de rocha saturadas com água e com capacidade de transmitir essa água no meio poroso a taxas relativamente elevadas (CLEARY, 1989). Portanto, a escala de tempo na questão das águas subterrâneas é de primeira importância. O tempo de residência da água no subsolo é muito maior que para as águas superficiais. Esse fato tem várias implicações, como, por exemplo, a maior proteção desses sistemas contra eventos de contaminação, devido ao longo tempo que o contaminante leva para chegar à zona saturada. Por outro lado, essa mesma característica implica na necessidade de um tempo muito maior para despoluir um aquífero já contaminado, quando comparado a um corpo d'água superficial (PINDER; CELIA, 2006).

Ainda assim, em sua grande maioria, as águas subterrâneas apresentam qualidade bastante superior à dos cursos d'água superficiais. Dessa forma, os mananciais subterrâneos são cada vez mais reconhecidos como fonte estratégica de recurso hídrico, principalmente para as gerações futuras (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2011).

Mesmo em regiões de clima úmido e geologia favorável à manutenção das águas superficiais, as águas subterrâneas assumem papel estratégico, pois, se corretamente exploradas, permitem descentralizar o abastecimento, com ganho na qualidade e economia em seu tratamento, armazenamento e distribuição (THORNTON et al., 2002). Além disso, os períodos críticos de secas e os

eventos de poluição das águas superficiais reforçam a necessidade de um cuidado especial com o manancial subterrâneo (CLEARY, 1989).

Em relação à quantidade e à disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos, e sua interação com as águas superficiais, podem-se subdividir os aquíferos em dois níveis: um superior, livre e submetido à pressão atmosférica e um inferior, semiconfinado, limitado superiormente por rochas semi-impermeáveis, através das quais ocorrem trocas de água entre os níveis superiores e desses com a superfície (Figura 2) (ALBUQUERQUE, 2007).

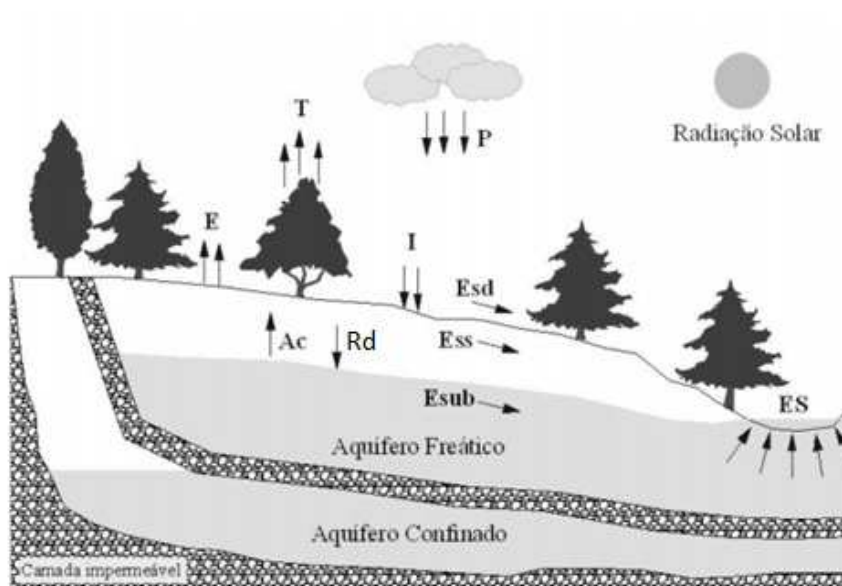


Figura 2 Dinâmica da hidrologia subterrânea
Fonte: Viola (2008)

Os aquíferos livres têm uma característica especial que os torna passíveis de um uso sustentável, que é a ocorrência de recarga natural periódica advinda da água das chuvas. Assim, ao se extrair do aquífero livre apenas uma porção dessa recarga anual ou reserva renovável, permite-se que os fluxos

hidrológicos característicos de cada bacia se mantenham (COSTA et al., 2011). Pode-se, assim, manter o equilíbrio ecológico, ao mesmo tempo em que se utiliza desse recurso nas mais diversas atividades humanas, sem, no entanto, comprometer a qualidade ou a continuidade das taxas exploráveis ao longo do tempo.

Dessa maneira, torna-se fundamental conhecer o ciclo hidrológico do aquífero livre, sobretudo a quantificação da recarga anual. Porém, essa atividade é bastante complexa, já que a água subterrânea não pode ser monitorada direta e continuamente. Isso torna a compreensão do fluxo subterrâneo e as interações desse com o ciclo hidrológico um desafio de primeira importância, para gerenciar corretamente o uso da água (SOPHOCLEOUS, 2010).

2.3 Recarga de aquíferos

O processo de recarga de aquíferos pode ser definido como o movimento descendente da água no solo ou rocha, até alcançar a zona saturada. Deve-se, no entanto, distinguir o conteúdo de água no solo potencialmente disponível para a recarga efetiva, já que o meio não saturado pode influenciar de modo que haja diferença entre os dois valores (LERNER; ISSAR; SIMMERS, 1990). Assim, pode-se definir recarga potencial como o conteúdo de água no solo que percola para além da profundidade efetiva do sistema radicular e que, portanto, potencialmente, deve chegar à zona saturada e constituir recarga direta (OLIVEIRA, 2004).

A recarga direta é definida como a água adicionada ao reservatório subterrâneo, em excesso ao déficit e evapotranspiração da umidade do solo, pela percolação vertical da precipitação através da zona insaturada. Já a recarga indireta resulta da percolação para o lençol freático da água que escoar e se

acumula em represas e cursos d'água. Ambos constituem as reservas renováveis do aquífero livre (BERTOL, 2007).

Além dessas duas, pode-se caracterizar a recarga artificial, a qual ocorre pela ação antrópica, seja acidentalmente, pelo excesso de irrigação, perdas em encanamentos d'água, represas, entre outros, ou de modo planejado, visando à recuperação do nível freático de determinado aquífero livre ou confinado (ALMEIDA, 2011).

Já a recarga do aquífero confinado é condicionada pela constituição geológica deste. Aquíferos porosos ou sedimentares, como o aquífero Guarani, ocorrem em rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e são os mais importantes devido ao grande volume de água e à alta permeabilidade. Os aquíferos fraturados são formados em fendas, fraturas e falhas em rochas duras e maciças, e são totalmente dependentes da ocorrência destas. Geralmente, são pouco produtivos e a recarga é pontual e de difícil determinação (INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM, 2010).

Diversas ferramentas são aplicadas no sentido de aferir o movimento das águas subterrâneas, para poder, assim, determinar os parâmetros para sua exploração e gestão sustentável. Mas, a escolha de técnicas apropriadas depende de diversos fatores, tais como escala de tempo e espaço, nível de precisão e objetivos, entre outros (SCANLON; HEALY; COOK, 2002). Entre as técnicas correntes estão a do balanço hídrico, técnicas baseadas no estudo das águas superficiais ou na zona não saturada do solo e técnicas da zona saturada. Para cada uma dessas técnicas existem inúmeros métodos já desenvolvidos, cada um com características específicas e, portanto, com limitações e pontos fortes. A modelagem hidrológica está entre as metodologias mais utilizadas atualmente.

2.4 Modelagem hidrológica

Modelo é uma estruturação simplificada da realidade que, supostamente, apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações mais ou menos subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por omitem detalhes acidentais e por evidenciarem dos aspectos fundamentais da realidade (CHRISTOFOLETTI, 1999).

No âmbito da hidrologia, os modelos são ferramentas de análise importantes, uma vez que podem ser utilizados para assegurar uma melhor compreensão dos processos hidrológicos, analisar o desempenho de práticas de manejo, avaliar os riscos e benefícios advindos de diferentes tipos de uso do solo e auxiliar na tomada de decisão na implantação de sistemas agrícolas (SPRUILL; WORKMAN; TARABA, 2000).

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, por meio da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). 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.

Os processos ambientais no mundo real são, geralmente, bastante complexos e são tipicamente tridimensionais e dependentes do tempo. Tal complexidade pode incluir comportamentos não lineares e componentes estocásticos sobre múltiplas escalas de tempo e espaço. Pode haver um

entendimento qualitativo de um processo particular, mas o entendimento quantitativo pode ser limitado. A possibilidade de expressar os processos físicos como um conjunto de equações matemáticas detalhadas pode não existir, ou as equações podem ser muito complicadas, exigindo simplificações para seu uso (STEYAERT, 1993).

Uma importante vantagem da utilização de simulação está associada ao seu baixo custo. Na maioria das aplicações, o custo de executar um programa computacional é muitas ordens de magnitude menor do que o correspondente custo relativo à investigação experimental. Esse fator adquire maior importância à medida que o problema real estudado apresenta maiores dimensões e complexidade, como em uma bacia hidrográfica (MACHADO, 2002). A vantagem do baixo custo não elimina a necessidade da pesquisa de campo, mas auxilia na realização de experimentos que, certamente, trarão maior quantidade de informações novas e relevantes ao conhecimento científico (PESSOA; SILVA; DUARTE, 1997). Porém, a necessidade de validação dos modelos e simuladores já existentes pode ser considerada uma desvantagem desse processo, pois, por vezes, é demorada e requer conhecimento amplo do problema, além da obtenção de dados de campo.

Além disso, limitações computacionais, ou a maneira pela qual as equações matemáticas são convertidas em processos numéricos discretos, levam à parametrização de processos complexos em escalas muito detalhadas que podem não ser explicitamente representadas no modelo. Em alguns casos, esses conjuntos de equações podem ser vistos como uma coleção de hipóteses, relativa a processos físicos, nos quais entradas e saídas estão conectadas. Esse conjunto de equações parametrizadas representa a melhor aproximação do modelador para explicar esses processos, dadas essas restrições coletivas (STEYAERT, 1993).

Mesmo os modelos atuais, caracterizados por sua grande capacidade e sofisticação, pelas inúmeras possibilidades de condições de contorno, incontáveis parâmetros e variáveis, não podem oferecer uma previsão de um futuro certo. No entanto, modelos são criados e utilizados com objetivos específicos e o que deve ser verificado sempre é se o modelo cumpre seu objetivo (HUNT; ZHENG, 2012). Tal fato é especialmente importante para a modelagem da água subterrânea, cujo monitoramento do fluxo, ou a quantificação exata dos processos, é ainda praticamente impossível. Além disso, a quase inexistência de dados hidrogeológicos a respeito das águas subterrâneas na maioria das regiões brasileiras, principalmente nas áreas com abundância de águas superficiais, obriga os hidrólogos a utilizarem modelos mais simples do que os atualmente disponíveis, em âmbito mundial.

Oliveira (2004) divide os modelos de recarga em duas classes, que são:

1. modelos de previsão, que consistem em estimar a recarga a partir da quantificação dos processos que a antecedem, podendo citar o balanço hídrico sequencial diário, que é um modelo de cálculo através do armazenamento na zona vadosa;

2. modelos de resposta que permitem estimar a recarga a partir da reação do meio subterrâneo ao processo de recarga, podendo, ainda, considerar as extrações por parte do homem. Eles fornecem estimativas de valores de recarga por episódios, como, por exemplo, a decomposição dos hidrogramas de escoamento superficial, a variação do armazenamento da zona saturada (variação de níveis piezométricos), a quantificação dos escoamentos em secções da zona saturada, a quantificação dos caudais de nascentes ou as combinações de alguns destes métodos.

Uma maneira de contornar essa carência de dados hidrogeológicos é o uso de modelos de balanço hídrico do solo, que utilizam dados meteorológicos e dados de atributos físico-hídricos do solo.

2.5 BALSEQ

BALSEQ é um modelo numérico de balanço hídrico sequencial diário no nível do solo, desenvolvido para a estimativa da recarga de águas subterrâneas rasas em Portugal (LOBO-FERREIRA, 1981; PARALTA et al., 2003). Originalmente, o modelo foi concebido para áreas semiáridas e com escassez de dados hidrogeológicos, para obter estimativas de recarga potencial por incremento de tempo considerado no balanço. Essas estão entre as principais vantagens do modelo, ou seja, sua simplicidade e pouca exigência de dados de difícil aquisição, que foi o que estimulou sua escolha na avaliação em condições de clima úmido, para verificar se pode ser adaptado para tais condições.

Uma das principais simplificações adotadas pelo BALSEQ original é o uso o método da Curva Número (CN-SCS) para estimar a lâmina de escoamento superficial direto e a lâmina infiltrada. Sabe-se, no entanto, que esse método apresenta sérias deficiências na estimativa de eventos isolados de escoamento superficial, isso por se tratar de um método empírico, que foi desenvolvido para bacias hidrográficas norte-americanas e devido à dificuldade de se enquadrar solos tropicais nas classes de solos propostas por ele. Mas, com as devidas adaptações e após passar por um processo de calibragem, o modelo oferece resultados adequados, sobretudo para simulações com compasso mensal ou anual (SILVA, 2006).

Para estimar a recarga potencial, o modelo utiliza o conceito de armazenamento dado pela capacidade de campo, com a recarga potencial sendo dada pela diferença da umidade do solo no dia e o valor da umidade na capacidade de campo multiplicada pela profundidade efetiva do sistema radicular considerado. Pelo processo de fluxo na zona vadosa (solo não saturado), os impulsos de percolação profunda estimados para cada incremento de tempo são atenuados, devido à redistribuição da umidade na zona vadosa.

Obtém-se, assim, um valor de recarga potencial que não reflete, necessariamente, a recarga efetiva ou a quantidade de água que efetivamente chega à zona saturada do solo.

Oliveira (2004) aplicou diversos métodos de estimativa da recarga e comparou com os resultados obtidos pelo BALSEQ. Propôs, então, uma série de mudanças para melhorar o modelo e seus resultados, nomeando-o BALSEQ_MOD. No entanto, não pôde avaliar satisfatoriamente seu desempenho. O autor também sugeriu outras tantas possibilidades de melhoria no modelo e desenvolvimentos futuros para avaliá-lo e aplicá-lo em diferentes situações. Entre as mudanças, destacam-se o uso de outras metodologias para calcular a infiltração superficial, como o modelo de infiltração de Philip (OLIVEIRA, 2007), em substituição do método CN, que parece ser uma das principais limitações do BALSEQ.

Outras proposições de Oliveira (2004) foram: incorporar a interceptação pela cobertura vegetal como parâmetro do modelo, uso de Kc dual no cálculo da evapotranspiração de referência, considerar a posição do lençol freático e diferentes métodos de calcular a recarga potencial.

Quanto à sua classificação, além de ser um modelo de previsão (OLIVEIRA, 2004), o BALSEQ pode ser classificado como um modelo determinístico, semiconceitual, dinâmico e discreto, segundo a classificação dada por Tucci (2005).

O modelo BALSEQ foi aplicado em diversas bacias hidrográficas em Portugal, na Índia, na China, em Angola e também no Brasil. Em Portugal, foi aplicado nos sistemas aquíferos de Quarteira, Albufeira-Ribeira de Quarteira e Querença-Silves, situados no Algarve (OLIVEIRA, 2005; SALVADOR et al., 2007); no aquífero Algar I (NOVO et al., 1998) e no aquífero Quaternário de Aveiro, na cidade de Estarreja e no aquífero dos Gabros de Beja, na região semiárida do Alentejo (PARALTA et al., 2003); na Índia, foi no estado de Goa

(CHACHADI et al., 2004); em Angola, na bacia do rio Cunene e na República Popular da China, nas regiões de Cantão e de Dalian (LOBO-FERREIRA, 2000).

No Brasil, o BALSEQ foi aplicado na bacia do rio do Peixe, localizada nos estados da Paraíba e do Ceará (BRITO et al., 2008; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM, 2007), em uma região cárstica no município de Confins, MG (CAMARGO et al., 2011) e também em uma bacia experimental no Ceará (LOPES; PINHEIRO; ARAÚJO NETO, 2012). Além disso, foi utilizado para estimar recarga da bacia hidrográfica do rio Doce, em Minas Gerais (FERNANDES FILHO et al., 2012).

Faltam, entretanto, trabalhos que avaliem o modelo BALSEQ quanto à qualidade de seus resultados, principalmente para áreas com clima, geologia, solos e geomorfologias características das diferentes bacias hidrográficas do Brasil.

2.6 Avaliação de modelos hidrológicos

Como modelos são formulações matemáticas mais ou menos representativas da realidade, o processo de validação é uma premissa básica dessa abordagem (SCHAEFLI; GUPTA, 2007). A necessidade de avaliar os modelos utilizados na hidrologia é ainda maior, dada a natureza desse tipo de modelagem, ou seja, os objetos de estudo da hidrologia são fenômenos bastantes variáveis, de difícil mensuração e controle (BEVEN, 1993; WELLES et al., 2007).

Alguns esforços têm sido feitos para sistematizar os métodos de avaliação dos modelos hidrológicos e normatizar suas práticas. Nesse sentido, o trabalho de Biondi et al. (2012) traz uma revisão do atual estado da arte e propõe um protocolo de avaliação para modelos hidrológicos. Dada sua atualidade, essa

proposta será parcialmente aplicada na avaliação do modelo BALSEQ neste estudo. Aqui, o termo avaliação tem um contexto mais geral de verificar as qualidades e os defeitos do modelo, e o termo validação é utilizado para a verificação quantitativa do desempenho do modelo. Salienta-se que esta última é apenas uma parte do processo de avaliação.

A avaliação de modelos hidrológicos pode ser entendida como um conjunto de procedimentos que permite verificar o desempenho da modelagem em três fases complementares: quantitativa, qualitativa e a avaliação da estrutura do modelo e suas bases científicas (BIONDI et al., 2012). O desempenho quantitativo e qualitativo pode ser realizado gráfica ou metricamente e, para este último, utilizam-se coeficientes numéricos de eficiência.

Usualmente, a validação é feita pela comparação entre dados observados de um conjunto que não tenha sido utilizado na calibragem do modelo e os resultados estimados pelo modelo. Tal comparação pode ser feita utilizando-se coeficientes de eficiência, como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (CRISS; WINSTON, 2008; SCHAEFLI; GUPTA, 2007), o qual tem sido amplamente utilizado na verificação do desempenho de modelos hidrológicos (GETIRANA et al., 2011).

Porém, mensurar dados da hidrologia subterrânea, com boa precisão e diretamente no campo, é bastante complicado e oneroso, e, por vezes, impossível para a atual tecnologia. Portanto, a validação de modelos da água subterrânea não pode ser feita com os tradicionais coeficientes de eficiência. Pode-se, entretanto, avaliar o desempenho desses modelos com análises comparativas indiretas, seja com modelos consagrados na literatura, com comparações indiretas com dados de fluxo de base, ou outros métodos que consideram dados da zona saturada.

Além disso, há discussões filosóficas válidas e bastante atuais a respeito da validação de modelos, sobretudo na modelagem da água subterrânea.

Konikow e Bredehoeft (1992) colocam isso muito bem em seu artigo intitulado “Groundwater models cannot be validated” e argumentam que modelos e teorias científicas podem apenas ser invalidados com dados discordantes, mas, mesmo que uma grande série de dados observados corrobore a hipótese do modelo, ou seus resultados, ele não pode ser validado positiva e definitivamente.

Quanto à avaliação gráfica, esse é um passo fundamental no processo de avaliação de um modelo, pois, por meio desse recurso visual, pode-se verificar a concordância espacial e temporal entre dados estimados e medidos e a ocorrência de padrões de erro do modelo (BIONDI et al., 2012).

Já a avaliação da estrutura do modelo e das bases científicas que o compõem visa avaliar a consistência e a coerência com o mundo real, no sistema de entrada-processamento-saída do modelo, e tem o objetivo de verificar se as repostas corretas obtidas com a modelagem são produzidas por parâmetros adequados e com sentido físico da realidade. Assim, a quantificação e a análise das diferentes fontes de incertezas são cruciais.

Para o trabalho aqui apresentado, a análise da estrutura do modelo tem grande importância, já que a comparação com dados de recarga medidos diretamente, e com distribuição espacial e temporal, é praticamente impossível atualmente. A compreensão das bases científicas do modelo e do equacionamento por ele proposto é fundamental, pois, com isso, podem-se identificar pontos fortes do modelo, suas fraquezas e possíveis anomalias. Também possibilita implementar melhorias e adaptações no modelo, de forma mais consciente e acertada.

Além disso, a análise crítica de todos os processos envolvidos na formulação do modelo permite verificar se há equilíbrio entre o objetivo do modelo, sua complexidade e a disponibilidade de dados para a sua utilização adequada, o que auxilia no processo de melhoria da estrutura do modelo e

facilita a adoção de parâmetros importantes e adaptações nos cálculos e nas formulações utilizadas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas de estudo

Foram utilizados dados de duas bacias hidrográficas monitoradas, as quais se localizam na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH – GD1), sul de Minas Gerais (Figura 3).

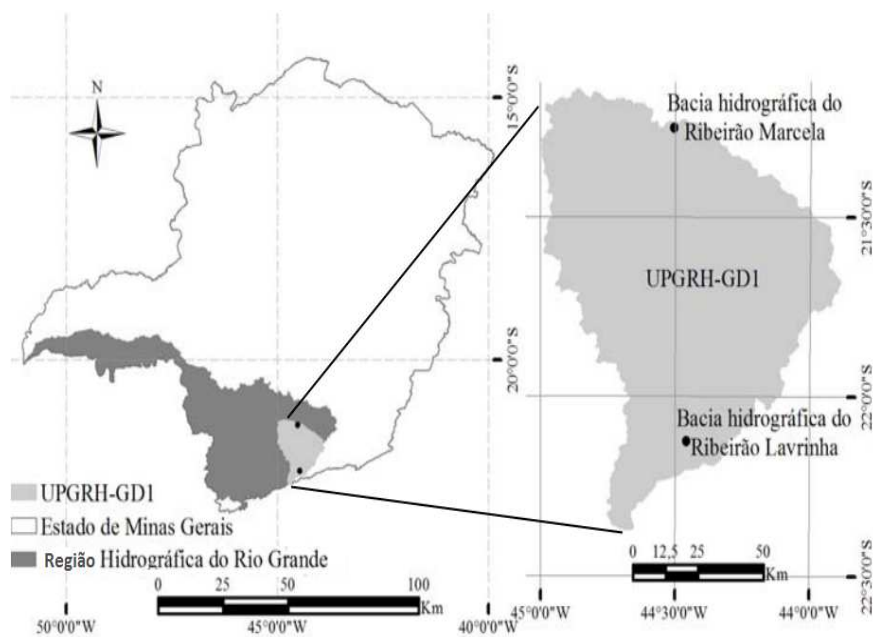


Figura 3 Localização das duas bacias hidrográficas estudadas
Fonte: Adaptado de Silva (2009)

Diversos trabalhos de mestrado e doutorado já foram realizados nas bacias do ribeirão Lavrinha e do ribeirão Marcela (ÁVILA, 2008; GOMES, 2008; JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006; PEREIRA, 2009; PINTO, 2011; SILVA, 2006, 2009), porque há grande interesse no entendimento dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas que sejam representativas dos domínios dos Cambissolos e Latossolos que ocorrem na UPGRH-GD1.

A bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (BHRL) está localizada entre as coordenadas geográficas 22°06'50,4'' e 22°08'24,0'' de latitude Sul e 44°26'20,4'' e 44°28'40,8'' de longitude Oeste, no município de Bocaina de Minas. Essa bacia drena uma área de 676 ha, com altitude e declividade médias de 1.375 m e 38,5%, respectivamente. O ribeirão deságua diretamente no rio Grande.

O clima da BHRL foi classificado como do tipo Cwb, conforme classificação Köppen, caracterizado como mesotérmico de verões brandos e suaves e estiagem no inverno. A precipitação média anual é de 1.860 mm e a temperatura média anual é de 17,5 °C. Com temperatura mínima de 2,7 °C e máxima de 32 °C, geadas são comuns e ocorrem anualmente (JUNQUEIRA JÚNIOR, 2006).

A bacia hidrográfica do ribeirão Marcela (BHRM) está localizada entre as coordenadas geográficas 21°14'24'' e 21°15'54'' de latitude Sul e 44°29'24'' e 44°30'54'' de longitude Oeste, no município de Nazareno, MG. Drena uma área de 470 ha, sendo este um afluente da margem direita do córrego Jaguará, o qual deságua diretamente no reservatório da usina hidrelétrica de Camargos/CEMIG. A altitude e a declividade média são de 1.007 m e 12,3%, respectivamente.

O clima na BHRM é do tipo Cwa, conforme a classificação Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos. A precipitação e a temperatura média anual são de 1.300 mm e 19,7°C, respectivamente, com

médias de temperaturas mínimas e máximas de 2,6 °C e 36,2 °C, respectivamente (SILVA, 2009).

3.1.1 Geologia, solos e cobertura vegetal

O levantamento geológico, pedológico e do uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas estudadas foi realizado por diferentes autores em épocas diferentes (GOMES, 2005, 2008; MENEZES, 2007; PINTO, 2011).

Os solos na BHRL foram caracterizados em três classes: Cambissolo háplico, Gleissolo háplico e Neossolo flúvico, com 92% de Cambissolos e os demais como solos típicos de várzea (Figura 4) (MENEZES, 2007).

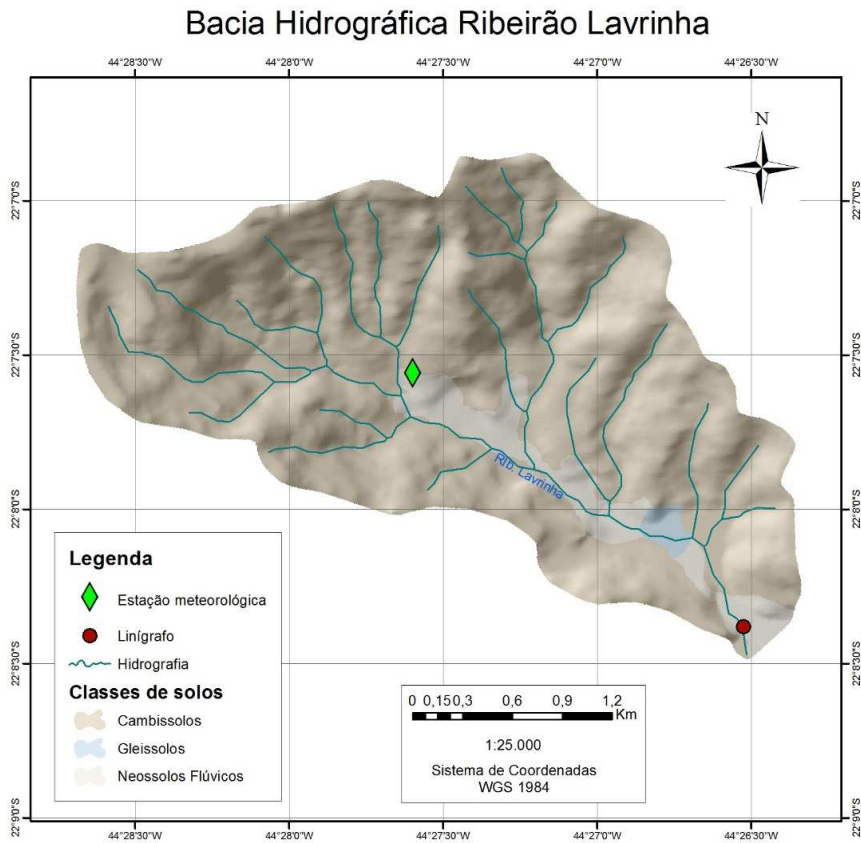


Figura 4 Bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, com as classes de solos predominantes e localização da estação meteorológica e do linígrafo.

Fonte: Menezes (2007)

A cobertura do solo na bacia do ribeirão Lavrinha é predominantemente florestal, ocupando 41,5% da área. As pastagens ocupam 40,4%; as áreas de regeneração natural, 13,2% e a vegetação de várzea ocupa 4,9% do total da área da bacia (PINTO, 2011) (Figura 5).

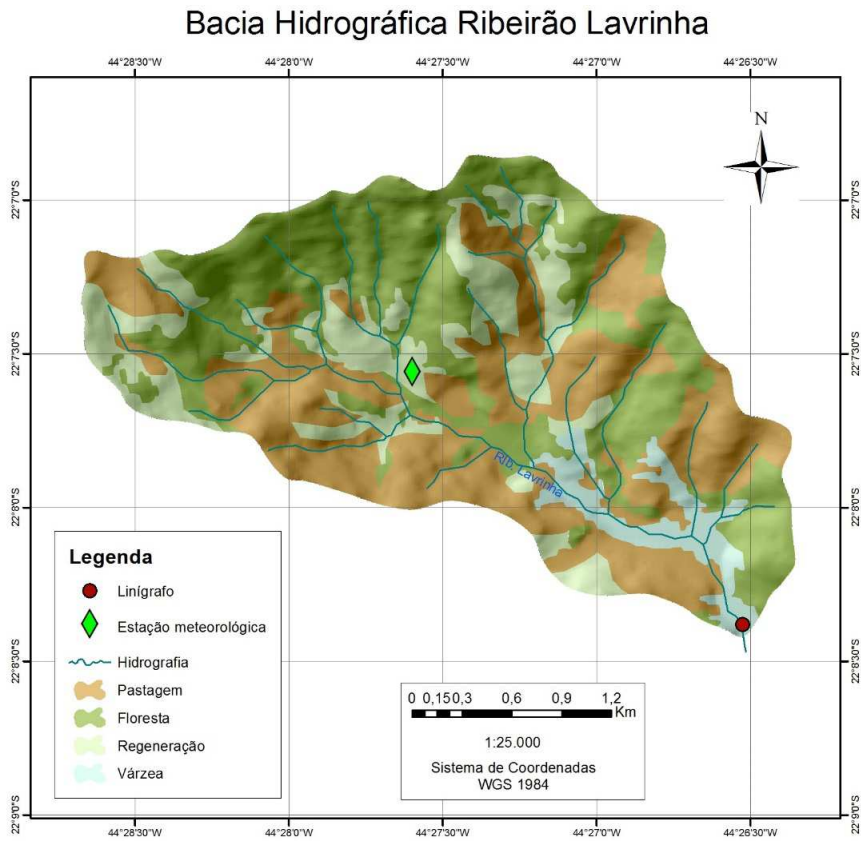


Figura 5 Uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha
Fonte: Pinto (2011)

Nas Figuras 4 e 5 pode-se observar que as principais pedoformas na BHRL são caracterizadas por curvatura (curva de nível) e perfil côncavos, ou simplesmente pedoformas côncavo-côncavas (RESENDE et al., 2007).

Na BHRM predominam Latossolos vermelho-amarelos (LVAd), em 65% da área; seguido de Latossolos vermelhos (LVd), com 14% da área e Cambissolos (CXbd) em menos de 5% do total da área da bacia e presentes em áreas de relevo mais declivoso; 17% são áreas de várzea, onde ocorrem solos Hidromórficos distróficos (RUd) (GOMES, 2008) (Figura 6).

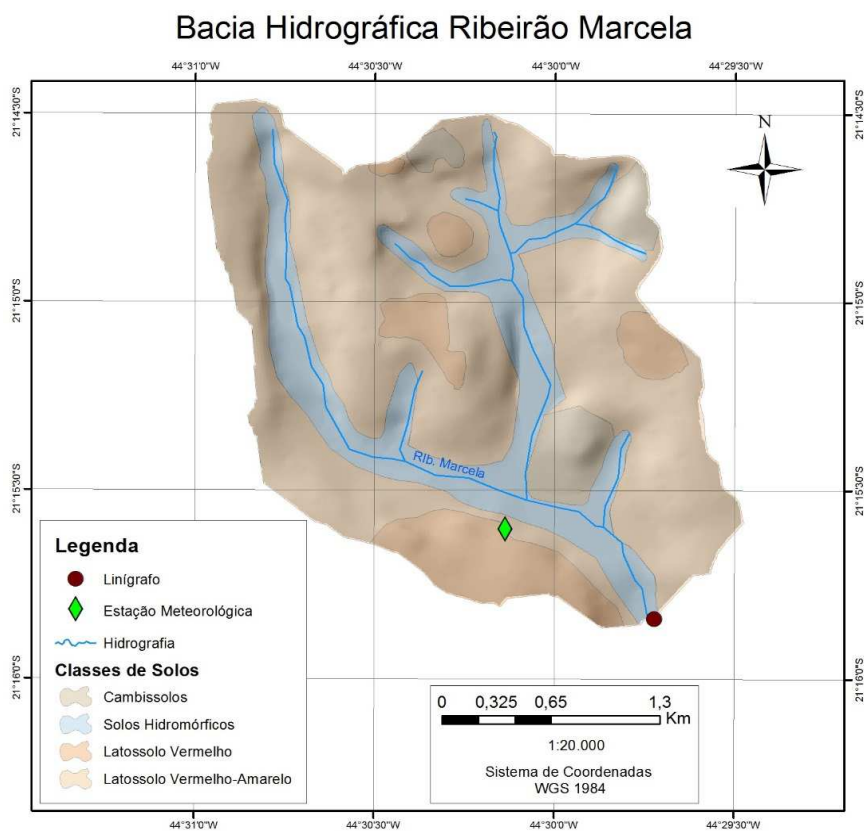


Figura 6 Bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, com as classes de solos e localização da estação meteorológica e do linígrafo
Fonte: Motta et al. (2001)

O uso do solo na BHRM é diverso. Gomes (2005) encontrou 76% da área ocupada por pastagem, 16,7% com culturas anuais (milho), 4,2% com fragmentos de floresta tropical subcaducifólia, 1,91% com plantação de Eucalipto, 0,68% de canavial e 0,68% de corpos d'água (lago) (Figura 7).

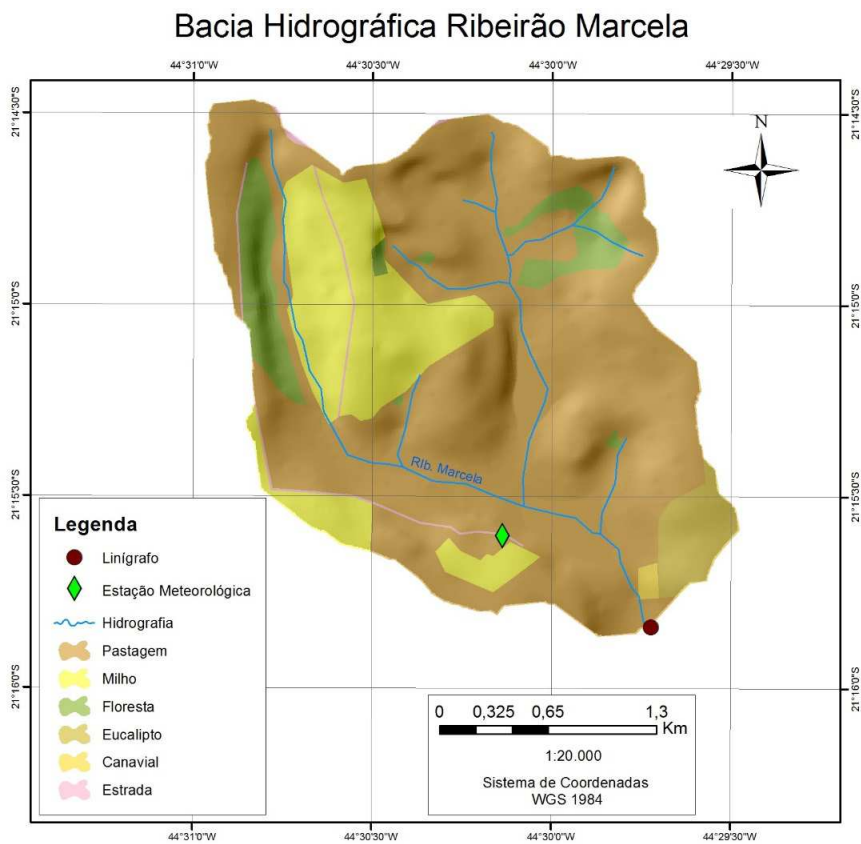


Figura 7 Uso e cobertura dos solos na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela
Fonte: Gomes (2005)

As pedofomas da BHRM são caracterizadas por curvatura convexa e perfil côncavo, ou simplesmente pedofomas convexo-côncavas. Outra informação importante, sobretudo na BHRM, é o histórico do manejo adotado

na área, Gomes (2005) observou práticas rudimentares no manejo da pastagem, com uso de fogo para limpar o pasto, o que provoca degradação acelerada do solo. Soma-se a isso a ausência de práticas conservacionistas, como plantio em nível, terraceamento, barragens de contenção e, ainda, a inexistência de mata ciliar ao longo da rede de drenagem e pouca cobertura vegetal nas proximidades das nascentes. Além disso, algumas nascentes são parcialmente ocupadas com cultivo anual de milho, o qual utiliza maquinário no plantio e na colheita, com consequente compactação do solo. O mesmo efeito de compactação é observado pelo pisoteio do gado, que tem acesso aos cursos d'água, inclusive nas áreas de nascente. Este cenário é um indício do favorecimento do escoamento superficial, com menor infiltração e recarga.

3.1.2 Parâmetros do solo e da vegetação

O modelo BALSEQ requer alguns parâmetros físico-hídricos do solo, tais como capacidade de campo (CC), densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0). Junqueira Júnior (2006) realizou o levantamento dessas e de outras informações em 198 pontos na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha (Figura 8).

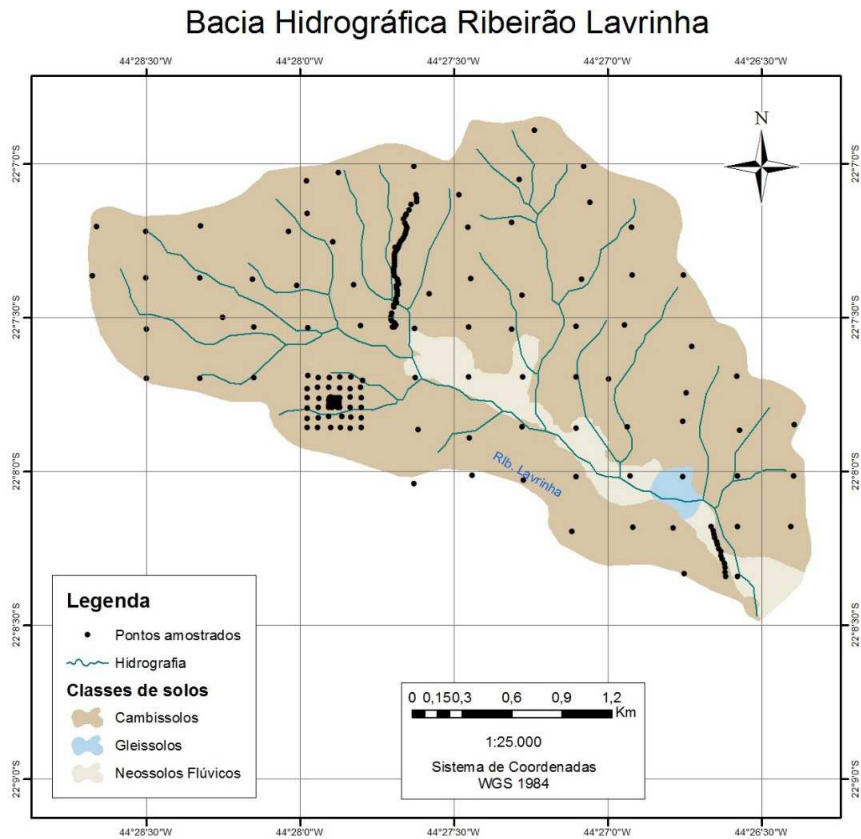


Figura 8 Pontos com solos amostrados na BHRL
 Fonte: Junqueira Júnior (2006)

Os métodos utilizados na determinação dos parâmetros supracitados encontram-se em Junqueira Júnior (2006). Densidade do solo (D_s) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) foram determinadas conforme metodologia descrita em Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997). A capacidade de campo adotada foi a umidade de equilíbrio em amostras indeformadas, submetidas à tensão de -10 kPa, conforme descrito por Medina e Oliveira Júnior (1987).

Na BHRM, Motta et al. (2001) realizaram um levantamento detalhado das classes de solos presentes na bacia. Gomes (2005) determinou, em 174 pontos dentro da BHRM, os valores dos parâmetros do solo: K_0 , D_s , conforme EMBRAPA (1997) e CC, conforme Medina e Oliveira Júnior (1987) (Figura 9).

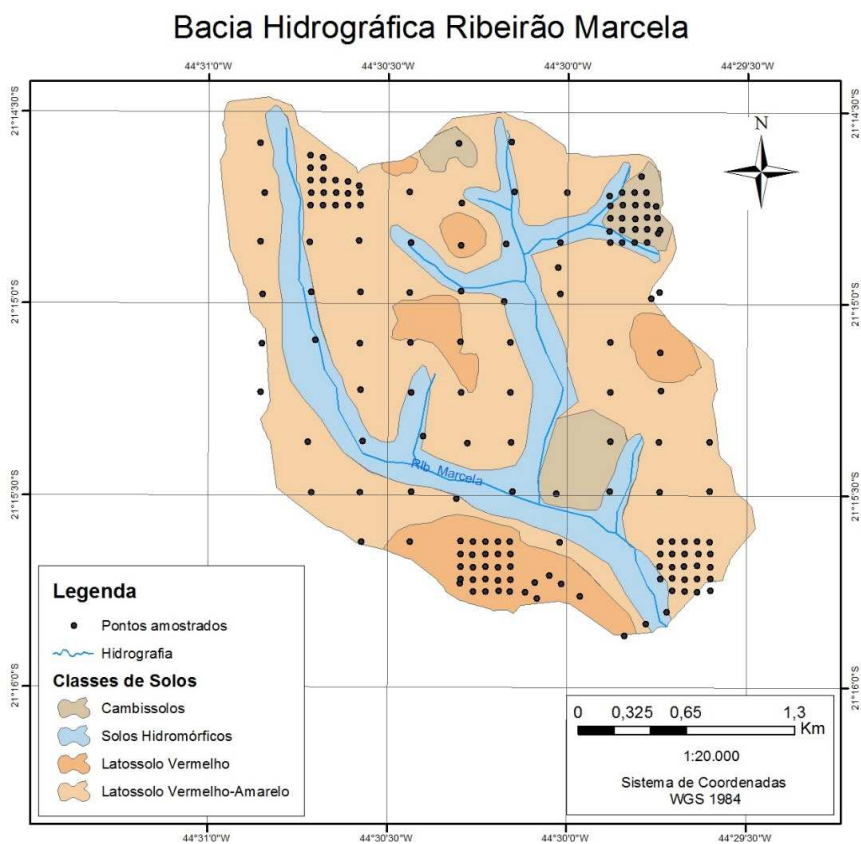


Figura 9 Pontos com solos amostrados na BHRM
Fonte: Gomes (2005)

O modelo BALSEQ requer valores de atributos de solo para cada classe de solo encontrada na bacia. Dessa forma, separaram-se os pontos por classe de solo mapeada e calculou-se a média para cada atributo do solo.

Para o presente trabalho, foram utilizadas as informações disponibilizadas por estes autores, pois a modelagem hidrológica foi realizada com dados hidrometeorológicos referentes aos anos destes trabalhos pretéritos. Para os parâmetros referentes à vegetação existem dados disponíveis na literatura (Tabela 1).

Tabela 1 Parâmetros referentes à vegetação encontrados na literatura

Cobertura vegetal	$K_{c\ mid}$ *	Prof. (m)*
Pastagem	0,80 ⁽¹⁾	0,30
Floresta	1,00 ⁽²⁾	3,00**
Eucalipto	1,00 ⁽³⁾	2,00**
Regeneração	1,00 ⁽²⁾	1,00
Milho	1,20	1,00
Cana-de-açúcar	1,25	1,20

$K_{c\ mid}$ é o coeficiente de cultura no terceiro estágio de crescimento

Fontes: * os valores de $K_{c\ mid}$ e Prof. foram extraídos de Allen et al. (1998);

** Floresta, Eucalipto (ALMEIDA; SOARES, 2003).

(1) Alencar et al. (2009)

(2) Adaptado de Grazing Pasture (ALLEN et al., 1998)

(3) Adaptado de Conifer Tree (ALLEN et al., 1998)

Porém, a despeito dos valores de profundidade efetiva do sistema radicular (Prof.) para culturas com dados encontrados na literatura, as bacias hidrográficas apresentam situações limitantes que foram consideradas na modelagem e, portanto, foram utilizados valores adaptados para as condições encontradas. Na BHRL, a profundidade média do solum (horizonte A e horizonte B) é de 1 m e, portanto, a Prof. adotada para florestas, eucaliptos e regeneração foi de 1 m. Já na BHRM, os valores desta variável adotados para milho e cana-de-açúcar foram de 0,40 e 0,50 m, respectivamente, valores menores que os da literatura, pois estes dizem respeito a profundidades efetivas máximas, entretanto, na maior parte do tempo, o sistema radicular dessas culturas é bastante inferior ao valor máximo. Ademais, no período de pousio, o solo fica exposto e, em seguida, é ocupado por vegetação espontânea, o que justifica o fato de os valores de Prof. adotados na modelagem com o BALSEQ serem inferiores aos listados na Tabela 1.

3.1.3 Dados meteorológicos

Na execução do BALSEQ, foram utilizados dados diários de evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação total (P). Em cada uma das bacias está instalada, desde janeiro de 2005, uma estação meteorológica compacta completa, da marca Campbell® (Figura 10) abastecida por energia de um painel solar e programada para leitura e gravação dos dados meteorológicos a cada 30 minutos, os quais passaram por análise de consistência e foram compilados em base diária, para cálculo da ET_0 diária pelo método padrão da FAO (ALLEN et al., 1998).



Figura 10 Estação meteorológica compacta completa Campbell®
Fonte: Pereira (2009)

3.1.4 Dados de vazão

Para as duas bacias hidrográficas existem dados de vazão dos seus cursos d'água desde o ano de 2006 (GOMES, 2008; PINTO, 2011), quando foram instalados linígrafos automáticos com sensor de pressão, para o registro da lâmina d'água na seção de controle da bacia ao longo do tempo, programado para coletar informações a cada 15 minutos. Também foram realizadas campanhas de campo para o monitoramento da velocidade com molinete, com um perfilógrafo determinaram-se a área da seção e, posteriormente, a vazão do curso d'água. Em seguida, gerou-se a curva chave, por meio de regressão potencial, relacionando a vazão com a lâmina de água. Com a curva-chave gerou-se a série de vazão para o período de estudo (PINTO, 2011).

3.2 Modelo BALSEQ

O algoritmo do BALSEQ é apresentado na Figura 11.

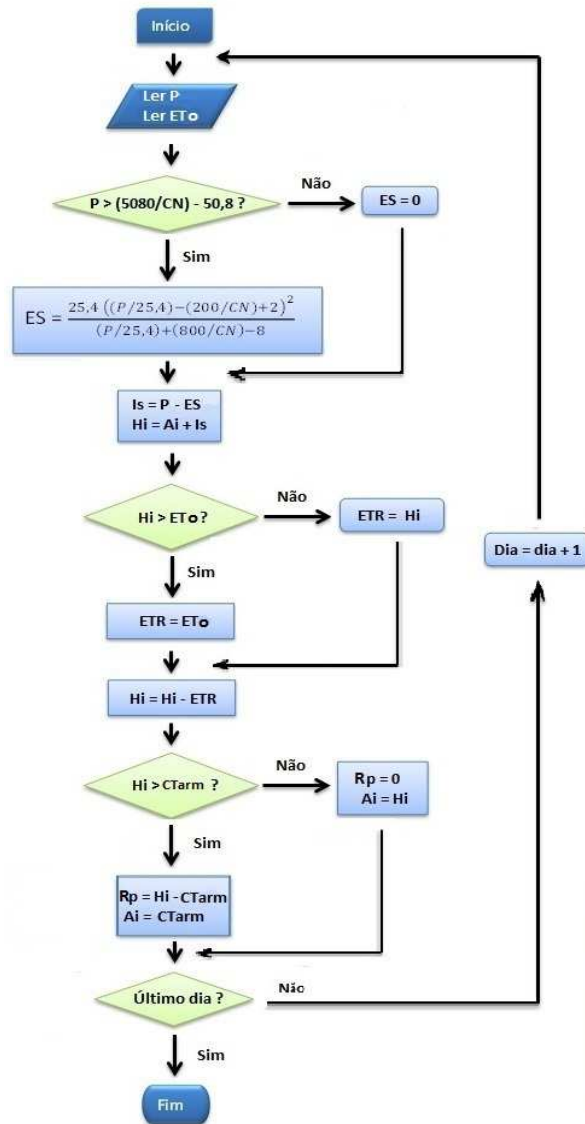


Figura 11 Algoritmo de funcionamento do modelo BALSEQ
 Fonte: Adaptado de Paralta et al. (2003)

Em que:

P = precipitação (mm);
 ETo = evapotranspiração de referência (mm);
 CN = coeficiente do método CN-SCS;
 ES = escoamento superficial (mm);
 Is = infiltração superficial (mm);
 Hi = lâmina de água armazenada no solo ao longo do dia (mm);
 Ai = lâmina de água armazenada no solo ao final do dia (mm);
 ETR = evapotranspiração real (mm);
 CTarm = capacidade total de armazenamento (mm);
 Rp = recarga potencial (mm).

O algoritmo consiste em entradas de dados diários de precipitação e evapotranspiração de referência para um determinado valor de CN, referente ao conjunto solo/vegetação, com o qual é calculado o escoamento superficial relacionado ao evento de precipitação diário. A infiltração é dada pela diferença entre a precipitação diária e o valor de ES obtido com o método CN-SCS. A lâmina infiltrada é acrescentada à umidade do solo e, em seguida, o valor de ET_0 é subtraído desta umidade, com a qual é obtida a ETR de acordo com a lâmina d'água armazenada no solo. O valor excedente à capacidade total de armazenamento irá constituir a recarga potencial daquele dia. Em seguida, o algoritmo repete as operações para o próximo dia, sequencialmente, até o final do intervalo de tempo simulado.

O método pode ser aplicado para condições nas quais não exista recarga artificial, não haja escoamento superficial afluyente à área de estudo, o nível freático se encontre sempre abaixo da profundidade do solo sujeita à evapotranspiração, não haja zonas de impedimento abaixo do solo e nem caminhos preferenciais da água no solo. Feitas essas considerações a equação do balanço hídrico para o solo nessa área pode ser expressa por

$$P - ETR - DA_i - ES - Rp = \varepsilon$$

em que P é a precipitação, ETR é a evapotranspiração real, DAi é a variação (final - inicial) do armazenamento de água no solo, ES é o escoamento superficial, Rp é a recarga potencial e ε é o erro de cálculo do balanço.

Para a aplicação sequencial desta fórmula, é necessário conhecer os valores de P e da evapotranspiração de referência (ET_0) referentes a cada intervalo de tempo do balanço, assim como o valor da lâmina d'água total armazenada no solo (CT_{arm}):

$$CT_{arm} = CC \cdot \text{prof.} \cdot Ds \cdot 10^{-1}$$

em que CC é umidade do solo na capacidade de campo do solo (g. g^{-1}), Ds é a densidade do solo (g. cm^{-3}) e prof. é a profundidade do solo sujeita à evapotranspiração, em centímetros (normalmente a profundidade efetiva das raízes das plantas) e o fator 10^{-1} é para obter o resultado da lâmina d'água, em milímetros (mm).

Para a determinação do escoamento superficial pelo Método do Número da Curva (CN-SCS), é necessário conhecer a precipitação que incide sobre a área para a duração pretendida (6, 12 ou 24 horas) e obter, a partir de tabelas, o valor do número da curva para diferentes condições de superfície e tipos de solo. Para o presente estudo, adotou-se a duração de 24 horas, já que o balanço é diário, e o valor de precipitação total (P), que é a soma diária.

O Método do Número da Curva foi desenvolvido pelo Soil Conservation Service (MOCKUS, 1972), vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA), em que CN é o número da curva, cujo valor pode variar entre 0 (correspondendo a um solo de permeabilidade vertical infinita, em que toda a água se infiltra no solo) e 100 (que corresponde a uma zona completamente impermeável), e depende do uso e manejo da terra, grupo de solo, condição hidrológica e umidade antecedente do solo. Os solos foram caracterizados utilizando-se a proposição de Mockus (1972 citado por PRUSKI;

BRANDÃO; SILVA, 2003), que classifica o solo em função da taxa de infiltração da água.

A umidade antecedente do solo também é considerada no método CN. Aqui foi utilizada a precipitação dos cinco dias antecedentes; quando esta estiver entre 0 e 35 mm, usa-se o CN I; se a precipitação somada for maior que 35 e menor que 52,5 mm, usa-se o CN II e, se a precipitação total dos cinco dias anteriores for maior que 52,5 mm, utiliza-se o CN III. A conversão de CN II para os demais é obtida pela interpolação de valores tabelados (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2003).

As áreas da bacia com a presença de Gleissolos e Neossolos Flúvicos, e as áreas de corpos d'água não são consideradas na aplicação do modelo para estimar a R_p , justamente por não se enquadrarem no objetivo deste trabalho, ou seja, não contribuem diretamente para a recarga do aquífero livre, já que o nível deste está na superfície nessas áreas. No entanto, estas são áreas importantes na geração de escoamento superficial e, assim, as estimativas de ES para essas áreas foram contabilizadas no balanço total da bacia hidrográfica.

Os dados de entrada do modelo são precipitação diária, evapotranspiração de referência diária (ET_0), coeficiente da cultura (K_c), profundidade efetiva do sistema radicular (Prof.), coeficiente do número da curva (CN) e dados de atributos físicos do solo, tais como umidade do solo na capacidade de campo (CC), densidade do solo (Ds) e condutividade hidráulica do solo saturado (K_0). Para cada combinação de solo/vegetação foi obtido um valor médio dos parâmetros supracitados e, só então, o modelo foi executado para cada uma dessas combinações.

3.3 Análise da hidrógrafa e separação do escoamento base

Existem diversos métodos para a separação do fluxo superficial do fluxo subterrâneo, como os que utilizam análises químicas de determinadas substâncias identificadas como traçadores, em outros são utilizados filtros digitais de base física e existem, ainda, os métodos que se baseiam em ajustes de curvas por meio da análise gráfica dos hidrogramas.

No presente trabalho foi utilizado o filtro numérico proposto por Eckhardt (2005), para a obtenção do escoamento de base em função de dois parâmetros α e BFI_{max} .

$$EB_i = \frac{(1 - BFI_{max}) \cdot \alpha \cdot EB_{i-1} + (1 - \alpha) \cdot BFI_{max} \cdot Q_i}{1 - \alpha \cdot BFI_{max}}$$

Em que:

EB_i – escoamento de base, $m^3 s^{-1}$;

Q_i – vazão, $m^3 s^{-1}$;

α – constante de depleção do escoamento, d^{-1} ;

BFI_{max} – fração máxima que o escoamento de base representa em relação à vazão, decimal.

A solução da equação está de acordo com a metodologia descrita em Eckhardt (2005) e Eckhardt et al. (2002), e os índices α e BFI_{max} foram estimados conforme metodologia proposta por Collischonn e Fan (2012) e Eckhardt (2008).

[G1] Comentário: Onde aparece Q_i ?

3.4 Calibração

A etapa de calibração em modelos hidrológicos é um processo iterativo de modificação dos parâmetros de entrada do modelo, mais precisamente variáveis dependentes, com avaliação dos efeitos nos resultados, buscando otimizar a reprodução do hidrograma observado (TUCCI, 1998). Para isso é necessário conhecer as principais características dos parâmetros, o que pode ser auxiliado pela análise de sensibilidade do modelo para cada um deles. A análise de sensibilidade permite selecionar os parâmetros mais relevantes na calibração, aqueles para o qual o modelo apresentar maior sensibilidade. Assim, evitam-se alterações absurdas ou sem representação física dos parâmetros.

A calibração do BALSEQ consistiu em ajustar os coeficientes CN para calibrar a resposta do ES simulada pelo modelo com os dados de vazão observados. Utilizaram-se métodos numéricos implantados na ferramenta solver do Excel®, com o objetivo de maximizar o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, o qual compara dados simulados com a média dos dados observados no período. Utilizou-se o conjunto de dados dos dois primeiros anos hidrológicos, 2006-2007 e 2007-2008, de modo a obter os valores ótimos de CN para cada combinação solo/vegetação.

A determinação do ES pelo BALSEQ é importante, pois é o único parâmetro passível de calibração com coeficientes de eficiência. Além disso, a calibração do ES permite melhorar a precisão do modelo como um todo, uma vez que os demais componentes do balanço hídrico estão inter-relacionados.

3.5 Avaliação do modelo

Foram utilizadas as diretrizes de avaliação propostas por Biondi et al. (2012), as quais foram divididas em três grupos: avaliação qualitativa, validação numérica ou quantitativa e análise da estrutura do modelo.

3.5.1 Avaliação qualitativa

A avaliação qualitativa realizada foi a comparação gráfica entre os resultados e os dados medidos. Para facilitar a interpretação e prover uma boa referência para comparação, utilizaram-se os valores mensais do ES simulado e observado, bem como dados anuais do EB, em comparação à recarga potencial anual obtida pelo modelo.

A avaliação gráfica da R_p versus EB no tempo é fundamental para verificar a precisão do modelo, pois ela permite estudar a dinâmica temporal dos resultados, facilita a identificação da ocorrência de padrões de erro e oferece uma ideia da sua magnitude, mas, principalmente, porque a R_p , foco do modelo BALSEQ, não pode ser comparada com dados medidos de recarga.

3.5.2 Validação numérica ou quantitativa

A validação numérica consiste na aplicação de índices de eficiência, equações que comparam numericamente os dados observados com os resultados obtidos na simulação. No presente trabalho, foram utilizados índices que permitem verificar a capacidade do modelo em reproduzir valores médios e a variância de séries temporais de escoamento superficial e obter um coeficiente de correlação entre as séries temporais observadas e simuladas.

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é uma medida normalizada que compara o erro quadrado médio gerado pela simulação com a variância do conjunto de dados observados (SCHAEFLI; GUPTA, 2007). O Pbias, ou viés percentual, é uma medida da tendência média de os fluxos simulados serem maiores ou menores que os dados observados (LIEW et al., 2007) (Quadro 1).

Quadro 1 Coeficientes de eficiência utilizados para validação numérica

Índice de performance	Equação
Coeficiente de Nash-Sutcliffe	$Cns = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - Qsim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs_i - \bar{Qobs})^2}$
PBIAS	$PBIAS = \left(\frac{\bar{Qsim} - \bar{Qobs}}{\bar{Qobs}} \right) * 100$

$Qobs_i$ é a vazão observada no mês i ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 $Qsim_i$ = vazão simulada no mês i ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 \bar{Qobs} = vazão média dos dados observados ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 \bar{Qsim} = vazão média dos dados simulados ($m^3 \cdot s^{-1}$)

O Cns pode ser classificado como bom, para valores de Cns > 0,75; satisfatório, para $0,75 < Cns < 0,36$, e não satisfatório para valores inferiores a 0,36. O valor ótimo para o Pbias é 0, mas pode ser classificado como muito bom para um erro percentual absoluto menor que 10%; bom, se o erro estiver entre 10% e 15% e, aceitável se o erro estiver entre 15% e 25%. Valores positivos do Pbias indicam subestimativa e valores negativos, superestimativa (LIEW et al., 2007).

Além dos índices de performance, os resultados obtidos foram avaliados de acordo com valores de referência disponíveis na literatura e nos trabalhos de

pesquisa realizados por outros autores nas mesmas bacias hidrográficas do presente estudo.

3.5.3 Avaliação da estrutura do modelo

A avaliação da estrutura do modelo inclui análise detalhada dos processos envolvidos na modelagem. Visa identificar as fontes de incerteza e se a parametrização e estrutura do modelo são consistentes com a realidade física dos processos simulados.

Para isso, foi feita análise de sensibilidade de cada parâmetro, que consiste em verificar a variação relativa dos resultados em relação à variação de cada parâmetro de entrada do modelo individualmente. Ou seja, o parâmetro analisado varia, enquanto os demais são mantidos fixos (LENHART et al., 2002; MCCUEN, 1973; MCCUEN; SNYDER, 1986). Para tanto, utilizou-se o índice de sensibilidade (IS, adimensional) proposto pelos autores supracitados:

$$IS = [(R1 - R2)/R12]/[(E1 - E2)/E12]$$

em que R1 é a resposta do modelo associada a E1; R2 é a resposta do modelo associada a E2; R12 é a média entre R1 e R2; E1 é o menor valor de entrada; E2 é o maior valor de entrada e E12 é a média dos valores de entrada.

O modelo apresenta maior sensibilidade aos parâmetros em que o valor do IS for maior em módulo, ou seja, quanto mais próximo de zero, menos sensível é o modelo em relação ao parâmetro testado.

Com isso, é possível identificar as variáveis de maior peso no modelo, as quais devem ser mais detalhadamente amostradas e caracterizadas com precisão, e também as mais importantes para calibrar o modelo.

Também fazem parte desta etapa da avaliação:

1. Identificar claramente o propósito do modelo e se o BALSEQ atinge tal objetivo;
2. Listar e discutir cada premissa adotada na modelagem;
3. Descrever o processo de validação;
4. Analisar a confiabilidade dos fundamentos teóricos e justificar o grau de complexidade e o esforço computacional;
5. Identificar os pontos fortes e fracos do modelo e destacar suas interações com riscos e oportunidades, como proposto pela análise SWOT.

A análise SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats*) ou PFOA (em português Potencialidades, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças), é importante, pois visa orientar o usuário da modelagem (SIN et al., 2005). O qual encontrará, na matriz, um auxílio para interpretar corretamente os parâmetros e resultados obtidos na modelagem, e evitar situações que reforcem seus pontos fracos, limitações e riscos (BIONDI et al., 2012). Neste estudo, trabalhou-se com uma variação da matriz SWOT, com emprego de limitações em vez de fraquezas, e riscos no lugar de ameaças, denominado PLOR, para ficar mais condizente com o propósito da modelagem. Para o BALSEQ, a matriz foi representada em um quadro com as quatro componentes PLOR (Quadro 2).

A metodologia descrita visa aumentar o escopo de conhecimento a respeito do modelo BALSEQ em específico, mas permite também conhecer mais profundamente os processos envolvidos na modelagem e os que ocorrem na natureza.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com a modelagem e a avaliação do modelo BALSEQ, para ambas as bacias hidrográficas, são apresentados e discutidos a seguir.

4.1 Análise e separação da hidrógrafa

Os valores dos índices de escoamento base α e BFI_{\max} , para ambas as bacias hidrográficas, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Valores anuais da constante de recessão α e da BFI_{\max} , para as bacias hidrográficas do ribeirão Lavrinha e do ribeirão Marcela

Ano hidrológico	BHRL		BHRM	
	α	BFI_{\max}	α	BFI_{\max}
06-07	1,00	0,65	0,99	0,34
07-08	1,00	0,84	1,00	0,64
08-09	0,99	0,91	0,99	0,36
09-10	1,00	0,75	0,99	0,41
Média	0,99	0,79	0,99	0,44
CV (%)	0,54	14,23	0,15	31,71

Cabe ressaltar que, na BHRL, cerca de, no máximo, 79% do escoamento total (LET) é proveniente do escoamento base (LEB). Já na BHRM, apenas 44% do LET podem ser representados pela LEB, relações estas evidenciadas nos valores de BFI_{\max} . A variação interanual da BFI_{\max} deve-se à metodologia utilizada no cálculo deste coeficiente e também está relacionada à distribuição das chuvas em cada ano. Os dois anos com menor BFI_{\max} para a BHRL (06-07 e 09-10) foram anos em que ocorreram chuvas concentradas. Em janeiro de 2006, a precipitação total foi de 620 mm e, no mesmo mês, em 2010, a precipitação foi de 774 mm, valores bem acima da média mensal para o período chuvoso

histórico. Eventos extremos, normalmente, geram grande quantidade de escoamento superficial direto e, portanto, menor recarga e menor participação do EB no deflúvio total.

Fato semelhante, mas não tão evidente, ocorreu na BHRM. Em janeiro de 2007, o total precipitado foi de 583 mm; já no ano hidrológico 08-09, não ocorreu um evento mais extremo, apenas uma sucessão de grandes precipitações concentradas entre outubro de 2008 e março de 2009. Estes anos hidrológicos foram os que apresentaram menor BFI_{max} .

Vê-se que a BFI_{max} na BHRL é, em média, 0,35 maior que na BHRM, ou seja, o EB tem maior participação no deflúvio total do ribeirão Lavrinha do que no ribeirão Marcela. Portanto, o comportamento das hidrógrafas será próximo a esse valor máximo. As hidrógrafas, com dados diários da separação do escoamento base e do escoamento superficial para os anos hidrológicos compreendidos entre 2006 e 2010, na BHRL, são apresentadas nos Gráficos 1 a 4, com os dados sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 Valores e relações entre os componentes da hidrógrafa e do pluviograma para a BHRL

Ano hidrológico	P (mm)	LET (mm)	LES (mm)	LEB (mm)	LES/LET	LEB/LET
06-07	2003	932,47	357,86	574,61	0,38	0,62
07-08	2363	846,64	167,60	679,04	0,20	0,80
08-09	2478	868,60	98,81	769,79	0,11	0,89
09-10	1983,7	810,82	207,83	602,99	0,26	0,74
Média	2206,9	864,63	208,02	656,61	0,24	0,76
C.V.	0,11	0,06	0,53	0,13	0,48	0,15

P: precipitação total; LET: lâmina de escoamento total; LES: lâmina de escoamento superficial; LEB: lâmina de escoamento base.

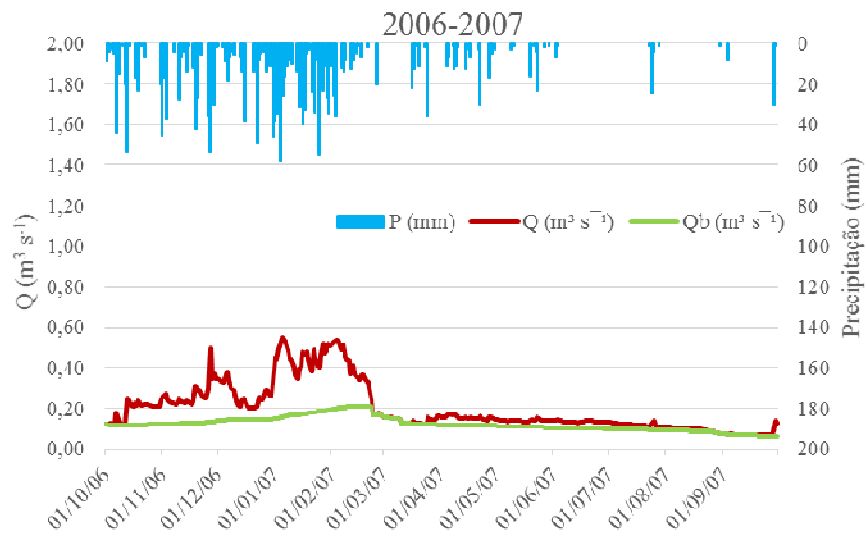


Gráfico 1 Pluviograma e hidrógrafa com seus componentes: escoamento de base e superficial, para o ano hidrológico 2006-2007, na BHRL

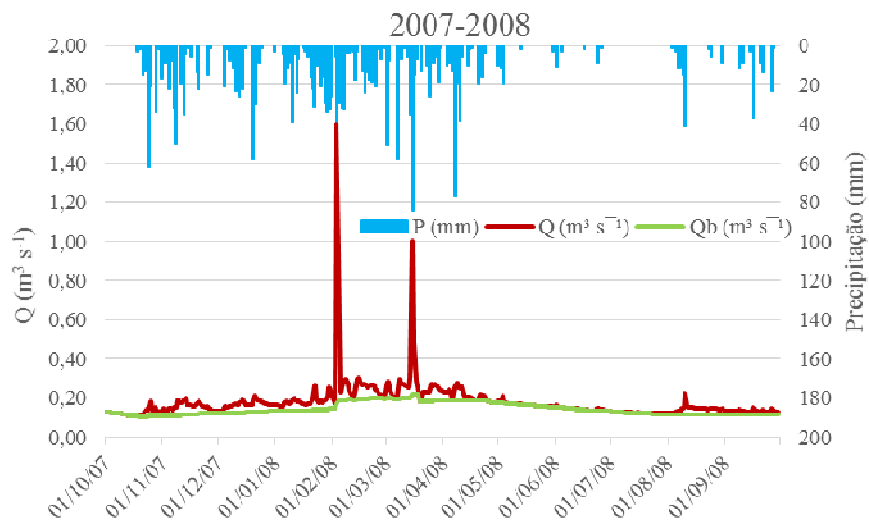


Gráfico 2 Pluviograma e hidrógrafa com separação dos escoamento base para o ano hidrológico 2007 – 2008, na BHRL

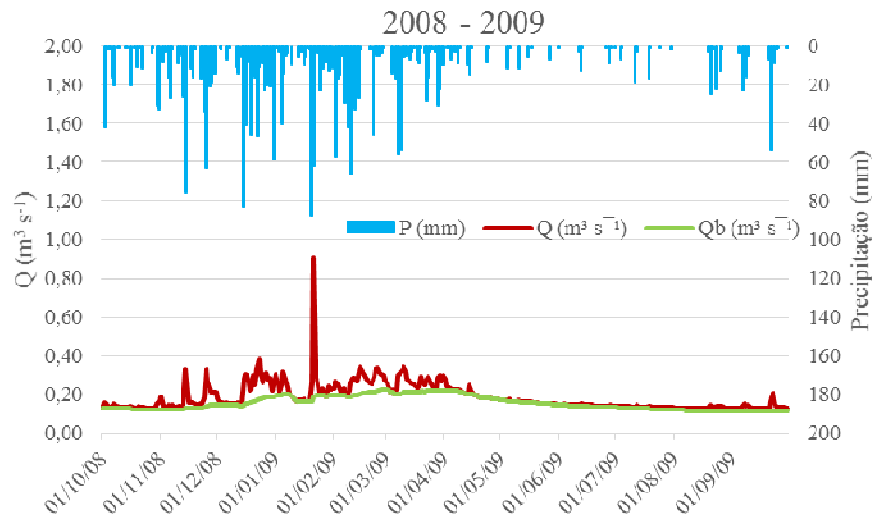


Gráfico 3 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2008-2009, na BHRL

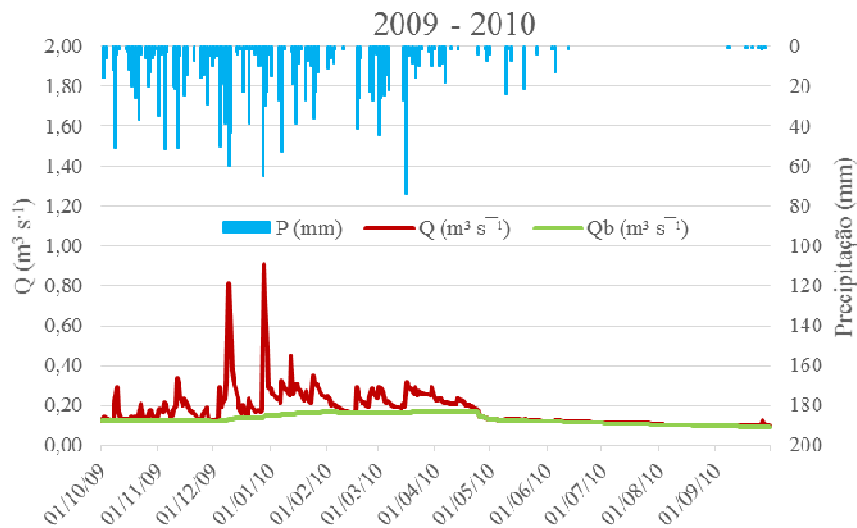


Gráfico 4 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2009-2010, na BHRL

Nota-se, de modo geral, em todos os anos, um amplo predomínio do EB na vazão do curso d'água, e com média de 30% na razão LEB/P. Também se pode observar a baixa variação interanual do EB, mesmo com alta variabilidade do total precipitado. Outra observação importante é a relação LEB/LET que, nesta bacia hidrográfica, foi, em média, igual a 76%, o que reflete a alta recarga superficial presente da BHRL. Nota-se que este é um valor ligeiramente inferior ao BFI_{max} médio desta bacia hidrográfica, o que era esperado por se tratar de valor máximo. Todas as pesquisas realizadas nesta bacia hidrográfica enfatizam a alta participação do EB no deflúvio total e a alta taxa de recarga.

Oliveira (2011), ao separar os componentes das hidrógrafas para a BHRL e para quatro nascentes desta mesma localidade, encontrou, para o ano hidrológico 2009-2010, na bacia hidrográfica como um todo, LET de 820 mm e relação LEB/LET de 82,3 %, com LEB igual a 675,2 mm. Já para as nascentes, a LEB média foi de 698,7 mm, valor superior aos encontrados no presente trabalho, mas que estão dentro da variação normal para estas variáveis, conforme o coeficiente de variação (CV) aqui calculado. Silva (2009) monitorou cinco nascentes na BHRL e obteve deflúvios da ordem de 75,5 a 599,9 mm, com valor médio de 322 mm, para o período de fevereiro a outubro de 2008.

Para a BHRM, os resultados da separação dos escoamentos base e superficial na hidrógrafa, bem como os dados de precipitação, estão expostos, em dados diários, nos Gráficos 5 a 8 e a síntese, na Tabela 4.

Tabela 4 Valores e relações entre os componentes da hidrógrafa e pluviograma para BHRM

Ano hidrológico	P (mm)	LET (mm)	LES (mm)	LEB (mm)	LES/LET	LEB/LET
06-07	1417,50	603,75	404,85	198,90	0,67	0,33
07-08	1458,00	298,26	143,22	155,04	0,48	0,52
08-09	1892,00	716,92	143,22	224,39	0,69	0,31
09-10	1580,02	613,02	346,97	266,04	0,57	0,43
Média	1586,88	557,99	259,56	211,09	0,48	0,40
CV	0,14	0,32	0,53	0,22	0,42	0,24

P: precipitação total; LET: lâmina de escoamento total; LES: lâmina de escoamento superficial; LEB: lâmina de escoamento base.

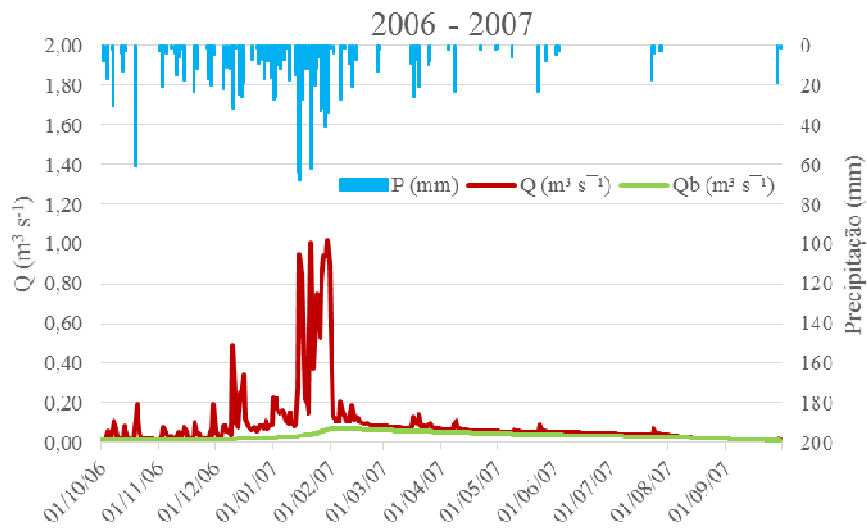


Gráfico 5 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2006-2007, na BHRM

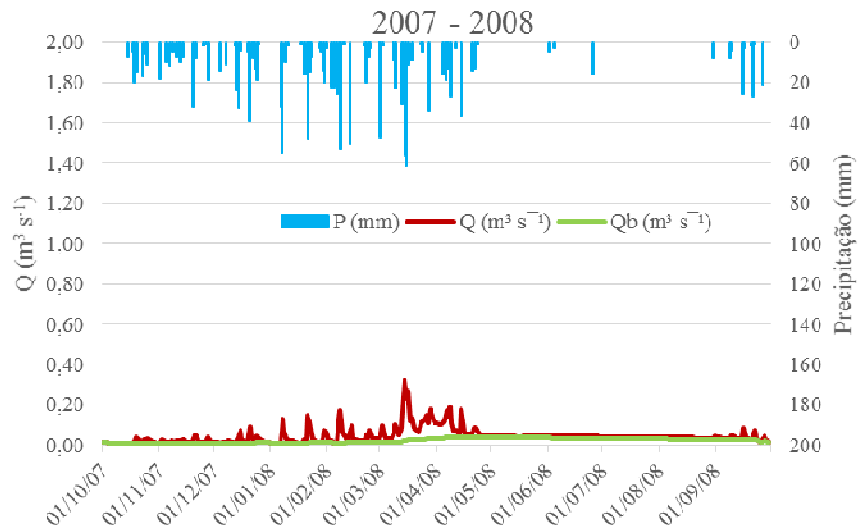


Gráfico 6 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2007-2008, na BHRM

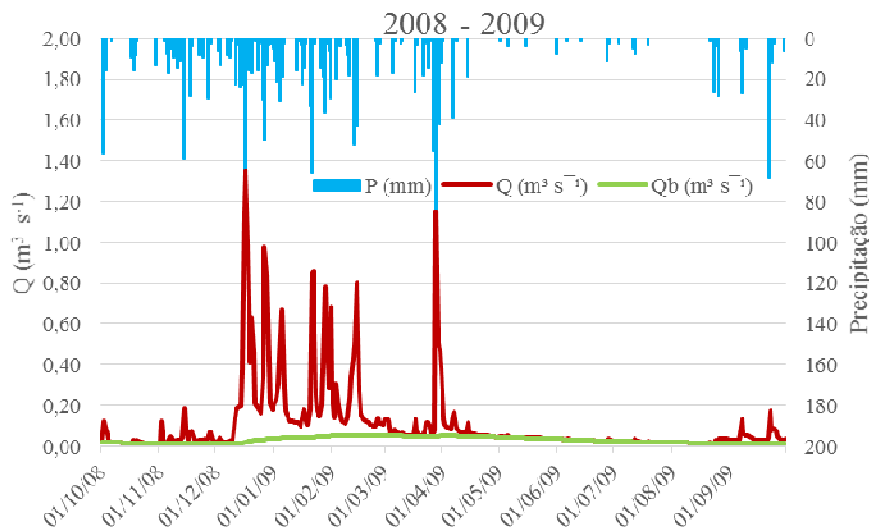


Gráfico 7 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2008-2009, na BHRM

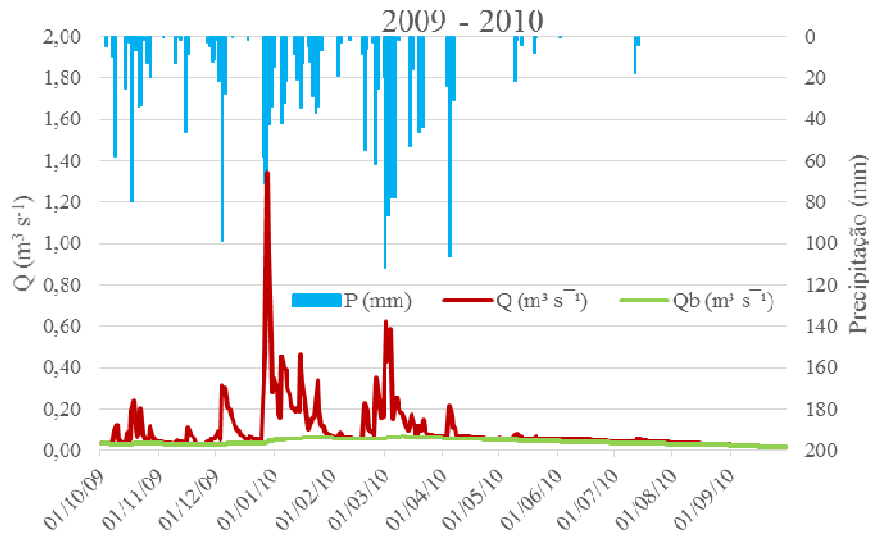


Gráfico 8 Pluviograma e hidrógrafa com separação do escoamento de base, para o ano hidrológico 2009-2010, na BHRM

Analisando-se as informações anteriores, evidencia-se a grande diferença da relação LEB/LET desta bacia com a da BHRL. Enquanto a BHRM apresenta uma LEB/LET média de 40%, na BHRL a relação é de 76%, ou seja, cerca de 36% maior, o que evidencia o maior potencial de recarga do aquífero livre na BHRL, conforme constatado por Oliveira (2011) e Silva (2009).

Oliveira (2011) encontrou, para a BHRM, no ano hidrológico 2009-2010, LET de 609,2 mm e LEB de 388,7 mm, com relação LEB/LET de 63,8%, valor este superior ao estimado no presente estudo, o que pode ser devido a diferenças nos métodos de separação da hidrógrafa. Nas nascentes, a relação LEB/LET foi, em média, igual a 26%, bem inferior ao apresentado na bacia como um todo, o que pode indicar superestimativa, no primeiro caso e subestimativa, para as nascentes.

Já Silva (2006) observou, na BHRM, um deflúvio total de 250,19 mm, no período de janeiro de 2004 a março de 2005, quando a precipitação foi de 776,71 mm de chuva. Desta precipitação, 32% se converteram em escoamento total, dos quais 20% referem-se ao EB e 12% ao ES, ou seja, 63% do escoamento total foram devido ao EB. Uma possível explicação para a diferença entre os valores da razão LEB/LET encontrada pelos autores supracitados e o trabalho aqui apresentado é a grande dependência do regime de escoamento quanto à distribuição temporal da chuva. Elevadas relações LEB/LET indicam elevada recarga e, na BHRM, elas estão associadas, principalmente, a anos com baixa pluviosidade ou distribuição mais homogênea das chuvas.

A baixa pluviosidade explica a alta participação do EB nos deflúvios observados por Silva (2006) e a distribuição homogênea da precipitação pode explicar o comportamento do escoamento no ano 2007-2008, quando o total precipitado foi superior ao do ano anterior, mas o deflúvio total foi bem inferior, devido à falta de chuvas intensas e de boa distribuição temporal dos eventos de precipitação. Outra possível explicação seria uma falha no equipamento que monitora a altura linimétrica no curso d'água.

Uma observação importante é a grande variação interanual dos componentes da hidrógrafa, o que reflete, sobretudo, as condições de uso do solo. O predomínio de pastagens e culturas anuais na BHRM promove maior potencial de escoamento superficial direto em consequência da menor infiltração, o que resulta em menor recarga.

4.2 Balanço hídrico e estimava da recarga potencial

Conforme indicado na metodologia, foram separados dois anos hidrológicos (outubro 2006 a setembro 2008) para calibração e dois anos hidrológicos (outubro de 2008 a setembro de 2010) para validação. Isto porque,

para estes períodos há, em ambas as bacias hidrográficas, dados de vazão observada comparáveis a dados meteorológicos consistentes.

Com a calibração do CN no BALSEQ, obteve-se Cns de 0,68, para a BHRL e de 0,88, para a BHRM, o que pode ser classificado como um ajuste muito bom da modelagem. No entanto, os valores de CN para a BHRL, assim obtidos, parecem inconsistentes com as tabelas utilizadas na seleção do CN (PRUSKI; BRANDÃO; SILVA, 2003) (Tabela 5).

Tabela 5 Valores do coeficiente CN para cada tipo de uso e ocupação do solo na BHRL, obtidos com o processo de calibragem do modelo BALSEQ e umidade antecedente

	Floresta	Regeneração	Pastagem	Várzea
CN I	8,81	13,00	45,13	91,08
CN II	19,68	26,67	65,11	96,57
CN III	36,55	46,34	82,09	98,63

Na BHRL, as áreas de florestas, regeneração e pastagem estão todas sobre Cambissolos e a vegetação de várzea ocorre sobre os solos hidromórficos: Gleissolo e Neossolos Flúvicos, situações para as quais são encontradas, na literatura, altos valores de CN. No entanto, os valores de CN II calibrado ficaram abaixo dos valores encontrados na literatura, mas, ainda assim, foram adotados na modelagem do balanço hídrico para a BHRL, já que levaram aos melhores resultados do Cns na calibração.

Apesar de serem inferiores aos valores encontrados na literatura, os coeficientes apresentaram valores coerentes, ou seja, valores de CN para pastagem maiores que nas florestas e nas áreas de regeneração natural. Além disso, tais valores corroboram os resultados obtidos na modelagem do balanço

hídrico pelo BALSEQ que, para a BHRL, apresenta baixo ES, correspondente ao baixo CN. Portanto, os resultados reforçam que não é indicada a adoção de coeficientes do método CN-SCS encontrados na literatura, sem realizar uma calibração.

Para a BHRM, os coeficientes CN obtidos na calibragem do BALSEQ estão bastante parecidos com os recomendados na literatura (Tabela 6).

Tabela 6 Valores do coeficiente CN para cada combinação de solo e uso e ocupação do solo na BHRM, obtidos com o processo de calibragem do modelo BALSEQ

	Latossolos				Cambissolos		
	Pastagem	Milho	Floresta	Eucalipto	Cana	Pastagem	Floresta
CN I	62,16	74,32	51,00	51,00	61,80	67,33	57,00
CN II	79,30	87,70	70,00	70,00	79,00	83,09	75,00
CN III	90,58	95,08	85,00	85,00	90,40	92,86	88,00

As estimativas de Rp, ETR e ES, obtidas com o BALSEQ, para as bacias hidrográficas do ribeirão Lavrinha e do ribeirão Marcela, foram sintetizadas em base mensal, para facilitar sua visualização e apresentação. Na BHRL, os anos de 2010 a 2012, não puderam ser utilizados para validar o modelo, pois não há registros do linígrafo para este período. Mesmo assim, estes anos foram incluídos entre os resultados, a título de ilustração (Gráfico 9 e Tabela 7).

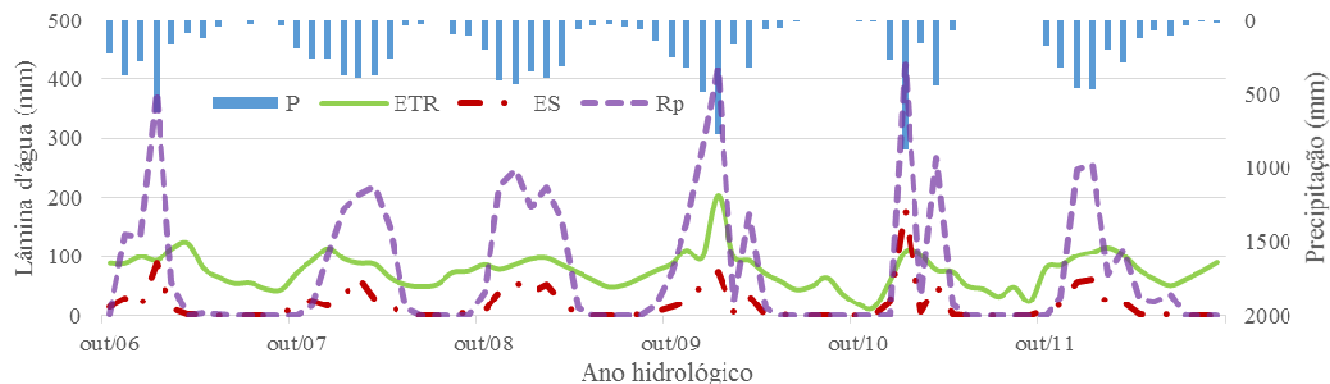


Gráfico 9 Balanço hídrico mensal obtido pelo BALSEQ para os anos hidrológicos de 2006 a 2012, na BHRL.

Tabela 7 Resumo, por ano hidrológico, do balanço hídrico estimado pelo BALSEQ na BHRL

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	(ETR+ICV)/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	2003	947,31	1137,99	166,09	714,48	47,29	56,81	8,29	35,67
07-08	2363	915,95	1140,91	209,52	887,82	38,76	48,28	8,87	37,57
08-09	2478	903,09	1139,00	227,30	1093,62	36,44	45,96	9,17	44,13
09-10	1983	930,42	1119,27	148,58	884,26	46,90	56,42	7,49	44,58
10-11	1844	668,37	843,94	264,33	745,63	36,24	45,76	14,33	40,43
11-12	2292	1008,56	1226,76	199,68	800,57	44,00	53,52	8,71	34,93
Média	2160	895,62	1101,31	202,58	854,40	41,61	51,13	9,48	39,55

Na BHRL observa-se uma grande participação da recarga no balanço hídrico, com 35% a 40% da precipitação convertida em recarga potencial, situação inesperada para uma bacia hidrográfica com as características da Lavrinha, de solos rasos e pouco desenvolvidos (Cambissolos) e relevo fortemente acidentado que, normalmente, indicam um alto índice de escoamento superficial. Porém, as pedoformas desta bacia hidrográfica, com predomínio de feições côncavo-côncavas, favorecem o escoamento subsuperficial e, por conseguinte, o predomínio desta fase do escoamento, na vazão do curso d'água (ÁVILA, 2011).

Outro fator é o predomínio de cobertura florestal, que atua de duas maneiras antagônicas: por um lado, favorece a formação de agregados, macroporos e caminhos preferenciais no solo, com aumento da infiltração e percolação da água e, por outro lado, suas raízes profundas e a elevada evapotranspiração, normalmente associada às florestas, consomem a água já percolada e armazenada em profundidade no solo, o que tem reflexo negativo na recarga efetiva. Desse modo, o tipo de cobertura florestal (floresta, cerrado, veredas), em interação com o meio físico onde se encontra, pode atuar a favor ou contra a recarga do aquífero freático.

No caso da BHRL, a Floresta Ombrófila favorece a infiltração da água no solo e também atenua a evaporação da água, com formação de microclima favorável ao acúmulo de água e, portanto, atua a favor da recarga. Em concordância com isso, os demais autores que desenvolveram suas pesquisas na região atribuem à cobertura florestal os elevados índices de recarga (ALVARENGA, 2010; ÁVILA, 2011; MENEZES, 2007; OLIVEIRA, 2011).

Silva (2009) estimou a recarga direta para quatro nascentes, duas na BHRL e duas na BHRM, pelo método de variação do nível d'água em poços freáticos (VNA). Para as áreas de recarga das nascentes do ribeirão Lavrinha, o autor estimou recarga de 18,11% (341,6 mm) e 12% (183,8 mm), em relação ao

total precipitado no período de fevereiro de 2008 a janeiro de 2009. Porém, o autor aponta deficiências na metodologia utilizada, com possibilidade de subestimativa do rendimento específico e, portanto, da recarga.

Outro fator de erro e subestimativa da recarga é o grande intervalo de tempo entre as leituras do nível do lençol freático, pois, em quinze dias, podem ocorrer variações substanciais no nível no lençol freático que não serão registradas, sobretudo nos solos da BHRL, que têm alta capacidade de transmitir água para a zona saturada (ÁVILA, 2011).

O mesmo problema foi encontrado no trabalho de Pereira et al. (2010), ao estimarem a recarga e a evapotranspiração da BHRL com a utilização de sensores de umidade do solo, com intervalo de quinze dias entre as medições, tempo suficiente para haver percolação de água sem ser contabilizada. Estes autores relataram uma recarga de 13,6% da precipitação, valor coerente com o do trabalho de Silva (2009), porém, discordante com as relações entre EB e ES, e destes com a precipitação, observadas na bacia.

Quanto à evapotranspiração, ao se considerar a ETR sem interceptação pela cobertura vegetal (ICV), os valores calculados parecem estar abaixo dos encontrados na literatura. Pereira et al. (2010), citados anteriormente, obtiveram ETR de 1.169,8 mm, equivalente a 89% da precipitação para o período de fevereiro a dezembro de 2008. Porém, o grande intervalo entre as medidas de umidade do solo é um fator de superestimativa dos seus resultados.

Voigtlaender (2007), para uma bacia hidrográfica com Mata Atlântica no estado do Paraná, obteve ETR de 994 mm, 81% em relação à precipitação. Mas, ao considerar a variação do armazenamento da água no solo próximo a zero e simplificar o balanço hídrico para $ET = P - Q$, pode ter superestimado a ETR. Cardoso et al. (2006), ao considerarem o mesmo balanço hídrico simplificado, com armazenamento nulo, para uma bacia com predomínio de Floresta Ombrófila, com clima, solo e relevo similares ao da BHRL,

encontraram ETR de 1.923 mm, equivalente a 88% da precipitação. Além disso, a metodologia adotada por esses autores já incorpora os efeitos globais do solo e vegetação, entre eles o ICV, o que justifica os valores elevados. Almeida e Soares (2003) estimaram, em uma mata nativa no estado do Espírito Santo, que a relação ETR/P é de 1 para aqueles anos com pluviosidade média ou acima desta, e pode chegar a valores acima de 1 para anos mais secos, o que representa uma ETR média de 1.350 mm/ano, bastante similar ao valor de ETR + ICV encontrado nas áreas de mata na BHRL.

Ávila (2011) estimou ETR anual média de 1.193 mm, correspondente a 47,4% da precipitação, mais coerente com o comportamento hidrológico em regiões de elevada precipitação e, portanto, de excedente hídrico. Nesse trabalho, foi encontrada ICV de 22,7% da precipitação anual, valor este que foi utilizado como referência na modelagem do balanço hídrico pelo BALSEQ.

Durante o processo de calibração, foi admitido um ICV de 20% (ALMEIDA; SOARES, 2003; ÁVILA, 2011) na modelagem da ETR para áreas florestadas na BHRL. Ou seja, para cada evento de precipitação, 20% voltam para a atmosfera sem constituir ES ou Is. Com isso, houve um aumento médio de 18,8% na ETR anual média para esta bacia hidrográfica (Gráfico 10).

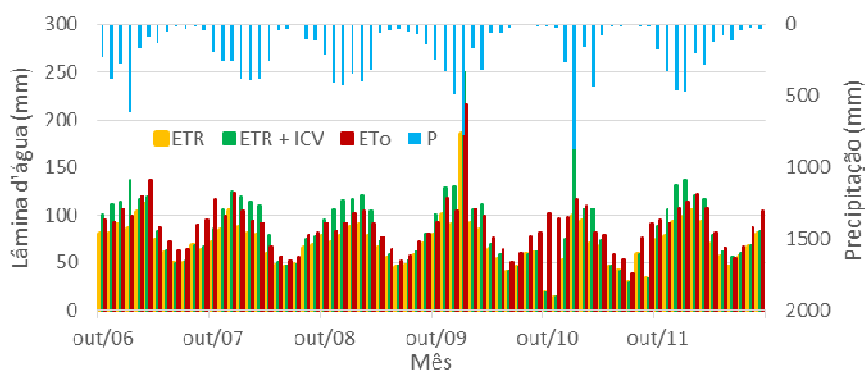


Gráfico 10 Comparação entre os resultados de ETR e ETR + ICV para a BHRL

Assim, os valores de ETR e R_p ficaram mais coerentes com os encontrados pelos autores já citados. Tal procedimento não alterou a estimativa do ES já que, para áreas com cobertura florestal, o ES estimado e calibrado foi praticamente nulo. Vale destacar o ano hidrológico 2010-2011, em que o regime pluviométrico foi mais concentrado, condicionando a uma menor participação da ETR no balanço hídrico, o que pode ser confirmado ao comparar a ET_0 com a ETR no início deste ano hidrológico. Percebe-se que a ETR está sendo limitada pela baixa precipitação dos meses anteriores, o que caracteriza um veranico, em que a baixa umidade do solo impede que a evapotranspiração seja máxima. Em contrapartida, o ES ficou acima da média, devido à alta pluviosidade concentrada entre dezembro de 2010 e março de 2011.

O ES estimado para a BHRL representou pequena parcela do balanço hídrico, o que se deve, sobretudo, ao predomínio da cobertura florestal na bacia. A mata ombrófila tem um alto índice de interceptação da precipitação que diminui drasticamente a energia cinética das gotas sobre o solo e o escoamento direto pela superfície. Isso porque a maior parte da água interceptada volta à atmosfera como evaporação e apenas uma parcela muito pequena escoia pelos troncos das árvores e infiltra no solo por caminhos preferenciais formados pelas raízes, ou por outros processos pedológicos (BUNDT et al., 2001; NIEBER; SIDLE, 2010). Essa parcela que escoia pelos troncos foi ignorada na modelagem, pois é um processo de difícil modelagem e pouca contribuição na recarga, já que apenas 1% a 2% da água interceptada escoia pelos troncos (OLIVEIRA et al., 2008; PEREZ-MARIN; MENEZES, 2008).

É de se salientar que a grande quantidade de material orgânico depositado pela mata sobre o solo forma uma camada de serapilheira, a qual tem alta condutividade hidráulica e retenção de água e assim protege o solo da erosão e reduz o escoamento superficial (ROMANOVSKI, 2001; WALSH; VOIGT, 1977). Tal comportamento do ES é compatível com os resultados

obtidos nas pesquisas realizadas anteriormente na BHRL, apesar de as metodologias serem diferentes, o que reforça ainda mais a validade dos resultados aqui encontrados, bem como os baixos valores de CN obtidos com a calibração.

Ávila (2011), para uma sub-bacia da BHRL com mata atlântica, obteve um ES médio de 212 mm, correspondente a 8,47% da precipitação. O BALSEQ estimou um ES médio de 202 mm (9,5% da P). Entretanto, esta estimativa é referente à BHRL como um todo, destacando que as áreas com pastagem foram responsáveis por quase a totalidade do ES, enquanto as áreas florestadas não contribuíram significativamente para o ES modelado pelo BALSEQ. Isso pode representar uma imprecisão na modelagem para as áreas com floresta, mas, para a bacia como um todo, os resultados estão coerentes.

Os resultados do balanço hídrico para os anos de calibração (2006 a 2008) e validação (2008 a 2010) para a BHRM também foram sintetizados em intervalos mensais (Gráfico 12 e Tabela 5)

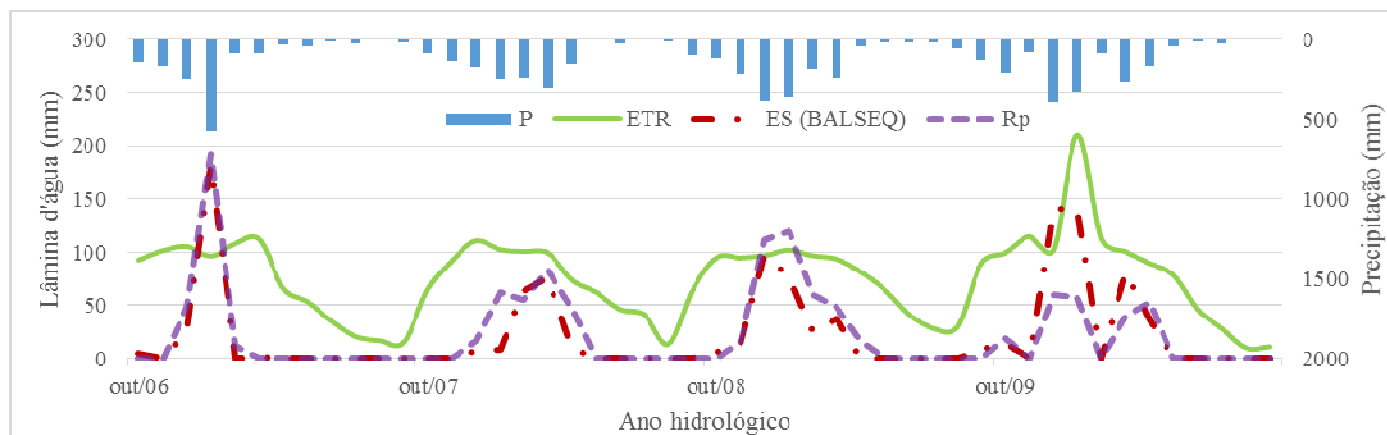


Gráfico 11 Balanço hídrico mensal obtido pelo BALSEQ para os anos hidrológicos de outubro de 2006 a setembro de 2010, na BHRM

Tabela 8 Resumo por ano hidrológico do balanço hídrico estimado pelo BALSEQ, na BHRM

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	(ETR+ICV)/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,5	820,36	845,87	212,51	339,29	58	59,80	15,02	23,99
07-08	1460	874,21	901,29	163,32	358,64	59,88	61,73	11,19	24,56
08-09	1767	912,82	941,66	263,98	497,71	51,66	53,29	14,94	28,17
09-10	1580	903,65	926,32	326,16	377,59	57,19	58,63	20,64	23,90
Média	1555,4	877,76	903,79	241,49	393,31	56,68	58,36	15,45	25,15

Na bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, o componente com maior participação no balanço hídrico foi a ETR, com 56,7% da precipitação na média geral; a recarga potencial e o escoamento superficial representaram 25,15% e 15,45%, respectivamente. Essa elevada participação da ETR no balanço hídrico se deve, sobretudo, à menor pluviosidade, quando comparada à BHRL, com conseqüente menor excedente hídrico, recarga e menor capacidade de manutenção dos cursos d'água.

Em termos absolutos, a ETR foi responsável, em média, por 877,76 mm/ano, bastante inferior aos valores encontrados na BHRL, o que também é conseqüência da menor precipitação e dos usos do solo encontrados na bacia. As médias diárias de ETR por uso do solo foram: 2,10 mm para áreas de pastagem, 2,75 mm para as áreas com cultura anual de milho e cana e 3,78 mm para as áreas com floresta e eucalipto, já somada à ICV. A adoção de uma ICV de 20% para floresta nativa e de 15% para plantações de eucalipto acrescentou, em média, 3% na ETR da BHRM, valor pouco expressivo, devido à pequena área ocupada por essas vegetações. Por isso, o K_c é a variável mais importante na modelagem da ETR nesta bacia hidrográfica, sendo a variável que determina a variabilidade espacial da ETR, uma vez que a ET_0 é a mesma para toda a área,

Para a região sul do estado de Minas Gerais, estima-se uma ET_0 média anual de 3 mm dia⁻¹, com mínima e máxima de 2 e 4 mm dia⁻¹, respectivamente (EMBRAPA, 2011). Para a bacia hidrográfica do rio Grande, Viola (2011) estimou uma ET_0 anual média de 1.132,6 mm, para o período de 1961 a 1990, também observando tendência de aumento nos anos seguintes. Estes valores são bastante similares aos estimados para a BHRM. No entanto, os valores de ETR foram inferiores, devido à predominância de pastagens como cobertura do solo nessa bacia, para as quais foi adotado um K_c igual a 0,8, ou seja, a ET_0 será superior à ET_c por causa do coeficiente da cultura (K_c) predominante e,

consequentemente, a ETR será menor que a ET_c pois, nos períodos de déficit hídrico, a ET_c será restringida pelo conteúdo de água no solo.

Ademais, o uso de K_c médio para cada cultura, sem considerar sua fase de desenvolvimento e época de plantio, sobretudo nos cultivos anuais, constitui a principal deficiência no cálculo da ETR. Com superestimativa desta e da R_p e subestimativa do ES para a BHRM, a qual apresenta ocupação do solo mais variada e manejo impactante, com gradeamento e aragem para plantio do milho, ainda há a presença de gado, o que compacta a camada superficial do solo, favorecendo o escoamento superficial das águas pluviais. Assim, a generalização e uso de K_c e CN únicos ao longo do tempo são a principal fonte de imprecisão na modelagem nesta bacia. Além disso, a implementação de K_c modular de acordo com a fase de desenvolvimento das culturas e um coeficiente do número da curva (CN) variável de acordo com as épocas de plantio são as alterações mais necessárias para melhorar a modelagem hidrológica (**vide item 4.3.2 análise de sensibilidade**).

O uso de um CN para a época de pousio dependente das condições de cobertura do solo neste período; um CN maior para o período de plantio, quando o solo é preparado para a lavoura de milho e assim fica exposto, até que as plantas cresçam o suficiente e, ainda, outro CN para o período de desenvolvimento e colheita das culturas anuais permitiriam melhor acurácia na predição do ES.

Ainda assim, os valores ES encontrados para a BHRM estão de acordo com os trabalhos de outros autores para a mesma área. Silva (2006), ao comparar dados da separação da hidrógrafa com o ES simulado com método CN-SCS, encontrou, para o período de janeiro de 2004 a março de 2005, um ES de 93,91 mm, com a separação da hidrógrafa referente a 12% da P de 774,6 mm. Portanto, o autor considerou o método CN-SCS inadequado para eventos isolados e sem ajuste dos parâmetros.

O mesmo autor determinou, ainda, que, apesar do elevado coeficiente de variação, os Latossolos e os Cambissolos da área cultivada com pastagem converteram, em média, 10,5% e 31% da precipitação em ES, respectivamente. Já o BALSEQ obteve, para esses mesmos solos e coberturas vegetais, coeficientes de escoamento superficial de 16% e 20%, respectivamente, o que resultou na média de 15,45%, similar à média obtida por Silva (2006). Este autor observou, para uma parcela com Latossolo sob cultivo degradado de eucalipto, 13% da precipitação convertida em ES, enquanto o BALSEQ obteve uma razão de 5,45%. Este valor é substancialmente inferior, pois, na modelagem com o BALSEQ, considerou-se que o plantio estava em boas condições de manejo, e, portanto, com menor geração de ES.

Quanto à recarga, Silva (2009) encontrou estimativas de 11,32% e 11,79% da precipitação para duas nascentes localizadas na BHRM, inferiores aos 25% encontrados como média no presente trabalho, que podem ser devido à subestimativa do rendimento específico, conforme relatado pelo autor. É importante ressaltar que este autor encontrou valores de recarga maior para a BHRL do que para a BHRM, do mesmo modo que no presente trabalho e nos demais que foram publicados a respeito destas áreas.

A menor recarga atribuída à BHRM parece se dar, principalmente, devido à menor pluviosidade e também ao menor excedente hídrico, quando comparado à BHRL. Porém, o predomínio de pedoformas convexas, aliado ao histórico de uso, ocupação e manejo da área, também contribui para uma menor recarga do aquífero livre. A pedoforma convexo-côncava favorece o fluxo difuso do escoamento superficial, o que ajuda a explicar a maior participação da evapotranspiração no balanço hídrico e, por conseguinte, menor R_p e EB. Ademais, o manejo historicamente adotado na bacia prejudica a estrutura do solo, com aumento da sua densidade e, conseqüentemente, menor permeabilidade, afetando negativamente o processo de recarga.

Estimativas de recarga em diferentes localidades são de difícil comparação, pois apresentam valores muito diversos, tanto para diferentes regiões ou, mesmo, devido a variações nos parâmetros do solo, vegetação e/ou clima em pequenas distâncias. Além disso, diferentes metodologias de estimativa apresentam valores bastante discrepantes.

Paiva (2006) comparou três métodos de estimativa da recarga em uma sub-bacia do rio Piranga (MG) e obteve, com o método do balanço hídrico realizado pelo software SH 2.0, uma recarga potencial de 33,15% em relação à precipitação total. Já com os métodos de medida de descarga e variação do nível d'água na zona saturada, obteve recarga média de 19,5%. Também em Minas Gerais, na cidade de Araguari, Bertol (2007) encontrou recargas de 29%, com o método da variação do nível da água em poços (VNA). Nesse mesmo estudo foram apresentados dados de Velásquez et al. (2013), com resultados variando de 23% a 51%.

Portanto, sabe-se que não é recomendado comparar dados de regiões diferentes, mesmo que semelhantes, para avaliar os resultados de recarga obtidos com a modelagem. A opção mais indicada é utilizar diferentes metodologias em uma mesma bacia hidrográfica, de preferência conjugar modelos de previsão com modelos de resposta, para poder comparar as estimativas. Assim, trabalha-se com um limite inferior, dado pelo modelo de resposta e um limite superior, dado pelo modelo de previsão (OLIVEIRA, 2004). No presente estudo, a separação do EB na hidrógrafa foi a principal ferramenta para aferir a qualidade dos resultados de R_p do BALSEQ.

4.3 Avaliação do modelo BALSEQ

A avaliação do modelo foi feita com base na comparação dos valores obtidos pelo BALSEQ com os dados de vazão do curso d'água na secção de

controle de cada uma das bacias estudadas. Esta metodologia permitiu fazer comparações diretas entre os valores de ES estimados pelo BALSEQ com a lâmina de escoamento superficial provenientes da separação deste elemento na hidrógrafa, o que possibilita calibrar o modelo e utilizar coeficientes métricos de eficiência na modelagem.

Para avaliar os resultados de R_p obtidos pelo BALSEQ, utilizou-se a comparação da R_p com o EB que, apesar de não dever ser feita de forma direta e no intuito de se utilizar os coeficientes de eficiência, permite inferir sobre o funcionamento hidrológico das bacias hidrográficas estudadas e também sobre a qualidade dos resultados obtidos com a modelagem

4.3.1 Avaliação qualitativa

Dada a dificuldade em mensurar a R_p diretamente no campo, a análise gráfica é uma das etapas mais importantes da avaliação, uma vez que permite comparar o comportamento temporal de duas variáveis que são diretamente correlacionadas, no caso o EB e a R_p . Esta representa eventos de precipitação em que o excedente hídrico foi suficiente para percolar além da zona das raízes e o EB representa a síntese de todos os processos que ocorrem após cada conjunto de eventos de precipitação na bacia hidrográfica. Ressalta-se, aqui, que a R_p trata de eventos de precipitação, enquanto o EB lida com conjunto de eventos.

Devido à natureza destas variáveis, o compasso ou o intervalo de tempo entre estas difere em questões de semanas, meses ou até mesmo anos, a depender das características e das condições da bacia hidrográfica (PRICE, 2011). Logo, a comparação de valores em lâmina d'água dessas duas grandezas em curtas escalas de tempo não traz compreensão do fenômeno e muito menos base para avaliar a modelagem. Para este fim, a comparação anual é mais indicada e a separação dos anos hidrológicos, essencial. Desse modo, pode-se

visualizar o comportamento anual dos dois componentes da hidrologia subterrânea e aferir a qualidade do modelo (Gráficos 12 e 13).

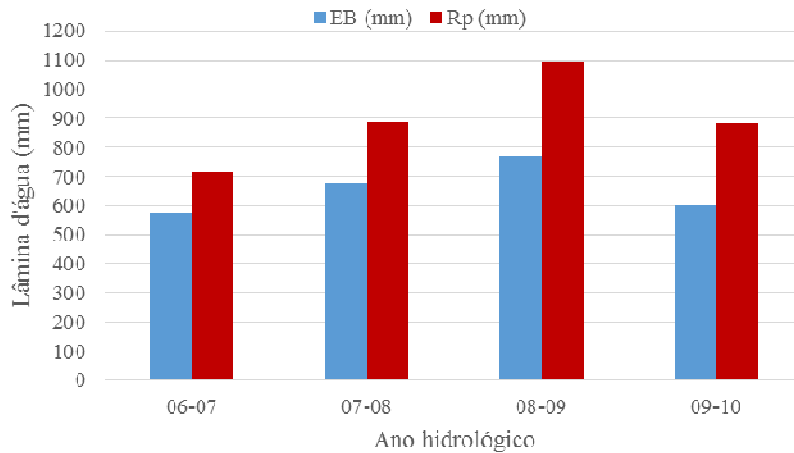


Gráfico 12 Comparação gráfica entre a Rp estimada com o BALSEQ e o EB obtido com a separação da hidrógrafa da BHRL

Na BHRL, a comparação do resultado da Rp estimada, com os dados de EB para os anos utilizados na calibração e validação, aponta para um bom ajuste do modelo, já que o BALSEQ acompanhou o comportamento do EB com a estimativa da Rp, ou seja, existe coerência entre os dados de escoamento base e a simulação com o BALSEQ. Mas, como o ano hidrológico 2008-2009 teve um total precipitado acima da média, observa-se um aumento da diferença entre a Rp obtida pelo BALSEQ e o EB. O mesmo efeito foi identificado também no ano posterior, quando o total precipitado foi menor, porém, as condições de umidade do solo estavam elevadas por causa dos eventos do ano anterior.

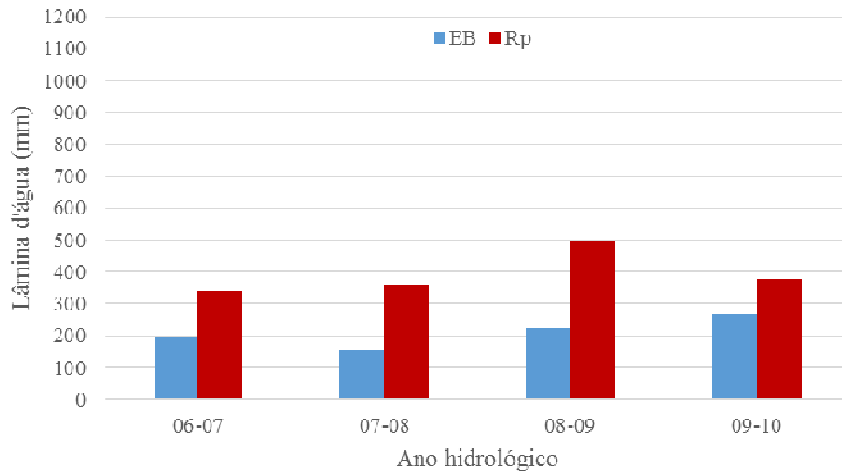


Gráfico 13 Comparação gráfica entre a Rp estimada com o BALSEQ e o EB obtido com a separação da hidrógrafa da BHRM

No caso da BHRM, a comparação ficou mais bem representada em termos relativos à precipitação, com Rp e EB em % da P (Gráfico 14).

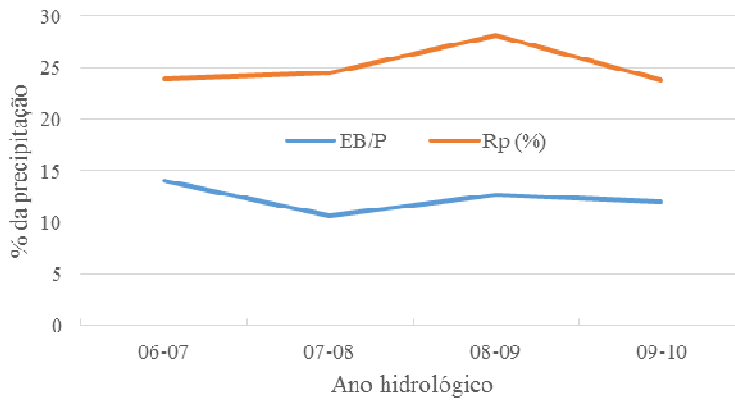


Gráfico 14 Comparação anual dos valores relativos da Rp e EB, para a BHRM

Na BHRM, os valores absolutos de R_p não acompanharam tão fielmente o comportamento do EB (Gráfico 13). Pode-se notar um comportamento mais coerente da R_p com o EB, quando comparados à precipitação total anual (Gráfico 14). Apenas no ano hidrológico 2007-2008, o EB apresenta queda de 3,4%, enquanto a R_p tem aumento de 0,6%. No entanto, conforme já discutido anteriormente, este foi um ano bastante atípico nas medidas da hidrógrafa, devido à distribuição homogênea da precipitação e à falta de chuvas intensas ou, mesmo, a algum problema no linígrafo, o que refletiu em um deflúvio total bem menor que a média anual e, por conseguinte, neste caso, com um EB mais significativo.

A recarga potencial estimada com o BALSEQ deve ser sempre superior ao escoamento base, isso porque a recarga potencial é a lâmina de água que percolou para além da zona das raízes, mas que não necessariamente chega até a zona saturada (recarga efetiva) para, posteriormente, converter-se em EB. Isto porque parte da R_p pode constituir o armazenamento da água no solo em profundidades abaixo da zona das raízes ou pode, ainda, se redistribuir no perfil do solo acompanhando o relevo, de modo a tornar-se disponível à evapotranspiração. Estas situações são mais esperadas na BHRM, devido ao predomínio de latossolos, que têm elevada capacidade de armazenamento da água no solo e à pedoforma convexo-côncava, que atua no fluxo divergente das águas, favorecendo a ETR.

Na BHRL, uma parte da água percolada pode constituir recarga do aquífero confinado e, portanto, deixar de participar do EB. Além disso, o relevo movimentado e as pedoformas côncavas favorecem o fluxo acumulado da água e o seu escoamento subsuperficial, o qual pode ser contabilizado como escoamento superficial direto na separação dos elementos da hidrógrafa, aumentando a diferença entre a R_p estimada com o BALSEQ e o EB obtido com

as hidrógrafas. Daí a importância de se avaliar a diferença Rp-EB, nas duas bacias hidrográficas (Tabela 9).

Tabela 9 Valores anuais da diferença Rp-EB, nas sub-bacias hidrográficas do ribeirão Lavrinha e do ribeirão Marcela

Ano hidrológico	Rp - EB	
	BHRL	BHRM
06-07	203,21	134,17
07-08	258,90	197,38
08-09	400,15	267,11
09-10	366,70	105,32
Média	307,24	176,00

Nota-se que a diferença Rp - EB é maior na BHRL, quase o dobro da encontrada na BHRM, ou seja, a estimativa da recarga pelo BALSEQ é maior na primeira bacia. Nesta, o escoamento subsuperficial rapidamente converte-se em vazão direta no ribeirão Lavrinha e, portanto, não aparece como EB após a separação deste na hidrógrafa. Outra suposição que se pode fazer é a de que os mecanismos que impedem a conversão da Rp em EB, são mais expressivos na BHRL.

O fato é que a aplicação do balanço hídrico para estimar a Rp permitiu prever o comportamento desta variável em bacias hidrográficas com características muito diferentes. Permitiu também confirmar a maior recarga ocorrida na BHRL em comparação à BHRM, evidenciada por estudos anteriores (OLIVEIRA, 2011; SILVA, 2009). Outro resultado que vale destacar é a maior conversão da Rp em EB, na BHRM, em comparação à BHRL. Nesta bacia hidrográfica, a estimativa da recarga direta foi maior, o que mostra a importância

de se comparar os resultados do BALSEQ com dados medidos em campo, no caso, os valores de vazão da hidrógrafa. Ou seja, é recomendado utilizar o BALSEQ em conjunto com um modelo de resposta, isto é, modelos que utilizem dados da zona saturada do solo, ou do deflúvio na rede de drenagem. Por exemplo, o método de variação no nível freático (VNA), ou *water table fluctuation* (WTF), ou os métodos de separação dos componentes da hidrógrafa (ES e EB) são modelos que oferecem boas estimativas da recarga direta, pois sintetizam o conjunto de interações hidrológicas que ocorrem na bacia hidrográfica. No entanto, eles não permitem prever o comportamento da recarga logo após um dado evento de precipitação ou, mesmo, em simulações de mudanças climáticas ou alteração do uso do solo.

Quanto ao ES, a comparação gráfica também é importante e foi feita em base mensal (Gráficos 15 e 16).

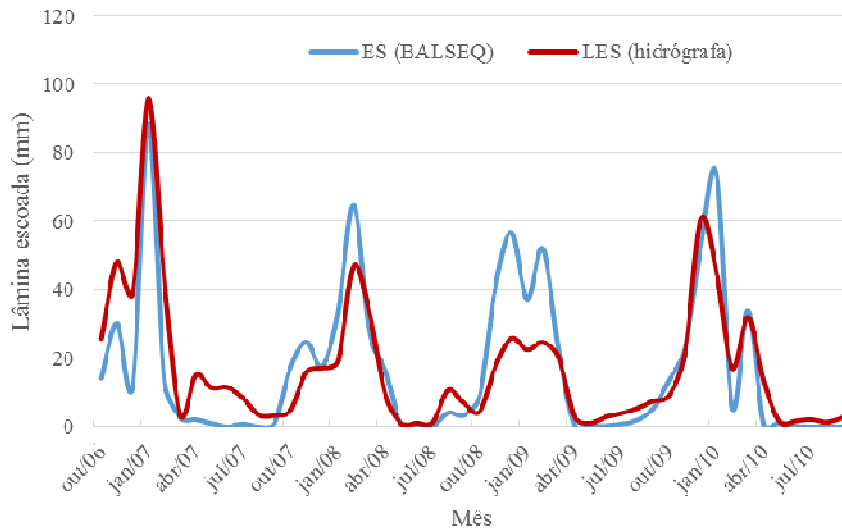


Gráfico 15 Comparação dos valores de ES obtidos com simulação do BALSEQ e dados da hidrógrafa do ribeirão Lavrinha

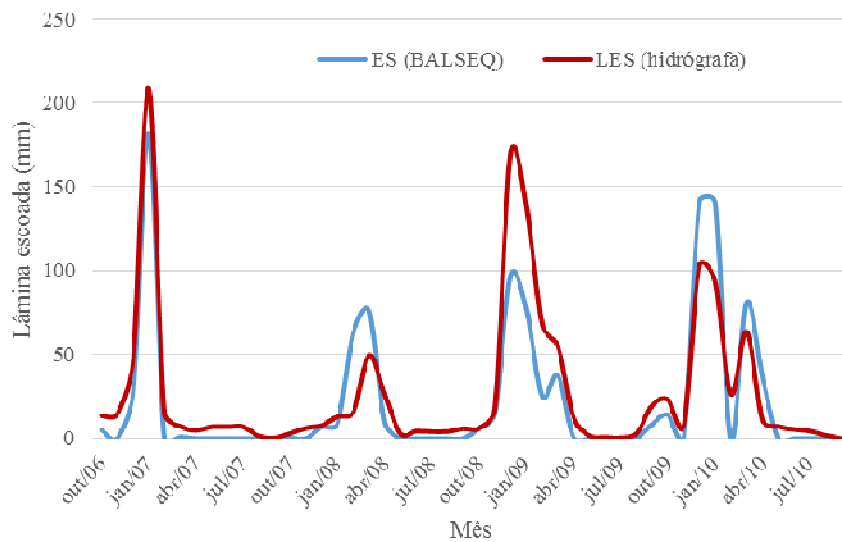


Gráfico 16 Comparação dos valores de ES obtidos com simulação do BALSEQ e dados da hidrógrafa do ribeirão Marcela

Observou-se uma modelagem bastante coerente. Apenas a magnitude dos eventos costuma ser superestimada pelo método CN-SCS utilizado no BALSEQ, embora, no ribeirão Marcela, metade dos eventos tenha sido subestimada e a outra metade, superestimada. Também na modelagem do escoamento na BHRL houve um ano em que o ES foi subestimado. Tais casos podem ser devido a dois fatores principais: a presença de apenas um pluviógrafo não é suficiente para representar a precipitação média nas bacias hidrográficas ou o linígrafo instalado na seção de controle dos ribeirões não captou adequadamente as variações da vazão.

É importante lembrar que os dois primeiros anos foram utilizados para calibração e, portanto, os resultados apresentam-se otimizados e que, apesar de o ES ser um resultado secundário do modelo BALSEQ, ele assume grande importância por tornar possível o uso dos coeficientes de desempenho na comparação direta com dados medidos em campo, para calibrar e validar quantitativamente o modelo.

4.3.2 Validação numérica

Os resultados médios dos coeficientes de eficiência Cns e Pbias para o período de validação (2008-2010) podem ser classificados, de acordo com a literatura (LIEW et al., 2007), como não satisfatórios, para a BHRL. Para a BHRM, o Cns é classificado como bom e o Pbias, como muito bom (Tabela 10).

Tabela 10 Coeficientes de desempenho aplicados na validação numérica

Coeficiente	BHRL			BHRM		
	08-09	09-10	Média	08-09	09-10	Média
Cns	- 1,30	0,71	- 0,30	0,72	0,55	0,67
Pbias	- 63,74	1,64	-31,0	43,0	-24,26	9,37

Analisando-se o Cns de cada ano, verifica-se que, na BHRL, o modelo apresentou resultados bons para o ano 2009-2010 e uma estimativa ruim do ES no ano hidrológico 2008-2009. Salienta-se que, neste ano, a precipitação foi de 2.478 mm, bem acima da média histórica. E, ao verificar-se a hidrógrafa deste período, vê-se que a lâmina total escoada (868 mm) é praticamente igual à média para toda a série (864 mm). Resultado semelhante foi obtido com o Pbias, tendo o ano 2008-2009 apresentado uma grande superestimativa, e o ano seguinte com resultado que pode ser classificado como muito bom.

As características pedológicas e geomorfológicas da BHRL são bastante desafiadoras para a modelagem de processos hídricos. O relevo acidentado, com ravinamentos profundos e agudos, e pedoformas convexo-côncavas (geomorfologia), imprime uma dinâmica de escoamento, com ênfase na fase subsuperficial e subterrânea, para as quais são necessárias informações detalhadas destas camadas, para uma modelagem mais acertada. Ademais, os solos rasos e os afloramentos de rocha, normalmente, não são mapeados devido à escala dos mapas e à presença pontual destes fatores, o que implica em imprecisões na modelagem.

Na BHRM, os anos hidrológicos apresentaram comportamentos totalmente opostos. No primeiro ano hidrológico, o BALSEQ subestimou em

43% (Pbias) o ES; já no segundo ano, o modelo superestimou o ES em 24%. Apesar disso, o Cns indicou resultados satisfatórios para ambos os anos, o que significa que o erro médio da modelagem é pequeno em relação à variância dos dados observados. Porém, o volume total simulado apresentou elevado desvio percentual.

Apesar de o uso do método CN-SCS apresentar falhas graves na modelagem do ES, conforme relatam alguns autores (MELLO, 2003; SILVA, 2006), os totais mensais apresentaram boa performance, de acordo com os coeficientes Cns e Pbias, sobretudo para intervalos de tempo maiores. Já que o foco do BALSEQ é a recarga do aquífero livre, imprecisões no montante diário ou instantâneo do ES não prejudicam seus resultados principais, pois o processo de recarga tem um compasso de tempo geralmente maior, da ordem de meses ou anos, a depender das características físico-hídricas da bacia hidrográfica, enquanto o ES, comumente, apresenta um tempo de concentração da ordem de dias ou semanas (PRICE, 2011).

A questão é que o modelo fornece boas estimativas mensais para o ES e, portanto, supostamente boas estimativas de médio ou longo prazo para a recarga direta.

4.3.3. Análise da estrutura do modelo

O foco do modelo é obter a estimativa média de recarga potencial direta. A validação numérica do modelo indica que os resultados são mais precisos para intervalos de tempo mensais, no caso do ES e anuais, para a Rp. Assim, seus resultados podem ser utilizados para prever a Rp de precipitações mensais e anuais. Isso devido às premissas adotadas pelo modelo.

As premissas da modelagem da Rp com o BALSEQ, detalhadas no item 3.6 da metodologia, podem ser assim sumarizadas:

- a. Inexistência de camada menos permeável abaixo da zona de controle adotada na modelagem;
- b. Nível freático sempre abaixo da profundidade do solo sujeita à evapotranspiração, ou seja, não há evapotranspiração ou ascensão capilar nesta zona;
- c. Inexistência de recarga artificial;
- d. Ausência de escoamento superficial afluente à área de estudo e nem caminhos preferenciais da água no solo.

O modelo é simples, mas permite inferir satisfatoriamente o comportamento médio anual da recarga. O esforço computacional depende das modificações adotadas para melhorar a modelagem e/ou adequar as condições específicas do local de aplicação. A falta de um programa computacional pode tornar a tarefa bastante morosa e complexa, para bacias hidrográficas médias a grandes, ou para um nível muito detalhado.

Quanto às variáveis e aos parâmetros envolvidos na modelagem, deve-se enfatizar a alta variabilidade espacial de alguns dos parâmetros utilizados, sobretudo da CC e densidade do solo, bem como as dificuldades e imprecisões nas suas determinações. Assim, torna-se necessário averiguar a que variáveis o modelo é mais sensível e, portanto, quais delas devem ser obtidas com mais rigor.

4.3.3.1 Análise de sensibilidade

Com a análise de sensibilidade, puderam-se identificar as variáveis dependentes mais expressivas na modelagem com o BALSEQ e, também, as alterações mais eficazes para melhorar a modelagem, ou seja, evidenciar as variáveis calibráveis. Estas apresentam maior |IS| (Tabela 11) e, portanto, têm prioridade na calibração.

Tabela 11 Valores de |IS| para cada variável dependente de entrada e cada variável resposta no modelo BALSEQ, para os usos do solo na BHRL

	Floresta			Pastagem			Regeneração			Média
	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	
CTarm	0,09	0	1,10	0,21	0,00	0,25	0,11	0	0,27	0,23
Kc	0,27	0	2,14	0,99	0,00	0,92	0,58	0	1,38	0,70
CN	0,01	1,29	1,23	1,11	2,54	2,71	0,12	1,71	1,71	1,38
ICV	0,46	1,22	1,22	-	-	-	0,54	1,66	1,67	0,75

Analisando-se o valor de IS para cada um dos parâmetros, nota-se que a sensibilidade do modelo a determinado parâmetro varia de acordo com o tipo de uso do solo. Por exemplo, na floresta, a variável a que o BALSEQ foi mais sensível para estimar a recarga foi o Kc; já para regeneração, o CN foi mais expressivo. Isso porque cada variável participa de processos distintos dentro do balanço hídrico, processos que estão inter-relacionados, mas que têm pesos distintos para cada variável resposta da modelagem. Consequentemente, deve-se buscar otimizar as respostas do modelo com a alteração das variáveis com maior |IS| (MCCUEN, 1973; MISHRA, 2009).

Para as áreas com pastagem ou em regeneração, o CN é o parâmetro de maior importância tanto para o ES como para a Rp. Já para as florestas na bacia hidrográfica do ribeirão Lavrinha, o Kc assume papel de maior peso na Rp e o CN para o ES, mas, na média para a bacia toda, o CN foi bem mais expressivo e, por isso, este parâmetro foi utilizado durante a calibração do BALSEQ na BHRL.

O mesmo procedimento foi realizado para a BHRM, porém, os resultados foram bem diferentes (Tabelas 12 e 13).

Tabela 12 Valores de |IS| para cada variável dependente de entrada e cada variável resposta no modelo BALSEQ, para os usos do solo nos Latossolos da BHRM

	Pastagem			Milho			Floresta			Eucalipto			Cana		
	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp
CTarm	0,20	-	0,42	0,18	-	0,86	0,08	-	0,81	0,13	-	1,65	0,18	-	0,69
Kc	0,72	-	2,04	0,59	-	1,41	0,95	-	2,24	0,46	-	3,00	0,58	-	1,46
CN	0,32	2,15	2,25	0,30	2,27	2,45	0,01	1,43	1,43	0,16	1,57	1,57	0,14	2,27	2,45
ICV	-	-	-	-	-	-	0,94	2,94	7,00	0,70	2,46	7,00	-	-	3,44

Tabela 13 Valores de |IS| para cada variável dependente de entrada e cada variável resposta no modelo BALSEQ, para os usos do solo nos Cambissolos da BHRM

	Pastagem			Floresta		
	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp
CTarm	0,19	-	0,34	0,07	-	1,67
Kc	0,74	-	1,16	0,66	-	3,71
CN	0,56	2,62	3,11	0,12	1,43	1,43
ICV	-	-	-	0,73	2,22	7,00

O ICV é o parâmetro de maior influência na modelagem da Rp pelo BALSEQ, pois ele afeta diretamente a principal variável independente, que é a precipitação. Todavia, o CN e o Kc aparecem como as variáveis mais expressivas para a BHRM como um todo, já que, na média ponderada pela área representativa de cada cobertura vegetal ou uso do solo, estas possuem os maiores valores em módulo do |IS|, para Rp e ES (Tabela 14).

Tabela 14 Média do |IS| ponderada pela área, para a BHRM

	Média IS ponderada pela área		
	ETR	ES	Rp
CTarm	0,020	0	0,065
Kc	0,075	0	0,205
CN	0,033	0,229	0,244
ICV	0,011	0,036	0,093
Média	0,379	0,215	0,135

Isso porque a ocorrência das florestas, onde o ICV é expressivo, é limitada a pequenas áreas na BHRM. Logo, o CN foi usado na calibração do ES, em vez da ICV.

4.3.3.2 Matriz SWOT

A última etapa da avaliação do modelo é a análise das potencialidades, fraquezas, oportunidades e ameaças (Quadro 2).

Quadro 2 Matriz SWOT para o modelo BALSEQ

Potencialidades	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> - Resultados adequados com o nível de complexidade. - Modelo simples, com baixa exigência de dados complexos ou de difícil obtenção. - Facilidade em implementar melhorias. - Aplicável e adaptável a diversas condições climáticas, pedológicas e de uso e ocupação do solo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Superestima a recarga direta. - Uso do método CN-SCS para estimar ES e Is. - Não detecta variações importantes na vazão. - Não considera o relevo e a geomorfologia diretamente na modelagem. - Não considera camadas heterogêneas no perfil do solo. - Não considera o escoamento subsuperficial, ou capilaridade, ou caminhos preferenciais. - Modelo discreto e determinista.

Oportunidades	Riscos
<ul style="list-style-type: none"> - Uso do modelo auxilia no entendimento dos processos hídricos fundamentais em bacias hidrográficas. - Possibilidade de utilizar equações de pedotransferência para estimar variáveis do solo. - Possibilidade de espacializar os resultados com uso de ferramentas geoestatísticas ou métodos mais simples, como interseção de polígonos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de perícia com balanços hídricos e hidrologia do solo pode levar à obtenção de resultados errôneos, e a ações errôneas de gestão e manejo das bacias hidrográficas. - Onde as fraquezas forem importantes ou significativas para o objetivo da modelagem, usar com maior critério os resultados do BALSEQ.

A matriz é autoexplicativa, mas vale ressaltar que todos os riscos referem-se ao uso errôneo do modelo, sobretudo quando não há conhecimento adequado para a modelagem em si e também no uso que se dá à informação obtida. Outra consideração importante é que, além de o modelo ser relativamente simples, devido à sua formulação e também aos parâmetros de entrada do modelo, apresentaram boa disponibilidade de informação. Mesmo na ausência de dados, como capacidade de campo do solo, condutividade hidráulica ou densidade do solo, tais atributos podem ser estimados com razoável confiança pelo uso de funções de pedotransferência (SOUZA et al., 2013), o que pode ser considerado uma potencialidade do modelo, do mesmo modo que a possibilidade de mapear seus resultados (SOUZA, 2013).

Em suma, o modelo é simples de usar, porém, às vezes, é simplista, por não considerar parâmetros fundamentais característicos de cada bacia hidrográfica. Por exemplo, na BHRL, a profundidade do solo e a geomorfologia são fundamentais no regime hídrico, enquanto, na BHRM, os ciclos de cultivo e pousio têm reflexos diretos nos parâmetros de entrada: CN, Kc e Prof., os quais têm grande peso na resposta do modelo.

5 CONCLUSÕES

- Foram gerados valores consistentes de recarga potencial, escoamento superficial e evapotranspiração real estimados pelo BALSEQ para as bacias hidrográficas do ribeirão Lavrinha e do ribeirão Marcela.
- Apesar de não ser possível uma validação numérica dos resultados de recarga obtidos com o BALSEQ, a metodologia de avaliação adotada permitiu realizar uma avaliação mais ampla da modelagem do balanço hídrico nas bacias hidrográficas. Dessa forma, conclui-se que o BALSEQ é uma ferramenta adequada para prever a R_p para intervalos de tempo anuais ou maiores.
- A análise da estrutura e embasamento científico do BALSEQ foi positiva, pois o modelo tem a elaboração suficiente para evidenciar as principais causas e efeitos das variáveis e a simplicidade necessária para omitir processos secundários e possibilitar sua aplicação em locais com poucos dados.
- O BALSEQ teve avaliação qualitativa positiva, uma vez que pôde prever com precisão a variação temporal dos componentes do balanço hídrico.
- O BALSEQ é um instrumento válido para estudar a dinâmica não só da recarga, mas também os demais elementos do balanço hídrico em bacias hidrográficas brasileiras. Porém, devem ser feitos levantamentos necessários para calibrar e avaliar os resultados obtidos com o modelo BALSEQ, a fim de garantir seu emprego correto.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. do P. T. Água subterrânea no planeta água. **Estudos Geológicos**, Recife, v. 17, n. 1, p. 23-39, 2007.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L. et al. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 32, n. 2, p. 53-61, nov. 2011.
- ALENCAR, C. A. et al. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, p. 98-108, jul. 2009. Número especial.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- ALMEIDA, A. C. de; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 159-170, mar./abr. 2003.
- ALMEIDA, L. de. **Estudo da aplicabilidade de técnicas de recarga artificial de aquíferos para a sustentabilidade das águas termais da região de Caldas Novas, GO**. 2011. 170 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- ALVARENGA, C. C. **Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea**. 2010. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
- ÁVILA, L. F. **Balço hídrico em um remanescente de Mata Atlântica da Serra da Mantiqueira, MG**. 2011. 180 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- ÁVILA, L. F. **Comportamento espacial e temporal da umidade do solo numa bacia hidrográfica na serra da Mantiqueira, Minas Gerais**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

BERTOL, G. A. **Avaliação da recarga anual no aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais**. 2007. 111 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BEVEN, K. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 16, n. 1, p. 41-51, 1993.

BIONDI, D. et al. Validation of hydrological models: conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 42/44, p. 70-76, 2012.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/19433.htm>. Acesso em: 10 abr. 2013.

BRITO, G. L. M. et al. Estimativa da taxa de recarga na bacia sedimentar do rio do Peixe no semi-árido paraibano pelo método do Balanço Hídrico Sequencial Diário (BALSEQ). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais...** Natal: UFRN, 2008. 1 CD-ROM.

BUNDT, M. et al. Preferential flow paths: biological “hot spots” in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 33, n. 6, p. 729-738, May 2001.

CAMARGO, R. D. A. et al. Aplicação de modelo de balanço hídrico BALSEQ para estimativa da infiltração profunda em região cárstica application of a water balance model for estimating deep infiltration in a karstic watershed. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 1-15, 2011.

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 249-256, mar./abr. 2006.

CHACHADI, A. G. et al. Estimation of surface runoff and groundwater recharge in Goa mining area using daily sequential water balance model - BALSEQ. **Hydrology Journal**, Amsterdam, v. 27, n. 1/2, p. 1-15, 2004.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: E. Blucher, 1999. 236 p.
- CLEARY, R. W. Águas subterrâneas. In: _____. **Engenharia hidrológica**. São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989. p. 117.
- COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 27, n. 18, p. 2614-2622, 2012.
- COSTA, M. L. M. e et al. Proposição de critérios de outorga para águas subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 105-113, jan./mar. 2011.
- CRISS, R. E.; WINSTON, W. E. Do Nash values have value?: discussion and alternate proposals. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 22, p. 2723-2725, Apr. 2008.
- ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 352, n. 1/2, p. 168-173, Apr. 2008.
- ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 2, p. 507-515, Feb. 2005.
- ECKHARDT, K. et al. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Oxford, v. 27, n. 9/10, p. 641-644, Jan. 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e Abastecimento, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapas decendiais da evapotranspiração de referência (ET_o) para Minas Gerais**. Brasília, 2011. 60 p.
- FERNANDES FILHO, E. I. et al. **Modelagem ambiental e capacidade de recarga hídrica da bacia hidrográfica do Rio Doce: uma contribuição ao desenvolvimento sustentável**. Viçosa, MG: UFV, 2012. 80 p.

GETIRANA, A. C. V. et al. Calibração e validação de modelo hidrológico com observações in situ, altimetria e gravimetria espaciais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 29-45, 2011.

GOMES, N. M. **Aplicação do LISEM (limburg soil erosion model) para simulação hidrológica em bacia hidrográfica tropical**. 2008. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

GOMES, N. M. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, representativa da região Alto Rio Grande, MG**. 2005. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

HUNT, R. J.; ZHENG, C. The current state of modeling. **Ground Water**, Dublin, v. 50, n. 3, p. 330-333, May 2012.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2010. 113 p.

JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A. **Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG**. 2006. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

KONIKOW, L. F.; BREDEHOEFT, J. D. Ground-water models cannot be validated. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 15, n. 1, p. 75-83, Jan. 1992.

LENHART, T. et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Oxford, v. 27, n. 9/10, p. 645-654, Jan. 2002.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge**. Hannover: International Contributions to Hydrogeology, 1990. 327 p.

LIEW, M. W. van et al. Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service

watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 12, n. 2, p. 173-189, Mar. 2007.

LOBO-FERREIRA, J. P. Gis and mathematical modelling for the assessment of groundwater vulnerability to pollution: application to two Chinese case-study areas. In: ECOSYSTEM SERVICE AND SUSTAINABLE WATERSHED MANAGEMENT IN NORTH CHINA INTERNATIONAL CONFERENCE, 1., 2000, Beijing. **Proceedings...** Beijing: CIC, 2000. p. 69-90.

LOBO-FERREIRA, J. P. Mathematical model for the evaluation of the recharge of aquifers in semiarid regions with scarce (lack) hydrogeological data. In: EUROMECH., 143, 1981, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: EUROMECH, 1981. 1 CD-ROM.

LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E. A. R.; ARAÚJO NETO, J. R. de. Modelagem da recarga de águas subterrâneas em uma bacia semiárida: influências da ocupação agrícola. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 6, n. 1, p. 33-40, 2012.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002.

MCCUEN, R.; SNYDER, W. **Hydrologic modeling**: statistical methods and applications. New Jersey: Prentice-Hall, 1986. 568 p.

MCCUEN, R. H. The role of sensitivity analysis in hydrologic. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 18, p. 37-53, 1973.

MEDINA, P. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. C. de. Relações entre capacidade de campo determinada in situ e em laboratório em Latossolo Amarelo muito argiloso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 91-95, 1987.

MELLO, C. R. de. **Estudo hidrológico em micro-bacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**. 2003. 133 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

MENEZES, M. D. de. **Levantamento de solos em sub-bacias hidrográficas como apoio para avaliação do uso da terra e da potencialidade de recarga**

de aquíferos. 2007. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

MISHRA, S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for hydrologic modeling. **Journal of Hydroinformatics**, London, v. 11, n. 3/4, p. 282-285, July 2009.

MOCKUS, V. **Hydrology**. Washington: National Engineering Handbook, 1972. 79 p.

MOTTA, P. E. F. et al. **Levantamento pedológico detalhado, erosão dos solos, uso atual e aptidão agrícola das terras da microbacia piloto na região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos-MG**. Belo Horizonte: CEMIG, 2001.

NIEBER, J. L.; SIDLE, R. C. How do disconnected macropores in sloping soils facilitate preferential flow? **Hydrological Processes**, Chichester, v. 24, n. 12, p. 1582-1594, Mar. 2010.

NOVO, M. E. et al. A inter-relação entre pluviosidade, níveis aquíferos e suas nascentes em ilhas vulcânicas: o caso das nascentes do cabrito, Ilha Terceira, Açores. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 4., 1998, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Universidade de Lisboa, 1998. p. 1-11.

OLIVEIRA, A. S. de. **Dinâmica do escoamento em nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2011. 131 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

OLIVEIRA, L. L. et al. Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 4, p. 723-732, 2008.

OLIVEIRA, M. J. P. M. **Caracterização da recarga natural dos sistemas aquíferos de quarteira e de albufeira-ribeira de quarteira (Algarve)**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005. 122 p.

OLIVEIRA, M. J. P. M. Uma metodologia para o cálculo da infiltração superficial em modelos de balanço hídrico sequencial diário de solos. In: SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 2007, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2007. p. 1-13.

OLIVEIRA, M. J. P. M. **Recarga de águas subterrâneas: métodos de avaliação.** 2004. 440 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.

PAIVA, G. P. D. E. **Estimativa da recarga em uma unidade detrítica de uma micro-bacia do rio Piranga, MG.** 2006. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

PARALTA, E. A. et al. Avaliação da recarga do sistema aquífero dos Gabros de Beja segundo critérios múltiplos: disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6., 2003, Lisboa. **Anais...** Lisboa: SILUSBA, 2003. 1 CD-ROM.

PEREIRA, D. dos R. **Evapotranspiração em área de Mata Atlântica na região da serra da Mantiqueira, MG.** 2009. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PEREIRA, D. dos R. et al. Evapotranspiration and estimation of aerodynamic and stomatal conductance in a fragment of Atlantic Forest in Mantiqueira range region, MG. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 32-40, 2010.

PEREZ-MARIN, A. M.; MENEZES, R. S. C. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidia sepium*. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2573-2579, dez. 2008.

PESSOA, D. G. C.; SILVA, P. L. N.; DUARTE, R. P. N. Análise estatística de dados de pesquisas por amostragem: problemas no uso de pacotes padrões. **Revista Brasileira de Estatística**, Rio de Janeiro, v. 58, p. 53-75, 1997.

PINDER, G. F.; CELIA, M. A. **Subsurface hydrology.** New York: J. Wiley, 2006. 468 p.

PINTO, D. B. F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG.** 2011. 227 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

- PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 35, n. 4, p. 465-492, May 2011.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. da. **Escoamento superficial**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 87 p.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322 p.
- ROMANOVSKI, Z. **Morfologia e aspectos hidrológicos da microbacia rua Nova, Viçosa-MG, para fins de manejo**. 2001. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2001.
- SALVADOR, N. et al. Contribuição para a quantificação das relações rio-aquífero no sistema aquífero Querença-Silves. In: SEMINÁRIO SOBRE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 7., 2007, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2007. p. 1-15.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, New York, v. 10, n. 10, p. 18-39, Jan. 2002.
- SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? **Hydrological Processes**, Chichester, v. 21, n. 15, p. 2075-2080, July 2007.
- SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. **O ciclo da água**. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>. Acesso em: 10 mar. 2013.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do nordeste brasileiro**: hidrogeologia da bacia sedimentar do rio do peixe: relatório técnico. Campina Grande, 2007. 107 p.
- SILVA, L. A. **Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande, MG**. 2009. 146 p. Dissertação (Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- SILVA, P. M. de O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, Alto Rio Grande,**

MG. 2006. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

SIN, G. et al. A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis. **Water Research**, New York, v. 39, n. 12, p. 2459-2474, July 2005.

SOPHOCLEOUS, M. Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA: lessons and recommended actions. **Hydrogeology Journal**, New York, v. 18, n. 3, p. 559-575, May 2010.

SOUZA, E. de. **Mapeamento digital de solos e modelagem da recarga hídrica na bacia do Rio Doce, Minas Gerais.** 2013. 155 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

SOUZA, E. de et al. Funções de pedotransferência para estimar a densidade de solos na bacia do Rio Doce, Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2013. 1 CD-ROM.

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**, Saint Joseph, v. 43, n. 6, p. 1431-1439, 2000.

STEYAERT, L. T. A perspective on the state of environmental simulation modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O. (Ed.). **Environmental modeling with GIS.** Oxford: Oxford University, 1993. p. 16-30.

THORNTON, P. et al. Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 113, n. 1/4, p. 185-222, Dec. 2002.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: ABRH, 1998. 669 p.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 631 p.

VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. **Projeto avaliação dos recursos hídricos do sistema aquífero Guarani no município de Araguari, Minas Gerais**.

Disponível em: <<http://www.sg-guarani.org>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. 2011.

287 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na região alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG**. 2008. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VOIGTLAENDER, M. **Caracterização hidrológica e biogeoquímica de microbacias**: uma comparação entre Mata Atlântica e Pinus taeda L. Maureen. 2007. 75 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2007.

WALSH, R. P. D.; VOIGT, P. J. Vegetation litter: an underestimated variable in hydrology and geomorphology. **Journal of Biogeography**, Oxford, v. 4, n. 3, p. 253-274, 1977.

WELLES, E. et al. Hydrologic verification: a call for action and collaboration. **Bolletín of the American Meteorological Society**, Boston, v. 88, n. 4, p. 503-511, 2007.

ANEXOS

ANEXO A - Resultados anuais do BALSEQ por classe de solo e uso e ocupação do solo na BHRL

Cambissolos com floresta								
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	2003,00	964,43	1365,03	0,00	621,92	48,15	0	31,05
07-08	2363,00	962,82	1435,42	0,06	832,36	48,07	0,003	41,56
08-09	2478,00	967,30	1462,90	0,00	989,90	48,29	0	49,42
09-10	1983,70	970,96	1367,70	0,00	753,08	48,47	0	37,60
10-11	1844,30	677,80	1046,66	0,00	797,64	33,84	0	39,82
11-12	2292,00	1092,60	1551,00	0,00	713,83	54,55	0	35,64

Cambissolos com pastagem							
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	2003,00	914,36	165,67	962,92	45,65	8,27	48,07
07-08	2363,00	836,81	224,86	1136,23	41,78	11,23	56,73
08-09	2478,00	793,19	250,28	1425,25	39,60	12,50	71,16

09-10	1983,70	863,67	127,85	1210,38	43,12	6,38	60,43
10-11	1844,30	657,59	390,31	818,96	32,83	19,49	40,89

Cambissolos com pastagem

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
11-12	2292,00	895,93	220,27	1069,57	44,73	11,00	53,40

Cambissolos com regeneração natural

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	2003,00	1082,90	1283,20	0,00	788,78	54,06	0,00	39,38
07-08	2363,00	966,42	1202,72	0,05	961,51	48,25	0,00	48,00
08-09	2478,00	967,30	1215,10	0,00	1228,60	48,29	0,00	61,34
09-10	1983,70	1053,26	1251,63	0,00	975,48	52,58	0,00	48,70
10-11	1844,30	777,38	961,81	0,00	891,93	38,81	0,00	44,53
11-12	2292,00	1092,60	1321,80	0,00	853,07	54,55	0,00	42,59

ANEXO B - Resultados anuais do BALSEQ por classe de solo e uso e ocupação do solo na BHRM

Latossolos com pastagem							
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	756,93	221,34	428,65	53,51	15,65	30,30
07-08	1460,00	802,65	169,25	460,38	56,74	11,59	31,53
08-09	1767,00	840,71	273,12	618,40	59,43	15,46	35,00
09-10	1580,02	816,04	342,07	494,66	57,69	21,65	31,31

Latossolos com lavoura de milho							
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	955,24	214,68	238,70	67,53	15,18	16,88
07-08	1460,00	1078,88	164,43	205,60	76,27	11,26	14,08
08-09	1767,00	1124,26	265,12	354,29	79,48	15,00	20,05
09-10	1580,02	1119,35	332,83	168,14	79,13	21,06	10,64

Latossolos com floresta								
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	1171,43	1454,33	60,72	0,00	82,82	4,29	0,00
07-08	1460,00	1165,01	1457,01	52,84	0,00	82,36	3,62	0,00
08-09	1767,00	1166,22	1519,62	91,85	0,00	82,45	5,20	0,00
09-10	1580,02	1274,63	1590,63	87,57	0,00	90,11	5,54	0,00

Latossolos com eucalipto								
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	1126,51	1338,69	70,60	0,00	79,64	4,99	0,00
07-08	1460,00	1100,76	1342,11	60,60	0,00	77,82	4,15	0,00
08-09	1767,00	1166,22	1340,73	105,25	101,53	82,45	5,96	5,75
09-10	1580,02	1274,63	1337,33	105,87	132,62	90,11	6,70	8,39

Latossolos com lavoura de cana de açúcar							
Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	971,21	217,26	220,69	68,66	15,36	15,60
07-08	1460,00	1102,70	166,30	182,00	77,96	11,39	12,47

08-09	1767,00	1148,78	268,22	325,93	81,21	15,18	18,45
09-10	1580,02	1139,73	336,42	142,28	80,57	21,29	9,00

Cambissolos com pastagem

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	774,38	281,35	351,19	54,75	19,89	24,83
07-08	1460,00	821,12	215,28	395,93	58,05	14,75	27,12
08-09	1767,00	859,19	345,87	532,37	60,74	19,57	30,13
09-10	1580,02	834,52	423,60	389,39	59,00	26,81	24,64

Cambissolos com floresta

Ano hidrológico	P (mm)	ETR (mm)	ETR + ICV (mm)	ES (mm)	Rp (mm)	ETR/P (%)	ES/P (%)	Rp/P (%)
06-07	1414,50	1039,79	1322,69	87,54	0,00	73,51	6,19	0,00
07-08	1460,00	1087,46	1379,46	69,32	0,00	76,88	4,75	0,00
08-09	1767,00	1153,35	1506,75	124,95	0,00	81,54	7,07	0,00
09-10	1580,02	1274,63	1590,63	126,26	0,00	90,11	7,99	0,00