
Análise de sensibilidade e avaliação da estrutura do modelo BALSEQ em condições distintas de clima, solo e vegetação

Sensitivity analysis and structure evaluation of the BALSEQ model under different climate, soil and vegetation conditions

**Lucas Machado Pontes¹, Gilberto Coelho², Carlos Rogério de Mello³,
Antonio Marciano da Silva⁴, Geraldo César de Oliveira⁵**

¹ Estudante doutorado em Ciência do Solo na Universidade Federal de Lavras – UFLA

lucasmachadopontes@hotmail.com

^{2,3,4} Professor no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras – UFLA

coelho@deg.ufla.br; crmello@deg.ufla.br; marciano@deg.ufla.br

⁵ Professor no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA

geraldooliveira@dcs.ufla.br

Recebido: 24/01/14 - Revisado: 01/04/14 - Aceito: 27/08/14

RESUMO

A avaliação de modelos hidrológicos é etapa indispensável na modelagem, porém sua abordagem não deve se restringir ao uso de coeficientes que comparam dados medidos com os simulados, sobretudo para modelos em que isso não é possível, como no caso dos modelos de água subterrânea. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o modelo BALSEQ no aspecto qualitativo. Para isso, foi feita a análise de sensibilidade das variáveis de entrada, bem como uma avaliação da estrutura do modelo, para detalhar o comportamento de cada variável e suas interações com as respostas da modelagem. O modelo apresenta estrutura simples mas bastante coerente, o que permite inserir modificações e adaptá-lo para diversas condições de clima, solo e vegetação. Os resultados da análise de sensibilidade indicam que o BALSEQ tem sensibilidade diferenciada para cada combinação de solo e vegetação modelada, o que enfatiza a importância da análise de sensibilidade uma vez que a calibração do modelo deve ser feita com as variáveis mais significativas. Nas áreas com cobertura florestal as variáveis de maior relevância na estimativa da recarga foram a Interceptação pela Cobertura Vegetal (ICV) e o coeficiente da cultura (Kc), as quais são parâmetros usados para representar a evapotranspiração. Enquanto que, nas áreas de pastagem e culturas anuais, o escoamento superficial, representado pelo parâmetro do método Curve Number- CN, foi a variável mais importante. De modo geral, o CN é a variável de maior impacto no balanço hídrico e portanto deve ser criteriosamente calibrado.

Palavras Chave: Validação. Modelagem. Avaliação qualitativa da modelagem. Recarga da água subterrânea

ABSTRACT

The evaluation of hydrological models is an essential stage in modeling, but its approach should not be restricted to the use of coefficients comparing measured and simulated data, especially for models where this is not possible, as in the case of groundwater models. Thus, the objective of this study was to evaluate the qualitative aspect of the BALSEQ model. For this purpose, the sensitivity analysis of the input variables was performed, as well as an assessment of the model structure, to detail the behavior of each variable and their interactions with the modeling results. The model offers a simple but quite coherent structure, which allows the user to insert changes and to adapt the model to different climate, vegetation and soil conditions. The results of the sensitivity analysis indicate that the BALSEQ has a different sensitivity for each combination of soil and vegetation modeled, which emphasizes the importance of sensitivity analysis since the model calibration must be done with the most significant variables. In areas with forest cover the most relevant variables for estimating recharge were Canopy Interception (ICV) and the crop coefficient (Kc), which are parameters used to represent the evapotranspiration, while in the pasture and annual crops runoff, represented by the Curve Number method parameter - CN, was the most important variable. In general, CN is the variable with the greatest impact on water balance and therefore should be carefully calibrated.

Keywords: Validation. Modeling. Qualitative model evaluation. Groundwater recharge

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica se estabeleceu como ferramenta fundamental para a gestão dos recursos hídricos, e também para a própria construção do conhecimento a respeito da ciência hidrológica. Observa-se atualmente uma crescente complexificação dos modelos utilizados, graças à evolução tecnológica e computacional. Tal fato pode trazer avanços do entendimento científico sobre o ciclo hidrológico e suas manifestações. No entanto, deve-se utilizar estes modelos com muito critério, sobretudo os mais avançados e complexos, pois utilizam quantidades crescentes de variáveis, muitas vezes de difícil determinação.

Por essa razão, as etapas de calibração e validação são partes indispensáveis da modelagem. Ambas são feitas basicamente comparando-se valores simulados com dados obtidos em campo. Porém, em modelos mais complexos têm-se observado bons ajustes mesmo com a adoção de valores de parâmetros sem sentido físico real. O que realça a necessidade de uma abordagem de avaliação mais ampla e consistente (SHIN et al., 2013).

Técnicas que permitam avaliar não apenas o quanto determinado modelo permite aproximar dados simulados à um conjunto limitado de dados medidos em campo, mas também identificar padrões de comportamento do modelo e o significado físico dos valores dos parâmetros utilizados.

Dentro dessa perspectiva, Biondi et al. (2012) propuseram um protocolo para avaliar modelos hidrológicos. A abordagem destes autores enfatiza o uso de avaliações qualitativas e também uma análise da estrutura científica do modelo e suas bases físicas. Tal abordagem mostra-se muito útil no processo de avaliação de modelos hidrológicos, sobretudo para modelos de água subterrânea, onde a validação numérica, ou seja, o uso de coeficientes de eficiência não é possível.

Na modelagem da recarga hídrica subterrânea, não é possível medir diretamente a recarga ocorrida em uma bacia hidrográfica, o que impossibilita comparações diretas entre dados medidos e estimados. Konikow e Bredehoeft (1992) questionam o uso do termo validação, e argumentam que um modelo de água subterrânea é baseado em hipóteses científicas e portanto é impossível de ser validado.

Assim, avaliações qualitativas e sobretudo uma análise crítica de cada parâmetro utilizado na modelagem deve ser realizada para verificar a qualidade do modelo, sempre tendo em vista o objetivo da modelagem. Neste caso, optou-se por um modelo de balanço hídrico sequencial diário, denominado BALSEQ (LOBO-FERREIRA, 1981). O modelo possui estrutura simples que permite realizar alterações e adaptações de acordo com as características da região a ser usada na modelagem.

O objetivo geral do trabalho é a avaliação qualitativa do modelo BALSEQ. A análise de sensibilidade em conjunto com a proposta de Biondi et al. (2012) para identificar os componentes principais na modelagem e utilizá-los na calibração foram objetivos complementares.

MATERIAIS E MÉTODOS

Áreas de estudo

Foram utilizados dados de duas bacias hidrográficas monitoradas, inseridas na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH – GD1), sul de Minas Gerais (Figura 1).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lavrinha (BHRL) está localizada entre as coordenadas geográficas 22°06,84' e 22°08,4' de latitude sul e 44°26,3' e 44°28,7' 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 (temperado quente), 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.

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. 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).

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela (BHRM) está localizada entre as coordenadas geográficas 21°14,4' e 21°15,9' de latitude sul e 44°29,4' e 44°30,9' de longitude oeste, no município de Nazareno, MG. Drena uma área de 470 ha, à margem direita do córrego Jaguará, com altitude e declividade média de 1.007 m e 12,3%, respectivamente.

O clima na BHRM é do tipo Cwa, conforme a classificação Köppen, caracterizado como temperado com verões quentes e úmidos e invernos secos. A precipitação e a temperatura média anual são de 1.300 mm e 19,7°C, respectivamente (SILVA, 2009).

Nesta bacia predominam Latossolos Vermelho-Amarelos (LVAd), em 65% da área; seguidos de Latossolos Vermelhos (LVd), com 14% da área e Cambissolos (CXbd) em menos de

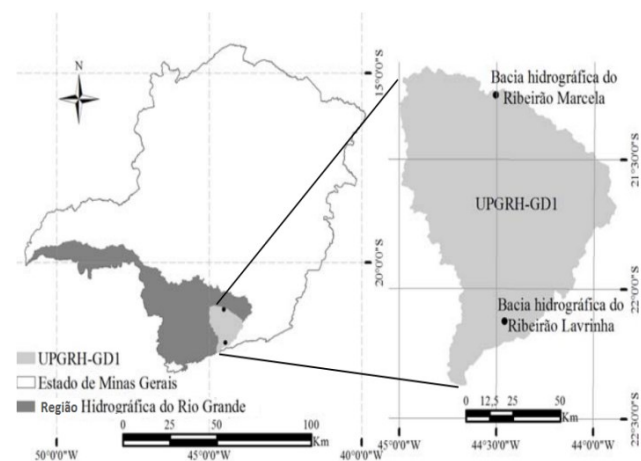


Figura 1 - Localização das duas bacias hidrográficas estudadas
Fonte: Adaptado de Silva (2009)

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 *et al.*, 2008). O uso do solo na BHRM é diverso mas pouco dinâmico. 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 canalial e 0,68% de corpos d'água (lago). Classes de solos e seus usos foram usados em parâmetros na estimativa feita com o BALSEQ.

Balanco hídrico estimado com o BALSEQ

O algoritmo do BALSEQ é apresentado na figura 2.

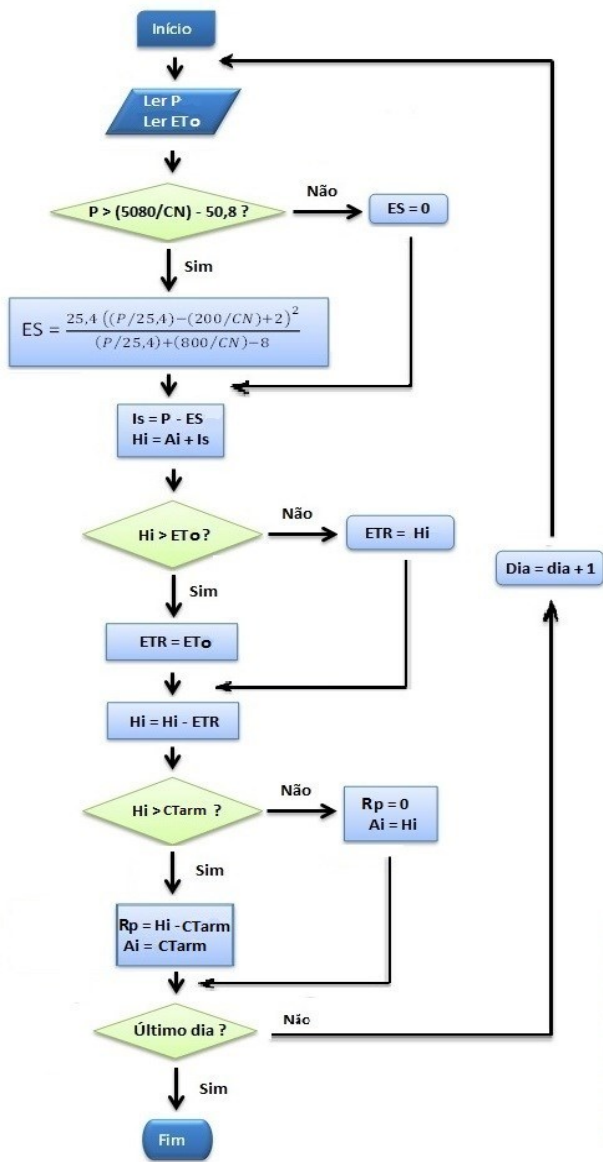


Figura 2 - Modelo original do balanço hídrico sequencial diário BALSEQ

Em que:

- P = precipitação (mm);
- ET₀ = 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);
- CT_{arm} = capacidade total de armazenamento (mm);
- R_p = recarga potencial (mm).

O método pode ser aplicado para condições nas quais não exista recarga artificial, não haja escoamento superficial afluente 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. Satisfeitas essas considerações a equação do balanço hídrico para o solo nessa área pode ser expressa por:

$$P - ETR - \Delta A_i - ES - R_p = \epsilon$$

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

Foi feita a aplicação sequencial desta fórmula com dados diários de P e ET₀ para o período 2007-2010. Neste trabalho adotou-se o passo diário para modelar as variáveis do modelo. O passo é o intervalo de tempo de entrada dos valores para cada variável, como a capacidade total de água armazenada no solo (CT_{arm}, mm), dada por:

$$CT_{arm} = CC \cdot Z \cdot D_s$$

Em que CC é a unidade do solo na capacidade de campo (g g⁻¹), D_s é a densidade do solo (g cm⁻³) e Z é a profundidade do solo sujeita à evapotranspiração, normalmente a profundidade radicular efetiva (cm).

Para a determinação do escoamento superficial foi utilizado o Método *Curve Number* (CN-SCS), desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* (MOCKUS, 1972). Os valores iniciais de CN para as bacias foram adotados conforme a literatura.

As áreas da bacia com a presença de Gleissolos e Neossolos Flúvicos, e as áreas de corpos d'água não foram 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 e portanto são áreas de descarga de água e não recarga.

A interceptação pela cobertura vegetal (ICV) foi inserida ao longo do estudo, e sua participação no balanço hídrico foi testada com a análise de sensibilidade. O ICV foi inserido como porcentagem da precipitação que se transforma em ETR, antes de atingir o solo, conforme valores médios encontrados

na literatura.

Os valores, para cada um dos parâmetros de entrada do modelo (CN, CC, Ds, Z, Kc e ICV), foram inicialmente atribuídos de acordo com o levantamento pedológico e do uso e cobertura do solo nas bacias hidrográficas estudadas. Tais levantamentos foram realizados por diferentes autores em períodos diferentes (GOMES, 2005; GOMES et al., 2008; PINTO, 2011). Porém, dado a baixa dinâmica no uso e cobertura do solo nos anos considerados (2007 – 2010), considerou-se apenas o valor médio para cada cobertura vegetal.

Os parâmetros referentes aos solos: CC e Ds, foram obtidos pela média dos valores encontrados para cada combinação de solo e vegetação mapeados. Os parâmetros referentes à vegetação: coeficiente de cultura Kc, profundidade(Z) e interceptação pela cobertura vegetal (ICV), são todos usados principalmente no cálculo da ETP, e foram adotados de acordo com dados da literatura (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores dos parâmetros de entrada do modelo BALSEQ

Cobertura Vegetal	K _{mid}	Z (m)	ICV (%)
Pastagem	0,80 ⁽¹⁾	0,30	-
Floresta	1,00 ⁽²⁾	3,00*	20%
Eucalipto	1,00 ⁽³⁾	2,00*	15%
Regeneração	1,00 ⁽²⁾	1,00	10%
Milho	1,20	1,00	-
Cana-de-açúcar	1,25	1,20	-

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

Fontes: os valores de K_{mid} e Z foram extraídos de Allen et al. (1998);

* Floresta, Eucalipto (ALMEIDA; SOARES, 2003). Na BHRL foi usado Z de 1 m. devido à profundidade do solo

Alencar et al. (2009)

Adaptado de GrazingPasture (ALLEN et al., 1998)

Adaptado de ConiferTree (ALLEN et al., 1998)

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. Neste trabalho foi aplicada esta última etapa da avaliação, a qual inclui a análise de sensibilidade dos parâmetros. A avaliação da estrutura do modelo inclui também a análise detalhada dos processos envolvidos na modelagem. Visa identificar as fontes de incerteza (XU; GERTNER, 2008) e se a parametrização e estrutura do modelo são consistentes com a realidade física dos processos simulados (VALÉRY; ANDRÉASSIAN; PERRIN, 2014).

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:

$$IS = \frac{(R_1 - R_2)/R_{12}}{(E_1 - E_2)/E_{12}}$$

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 ele atinge tal propósito;
- 2 - Listar e discutir cada premissa adotada na modelagem;
- 3 - Analisar a confiabilidade dos fundamentos teóricos e justificar o grau de complexidade e o esforço computacional;
- 4 - 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 os quatro componentes PLOR.

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.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O foco do modelo é obter a estimativa média de recarga potencial direta. Os resultados são mais precisos para intervalos de tempo mensais, no caso do ES e anuais, para a Rp. Isso devido às premissas adotadas pelo modelo, as quais 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 evapo-

- transpiração 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 que indica que os fundamentos teóricos são consistentes, ou seja, a estrutura do modelo (ordem em que os eventos são representados) e as variáveis utilizadas são adequadas para atingir o objetivo da modelagem.

Existem porém limitações, sobretudo na parametrização do coeficiente CN e da profundidade radicular efetiva (Z). Entretanto, o passo diário adotado na modelagem minimiza estas limitações e oferece um bom intervalo para estimar a recarga média anual (MASSMANN; HOLZMANN, 2012).

A simulação de interações mais complexas como a profundidade radicular efetiva e a cobertura vegetal de acordo com o estágio das culturas, pode melhorar a resposta do modelo. Fato evidenciado pela grande sensibilidade destes parâmetros no cálculo da ETP, conforme visto adiante.

Por outro lado, com estes incrementos aumenta-se a complexidade e demanda computacional (VALÉRY; ANDRÉAS-SIAN; PERRIN, 2014). 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 morosa e complexa para bacias hidrográficas médias e grandes, ou para um nível muito detalhado, onde é necessária boa amostragem para captar às variações espaciais.

Deve-se enfatizar a alta variabilidade espacial de alguns dos parâmetros utilizados, sobretudo da CC e Ds. Isto evidencia uma deficiência comum em modelos pontuais, ou não distribuídos, em que não é considerada a distribuição espacial

do parâmetros e variáveis (REUSSER; BUYTAERT; ZEHE, 2011). Porém, como no BALSEQ estes parâmetros são usados de modo linear no cálculo da CTarm, e esta por sua vez apresenta baixa sensibilidade no BALSEQ, tal deficiência não deve prejudicar significativamente a modelagem.

Há ainda dificuldades e imprecisões nas medidas dos valores das variáveis. Por exemplo a profundidade radicular efetiva (Z), que é usada como profundidade do solo sujeita à evapotranspiração, além de ter alta variabilidade entre as fases da cultura, é uma medida muito imprecisa para vegetações florestais nativas. Ademais, raramente se sabe a altura do lençol freático e a interação entre esta e a profundidade das raízes.

Já o uso do método CN-SCS apresenta sérias limitações quando se objetiva determinar o total escoado em eventos pontuais (MELLO, 2003). Porém, como o foco são medidas com intervalo de tempo maior que o diário, o uso deste método não prejudica a estimativa da recarga potencial. Ademais, uma calibração adequada pode contornar as limitações do método CN-SCS (MELLO, 2003), o que reforça a importância do atual estudo, sobretudo a análise de sensibilidade, que subsidia uma calibração adequada.

Feitas essas considerações, torna-se necessário averiguar a quais variáveis o modelo é mais sensível e, portanto, quais delas devem ser obtidas com mais rigor.

Análise de sensibilidade

Com a análise de sensibilidade, pôde-se identificar as variáveis dependentes mais expressivas na modelagem com o BALSEQ e, também, as alterações mais eficazes para otimizar a modelagem, ou seja, evidenciar as variáveis calibráveis. Estas apresentam maior |IS| (Tabelas 2, 3 e 4) e, portanto, têm prioridade na calibração.

Tabela 2 - 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

Tabela 3 - Valores de |IS| para cada variável dependente de entrada e cada variável resposta no modelo BALSEQ, para os usos e ocupação sobre os Latossolos na BHRM

	Pastagem			Milho			Floresta			Eucalipto			Cana			Média
	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	
CTarm	0,20	0	0,42	0,18	0	0,86	0,08	0	0,81	0,13	0	1,65	0,18	0	0,69	0,52
Kc	0,72	0	2,04	0,59	0	1,41	0,95	0	2,24	0,46	0	3,00	0,58	0	1,46	1,35
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	1,38
ICV	-	-	-	-	-	-	0,94	2,94	7,00	0,70	2,46	7,00	-	-	-	3,50

Tabela 4 - Valores de |IS| para cada variável dependente de entrada e cada variável resposta no modelo BALSEQ, para os usos e ocupação sobre os Cambissolos na BHRM

	Pastagem			Floresta			Média
	ETR	ES	Rp	ETR	ES	Rp	
CTarm	0,19	0	0,34	0,07	0	1,67	0,57
Kc	0,74	0	1,16	0,66	0	3,71	1,57
CN	0,56	2,62	3,11	0,12	1,43	1,43	1,55
ICV	-	-	-	0,73	2,22	7,00	3,32

A variável CTarm apresentou em todos os casos o menor IS, o que pode ser interpretado como positivo na modelagem com o BALSEQ, já que esta variável é calculada pela multiplicação da CC, Ds e Z, as quais apresentam grande variabilidade espacial. Como o modelo é pouco sensível a CTarm, esta variabilidade espacial tem pouca expressão nos resultados.

O Kc, que é um coeficiente usado na estimativa da ETP, apresenta alta IS no cálculo da Rpe da ETR nas áreas com vegetação florestal. Nestas áreas também foi incorporado a ICV, a qual é descontada na precipitação e incorporado diretamente na ETR. A ICV é bem expressiva (alto IS) sobretudo na BHRM, onde o clima é mais seco e ocorre inverso seco, com déficit hídrico. Esta variável entrada pode ter sua simulação melhorada com a adoção de um modelo de ICV relacionado à algum índice foliar e das características da chuva (CARLYLE-MOSES; GASH, 2011) ao invés de um valor percentual fixo.

Para o Kc a dificuldade são as matas nativas e culturas florestais como o eucalipto, para os quais não estão disponíveis informações detalhadas e também por ser difícil determinar este coeficiente em campo devido à grande profundidade radicular das árvores (ALMEIDA; SOARES, 2003).

O CN apresentou elevado IS na média das respostas obtidas com a modelagem. Nos Cambissolos da BHRL e Latossolos da BHRM o valor médio do IS para o CN foi 1,38 e nos Cambissolos da BHRM o IS médio do CN foi 1,55. Assim, a média geral do IS para o CN foi de 1,44, menor apenas que a média geral do IS para ICV igual a 2,52, o qual, conforme dito anteriormente, é muito expressivo em áreas de clima mais seco e déficit hídrico mais expressivo. Ainda assim, o CN foi escolhido para calibrar o modelo uma vez que é a variável principal quando considerada a área de cada uso e ocupação do solo.

Outros autores encontraram também um predomínio do CN na modelagem do escoamento superficial mesmo em modelos complexos como o SWAT (LELIS et al., 2012; Neto et al., 2014; WU; LIU, 2012). Para uma avaliação mais global, pode-se analisar os valores médios de cada variável independente. Assim, o CN aparece como a variável mais influente na modelagem como um todo, seguido da ICV e Kc (Tabelas 2 e 5).

Ao analisar o valor de IS para cada variável, nota-se que a sensibilidade do modelo a determinado parâmetro varia principalmente de acordo com o uso do solo. Por exemplo, na floresta, a variável a que o BALSEQ foi mais sensível para estimar a recarga foi o Kc na BHRL e a ICV na BHRM; já para regeneração, pastagens e culturas anuais o CN foi mais expressivo. Este predomínio da cobertura vegetal sobre os

processos de infiltração e escoamento superficial é condizente com observações de campo e também com outros trabalhos publicados (CARDOSO et al., 2012).

O mesmo procedimento foi realizado para a BHRM, porém, os resultados foram bem diferentes (Tabelas 3 e 4). Para esta bacia hidrográfica observa-se, na média, um amplo predomínio da ICV na resposta do modelo à recarga potencial (Rp), seguido do CN e Kc. Porém, devido à pequena porção da BHRM ocupada com vegetação florestal (6 %) é preciso analisar a média do |IS| ponderada pela área (Tabela 5).

Tabela 5 - Média do |IS| ponderada pela área, para a BHRM

	ETR	ES	Rp	Média
CTarm	0,020	0	0,065	0,028
Kc	0,075	0	0,205	0,093
CN	0,033	0,229	0,244	0,169
ICV	0,011	0,036	0,093	0,047

Dado o predomínio de pastagens, onde o CN é a variável com maior IS, esta variável sobressai na média ponderada pela área. Logo, o CN deve ser usado na calibração, ao invés da ICV. O que é bom para a modelagem, já que o CN é mais fácil de calibrar do que o ICV.

A comparação dos valores de IS para a BHRL (Tabela 2) e para a BHRM (Tabelas 3 e 4) evidencia que há diferenças entre a sensibilidade dos parâmetros relacionados às variáveis dependentes solos e vegetação e a variável independente clima. Esta diferença representa os efeitos combinados de clima, solo e vegetação nas variáveis de entrada e de resposta para cada situação. Tal comparação é dificultada devido à intervenção e combinação entre fatores.

Modelos matemáticos e estatísticos mais complexos podem ser adotados para uma análise mais precisa da sensibilidade do modelo e identificação dos componentes principais, bem como para separar interferências entre variáveis (ZHANG; CHU; FU, 2013). Entretanto, métodos complexos como análise global, análise regional e as baseadas em análise de variância requerem um grande número de simulações (REUSSER; BUYTAERT; ZEHE, 2011). Consequentemente, optou-se por uma análise de sensibilidade simples denominada um fator por vez (*one factor at time*) (LELIS et al., 2012). Suficiente para identificar as variáveis calibráveis em modelos lineares como o BALSEQ (MISHRA, 2009; REUSSER; BUYTAERT; ZEHE, 2011).

Ressalta-se que as análises de sensibilidade foram realizadas com dados climáticos reais, ao contrário do que é feito nos modelos mais complexos, que exigem centenas ou até milhares de simulações, as quais só podem ser executadas com dados simulados e, portanto, com menor representatividade dos processos reais.

Matriz SWOT

A última etapa da avaliação do modelo é a análise das

potencialidades, limitações, oportunidades e riscos (PLOR) (Quadro 1).

Quadro 1 - Matriz PLOR para o modelo BALSEQ

Potencialidades	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> - Resultados adequados para o nível de complexidade do modelo. - 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. - 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. - Pode-se espacializar os resultados com uso de ferramentas geoestatísticas ou técnicas 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 equivocadas na gestão e no manejo de bacias hidrográficas. - Em locais onde as limitações forem 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 (HUNT; ZHENG, 2012).

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 z, os quais têm grande peso na resposta do modelo.

Uma boa modelagem dos recursos hídricos subterrâneos é básica e fundamental para uma boa gestão e manejo deste bem. Por isso, estudos desta ordem são de vital importância para a compreensão e simulação de condições modeladas ou medidas em campo.

CONCLUSÕES

O modelo BALSEQ apresenta uma estrutura consistente, simples e facilmente adaptável, com resultados coerentes e significativos ao entendimento hidrológico de bacias hidrográficas.

Nas áreas com vegetação florestal as variáveis dependentes (parâmetros entrada do modelo) com maior IS para o cálculo da Rp foram ICV e Kc. Já nas áreas com pastagem e culturas anuais, o coeficiente CN apresentou maior IS para a estimativa da Rp e do ES.

Na BHRM, onde o clima é menos úmido, a ICV das áreas florestadas apresentou IS muito elevada, o que indica a grande representatividade desta no balanço hídrico em áreas com déficit hídrico e também a necessidade de melhorar sua estimativa.

De modo geral, o CN foi a variável com maior efeito na estimativa da Rp e do ES pelo BALSEQ. O CN representa a combinação do solo e da vegetação e é a principal variável a ser usada na calibração.

O modelo apresentou sensibilidade diferenciada em cada bacia hidrográfica, o que representa os efeitos combinados de clima, solo e vegetação, nas variáveis de entrada e de resposta. Isto sugere a necessidade de análises mais complexas que distingam os efeitos de correlação e interferência entre variáveis mesmo em modelos simples como o BALSEQ.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq, CAPES e à FAPEMIG pelo financiamento dos projetos e bolsas envolvidos.

REFERÊNCIAS

ALENCAR, C. A.; CUNHA, F. F.; MARTINS, C. E.; CÓSER, A. C.; ROCHA, W. S. D.; ARAÚJO, R. A. S. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, 98-108, 2009. Suplemento especial.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. (FAO irrigation and drainage paper, 56).

- ALMEIDA, A. C.; 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*, v. 27, n. 2, p. 159-170, mar./abr. 2003.
- BIONDI, D.; FRENI, G.; IACOBELLIS, V.; MASCARO, G.; MONTANARI, A. Validation of hydrological models: conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 42-44, p. 70-76, 2012. doi:10.1016/j.pce.2011.07.037
- CARDOSO, D. P.; SILVA, M. L. N.; CARVALHO, G. J.; FREITAS, D. A. F.; AVANZI JUNIOR, C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, v. 16, n. 6, p. 632-638, June 2012.
- CARLYLE-MOSES, D. E.; GASH, J. H. C. Rainfall interception loss by forest canopies. In: LEVIA, D. F.; CARLYLE-MOSES, D. E.; TAMAKA, T. *Forest hydrology and biogeochemistry*. Netherlands: Springer, 2011. p. 407-423. (Ecological studies, v. 216).
- 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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.
- GOMES, N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg soil erosion) para simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 6, p. 2483-2492, nov./dez. 2008.
- HUNT, R.; ZHENG, C. The current state of modeling. *Groundwater*, v. 50, n. 3, p. 329-333, 2012.
- KONIKOW, L. F.; BREDEHOEFT, J. D. Ground-water models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, v. 15, n. 1, p. 75-83, 1992. doi:10.1016/0309-1708(92)90033-X.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 2, p. 623-634, 2012.
- LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H.-G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, v. 27, n. 9-10, 645-654, 2002. doi:10.1016/S1474-7065(02)00049-9
- 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: [s.n.], 1981.
- MASSMANN, C.; HOLZMANN, H. Analysis of the behavior of a rainfall-runoff model using three global sensitivity analysis methods evaluated at different temporal scales. *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 97-110, Dec. 2012. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.09.026
- MCCUEN, R.; SNYDER, W. *Hydrologic modeling: statistical methods and applications*. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- MCCUEN, R. H. The role of sensitivity analysis in hydrologic. *Journal of Hydrology*, v. 18, n. 1, p. 37-53, Jan. 1973.
- MELLO, C. R. *Estudo hidrológico em micro-bacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero*. 2003. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.
- MISHRA, S. Uncertainty and sensitivity analysis techniques for hydrologic modeling. *Journal of Hydroinformatics*, v. 11, n. 3-4, p. 282-296, 2009. doi:10.2166/hydro.2009.048
- MOCKUS, V. Design hydrographs. In: NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK. *Hydrology*. [S.l.: s.n.], 1972. section 4.
- PINTO, D. F. *Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrográfica da serra da Mantiqueira, MG*. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- REUSSER, D. E.; BUYTAERT, W.; ZEHE, E. Temporal dynamics of model parameter sensitivity for computationally expensive models with the Fourier amplitude sensitivity test. *Water Resources Research*, v. 47, n. 7, p. 1-14, July 2011. doi:10.1029/2010WR009947.
- SILVA, L. A. *Regime de escoamento e recarga subterrânea de nascentes na região do Alto Rio Grande - MG*. 2009. Dissertação (Engenharia de Água e Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- SHIN, M.; GUILLAUME, J. H. A.; CROKE, B. F. W.; JAKEMAN, A. J. Addressing ten questions about conceptual rainfall-runoff models with global sensitivity analyses in R. *Journal of Hydrology*, v. 503, p. 135-152, Oct. 2013. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.08.047
- SIN, G.; VAN HULLE, S. W. H.; DE PAUW, D. J. W.; VAN GRIENSVEN, A.; VANROLLEGHEM, P. A. A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis. *Water Research*, v. 39, n. 12, p. 2459-2474, July 2005. doi:10.1016/j.watres.2005.05.006.
- VALÉRY, A.; ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C. 'As simple as possible but not simpler': What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2 – Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of Hydrology*, v. 517, p. 1176-1187, Sept. 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058
- XU, C.; GERTNER, G. Z. Uncertainty and sensitivity analysis for models with correlated parameters. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 93, n. 10, p. 1563-1573, Oct. 2008. doi:10.1016/j.

ress.2007.06.003

WU, Y.; LIU, S. Automating calibration, sensitivity and uncertainty analysis of complex models using the R package Flexible ModelingEnvironment (FME): SWAT as an example. *Environmental Modelling & Software*, v. 31, p. 99 - 109, 2012. doi: 10.1016/j.envsoft.2011.11.013

ZHANG, C. CHU, J. FU, G. Sobol'sensitivity analysis for a distributed hydrological model of Yichun River Basin, China. *Journal of Hydrology*, v 480, p. 58-68, Feb. 2013. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.005