

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO FRAMEWORK JAMS NA CONTRUÇÃO DO MODELO CHUVA-VAZÃO PARA BACIA HIDROGRÁFICA EM ZONA DE AFLORAMENTO DO AQUÍFERO GUARANI

*Aline da Silva Ribeiro*¹; *Marjolly Priscilla Shinzato*²; *Edson Cezar Wendland*³; *Jackson Roehrig*⁴

Resumo – O sistema nacional de informações de recursos hídricos ainda não monitora todos os rios brasileiros, refletindo na carência de informações, o que prejudica sua gestão. Nesse contexto, os modelos hidrológicos destacaram-se por tentar suprir essa insuficiência de dados. Entretanto, nota-se que muitos modelos não geram bons resultados quando executados fora da área de estudo onde foram criados. Por isso, devido a possibilidade de reestruturação de modelos, este trabalho avaliou o *framework* JAMS na construção de modelo chuva-vazão específico para uma bacia hidrográfica no Brasil, a qual está inserida em zona de afloramento de um dos mais importantes aquíferos do mundo, o Sistema Aquífero Guarani. O JAMS apresentou-se como um sistema simplificado para uso e flexível diante das adaptações necessárias para tratar e gerar dados compatíveis com as características climatológicas e hidrológicas do país. O modelo construído, JAMS-Guarani, mostrou-se eficiente na predição da resposta hidrológica da bacia avaliada, apresentando um coeficiente de *Nash-Sutcliffe* positivo e um baixo valor de erro absoluto do volume (10,58). Portanto, o JAMS mostrou-se como um candidato potencial para expansão da série histórica dos dados fluviométricos da bacia do Ribeirão da Onça, importante para o aperfeiçoamento dos estudos de recarga e proteção do SAG.

Abstract – The National information system of water resources has not monitored all Brazilian rivers yet, mirroring the information lack, what affect its management. In this context, the hydrological models stood out for trying to overcome this lack of data. However, it was noticed that many models do not generate good results when they performed outside the study area where they were created. Therefore, due to the possibility of models restructuring, this study evaluated the JAMS framework in the construction of rainfall-runoff model for a specific river basin in Brazil, which is inserted into an area of outcrop of the most important aquifers in the world, Guarani Aquifer System. The JAMS presented as a simplified system to use and flexible for adjustments required to process and generate compatible data with the climatological and hydrological characteristics of the country. The constructed model, JAMS-Guarani, was efficient in predicting the hydrological response of the evaluated watershed, presenting a positive Nash-Sutcliffe coefficient and a low absolute volume error (10.58). Hence, the JAMS showed up as a potential candidate for expansion in the time series of streamflow data for *Ribeirão da Onça* watershed, which is important for improving the studies of recharge and protection of the SAG.

Palavras-Chave – Escoamento Superficial, Modelagem Hidrológica, Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça.

¹ Mestranda em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Endereço: av. Trabalhador São-carlense, 400 - Departamento de Hidráulica e Saneamento - CEP: 13566-590 São Carlos/ SP, Brasil, Tel: (16) 3373-8270, e-mail: alinee.ri@gmail.com

² Doutoranda em Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP, e-mail: marjollyps@gmail.com

³ Professor Titular do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da EESC/USP, e-mail: ew@sc.usp.br

⁴ Professor da Cologne University of Applied Sciences, Alemanha, email: jackson.roehrig@fh-koeln.de

1 INTRODUÇÃO

O homem está constantemente alterando os mecanismos naturais do ambiente que controlam o ciclo da água. Entre os componentes do ciclo hidrológico, a resposta do rio aos sinais climáticos e à modificação da paisagem – desmatamento, expansão da agricultura e urbanização – é de interesse especial porque a vazão representa uma síntese complexa de precipitação, evapotranspiração e outras variáveis da bacia hidrográfica. Portanto, para se controlar os impactos das alterações no comportamento do escoamento superficial é fundamental conhecer os regimes pluviométricos de uma bacia hidrográfica, bem como o comportamento de seus rios, suas sazonalidades e vazões. No entanto, o monitoramento dos corpos d'água ainda não atende à demanda por dados no Brasil – menos de 17% dos rios brasileiros estão cadastrados no sistema nacional de informações de recursos hídricos – justificando-se o interesse pelo desenvolvimento de métodos e ferramentas que auxiliem a gestão das águas.

Os modelos hidrológicos surgiram como uma tentativa de suprir e/ou complementar dados hidrológicos indisponíveis, da maneira mais representativa e aproximada da dinâmica real de uma bacia hidrográfica. São desenvolvidos com o intuito de responder às questões decorrentes de cada época, dando ênfase aos processos hidrológicos mais representativos de cada região, gerando diferentes configurações. O número de combinações possíveis para diferentes métodos em cada componente do ciclo hidrológico é extenso, por isso cada pesquisador tende a escolher pelo modelo que apresentem melhores resultados nas bacias da região avaliada através de comparações de eficiências. Este tipo de escolha não é definitivo, uma vez que as incertezas nos processos e as dúvidas na representatividade dos dados são maiores que as diferenças entre as equações utilizadas. Por isso a escolha por um modelo que utiliza métodos mais familiares ou compatíveis com a região estudada é a opção mais apropriada.

A partir das dificuldades e restrições de uso de alguns modelos chuva-vazão com disponibilidade livre no Brasil apresentadas na literatura, este trabalho avaliou o uso do JAMS, um *framework* de modelagem hidrológica gratuito, para construção de um novo modelo chuva-vazão (JAMS-Guarani), visando a expansão de séries históricas de escoamento superficial. Portanto, aqui são apresentadas as conclusões parciais do diagnóstico sobre o JAMS como uma ferramenta para construção de um modelo hidrológico específico para a bacia do Ribeirão da Onça - Brotas - SP - Brasil, a qual está inserida na zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), um dos mais importantes do mundo. Este trabalho é parte complementar de um projeto maior do grupo de pesquisa do Laboratório de hidráulica Computacional (LHC), que estuda a recarga hidráulica do SAG através do monitoramento e interpretação de dados hidrológicos dessa bacia piloto.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e dados hidrológicos

A bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça foi definida para ser bacia piloto e área de estudo do LHC desde 2004, por situar-se inteiramente em zona de afloramento do SAG e pela disponibilidade de dados adequados espacial e temporalmente. Barreto (2006) iniciou a instalação de equipamentos e poços nessa bacia piloto para estimar as recargas direta e profunda do SAG, através do método do balanço hídrico. Em seguida, Gomes (2008) estudou a recarga profunda estimando o valor médio do rendimento específico (S_y) e também aplicou o balanço hídrico na bacia. Posteriormente, Maldonado (2009) construiu uma seção de controle de vazão para monitorar o escoamento superficial dessa bacia, pois os dados de escoamento não eram satisfatórios até então, devido à mudança do leito do rio e à influência de um sistema de bombeamento a jusante da seção de medição da vazão. E atualmente, esses dados do monitoramento da bacia estão sendo utilizados para a construção do modelo chuva-vazão proposto por este trabalho.

A bacia do Ribeirão da Onça (Figura 1) localiza-se no município de Brotas, ao centro-leste do estado de São Paulo, entre os paralelos 22°10' e 22°15' de latitude sul e entre os meridianos 47°55' e 48°00' de longitude oeste.

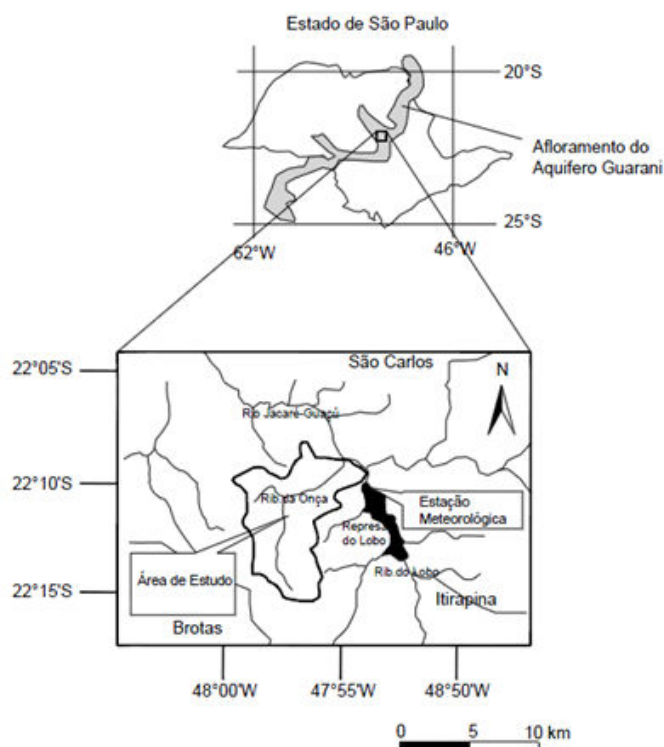


Figura 1: Localização da área de estudo - Bacia piloto do Ribeirão da Onça - Brotas/SP/Brasil

A bacia tem 65km² de área de drenagem e possui clima subtropical úmido com chuvas de verão, apresentando variação para clima tropical úmido com inverno seco. A precipitação média anual da região varia de 1300 a 1400 mm. Sua cobertura é formada por um sedimento superficial encontrado em grande parte do interior do Estado de São Paulo, denominado Sedimento Cenozóico, caracterizado por ser pouco compacto com partículas razoavelmente selecionadas, proporcionando uma estrutura bastante porosa à bacia. A agricultura e a pecuária são predominantes na região e vem substituindo sua cobertura vegetal original – Cerrado – por eucalipto, citros, pastagem, cana-de-açúcar, soja (Figura 2).

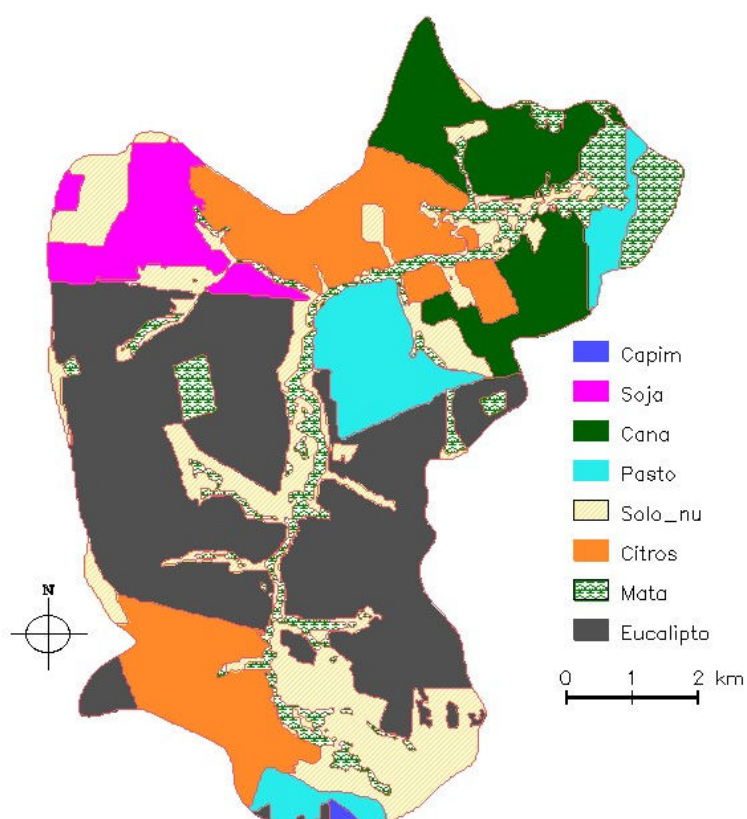


Figura 2: Distribuição espacial das culturas de soja, cana, pasto, citros e eucalipto na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, onde originalmente era Cerrado (adaptado de TANIKAWA & MANZIONE, 2010).

Os dados climatológicos (radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade dos ventos, pressão atmosférica e precipitação) foram disponibilizados pelo Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) que se localiza a aproximadamente 7km do centro da bacia. O monitoramento das vazões do Ribeirão da Onça vem sendo acompanhado em seção de medição específica desde dez/2007, com medições quinzenais auxiliadas por molinete hidrométrico e medições constantes através de um linígrafo e de um equipamento medidor de velocidade, o Flo-Tote, conforme descrito em Maldonado (2009).

2.2 Análise da estrutura do sistema *framework* JAMS

Por não existir um tutorial específico para o *framework* JAMS, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre suas funcionalidades e exemplos de sua aplicação. Os materiais com maior nível de detalhamento sobre o JAMS foram encontrados no site da Universidade Friedrich Schiller de Jena, Alemanha, escritos e/ou disponibilizados pelo criador do *framework*, o Professor Dr. Peter Krause. São disponibilizados ainda materiais com exemplos de aplicações no *site* criado para a divulgação deste sistema *framework* (<http://jams.uni-jena.de/>). Essa investigação detalhada foi fundamental para a pesquisa, pois as informações sobre os equacionamentos dos processos simulados, da estrutura dos modelos e dos resultados obtidos com as simulações foram relevantes durante a análise dos cálculos dos processos e para a escolha dos módulos a serem utilizados na construção do modelo para a bacia do Ribeirão da Onça. Além disso, foi utilizada a revisão apresentada por Gibin & Wendland (2008) sobre outros modelos hidrológicos, também aplicados na mesma área de estudo, a fim de apontar as principais vantagens de uso do *framework* de modelagem hidrológica JAMS em estudos hidrológicos.

2.3 Reestruturação J2000 e construção de modelo chuva-vazão

Dentre os modelos JAMS, o J2K – também chamado de J2000 – foi escolhido para o presente estudo, por se tratar de um modelo hidrológico chuva-vazão. Porém, para a aplicação do J2000 em bacias hidrográficas brasileiras foi necessária uma adaptação dos seus módulos originais, principalmente devido às diferenças entre as características climáticas e de natureza dos dados hidrológicos sul-americanos e europeus. A reestruturação do J2000 foi realizada utilizando-se o *Juice Builder*, uma interface do JAMS para a criação de arquivos XML que definem a estrutura dos modelos.

Após essa reestruturação, um modelo chuva-vazão – denominado JAMS-Guarani – foi construído para ser aplicado ao caso particular da bacia piloto, dando continuidade aos estudos de recarga hidráulica do SAG. Para sua construção seguiu-se as etapas de discretização e parametrização das propriedades físicas da bacia hidrográfica.

2.3.1 Discretização da bacia

Como uma bacia hidrográfica pode apresentar regiões com características físicas distintas, seu comportamento hidrológico também varia de forma espacialmente distribuída, por isso, a bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça foi dividida em unidades de resposta hidrológica (URH), as quais

foram delineadas utilizando-se um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 90mx90m (imagens SRTM); mapas digitais da geologia (PERROTTA *et al.*, 2005), uso e ocupação do solo (TANIKAWA & MANZIONE, 2010) e dos tipos de solo (CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008) da bacia piloto e; ferramentas do sistema de informação geográfica (SIG) *ArcGis9.3*.

2.3.2 Parametrização

Por ser um modelo físico, alguns parâmetros das propriedades físicas da bacia são exigidos como dados de entrada. Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros demandados para a caracterização de cada tipo de solo, cobertura vegetal e hidrogeologia. Esses parâmetros foram obtidos de trabalhos realizados anteriormente na bacia para caracterização do solo e hidrogeologia (GOMES, 2008; CUNHA, 2003) e de literatura brasileira para a caracterização da cobertura vegetal (COUTO, 2009; TASCH, 2006; de SOUZA *et al.*, 2010; CABRAL *et al.*, 2010; HENRIQUES, 2003) na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça.

Tabela 1: Parâmetros das propriedades físicas da bacia para entrada no modelo JAMS-Guarani

PARÂMETROS	SOLO	COBERTURA VEGETAL	HIDROGEOLOGIA
	Profundidade	Albedo (%)	Capacidade de armazenamento do aquífero
	Coefficiente de permeabilidade (mín e máx)	Resistência superficial	Coefficiente de armazenamento
	Capacidade de ar	Índice de área foliar	
	Capacidade de campo	Crescimento efetivo	
		Profundidade da raiz	

2.4 Aplicação do JAMS-Guarani na bacia piloto do Ribeirão da Onça

A avaliação do comportamento do modelo hidrológico e do seu desempenho para a estimativa da vazão na bacia do Ribeirão da Onça foi realizada por comparação entre os dados reais e os dados de saída do modelo. Para tanto, foram usados os coeficientes de eficiência: coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (E) citados por Krause *et al.* (2005), para diminuir a subjetividade da comparação visual entre as curvas de vazão. Estes coeficientes analisam a concordância do modelo com a real dinâmica do escoamento superficial. Para análise do volume escoado, será utilizado o valor do erro absoluto (EAV), que quantifica a diferença entre o volume simulado e o observado.

Para o teste do *framework* JAMS foi utilizado o período de janeiro a agosto de 2008. Os dados de entrada são lidos pelo modelo como arquivos ASCII.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação do sistema *framework* JAMS

O grande desafio para a hidrologia em geral é a necessidade de adaptação dos modelos hidrológicos segundo a singularidade de uma bacia hidrográfica em relação ao seu comportamento hidrológico e a disponibilidade de dados da área (FENICIA *et al.*, 2008). Os modelos hidrológicos codificam um conjunto de pressupostos que podem ou não ser válidos em diferentes momentos, locais e escalas e para diferentes propósitos (ANDREWS *et al.*, 2011). Portanto é importante a criação de ferramentas que auxiliam aos hidrólogos na construção de estruturas adequadas para a modelagem hidrológica. Daí a importância do desenvolvimento de um *framework* que divide as rotinas sistemáticas, necessárias a todos os modelos, da parte científica, requerida pelos pesquisadores e gestores, possibilitando a exploração de benefícios e características particulares dos modelos (KRAFT *et al.*, 2011). Além disso, o *framework* atua onde há funcionalidades comuns a várias aplicações, auxiliam na junção de modelos com diferentes objetivos de simulação seguindo a tendência atual de desenvolvimento de modelos climáticos, hidrológico e ambiental acoplados.

Por isso, o maior benefício no uso de *frameworks* é permitir aos desenvolvedores de modelo concentrar-se na implementação de métodos mais adequados, facilitada por uma interface familiar em ambiente de modelagem. Com este intuito o *framework* JAMS foi desenvolvido na Universidade Friedrich Schiller de Jena, através de programação orientada a objeto em linguagem JAVA. O sistema contempla as diferentes partes do ciclo da água – evapotranspiração, interceptação, água-solo, águas subterrâneas – como módulos de processos hidrológicos. Dispõe ainda de módulos para análise da distribuição de soluto e do transporte de sedimento ao longo de uma bacia hidrográfica em diferentes escalas de espaço-tempo (KRAUSE *et al.*, 2009; KRALISCH *et al.*, 2009).

Os modelos JAMS são criados a partir de documentos XML que contem a descrição dos módulos de processos hidrológicos que serão utilizados para a simulação e definem a montagem dos componentes do modelo e os dados a serem trocados entre eles. Isto é realizado por meio da interface gráfica *Juice Builder*. A configuração e execução do modelo bem como a comunicação entre seus componentes são estabelecidas pelo sistema de execução. Este sistema juntamente com a biblioteca de funcionalidades básicas, como os mecanismos de entrada e saída de dados, formam o

núcleo do JAMS, o qual não pode ser modificado durante a construção de novos modelos – “parte não conhecida”.

Alguns modelos já foram criados a partir do JAMS para diferentes aplicações. Entre eles destacam-se os modelos hidrológicos J2000 e J2000-g e o modelo de balanço de água e nutrientes, J2000-S. Porém estes modelos ainda não são difundidos na comunidade científica por não haver documentação detalhada sobre as funcionalidades desses programas. Ainda assim a utilização do JAMS é vantajosa uma vez que o seu código é aberto e as modificações são fáceis de serem realizadas, por contar com a interface bastante amigável do *Juice Builder*. O JAMS também conta com uma interface gráfica, JADE, para a visualização dos resultados da simulação, gerando gráficos de vazão, precipitação, evapotranspiração, umidade do solo *versus* tempo, o que ajuda o usuário durante a calibração dos parâmetros do modelo.

Durante a avaliação do JAMS os seus componentes foram revisados. Neste artigo será dado destaque aos módulos dos processos hidrológicos do modelo J2000 que foram utilizados na estrutura do JAMS-Guarani.

3.1.1 Módulos dos processos hidrológicos no J2000

Um esboço da estrutura do modelo J2000 foi esquematizado (Figura 4) para melhor entendimento de seu funcionamento.

Os contextos/JAMS são mostrados em cinza e os módulos/JAMS em caixas azuis e brancas. Os contextos são usados para gerenciar a repetição das simulações de processos ambientais, módulos, no tempo e no espaço (KRALISCH *et al.*, 2009). Os módulos que fazem parte do contexto temporal são chamados uma vez para cada período de tempo simulado – no caso 1 dia – enquanto os módulos do contexto espacial são simulados uma vez para cada fração espacial – unidades de resposta hidrológica – e neste caso particular, uma vez ainda a cada período de tempo por estar inserido também no contexto temporal. Os módulos inseridos no contexto do modelo são chamados apenas uma vez durante toda a simulação.

No contexto espacial, a simulação dos processos hidrológicos inicia-se no módulo de regionalização dos dados climáticos de entrada. Neste módulo é realizado o cálculo adicional de dados climáticos (umidade absoluta do ar e balanço de radiação) e a transferência dos dados climáticos de uma estação de medição para as URH para fornecer um conjunto de dados distribuídos ao modelo. A geração de escoamento é simulada dentro do núcleo da modelagem, módulo solo-água. O escoamento superficial é calculado através do balanço hídrico na bacia hidrográfica envolvendo o cálculo da evapotranspiração, da interceptação pelas plantas, da infiltração do solo, da percolação e do interfluxo lateral, respectivamente.

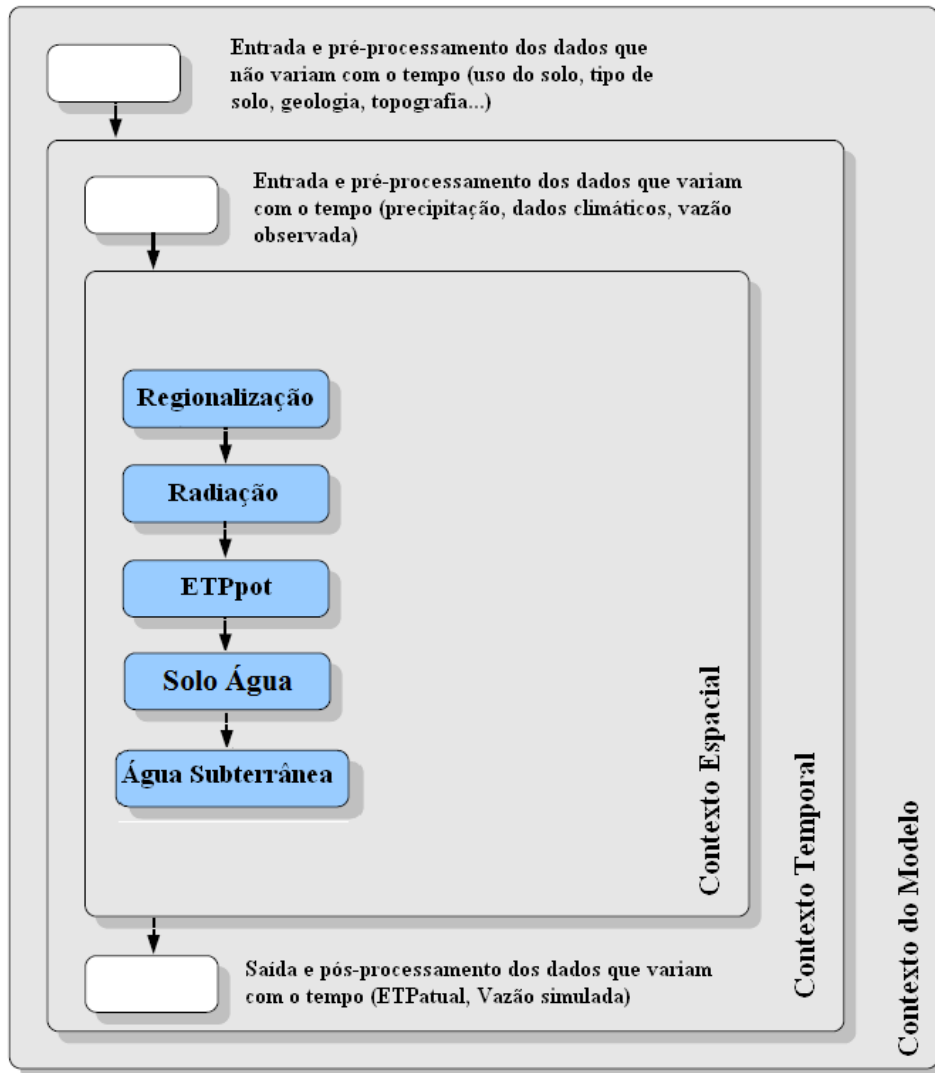


Figura 3: Esboço da estrutura do modelo chuva-vazão J2000 no *framework* JAMS

Evapotranspiração potencial: para seu cálculo é utilizada a equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1975) nos módulos de radiação e evapotranspiração potencial. Essa equação foi escolhida por considerar a influência das diferenças entre os tipos de vegetação da cobertura do solo. Para esse método de cálculo da evapotranspiração, o valor do saldo de radiação é necessário, por isso no módulo de radiação esse valor é calculado utilizando leituras padrão como temperatura, insolação, umidade relativa e do albedo da cobertura do solo. O saldo de radiação é o último componente do balanço de radiação e é estimado a partir da radiação extraterrestre, radiação global e radiação efetiva de ondas curtas e longas. Durante o cálculo do balanço de radiação, leva-se em consideração a posição topográfica de cada URH.

Interceptação da precipitação pela cobertura vegetal: seu cálculo baseia-se no conceito de Dickinson (1984) que trata a interceptação como um armazenamento dependente do índice de área

foliar (IAF) da cobertura vegetal. A capacidade máxima de armazenamento ($Intmáx$) é então calculada pela Equação 1.

$$Intmáx = \alpha \cdot IAF \quad [mm] \quad (1)$$

Onde α é um fator que descreve a capacidade de armazenamento por metro quadrado de área foliar em milímetros.

O volume de água precipitada que resta após os processos de evapotranspiração e de interceptação é encaminhada para o módulo solo-água. Este módulo é parte fundamental do núcleo de modelagem (Krause, 2002), refletindo a posição central do solo atuante como sistema de regulação e de distribuição, influenciando quase todos os processos do ciclo hidrológico (Figura 5). Neste módulo o solo é classificado segundo o volume de macroporos (diâmetro $> 50\mu m$) e poros médios ($0,2 > \text{diâmetro} > 50\mu m$). Para o cálculo do armazenamento nos macroporos (APG) toda a coluna do solo é levada em consideração, enquanto que para o armazenamento em poros médios (APM), a profundidade considerada coincide com a profundidade das raízes.

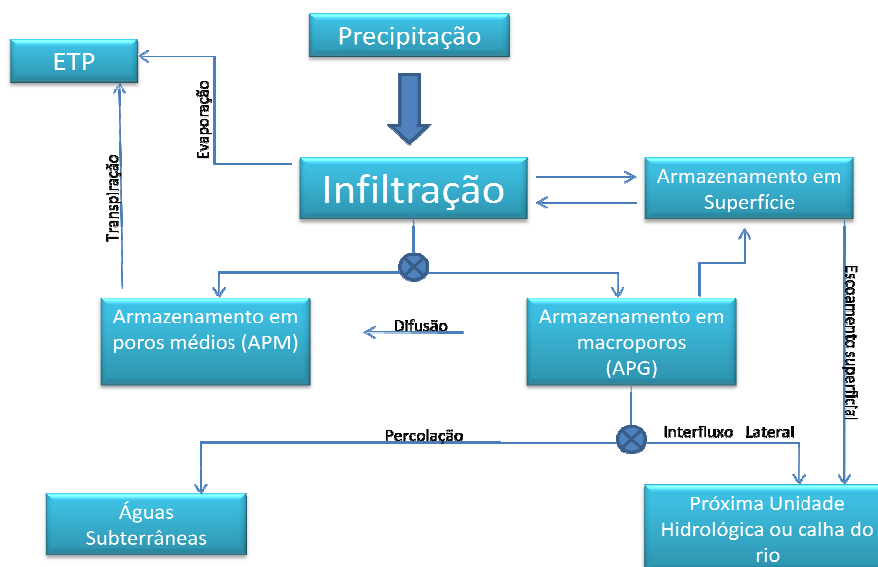


Figura 4: Esquema do módulo solo-água (adaptado de Krause, 2002)

Infiltração: seu cálculo é realizado a partir de uma equação empírica, pois segundo Krause (2002), devido à resolução temporal do modelo ser de um dia não é possível utilizar as equações tradicionais como a de Green & Ampt ou a de Richards. A equação escolhida (Equação 2) reduz um volume máximo de infiltração, definido pelo usuário, pelo volume de umidade relativa armazenada no APM (θ_{APM}).

$$Inf_{atual} = (1 - \theta_{APM}) \cdot Inf_{max} \quad [mm] \quad (2)$$

A água infiltrada é distribuída entre APG e APM de acordo com a saturação relativa do APM (θ_{APM}). Quanto mais seco estiver o APM maior será o aporte de água para esta zona. O afluxo de água para o APM (APM_{afluxo}) é calculado por meio da infiltração atual (Inf_{atual}), da umidade relativa do APM (θ_{APM}) e de um parâmetro “dist” – calibrável pelo usuário (Equação 3).

$$APM_{afluxo} = Inf_{atual} \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-dist}{\theta_{APM}} \right)} \right] \quad [mm] \quad (3)$$

O restante do volume de água infiltrada é repassada para o APG (Equação 4).

$$APG_{afluxo} = Inf_{atual} - APM_{afluxo} \quad (4)$$

Percolação e interfluxo lateral: o APG é a fonte de água para a percolação e interfluxo lateral no módulo do solo. O volume escoado do APG (APG_{esc}) depende (Equação 5): da saturação (θ_{APG}), do conteúdo atual (APG_{atual}) do APG e de um coeficiente calibrável L_{out} .

$$APG_{esc} = \theta_{APG}^{L_{out}} \cdot APG_{atual} \quad [mm] \quad (5)$$

O APG_{esc} é então distribuído entre percolação e interfluxo lateral pelas equações 6 e 7, dependendo da declividade e do coeficiente de distribuição definido pelo usuário ($latVert$).

$$perc = APG_{esc} \cdot [1 - \tan(slope) \cdot latVert] \quad [mm] \quad (6)$$

$$interfluxo = APG_{esc} \cdot [\tan(slope) \cdot latVert] \quad [mm] \quad (7)$$

Ainda no módulo solo-água, o volume de água escoado superficialmente é calculado. Os processos de escoamento superficial hortoniano e escoamento superficial nas zonas saturadas são envolvidos no cálculo da geração da vazão. O volume de água provindo destes dois processos é armazenado em superfície. A capacidade de armazenamento em superfície é definida pelo usuário. Para superfícies mais íngremes que 5°, a capacidade máxima de armazenamento diminui pela metade. O volume de água que excede tal capacidade é escoado para a próxima unidade hidrológica ou para a calha do rio.

No último módulo da simulação o volume de águas subterrâneas é dividido entre zona não-saturada (RG1) e zona saturada (RG2). Durante a fase de parametrização, o usuário define as capacidades máximas de armazenamento para essas duas zonas. Para a condição inicial, o usuário deve definir ainda o volume inicial de água armazenada.

O dado de entrada para o módulo de águas subterrâneas é o volume de água percolada, calculado no módulo solo-água. Este volume é distribuído entre RG1 e RG2 seguindo as equações 8 e 9, na qual $distRG1RG2$ representa um coeficiente de distribuição entre as zonas definido pelo usuário.

$$RG_{1in} = perc. \cdot (1 - (\tan(slope))^{distRG1RG2}) \quad [mm] \quad (8)$$

$$RG_{2in} = perc. \cdot (\tan(slope))^{distRG1RG2} \quad [mm] \quad (9)$$

Se o volume de água RG_{2in} exceder a capacidade de armazenamento da RG2, o restante de água é repassado para a RG1. Caso a capacidade de armazenamento da RG1 for excedida, o restante da água é tratada como interfluxo lateral, seguindo para a próxima URH ou para a calha do rio.

Finalmente, a propagação de cheias no rio é implementado pela abordagem da onda cinemática e pela equação de Manning-Strickler para o cálculo da velocidade do escoamento. A partir desta velocidade (v) um coeficiente de recessão da propagação de cheia (R_K) é calculado pela equação 10, dependendo do comprimento do fluxo (fl) de cada parte do rio e de um coeficiente de propagação definido pelo usuário (TA).

$$R_K = \frac{v}{fl} \cdot TA \cdot 3600 \quad [-] \quad (10)$$

O escoamento no rio é determinado então pela equação 11.

$$vazão = q_{act} \cdot e^{\left(\frac{-1}{R_K}\right)} \quad [m^3/s] \quad (11)$$

3.2 Reestruturação do J2000

Após o entendimento da estrutura e do equacionamento do J2000, foi necessária uma reestruturação do modelo para adaptá-lo às características climáticas e à natureza dos dados do Brasil. A primeira manipulação foi a retirada do módulo que fazia a correção dos erros sistemáticos das medições da precipitação por radar, uma vez que na bacia piloto essas medições são realizadas por pluviômetros. Segundo Silva *et al.* (2009), a medição por radar gera erros consideráveis para a simulação devido à grande sensibilidade deste sistema a vários fatores físicos e por isso havia esse módulo de correção para os dados pluviométricos da Alemanha. Ainda foi inserido um módulo para o cálculo da umidade absoluta, variável necessária para estimativa do fluxo de radiação na bacia, já que no CRHEA eram coletados apenas valores de umidade relativa. Por fim, por não haver formação de neve nessa bacia brasileira, os módulos que faziam a simulação do processo de

derretimento da neve foram retirados. Como resultado da reestruturação um arquivo XML foi gerado e denominado JAMS-Guarani.

3.3 Construção do modelo chuva-vazão JAMS-Guarani

A construção do modelo chuva-vazão particular para certa bacia hidrográfica acontece através da inserção de suas informações específicas dentro de diretórios do JAMS, as quais foram retiradas da discretização e da parametrização (que gerou 3 arquivos ACSII) da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça.

3.3.1 Resultado da discretização

Primeiramente, o mapa de solo da bacia (CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008) foi avaliado, quando percebeu-se que a maior parte da bacia era formada por neossolo-quartzarênico. Segundo Gomes (2008), este tipo de solo na área de estudo possui uma ampla variação de espessura em diferentes partes da bacia. Essa informação foi relevante, pois o modelo J2000 permite a atribuição de apenas uma espessura para cada tipo de solo, portanto, para melhor avaliação hidrológica do modelo, considerou-se apenas um tipo de solo (neossolo-quartzarênico) e adicionalmente foi criado um mapa de saturação do solo, onde foram atribuídos valores distintos de espessura, através da distância do rio principal e dos dados de espessura encontrados na pesquisa de Gomes (2008).

Para obtenção do mapa de geologia da bacia piloto, utilizou-se o mapa digital de geologia do Estado de São Paulo (PERROTA *et al.*, 2005), de onde foram retiradas as áreas que extrapolavam a delimitação da área de estudo.

O mapa digital de uso e ocupação do solo (TANIKAWA & MANZIONE, 2010) foi avaliado e usado sem alterações.

Do MDE foram derivadas informações de elevação, declividade (dividida em 5 classes) e aspecto (Norte; Sul e Leste x Oeste). Através desses dados foi gerada a direção do fluxo de água com o auxílio da extensão *ArcHydro* para determinar a localização precisa do Ribeirão da Onça.

Por fim, o *ArcGis9.3* foi utilizado para a sobreposição de 6 mapas (de saturação do solo, geologia, uso e ocupação do solo, aspecto, declividade e elevação), resultando em um mapa que delimitou 449 URH na bacia piloto, importante para avaliar a variabilidade espacial de seus processos hidrológicos.

3.4 Simulação do escoamento superficial da bacia do Ribeirão da Onça com o JAMS-Guarani

Após a criação do modelo chuva-vazão JAMS-Guarani, foi realizada a simulação no período entre 01/01/2008 a 01/08/2008 para avaliação do modelo quanto a sua eficiência na predição da dinâmica da resposta hidrológica da bacia piloto.

Na Figura 5 é mostrado o hidrograma gerado durante a simulação pela ferramenta JADE. A linha vermelha representa o hidrograma simulado e a linha azul, o hidrograma observado. A precipitação foi demonstrada em cinza.

A partir da análise visual do gráfico gerado, nota-se uma satisfatória predição pelo modelo das dinâmicas do hidrograma observado, apesar das diferenças entre os picos dos hidrogramas.

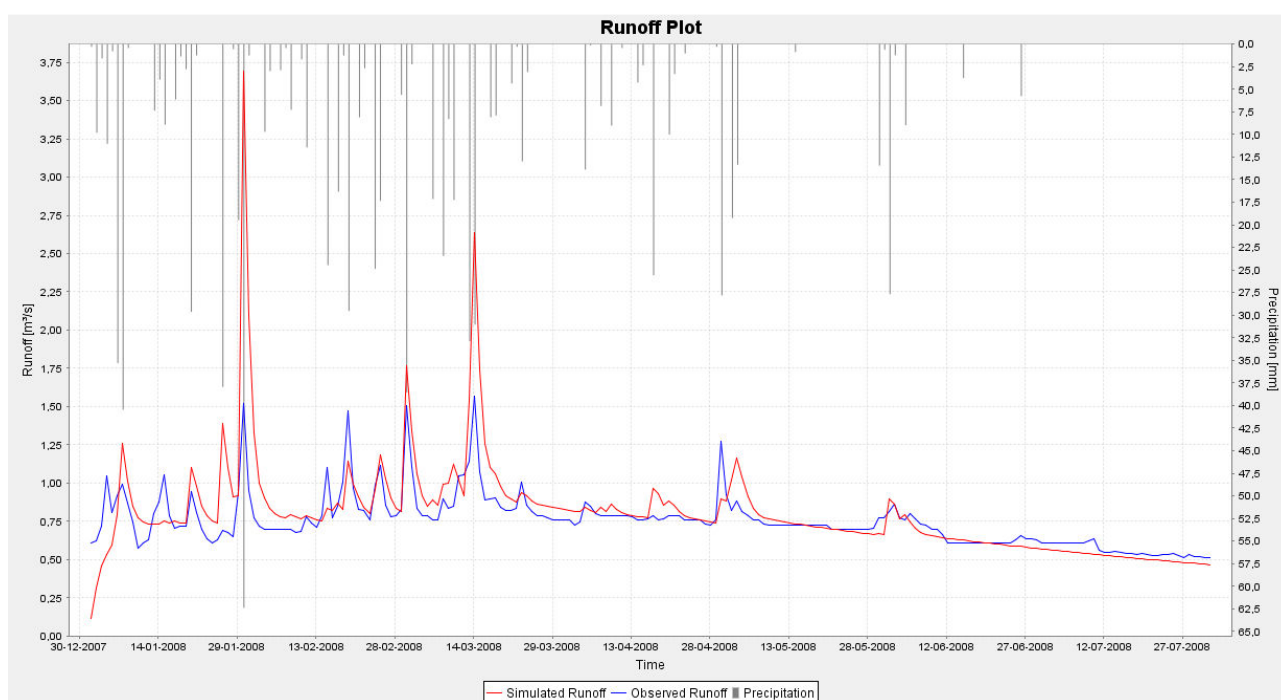


Figura 5: Resultado da simulação do escoamento superficial da bacia do Ribeirão da Onça com o modelo chuva-vazão JAMS-Guarani, apresentado pela ferramenta JADE

A diferença entre os picos pode ser resultado do processo de represamento que acontece na seção de medição de vazão da bacia piloto, o qual não foi considerado no modelo. Isso pode ser resolvido pela implementação de um módulo já existente no JAMS ou pela criação de um novo módulo que considere essa diferença na propagação da vazão.

A análise da eficiência do modelo gerou os valores para os coeficientes de *Nash-Sutcliffe* (E), de determinação (r^2) e o erro absoluto do volume (EAV) estão demonstrados na Tabela 2.

Apesar da baixa eficiência do modelo na predição dos picos do hidrograma, demonstrado pelo valor calculado de E , o volume escoado é satisfatoriamente simulado pelo modelo, demonstrado pelo baixo valor do EAV. O valor positivo do coeficiente E expõe que o modelo é melhor preditor do que a média dos valores observados (KRAUSE *et al.*, 2005), porém um valor de 0,04 está

distante do seu valor ótimo que é 1. Entretanto os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que nenhum processo de calibração foi realizado para o modelo. O modelo será calibrado na próxima etapa do projeto.

Tabela 2: Coeficientes de eficiência do modelo JAMS-Guarani

Coeficiente	Valor
EAV	10,58
r^2	0,59
E	0,04

4 CONCLUSÃO

O sistema *framework* JAMS não possui literatura específica sobre os seus módulos dos processos hidrológicos, porém mostrou-se de simples utilização para construção de modelos chuva-vazão, por incluir na sua instalação um modelo exemplo, o J2000. A sua adaptação para a realidade brasileira foi satisfatória uma vez que o sistema é flexível às mudanças em sua estrutura. As ferramentas *Juice Builder* e JADE auxiliam tanto na criação e modificação dos módulos quanto na execução das simulações e análise visual dos resultados.

Na construção do JAMS-Guarani não foi considerado o processo de represamento que acontece a jusante da seção de monitoramento, isto pode ter sido a causa da baixa eficiência na predição dos picos do hidrograma pelo modelo. Espera-se que isso possa ser resolvido através da inserção de um módulo que considere os efeitos de jusante na propagação da vazão. Apesar de serem apenas resultados parciais, pode-se concluir que o modelo é eficiente na predição da resposta hidrológica da bacia piloto, o que o torna um candidato potencial para a expansão da série histórica dos dados fluviométricos da bacia do Ribeirão da Onça, importante para o estudo de recarga do Sistema Aquífero Guarani.

A partir das vantagens apresentadas na avaliação do JAMS, existe a expectativa de que outros pesquisadores e gestores utilizem esse sistema para aplicações particulares, melhorando a eficiência da simulação dos modelos criados com a adaptação de outros módulos para as características climatológicas e hidrológicas do Brasil.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao auxílio financeiro oferecido por *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (Serviço Alemão de Intercâmbio Acadêmico) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6 BIBLIOGRAFIA

ANDREWS, F.T.; CROKE, B.F.W.; JAKEMAN, A.J. (2011) “*An open software environment for hydrological model assessment and development*”. Environmental Modelling & Software, v. 26, p. 1171-1185.

BARRETO, C.E.A.G. (2006) *Balanço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero guarani a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos-SP, 249 p.

CABRAL, O.M.R.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.C.; LIGO, M. A.V.; FREITAS, H.C.; TATSCH, J.D. (2010) “*The energy and water balance of a Eucalyptus plantation in southeast Brazil*”. Journal of Hydrology, v. 388, p. 208-216.

CASTRO JUNIOR, P.R.; WENDLAND, E.C. *Mapeamento Morfopedológico Aplicado à Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça (SP) e À Bacia-Escola do Rio Cachoeirinha (MT) em Áreas de Recarga do Aquífero Guarani*. Relatório PROCAD – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica – CAPES. 2008. USP/EESC (Mapa de Solo).

CUNHA, A.T. (2003) *Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do Aquífero Guarani*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos, 118 p.

COUTO, D.L.N (2009) *Albedo em cerrado sensu stricto como resposta à variação climática e biológica – conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂*. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas/USP, São Paulo, 93 p.

DICKINSON, R.E. (1984) *Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate models* in HANSEN, J.E., TAKAHASHI, T. Climate Processes and Climate Sensitivities; Geophys. Monograph. Ser. 29; Washington

FENICIA, F.; McDONELL, J.J.; SAVENIJE, H.H.G. (2008) “*Learning from model improvement: On the contribution of complementary data to process understanding*”. Water Resources Research, v. 44, W06419, doi:10.1029/2007WR006386.

GIBIN, E.B.; WENDLAND, E.C. (2008) *Integração de Modelos Chuva-Vazão ao SNIRH (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos) para disponibilização pública*. Relatório Final - EESC/USP São Carlos, 73 p.

GOMES, L. H. (2008) *Determinação da recarga profunda na bacia piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico na zona saturada*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos, 167 p.

HENRIQUES, O.K. (2003) *Caracterização da vegetação natural em Ribeirão Preto, SP: Bases para conservação*. Tese (Doutorado em Ciências) Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Ribeirão Preto, SP, 270 p.

KRALISCH, S.; ZANDER, F.; KRAUSE, P. (2009) “*Coupling the RBIS Environmental Information System and the JAMS Modelling Framework*” in Anais do 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, Jul. 2009, 1, pp. 902-908.

- KRAUSE, P. (2002) "*Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model*". Physics and Chemistry of the Earth, v. 27, p. 663-673.
- KRAUSE, P.; BENDE-MICHL, U.; FINK, M.; HELMSCHROT, J. KRALISCH, S.; KÜNNE, A. (2009) "*Parameter sensitivity analysis of the JAMS/J2000-S model to improve water and nutrient transport process simulation - a case study for the Duck catchment in Tasmania*" in Anais do 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, Jul. 2009, 1, pp. 3179-3186.
- KRAUSE, P.; BOYLE, D.P.; BÄSEL, F. (2005) "*Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment*". Advances in Geosciences, v. 5, p. 89-97.
- KRAFT, P.; VACHÉ, K.B.; FREDE, H.G.; BREUER, L. (2011) "*A hydrological programming language extension for integrated catchment models*". Environmental Modelling and Software, v. 26, p. 828-830.
- MALDONADO, L. H. (2009) *Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça*. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - EESC/USP São Carlos, 175 p.
- MONTEITH, J.L. (1975) *Vegetation and atmosphere*, v.1, Principles, Academic Press, London.
- PERROTTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; LOPES, R. C.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S. D.; SACHS, L. L. B.; MEIRA, V. T.; GARCIA, M. G. M.; LACERDA FILHO, J. V. 2005. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000*. Formato: shapefile. Programa Geologia do Brasil - PGM, CPRM, São Paulo. Disponível em: < <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>> Acesso em: 15/02/2011.
- SILVA, F.D.S.; PEREIRA FILHO, A.J.; HALLAK, R. (2009) "*Classificação de sistemas meteorológicos e comparação da precipitação estimada pelo radar e medida pela rede telemétrica na bacia hidrográfica do Alto Tietê*". Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, p. 292-307.
- TANIKAWA, D. H. MANZIONE, R. L. (2010) *Análise temporal do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica em área de recarga do Aquífero Guarani*. Relatório Final - UNESP, Ourinhos/SP (Mapa de uso do solo).
- TASCH, J.D. (2006) *Uma análise dos fluxos de superfície e do microclima sobre cerrado, cana-de-açúcar e eucalipto, com implicações para mudanças climáticas regionais*. Dissertação (Mestrado em Ciências) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas/USP, São Paulo. 132 p.
- Lehrstuhl für Geoinformatik, Geohydrologie und Modellierung, Institut für Geographie, Friedrich-Schiller-Universität, Jena/ Alemanha. Site JAMS. Disponível em: < <http://jams.uni-jena.de/>>. Acesso em: 20/05/2011.