

Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica Catarinense

Hierarchical Calibration of SWAT model for a watershed in southern Brazil

Tássia Mattos Brighenti, Nadia Bernardi Bonumá e Pedro Luiz Borges Chaffe

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil
tassiabrighenti@hotmail.com; nadia.bonuma@ufsc.br; pedro.chaffe@ufsc.br

Recebido: 18/03/15 - Revisado: 24/09/15 - Aceito: 21/10/15

RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pela modelagem hidrológica é a calibração eficiente dos parâmetros do modelo. O objetivo deste estudo foi testar um método hierárquico de calibração do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) considerando variações do clima e de uso do solo. A área de estudo foi a bacia hidrográfica do Rio Negrinho, localizada em Santa Catarina. A calibração do modelo foi feita usando o algoritmo Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2), utilizando testes de crescente complexidade. Primeiramente a série de vazões observadas foi dividida em períodos distintos de calibração e validação (Split Sample Test) sendo que os resultados obtidos para o intervalo mensal foram considerados aceitáveis com um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) $\geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$. Na análise de cada ano separadamente (Differential Split-Sample Test) a calibração e validação dos anos úmidos (2008 a 2012) foi mais eficiente que dos anos secos (2003 a 2007). No processo de validação do modelo para uma bacia com uso do solo semelhante (Proxy-Catchment Test), o modelo não foi eficiente para o ajuste dos picos de vazões (NSE de 0,0), porém, houve uma compensação dos volumes na estimativa do balanço hídrico ($Pbias$ de 0,1%). Os resultados indicam que a eficiência do modelo SWAT depende da escala espacial e do período de calibração. Para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa em relação aos períodos secos e úmidos.

Palavras Chave: Modelagem hidrológica. Análise de sensibilidade. Validação.

ABSTRACT

One of the main challenges of hydrological modeling is the effective calibration of model parameters. The aim of this study was to test a hierarchical calibration scheme for the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model by considering land use and climate changes. The study area was the Rio Negrinho watershed, located in Santa Catarina State, Brazil. Model calibration was performed with the Sequential Uncertainty Fitting (SUFI2) Algorithm through increasing complexity tests. The observed discharge data were first divided into calibration and validation periods (Split Sample Test) wherein the predicted monthly flow matched the measured values, with a Nash-Sutcliffe coefficient (NSE) ≥ 0.5 and $Pbias < \pm 25\%$. When wet and dry periods were considered separately (Differential Split-Sample Test) the NSE values of wet years (2008 a 2012) were higher than dry year values (2003 to 2007). In the SWAT validation for a watershed with similar land use (Proxy-Catchment Test), the model could not capture the flow peaks well (NSE of 0.0), however, the water balance volumes were compensated ($Pbias$ of 0.1%). The case study demonstrates that SWAT performance varies greatly, depending on the spatial scale and calibration period. The SWAT model can be used in further studies to simulate land use and climate change scenarios however it must be calibrated and validated using spatially well distributed data and recorded series segment including dry and wet periods.

Keywords: Hydrologic modeling. Sensitivity analysis. Validation.

INTRODUÇÃO

O uso de modelos hidrológicos na simulação de cenários de mudança ambiental (e.g. mudança climática e no uso do solo) permite uma economia significativa de custos e tempo de projeto (MORIASI et al., 2007; MORIASI et al., 2012). Porém, seu uso só será vantajoso se estes puderem prever ou simular com certa confiabilidade séries de dados que não estão disponíveis (KLEMES, 1986). Tais modelos geralmente contêm uma grande quantidade de parâmetros para descrever os processos hidrológicos.

Dependendo do tipo de estudo, alguns parâmetros são mais sensíveis e devem ser avaliados para obtenção de simulações mais eficientes (ROSSI et al., 2008). Existem procedimentos básicos na adequação e verificação da eficiência de um modelo a uma bacia hidrográfica. Trate-se dos processos de calibração e validação. Onde, os parâmetros existentes no modelo (ou aqueles selecionados pela análise de sensibilidade) são ajustados a partir da comparação com dados medidos em campo.

O Soil and Water Assessment Tool - SWAT é um modelo semi-distribuído e contínuo no tempo, que foi desenvolvido para simular o impacto da mudança do uso do solo em bacias hidrográficas de médio e grande porte (ARNOLD et al., 2012). O primeiro passo no processo de simulação do modelo SWAT é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia hidrográfica de estudo. O usuário determina quais variáveis devem ser ajustadas de acordo com seu conhecimento sobre a bacia ou uma análise de sensibilidade automática. O segundo passo, é o processo de calibração, que consiste no procedimento feito para encontrar a melhor faixa de valores para os parâmetros selecionados (ARNOLD et al., 2012).

A calibração de um modelo pode ser feita de duas formas: manual e automática. A calibração manual, por tentativa e erro pode ser uma tarefa laboriosa. A calibração automática facilita esse processo utilizando técnicas numéricas de otimização (BRAVO; COLLISCHONN; TUCCI, 2009). O modelo SWAT conta com o SWAT Calibration and Uncertainty Procedures - SWAT CUP, ferramenta disponível para auxiliar a calibração, validação e análises de incerteza dos projetos gerados no SWAT (EAWAG, 2009). O último passo é a validação do componente de interesse (e.g. vazão e produção de sedimentos), a qual consiste na demonstração de que o modelo é capaz de realizar simulações aceitáveis. A validação se resume em rodar o modelo com os valores de parâmetros determinados na calibração, sendo que a série de validação não pode ser a mesma da calibração (ARNOLD et al., 2012). Klemes (1986) propõe um procedimento hierárquico de calibração/validação dos modelos, composto de testes que seguem uma ordem crescente de complexidade.

Diversos modelos são utilizados para o cálculo das vazões (BEVEN, 2001; DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015; TRAMBAUER et al., 2013; YANG; HERATH; MUSIAKE, 2000) entre eles pode-se destacar: TOPMODEL, VIC, HBV, MIKE SHE, SWAT e também modelos criados no Brasil como o pacote MGB-IPH (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; FAN; COLLISCHONN, 2014).

Mais de 650 artigos publicados foram identificados relatando as aplicações do SWAT. A grande aplicabilidade do

modelo caracteriza-o como uma ferramenta flexível, podendo ser utilizado para simular uma variedade de situações em bacias hidrográficas (e.g. cálculo de vazões, escoamento de base, produção de sedimentos e transporte de nutrientes) (GASSMAN et al., 2007). Entretanto, o processo de calibração ainda apresenta muitos desafios, como a representação das variabilidades temporais e espaciais de uma bacia (MULETA 2012; ZHANG et al., 2015), influenciando nos resultados obtidos nas simulações de uso do solo e cenários climáticos (RAHBEH et al., 2013; ZHU et al., 2015).

No Brasil o modelo SWAT foi aplicado em mais de 100 trabalhos, entretanto poucos artigos foram publicados em periódicos. Cerca de 66% dos estudos apresentaram resultados de calibração e apenas 23% apresentaram resultados de validação para o modelo. (BRESSIANI et al., 2015). Destaca-se em alguns destes trabalhos que:

O modelo tem sido usado para análise de vazões (BONUMÁ et al., 2013; CARVALHO NETO; SRINIVASAN; RUFINO, 2011; MACHADO; VETTORAZZI; CRUCIANI, 2003; MELO NETO et al., 2014), em estudos que investigam o transporte de sedimentos e poluentes (BALOKOSKI et al., 2010; BONUMÁ et al., 2014; LELIS et al., 2012; LUBITZ; PINHEIRO; KAUFMANN, 2013; UZEIKA et al., 2012), e na criação de cenários hipotéticos (BONUMÁ et al., 2015; CARVALHO NETO; SRINIVASAN; RUFINO, 2011);

Em alguns casos as análises de sensibilidade e validações não são feitas, com a justificativa da ausência de uma maior série de dados (BALOKOSKI et al., 2010; CARVALHO NETO; SRINIVASAN; RUFINO, 2011; LUBITZ et al., 2013; MACHADO; VETTORAZZI; CRUCIANI, 2003);

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é o indicador estatístico de uso unânime na avaliação da eficiência do modelo SWAT em todos os trabalhos citados nos dois primeiros itens, com exceção de Souza e Santos (2013) utilizam o logNSE para analisar vazões mínimas;

De maneira geral o SWAT, nestes trabalhos citados, mostrou-se eficiente para as simulações (NSE \geq 0,5, MORIASI et al., 2007). Entretanto alguns autores encontraram dificuldades na calibração do modelo em pequenas bacias, como Melo Neto et al. (2014) e Uzeika et al. (2012).

Embora as limitações da utilização de modelos hidrológicos em bacias com dados escassos sejam mencionadas por alguns autores (BONUMÁ et al., 2013) métodos abrangentes de calibração e validação (e.g. KLEMES, 1986) são ausentes ou fracamente documentados em aplicações do modelo SWAT em bacias brasileiras. A tabela 1 apresenta os métodos de calibração utilizados em trabalhos realizados no Brasil, bem como o passo de tempo e os anos utilizados para as simulações.

Existem diferentes metodologias de calibração disponíveis em literatura. Andréassian (2005), por exemplo, utilizou um método chamado Subsampling, onde a escolha do intervalo de calibração é feita de maneira aleatória dentro do período total de dados disponíveis. Outro método seria o Crash Test, que consiste em aplicar o método de calibração proposto por Klemes (1986) em uma grande quantidade de bacias para garantir a confiabilidade do modelo hidrológico escolhido (ANDRÉASSIAN et al., 2009). Geralmente apenas o primeiro

Tabela 1 – Métodos de calibração utilizados para o modelo SWAT

Autor	Método de Calibração	Passo de Tempo (Período de dados)
Andrade et al. (2013)	<i>Split-Sample Test</i> (a)	Diário (2006 a 2009)
Baltokoski et al. (2010)	Calibração sem validação	Diário (2004 a 2005)
Bonumá et al. (2013)	Manual e <i>Split-Sample Test</i> (a)	Diário (2001 a 2005)
Brighenti, (2015)	<i>Split-Sample Test</i> , <i>Differential Split-Sample Test</i> e <i>Proxy-Catchment Test</i>	Mensal e Diário (2003 a 2012)
Carvalho Neto, Srinivasan e Rufino (2011)	Sem calibração	Diário (1988 a 2006)
Lelis et al. (2012)	<i>Split-Sample Test</i> (a)	Diário (2006 a 2008)
Lubitz, Pinheiro e Kaufmann (2013)	Calibração sem validação	Mensal e Diário (2006 a 2009)
Machado, Vettorazzi e Cruciani (2003)	Calibração sem validação	Mensal (1999 a 2000)
Melo Neto et al. (2014)	<i>Split-Sample Test</i> (a)	Diário (2006 a 2010)
Souza e Santos (2013)	<i>Split-Sample Test</i> (a)	Diário (1984 a 2010)
Uzeika et al. (2012)	Sem calibração	Mensal e Diário (2002 a 2006)

*Muitos autores não utilizam a nomenclatura ‘Split-Sample Test’ para definir o método de calibração, embora a metodologia seja a mesma, consistindo na divisão da amostra em dois períodos distintos.

**Split-Sample Test (a): quando não é feito o teste cruzado na amostra.

passo (*Split-Sample Test*) é utilizado na avaliação de modelos (ANDRÉASSIAN et al., 2009). Porém, a aplicação do teste de Klemes (1986) é a mais exigente encontrada na literatura, e os modeladores poderiam aprender algo a mais ao aplicar este teste completo (ANDRÉASSIAN et al., 2009).

A principal contribuição deste estudo é a aplicação e avaliação de uma metodologia hierárquica de calibração e validação para o modelo SWAT, considerando variações do clima e de uso do solo dentro de uma bacia hidrográfica. Os objetivos desse estudo são: a) testar a metodologia proposta por Klemes (1986) para o uso do modelo SWAT; b) realizar um estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Negrinho (SC) e; c) avaliar a eficiência do modelo com o uso dessa metodologia.

MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo SWAT

O SWAT foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o efeito do uso do solo no escoamento, no transporte de sedimento e na qualidade da água em bacias hidrográficas. Os componentes simulados pelo modelo incluem hidrologia, meteorologia, erosão, crescimento de plantas/culturas, manejo do solo e nutrientes. A área de estudo é dividida em sub-bacias, as quais são subdivididas em uma ou mais unidades de resposta hidrológica (HRUs) com homogeneidade de uso e tipo de solo e relevo (ARNOLD et al., 2012).

A simulação hidrológica realizada pelo modelo é dividida em duas fases: terrestre e de propagação do ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico simulado pelo SWAT é baseado na equação do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sup} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

onde, SW_t é a quantidade final de água no solo (mm), SW_o é a quantidade inicial de água no solo (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a precipitação total diária no dia t (mm), Q_{sup} o escoamento superficial no dia t (mm), E_a é a evapotranspiração total diária no

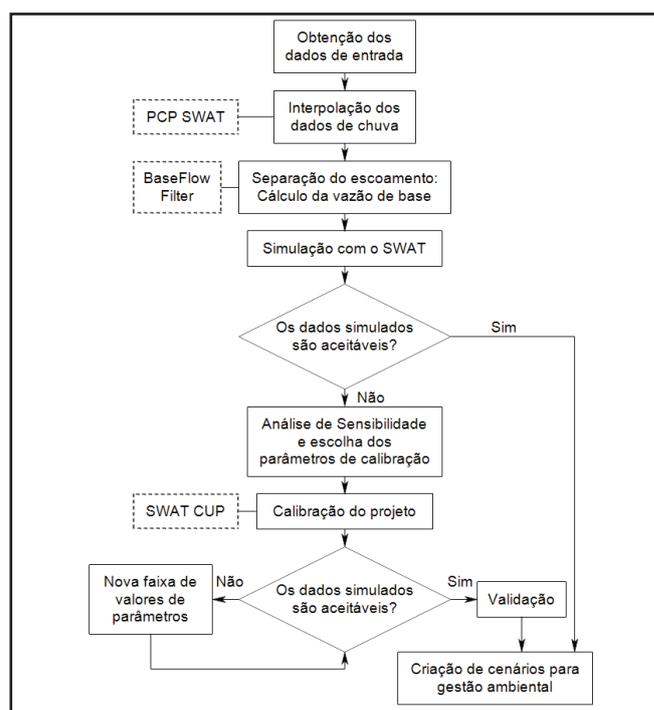


Figura 1 – Fluxograma demonstrativo dos procedimentos realizados neste estudo

dia t (mm), W_{secp} é a quantidade de água que entra e é armazenada no solo no dia t , e Q_{gw} é a vazão de retorno no dia t (mm).

A transpiração real das plantas e evaporação real do solo são estimadas com base na evapotranspiração potencial (PET) e parâmetros adicionais de solo e uso da terra. Para este estudo, a PET foi calculada a partir do REF-ET (Reference Evapotranspiration Calculator Software) pelo método de Penman-Monteith (ALLEN; JENSEN; BURMAN, 1989). O escoamento superficial foi estimado a partir do método SCS (Soil Conservation Service) curva número, e a propagação no canal foi simulada pelo método do armazenamento variável. A figura 1 apresenta os procedimentos realizados neste estudo.

O SWAT CUP

O programa integra cinco procedimentos de calibração e análise de incerteza semiautomáticos: SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol, e MCMC para a interface do modelo SWAT. O método usado para este estudo foi o SUFI2 (Sequential Uncertainty Fitting). Segundo Rouholahnejad et al. (2012) o SUFI2 utiliza o método do hipercubo latino para definição dos parâmetros e o processo inicia com uma faixa de valores determinada pelo usuário. Cada valor de parâmetro selecionado é substituído dentro do projeto do SWAT, esse processo é realizado quantas vezes o usuário achar necessário. Abbaspour et al. (2007) recomenda que o número de simulações seja relativamente grande (500-1000), para este estudos foram feitas 2001 iterações, que é máximo que o método escolhido realiza dentro da plataforma.

Análise de Sensibilidade, Calibração e Validação de Modelos Hidrológicos

A determinação dos parâmetros mais sensíveis foi feita a partir de revisão bibliográfica (ARNOLD et al., 2012; LENHART et al., 2002; MALUTTA 2012; van GRIENSVEN, et al., 2006). Por fim, foram selecionados sete parâmetros para calibração mensal e quinze para calibração diária (Tabela 2).

Os testes realizados para calibração hierárquica do modelo SWAT são os propostos por Klemes (1986):

Split-Sample Test: É o teste clássico, onde a série de dados é dividida em dois segmentos, um para calibração e outro para validação. Se a série for suficientemente longa para representar as diferentes condições climáticas, então deve ser dividida em partes iguais (50/50) e cada parcela deve ser usada tanto para validação quanto para calibração. Porém se ela não for suficientemente longa, o que é o caso deste estudo (2003 até 2012) deve ser adotado o seguinte procedimento: os primeiros 70% da série para calibração e os 30% finais para validação; e os últimos 70% para calibração e os 30% iniciais para validação (Figura 2). O modelo é dado como válido para a área, somente se os dois resultados das calibrações forem similares e os resultados das validações aceitáveis (KLEMES, 1986).

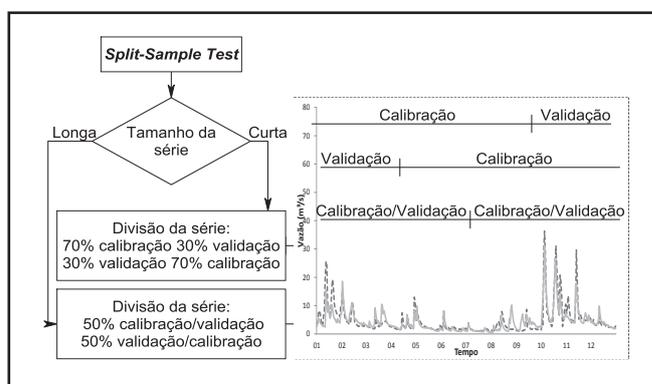


Figura 2 - Demonstração da divisão da série histórica de vazões para o Split-Sample Test

Differential Split-Sample Test: Este teste deve ser aplicado quando se pretende usar o modelo para simulações de vazões em bacias monitoradas e cenários sobre mudanças climáticas. O requisito básico para este teste é um período de dados (precipitação e vazão) longo o suficiente para serem identificadas diferentes condições históricas, como períodos

Tabela 2 – Relação dos parâmetros determinados pela análise de sensibilidade

Parâmetro	Descrição	Intervalo	Range
CN2	Curva Número inicial para condição de umidade do solo II	Mensal/Diário	35-85
SOL_AWC	Armazenamento de água no solo (mmH ₂ O mmsolo ⁻¹)	Mensal/Diário	0-1
ESCO	Coefficiente de compensação de evaporação de água no solo	Mensal/Diário	0-1
GW_DELAY	Intervalo de tempo para recarga do aquífero (dias)	Mensal/Diário	0-500
GW_QMN	Nível limite de água no aquífero livre para ocorrer o fluxo de retorno (mm)	Mensal/Diário	0-5000
GW_REVAP	Coefficiente de ascensão de água à zona de saturação	Mensal/Diário	0,02-0,2
RCHRG_DP	Coefficiente de percolação da água para o aquífero profundo (mm)	Mensal/Diário	0-1
SURLAG	Coefficiente de retardamento do escoamento superficial direto	Diário	0,05-24
CH_N2	Coefficiente de Manning para o canal principal	Diário	-0,01-0,3
CH_N1	Coefficiente de Manning para os canais tributários	Diário	0,01-30
CH_K2	Condutividade efetiva do canal (mm h ⁻¹)	Diário	-0,01-500
CH_K1	Condutividade efetiva dos canais tributários (mm h ⁻¹)	Diário	0-300
SLSOIL	Comprimento da declividade para o escoamento subsuperficial (m)	Diário	0-150
LATTIME	Escoamento lateral (dias)	Diário	0-180
CANMAX	Água interceptada (mm)	Diário	0-100

úmidos e secos. O teste consiste na calibração de anos úmidos e validação em anos secos, e vice-versa. Se o modelo for aplicável, ele deve mostrar a habilidade de transitar de forma eficiente entre todos os cenários (KLEMES, 1986). A divisão dos anos secos e úmidos foi baseada na média histórica de 12 anos de vazões e precipitações, onde anos secos são considerados abaixo da média e anos úmidos acima da média (Figura 4).

Proxy-Catchment Test: Com os resultados deste teste, pode-se avaliar a capacidade do modelo em prever impactos nas mudanças de uso do solo em uma bacia hidrográfica. Para isso, devem ser escolhidas duas bacias de uso do solo semelhante, o modelo deve ser calibrado em uma bacia e validado em outra. Novamente, se os resultados forem satisfatórios, o modelo pode ser julgado apto às simulações nesta bacia (KLEMES, 1986). O teste foi feito para os valores diários do ano de 2010, em bacias embutidas.

Funções Objetivo

Dois indicadores foram usados para identificação do ajuste do SWAT neste trabalho: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970); e Percent Bias (Pbias) (GUPTA et al., 1999). Com o uso desses indicadores é possível identificar os ajustes de altas vazões e super ou subestimação geral da amostra. As vazões simuladas em relação às observadas também foram analisadas de forma gráfica. Para um ajuste perfeito entre os dados simulados e observados o valor de NSE deve ser igual a 1, quando o resultado for ≤ 0 significa que o uso da média dos dados observados é melhor que a simulação feita. Algumas razões justificam o uso deste indicador: é altamente recomendado pela American Society of Civil Engineers (ASCE); é comumente usado (é o indicador estatístico de uso mais comum entre os usuários do SWAT), o que fornece maiores informações sobre seus valores e; estudos mostram que o NSE é a melhor função objetivo no ajuste de um hidrograma. (MORIASI et al., 2007):

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q^{mean})^2} \right] \quad (2)$$

onde, n é o número total de observações; Q_i^{obs} é a vazão observa; Q_i^{sim} ; a vazão simulada; e Q^{mean} a média da vazão observada, para as três equações.

O Percent *bias* (Pbias) avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal do Pbias é 0 (zero), valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação. Moriasi et al. (2007) também justifica o uso do coeficiente: tem uso comum na avaliação de erros no balanço hídrico e; capacidade de identificar o baixo desempenho do modelo.

$$Pbias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs})} \times 100 \quad (3)$$

As faixas de valores usadas para o julgamento satisfatório

ou não do modelo SWAT foram as propostas por Moriasi et al. (2007): $NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$.

Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN) está localizada nos municípios de Rio Negrinho e São Bento do Sul, estado de Santa Catarina, com uma área aproximada de 200 km² (Figura 3). O clima da região (segundo a classificação de Köppen) é temperado constantemente úmido, sem estação seca, com verões frescos (Cfb). A temperatura média anual varia entre 15,5 a 17,0°C, com precipitação anual média de 1720 mm, com máxima e mínima de 2500 e 1082 mm, respectivamente (EPAGRI/CIRAM, 2014). Na BHRN predominam-se Cambissolos em quase toda a sua extensão, apresentando uma pequena porção de Gleissolos nas nascentes da parte oeste da bacia. A bacia é caracterizada pela presença de Floresta Ombrófila Mista, reflorestamento de pinus, agricultura, e porção urbana (Figura 3).

A escolha da bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN), como área de aplicação desde estudo, está relacionada ao fato da bacia ser monitorada, com presença de dados de nível desde 2003 e de pontos de monitoramento de chuva, próximos a bacia, desde 1974. Além dos dados monitorados, a escolha da bacia está ligada a sua variabilidade nos usos do solo, apresentando áreas urbanizadas, agricultura, pastagens, reflorestamento e mata nativa.

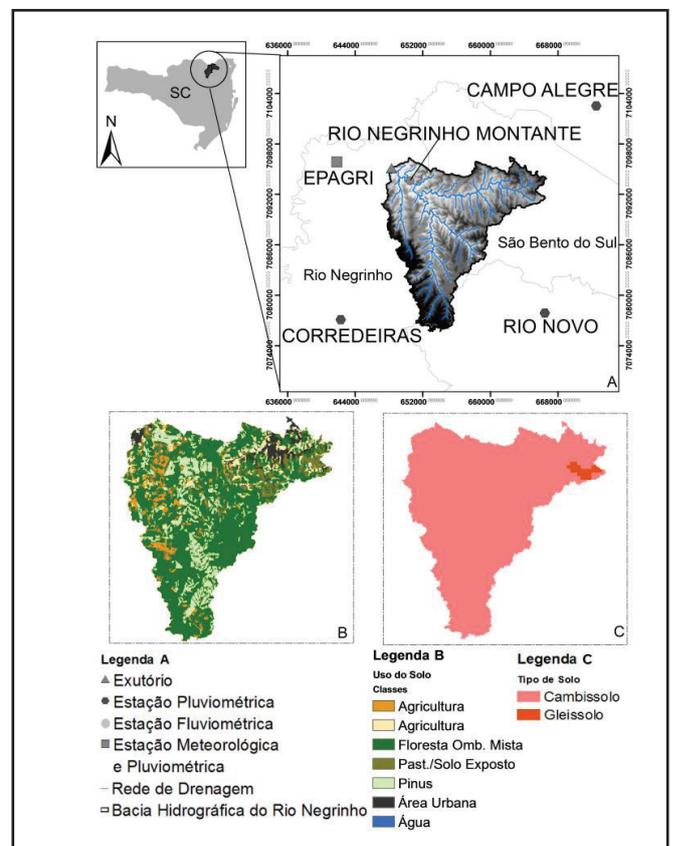


Figura 3 – Localização da Bacia hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN), pontos de monitoramento e Modelo Numérico do Terreno (A), uso do solo (B) e tipo de solo (C)

Dados Hidrológicos

O Modelo Numérico do Terreno (DEM), com uma resolução de 30m, foi feito a partir de curvas de nível e pontos cotados presentes nas cartas topográficas de Rio Negrinho e São Bento do Sul (MALUTTA, 2012). O mapa do tipo de solo foi elaborado com base no levantamento de solos (escala 1:250.000) realizado pelo CIRAM (Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina) no ano de 2004. Já para composição do mapa de uso do solo foram utilizadas imagens do satélite Landsat/TM-5 datadas de março de 2010.

Os dados meteorológicos (unidade relativa, radiação, temperatura e velocidade do vento) foram obtidos junto a EPA-GRI (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina). Os dados pluviométricos dos quatro pontos de monitoramento utilizados neste estudo, foram obtidos no site do HidroWeb. Os dados de nível utilizados, para posterior obtenção dos dados de vazão, foram obtidos a partir de monitoramento e também dados disponíveis no site do HidroWeb.

A simulação com o modelo SWAT foi realizada para o período de 2003 a 2012, além dos quatro anos de aquecimento do modelo (1999 a 2002). Esse período (aquecimento do modelo) visa estabilizar as condições iniciais de umidade do solo para os primeiros anos de simulação. Foram usados dois conjuntos de parâmetros, um para calibração mensal e outro para diária. O ordenamento dos parâmetros na análise de sensibilidade é dado pelo p-value, onde quanto mais perto do zero, mais sensível é o parâmetro. Na aplicação do SWAT nessa bacia, cada HRU corresponde exatamente a uma sub-bacia (117 sub-bacias ao total).

Interpolação dos Dados das Estações Pluviométricas

A estimativa da variabilidade espacial da chuva é fundamental na aplicação eficiente de modelos hidrológicos (ZHANG; SRINIVASAN, 2009). Arnold et al. (2012) descrevem que alguns dos resultados ineficientes publicados em estudos com o uso do SWAT podem ser parcialmente atribuídos a cobertura espacial ineficaz dos dados de chuva. Foi realizada a interpolação dos dados de chuva dos pontos de monitoramento utilizando o PCP SWAT (ZHANG; SRINIVASAN, 2009). Baseado nos resultados apresentados por Goovaerts (2000) e Zhang e Srinivasan (2009) o método escolhido para interpolação dos dados foi o de Krigagem Simples com Diferentes Médias Locais e Elevação como Variável Externa.

O método foi aplicado em dois diferentes arranjos: a) três estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras e Campo Alegre); b) quatro estações de monitoramento (EPAGRI, Corredeiras, Campo Alegre, e Rio Novo). A escolha do melhor arranjo (quatro estações interpoladas) foi baseada na comparação das simulações feitas pelo SWAT com os dados medidos de vazão. A tabela 3 apresenta, como exemplo, os resultados obtidos para o ano de 2012.

Tabela 3 - Demonstração da comparação feita para o melhor arranjo de estações para BHRN, ano de 2012

Estações	NSE	Pbias
Três estações não interpoladas	0,36	29,7
Quatro estações não interpoladas	0,56	19,8
Três estações interpoladas	0,53	21,5
Quatro estações interpoladas	0,65	21,0

Filtro para o Escoamento/Vazão de Base

Utilizou-se o filtro automático Base Flow Filter para separação dos escoamentos (ARNOLD et al., 1995). O filtro foi aplicado aos dados de vazão, disponíveis de 2002 a 2013. Sendo assim, foi possível estimar melhor o fator ALPHA_BF (Constante de recessão do escoamento de base), utilizado pelo SWAT para o cálculo do escoamento de base. O resultado final foi de um ALPHA_BF igual 0,0609 o qual foi utilizado como valor fixo em toda a bacia. Esta constante é um índice que avalia de forma direta a resposta da vazão subterrânea em função da recarga, onde valores próximos de 0,1 são representativos de locais com resposta lenta às recargas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 4 apresenta os parâmetros do ano de 2011 que foi o ano com os melhores resultados diários tanto para calibração como para validação.

Tabela 4 – Valores iniciais e finais relativos à calibração diária do ano de 2011, bem como o resultado final da análise de sensibilidade

Parâmetro	Valor Inicial	Valor Final	Sensibilidade
RCHRG_DP	0,05	A: -0,0255	0,0000
SURLAG	4	V: 1,2502	0,0002
CH_N2	0,035	V: -0,0142	0,0009
SLSOIL	0	V: 87,9296	0,0060
GW_DELAY	31	A: -21,591	0,0430
GW_REVAP	0,02	V: 0,1634	0,1750
SOL_AWC	0,13	R: -0,0056	0,2030
CH_K2	0	V: -7,9868	0,2320
CANMAX	0	V: 2,8058	0,2810
CH_K1	0,5	V: 5,5978	0,4510
CN2	73	R: 0,0898	0,5590
LATTIME	0	V: 82,7807	0,6620
GW_QMN	0	A: 2290,54	0,7180
CH_N1	0,035	V: 0,2922	0,7480
ESCO	0	V: 0,9449	0,7570

* R: o valor do parâmetro inicial é multiplicado por 1+(valor calibrado); V: o valor inicial é substituído pelo valor dado; A: o valor dado é somado ao valor inicial do parâmetro.

Em geral boas calibrações e validações, envolvem em seus períodos: representações de anos secos e úmidos; mais de uma técnica de avaliação; e a verificação se as outras saídas do modelo (e.g. evapotranspiração, vazão de base) possuem resultados coerentes (ARNOLD et al., 2012; GAN; DLAMINI;

BIFTU, 1997; KLEMES, 1986; ZHANG et al., 2015).

O primeiro passo na divisão dos anos foi o cálculo da média anual das chuvas e vazões para todo o período de dados. A figura 4 apresenta o coeficiente de escoamento para definição dos anos secos e úmidos. A escolha final dos anos foi baseada no desvio que os valores têm em relação à média anual. Os anos com valores abaixo da média (2003, 2004, 2005, 2006, 2007) foram considerados anos secos e os anos acima da média (2008, 2009, 2010, 2011, 2012) anos úmidos.

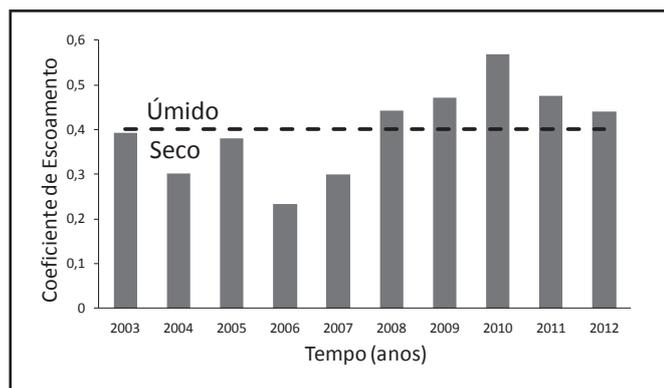


Figura 4 – Coeficiente de escoamento anual usada na divisão dos anos secos e úmidos. A linha tracejada representa a média geral de todos os anos

Na primeira parte do processo de calibração e validação do modelo SWAT para bacia hidrográfica do Rio Negrinho (Split-Sample Test), foi feita a separação da série total, em períodos distintos de calibração e validação. Para o processo mensal, a série foi dividida na estrutura 30-70. Dois arranjos foram feitos: a) os primeiros 70% da série foram destinados à calibração (2003 a 2009) e os últimos 30% a validação (2010 a 2012); b) os primeiros 30% foram destinados à validação (2003 a 2005) e os últimos 70% a calibração (2006 a 2012). Vale ressaltar que com essas divisões, as calibrações compreendem tantos anos secos, quanto úmidos. Os resultados obtidos para o intervalo mensal foram considerados aceitáveis quando avaliados pelos coeficientes NSE e Pbias, visto que os valores estão dentro da faixa considerada satisfatória ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$) (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores de NSE e Pbias para as calibrações e validações mensais pelo método Split-Sample Test

Anos	Tipo	Pbias (%)	NSE
2003-2009	Calibração	9,0	0,70
2010-2012	Validação	2,6	0,63
2006-2012	Calibração	3,4	0,73
2003-2005	Validação	18,5	0,55

A figura 5 apresenta os resultados de calibração (2003 a 2009) e validação (2010 a 2012), onde fica mais fácil de perceber como o modelo de maneira geral, subestima as vazões.

O próximo passo no processo de adequação do modelo SWAT à BHRN foi a aplicação do Differential Split-Sample

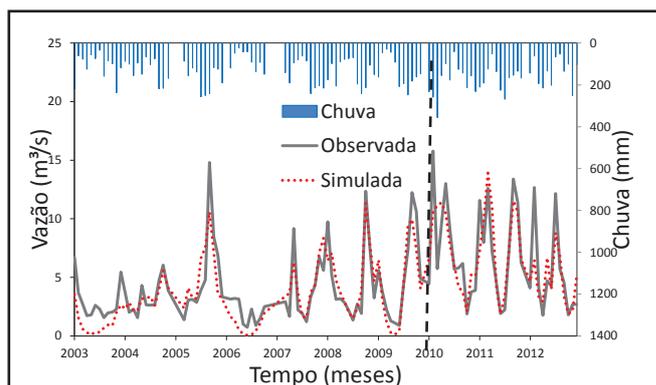


Figura 5 – Processo de calibração e validação mensal. Calibração (2003-2009) e validação (2010-2012)

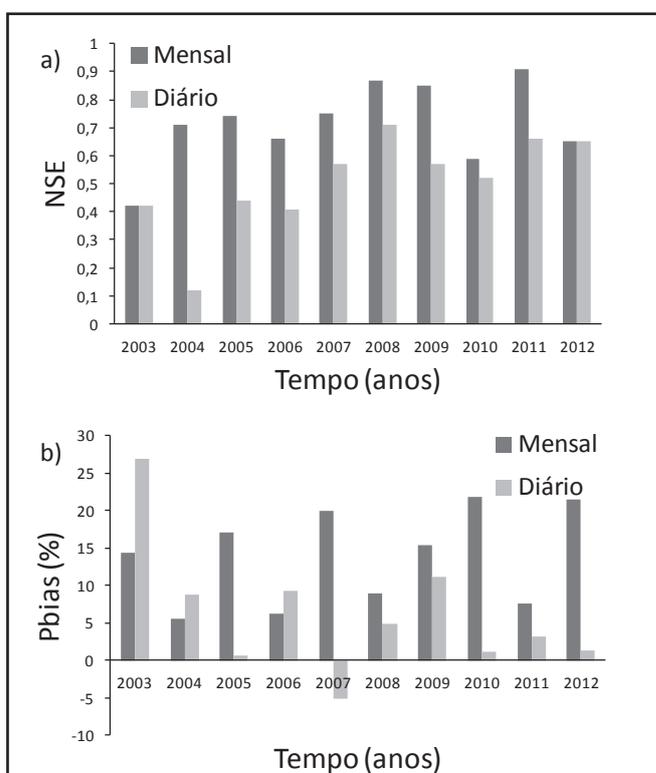


Figura 6 – Valores de NSE (a) e Pbias (b). Calibração feita pelo método Differential Split-Sample Test

Test, consistindo em um conjunto de parâmetros calibrado em um ano, deve validado em todos os outros. A figura 6 apresenta os valores calibrados, diários e mensais, do NSE (Figura 6a) e Pbias (Figura 6b) para todos os anos separadamente. De maneira geral as calibrações mensais apresentam melhores valores dos que as calibrações diárias. Tanto que se julgarmos o SWAT apenas pelos valores de calibração mensal, o modelo apenas teve problemas para a simulação de 2003, onde os valores de NSE, não estão dentro do padrão estabelecido por Moriasi et al. (2007) ($NSE \geq 0,5$ e $Pbias \leq \pm 25\%$). Os melhores anos de calibração são 2008 e 2011.

A tabela 6 mostra o processo calibração e validação para os intervalos diários e os valores do NSE e Pbias. A ‘entrada’ representa os valores de vazão do referente ano, e a ‘saída’ são os melhores valores calibrados de cada ano. Quando analisados de

Tabela 6 – Apresentação dos valores diários do NSE e Pbias, na aplicação do Differential Split-sample Test. A ‘entrada’ representa os valores de vazão do referente ano, e a ‘saída’ são os melhores valores calibrados de cada ano. Destacados em cinza os melhores valores de $NSE \geq 0,5$ e $Pbias < \pm 25\%$ para as validações; e com bordas são os valores calibrados de cada ano

Entrada (Calibração)	2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		
	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	Pbias	NSE	
Saída (Validação)	Vazão ano seco / Calibração ano seco										Vazão ano úmido / Calibração ano seco										
	2003	27,0	0,42	8,7	-0,48	4,2	0,02	4,4	0,4	-10,6	0,55	-9,5	0,65	-0,8	0,39	2,8	0,4	-10,9	0,55	-18,0	0,39
2004	43,4	0,15	8,8	0,12	-0,1	0,24	47,1	-0,58	-15,1	0,53	-8,1	0,58	5,0	0,54	4,4	0,49	-4,7	0,57	-1,3	0,52	
2005	57,4	0,01	11,4	0,06	0,7	0,44	58,5	-0,27	-8,6	0,32	-4,0	0,42	10,5	0,42	8,7	0,31	-4,7	0,45	2,8	0,36	
2006	49,2	0,15	3,9	0,01	-0,6	0,41	9,3	0,42	-16,2	0,45	-13,4	0,5	1,1	0,47	-1,3	0,41	-12,9	0,51	-9,1	0,47	
2007	53,2	0,17	7,8	-0,14	8,0	0,34	40,1	0,15	-5,2	0,57	-3,2	0,62	9,1	0,52	7,1	0,46	-4,9	0,62	1,7	0,52	
	Vazão ano seco / Calibração ano úmido										Vazão ano úmido / Calibração ano úmido										
	2008	66,4	0,04	18,1	-0,28	12,6	0,26	72,7	-0,61	-0,5	0,56	4,9	0,71	17,5	0,54	14,6	0,45	1,7	0,66	11,3	0,53
	2009	59,7	0,04	3,9	0,01	1,6	0,44	61,4	-0,32	-13,9	0,42	-9,5	0,54	11,2	0,57	4,7	0,42	-9,4	0,57	-0,1	0,49
	2010	59,1	0,07	5,3	-0,08	0,9	0,44	62,9	-0,39	-15,0	0,47	-7,7	0,59	6,9	0,53	1,2	0,52	-8,2	0,61	0,5	0,52
	2011	80,5	-0,29	61,9	-0,55	40,0	0,21	83,7	-0,99	20,5	0,47	3,3	0,63	16,0	0,53	11,0	0,44	3,1	0,66	8,8	0,54
	2012	62,2	0,03	7,1	-0,05	1,6	0,46	66,9	-0,44	-11,9	0,46	-7,7	0,57	7,2	0,53	5,7	0,43	-9,0	0,58	1,3	0,56

maneira geral, ou seja, pela comparação dos valores calculados, com o proposto como satisfatório ($NSE \geq 0,5$) os anos úmidos (2008 a 2012) têm calibrações e validações mais eficientes que os anos secos (2003 a 2007). Os parâmetros do ano de 2003 não são validados de maneira favorável por nenhum dos outros anos, porém com a comparação feita dentro próprio ano, ele é melhor validado pelos anos também secos; o mesmo padrão ocorre com o ano de 2004. Os anos de 2005 e 2007 são os melhores anos secos de validação, geralmente bem validados tanto por períodos secos quanto úmidos. O ano de 2006, o mais seco da série, apresenta calibração razoável (NSE de 0,44), porém não é bem validado por nenhum outro ano, exceto pelo ano de 2003 (NSE de 0,40). Os anos úmidos se comportam de maneira mais homogênea, onde são bem validados pelos dois períodos, seco e úmido, fato que pode estar associado à escolha da função objetivo (NSE) para calibração automática, a qual prioriza os valores mais altos de vazão.

Em resumo, para este estudo, anos úmidos são bem validados tanto por anos secos como por anos úmidos (sem exceção). Já anos secos nem sempre validam anos secos, e anos úmidos também nem sempre validam satisfatoriamente anos secos. Um ponto interessante, quando se observa os anos mais extremos, 2006 para seco e 2010 para úmido, é que o modelo SWAT apresenta comportamento inferior relativo aos outros anos. Se o propósito é a previsão de cenários úmidos, a série histórica tanto pode ser de anos secos ou úmidos, mostrando assim que o modelo SWAT, quando calibrado automaticamente com a função objetivo NSE , é bem representativo quando pretende trabalhar com vazões altas.

Durante anos secos e úmidos, o valor do Pbias, tende a variar entre os diferentes períodos de autocalibração, o método é muito utilizado quando se pretende avaliar a eficiência da calibração e validação de modelos hidrológicos. Em princípio o modelo SWAT, tem melhor avaliação quando se observa os valores do Pbias. Entre os anos de 2007 a 2012 todos os valores, tanto a calibração quanto a validação, estão dentro da faixa aceitável

($Pbias \leq \pm 25\%$). Os únicos anos que apresentam significativo problema de validação são os anos de 2003 e 2006, nenhum dos outros anos é capaz de proporcionar uma boa validação para esses anos, porém seus valores de calibração validam bem os outros anos. Os parâmetros calibrados no ano de 2011, ao contrário, são bem validados por todos os anos, mas incapaz de validar adequadamente os anos secos.

A validação nos anos secos é sempre subestimada, exceto para o ano de 2007. Nos anos úmidos esse padrão não corre, valores são superestimados para os anos de 2008 e 2011, subestimados para os anos de 2009 e 2010. Portanto, quando se avalia a calibração e validação do SWAT baseando-se na capacidade do modelo de transitar de forma eficiente entre cenários secos e úmidos, o modelo: anos úmidos são sempre bem validados, tanto por períodos secos como úmidos. Já os anos secos, nem sempre são bem validados por períodos secos e úmidos. Rahbeh, Chanasyk e Miller (2013), também aplicou o método Differential Split-Sample Test, em uma bacia de aproximadamente 34 km² de múltiplos usos do solo, e obteve resultados semelhantes aos deste estudo, onde o modelo SWAT apresentou melhor desempenho em cenários úmidos.

Para o Proxy-Catchment Test foram utilizados os dados de monitoramento, medidos no exutório da bacia de estudo (Figura 3). Como são bacias embutidas o teste mostra se o modelo apresenta ainda maior validade geral, e capacidade de prever mudanças no uso do solo.

O teste envolve a calibração do modelo para uma bacia (Rio Negrinho Montante) e, em seguida, execução do teste de validação em outra, que para esse estudo, são os dados do exutório da BHRN. O teste foi feito para os valores diários do ano de 2010, que apresenta boa calibração para toda sua série (NSE de 0,52 e $Pbias$ de 1,2%), mostrando bom ajuste dos picos e volumes para o ano.

A série de dados monitorados no exutório da BHRN compreende o período de 21/05/2010 a 17/11/2010, portando na comparação entre calibração e validação, foi utilizado esse

Tabela 7 – Médias anuais dos volumes de escoamento, medidos e simulados, tanto para os dados brutos (simulados no SWAT sem calibração), como para os dados calibrados no passo diário e mensal

	Ano	Chuva (mm)	Escoamento total (mm)		Escoamento superficial (mm)		Escoamento de base (mm)	
			Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido*	Simulado
Bruto	2003-2012	1724	715	1059	239	347	476	712
CM	2003-2012	1724	715	823	239	331	476	493
CMS	2003-2012	1724	715	827	239	330	476	497
CDS	2003-2012	1724	715	822	239	439	476	384

CM: Calibração mensal 2003-2009; CMS: Calibração mensal para os anos separados; CDS: Calibração diária para os anos separados; EB: Escoamento de base; ES: Escoamento superficial; Medido: valores encontrados a partir da separação dos escoamentos realizado pelo filtro automático proposto por Arnold et al. (1995).

intervalo para as duas bacias. Na calibração (Figura 7a), quando analisamos o período separadamente, os valores obtidos são inferiores aos da série total, com um NSE de 0,33 e Pbias de 1,5%.

O processo de validação no exutório da BHRN, não foi eficiente para o ajuste das vazões mais altas (NSE de 0,0), porém, extremamente eficiente para os volumes (Pbias de 0,1%) (Figura 7b).

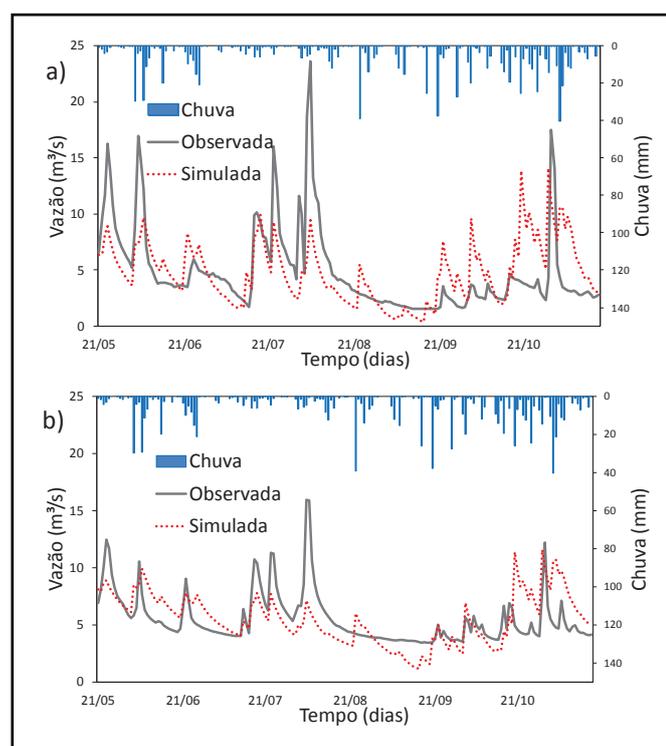


Figure 7 – Método Proxy-catchment. Calibração (a) com os dados da estação Rio Negrinho Montante e validação (b) com os dados do exutório da bacia

Mostrando que o SWAT foi ineficaz, nesse teste, em prever o ajuste dos picos, porém houve uma compensação dos volumes na estimativa do balanço hídrico. É importante relatar também os erros relativos às curvas-chave. O desvio médio para a curva da estação Rio Negrinho Montante é de 6% e que pode ser considerado aceitável para o método, porém o desvio médio da curva em relação aos valores observados de vazão para o exutório da bacia é de 15%, com valores pontuais que chegam a 80% de desvio, para a vazão de $5\text{m}^3/\text{s}$, por exemplo. Este fato

deve-se a pequena quantidade de medições utilizadas na elaboração da curva, sendo de apenas 15 medições para o exutório. Mostrando que a ineficiência dos resultados para este teste, não está relacionada necessariamente com a metodologia em si, mas com a quantidade de dados disponíveis para o teste. O fato de que o intervalo utilizado é a parte mais seca da amostra, pode, também, ser uma hipótese de causa dos baixos valores de NSE.

A tabela 7 apresenta para avaliação dos volumes dos escoamentos, a média de todos os anos simulados. Nela são expostos os resultados dos cálculos para simulações diárias e mensais. A vazão total representa 42% do total de chuva que chega à bacia (1724 mm/ano), sendo 67% de escoamento de base e 33% de escoamento superficial. Os valores de vazão de base apresentados como ‘medidos’, são os encontrados pela separação dos escoamentos, realizado no filtro automático Base Flow Filter proposto por Arnold et al. (1995).

Para a simulação bruta, os valores são superestimados, onde a vazão total é 61% da chuva que chega à bacia e a proporção dos escoamentos é mantida (33% para o escoamento superficial e 67% para o de base). Com as calibrações mensais e diária, a vazão total passa a ser cerca de 48%. Para a calibração mensal de 2003 a 2009 e para os anos separadamente os valores do escoamento superficial e de base são 40% e 60% respectivamente. Quando a calibração diária é feita, a proporção dos escoamentos é 53% para o escoamento superficial e 47% para o de base. Portanto quando analisamos de maneira geral os volumes dos escoamentos simulados pelo SWAT, a calibração mensal apresentou os valores mais próximos dos considerados como reais para este estudo.

CONCLUSÕES

O modelo SWAT mostrou-se representativo quando o objetivo é a simulação de cenários de clima úmido, mesmo quando a série de dados é considerada seca, o modelo consegue prever satisfatoriamente a transição entre os períodos, porém a mesma eficiência nos resultados não ocorre quando o intuito é a simulação de cenários mais secos, algumas vezes o modelo é bem sucedido (e.g. 2007) outras não (e.g. 2003 e 2006), portanto deve-se ter cuidado quanto à escolha da série histórica, ela deve ser espacialmente bem distribuída e representar corretamente os objetivos do usuário.

No teste para a verificação da eficiência do modelo em

prever mudanças no uso do solo, o modelo só apresentou bom ajuste para o Pbias (0,1%), já para NSE, que avalia o bom ajuste dos picos, o modelo não se mostrou representativo (NSE de 0,0), este fato pode estar associado que nesta etapa do estudo a quantidade de dados disponíveis é relativamente pequena (menos de um ano), quando comparada às outras fases do estudo, e o intervalo avaliado (21/05/2010 a 17/11/2010) representa a parte mais seca da amostra, o que pode levar o modelo não efetuar de maneira eficiente uma simulação que considere a variabilidade espacial da bacia. Aconselha-se então, que na realização deste teste, uma série de dados mais representativa seja utilizada.

Na análise dos resultados, tanto nos considerados eficientes ou não, as hipóteses de erros nos dados de entrada (e.g. vazão e chuva) e na própria concepção do modelo, devem ser considerados. Recomenda-se a aplicação do método para o modelo SWAT, porém com a adição de análises de incerteza, para que os estudos possam ser estendidos na criação de cenários futuros em estudos de gestão ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos membros do Laboratório de Hidrologia da UFSC pelo auxílio no campo, ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Rio Negrinho, também ao CNPq pela bolsa de estudos e a FINEP pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I.; SIBER, R.; BOGNER, K.; MIELEITNER, J.; ZOBRIST, J.; SRINIVASAN, R. Modelling of hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.*, v. 333, n. 2-4, p. 413-430, Feb. 2007.

ALLEN, R. G.; JENSEN, J. L.; BURMAN, R. D. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agron. J.*, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R.; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ANDRÉASSIAN, V. Three Riddles in Hydrological Modelling. 2005. 154 f. Thesis (Habilitation Thesis) - Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2005.

ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; BERTHET, L.; LE MOINE, N.; LERAT, J.; LOUMAGNE, C.; OUDIN, L.; MATHEVET, T.; RAMOS, M. H.; VALÉRY, A. Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, v. 13, p. 1757-1764, Set./Oct. 2009.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT,

G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. *Ground Water*, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, Nov. 1995.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D. N.; GASSMAN, P. W.; ABBASPOUR, K. C.; WHITE, M. J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R. D.; VAN GRIENSVEN, A.; VAN LIEW, M. W.; KANNAN, N.; JHA, M. K. SWAT: Model use calibration and validation. *Trans. ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, May 2012.

BALTOKOSKI, V.; TAVARES, M. H. F.; MACHADO, R. E.; OLIVEIRA, M. P. Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos rios Conrado e Pinheiro – Pato Branco (PR). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 34, n. 1, p. 253-261, nov. 2010.

BEVEN, K. J. Rainfall-runoff modelling: The primer. Chichester: John Wiley & Sons Ltda. 2001.

BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; MONTEIRO, J. A. F.; ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R. Modeling surface hydrology, soil erosion, nutrient transport, and future scenarios with the ecohydrological SWAT model in Brazilian watersheds and river basins. *Tópicos Ci. Solo*, v. 9, p. 241-290, 2015.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; PAIVA, E. M. C. D. Hydrology evaluation of the Soil and Water Assessment Tool considering measurement uncertainty for a small watershed in Southern Brazil. *Appl. Eng. Agric.*, v. 29, n. 2, p. 189-200, 2013.

BONUMÁ, N. B.; ROSSI, C. H. G.; ARNOLD, J. G.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P.; ALLEN, P. M.; VOLK, M. Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. *J. Environ. Qual.*, v. 43, n. 1, p. 55-66, Jan. 2014.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 14, n. 3, p. 37-50, jul./set. 2009. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/63107567dc8209a197cc03d1d8889189_df143d251c074afcd11a3856220dad31.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2015.

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L.; SRINIVASAN, R.; BONUMA, N. B.; MENDIONDO, E. M. A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, v. 8, n. 3, p. 1-27, June 2015.

BRIGHENTI, T. M. *Modelagem Hidrológica e Avaliação de Diferentes Métodos de Calibração para o Modelo SWAT*. 2015 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

- CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano. *RG4: revista geografia acadêmica*, v. 5, n. 2, p. 30-40, 2011. Disponível em: <<http://revista.ufr.br/index.php/rga/issue/viewIssue/183/10>>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 6, n. 1, p. 95-118, jan./mar. 2001. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/b0a907b2f768dd79ee670aedd81b1e87_a70d73b3aa2ef8d5a8926eab4d2513e3.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2015.
- DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1001-1007, Mar. 2015.
- EAWAG. SWAT-CUP. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index_EN>. Acesso em: 3 ago. 2015.
- EPAGRI/CIRAM. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina/Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. *Zoneamento Agroecológico*. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <<http://ciram.epagri.rct-sc.br/portal/website/index.jsp?url=jsp/agricultura/zoneAgroecologico.jspetipo=agricultura>>. Acesso em: 18 fev. 2014.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 1, p. 243-254, jan./mar. 2014. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/170c7ff9bc41f7f845e3bd393b13e7a9_f87a7958332fa277d40514f40c46809a.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2015.
- GAN, T. Y.; DLAMINI, E. M.; BIFTU, G. F. Effects of model complexity and structure. data quality. and objective functions on hydrologic modeling. *J. Hydrol.*, v. 192, n. 1, p. 81-103, set./out. 1997.
- GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; GREEN, C. H.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, v. 50, n. 4, p. 1211-1250, Feb. 2007.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.*, v. 228, n. 1-2, p. 113-129, Feb. 2000.
- GUPTA, H.V.S.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P.O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n. 2, p. 135-143, 1999.
- KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, v. 31, n. 1, p. 13-24, Oct. 1986.
- 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. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 36, n. 2, p. 623-634, nov. 2012.
- LENHART, T.; ECKHARDT, K.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Phys. Chem. Earth*, v. 27, p. 645-654, Jan. 2002.
- LUBITZ, E.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Simulação do transporte de sedimentos, nitrogênio e fósforo na bacia do Ribeirão Concórdia, SC. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 18, n. 2, p. 39-54, abr./jun. 2013. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/346e33d68b4bed4b989d4b1a53ea37c7_c765c686ac26110c90dfbe2e56f0ac20.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2014.
- MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; CRUCIANI, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 8, n. 1, p. 147-155, jan./mar. 2003. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/d381fd1f8014af83dee339810ad0e459_cface22597be53aeb056e7d77f15949b.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2014.
- MALUTTA, S. *Estudo Hidrossedimentológico da Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho - SC Com o Modelo SWAT*. 2012. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- MELO NETO, J. O.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Simulação hidrológica escalar com o Modelo SWAT. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 177-188, jan./mar. 2014. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/aa715a0a5d84ae2de251e566c78cd534_160fb2b3ab09b66e99b8e84e73bdd40c.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, v. 50, n. 3, p. 885-900, Mar. 2007.
- MORIASI, D. N.; WILSON, B. N.; DOUGLAS-MANKIN, K. R.; ARNOLD, J. G.; GOWDA, P. H. Hydrologic and water quality models: use. calibration. and validation. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, v. 55, n. 4, p. 1241-1247, Jun./Aug. 2012.
- MULETA, M. K. Improving model performance using season-

based evaluation. *J. Hydrol. Eng.*, v. 17, n. 1. p. 191-200, Jan. 2012.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, v. 10, n. 3, p. 282-290, Apr. 1970.

RAHBEH, M.; CHANASYK, D.; MILLER, J. Two-way calibration-validation of SWAT Model for a small prairie watershed with short observed record. *Can. Water Resour. J.*, v. 36, n. 3, p. 247-270, Jan. 2013.

ROSSI, C. G.; DYBALA, T. J.; MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; AMONETTI, C.; MAREK, T. Hydrologic calibration and validation of the Soil and Water Assessment Tool for the Leon River watershed. *J. Soil Water Conserv.*, v. 63, n. 6, p. 533-541, Nov./Dec. 2008.

ROUHOLAHNEJAD, E.; ABBASPOUR, K. C.; VEJDANI, M.; SRINIVASAN, R.; SCHULIN, R.; LEHMANN, A. A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environ. Model. Software*, v. 31, p. 28-36, May 2012.

SOUZA, R. M.; SANTOS, I. Estimativa da variabilidade espacial de vazões mínimas na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Negro, região sul-brasileira, com aplicação do modelo SWAT. *RAEGA: espaço geográfico em análise*, v. 28, p. 134-153, maio 2013. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/raega/article/view/32304/20516>>. Acesso em: 03 ago. 2014.

TRAMBAUER, P.; MASKEY, S.; WINSEMIUS, H.; WERNER, M.; UHLENBROOK, S. A review of continental scale hydrological models and their suitability for drought forecasting in (sub-Saharan) Africa. *Phys. Chem. Earth*, v. 66, p. 16-26, July 2013.

UZEIKA, T.; MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO, M. Use of the SWAT model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 36, n. 2, p. 1-9, Mar./Apr. 2012.

VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, v. 324, p. 10-23, 2006.

YANG, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. *Hydrol. Processes*, v. 14, n. 3, p. 403-416, Feb. 2000.

ZHANG, D.; CHEN, X.; YAO, H.; LIN, B. Improved calibration scheme of SWAT by separating wet and dry seasons. *Ecol. Model.*, v. 301, p. 54-61, Apr. 2015.

ZHANG, X.; SRINIVASAN, R. Gis-Based Spatial Precipitation Estimation: a comparison of geostatistical approaches. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 45, n. 4, p. 894-906, June 2009.

ZHU, Q.; ZHANG, X.; CHONG, G.; XU, Y. P. Investigating the uncertain and transferability of parameters in SWAT Model under climate change. *Hydrol. Sci. J.*, In press, 2015.

Contribuição dos autores:

Tássia Mattos Brighenti: Desenvolvimento do trabalho, responsável pela análise dos dados.

Participou na elaboração da ideia principal. Realizou a pesquisa bibliográfica, simulações, estruturação e a redação do material apresentado nesse artigo.

Nadia Bernardi Bonumá: Professora orientadora, participou na elaboração da ideia principal, contribuiu na análise dos resultados e redação do artigo.

Pedro Luiz Borges Chaffe: Participou na elaboração da ideia principal, contribuiu na análise dos resultados e redação