UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ALINE DA SILVA RIBEIRO

**Modelagem chuva-vazão utilizando *framework* JAMS em área de
afloramento do Sistema Aquífero Guarani**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos
2012

ALINE DA SILVA RIBEIRO

Modelagem chuva-vazão utilizando *framework* JAMS em área de afloramento
do Sistema Aquífero Guarani

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos para obtenção do
título de Mestre em Ciências, Programa de
Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Tit. Edson Cezar Wendland

São Carlos

2012

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

R484m	<p>Ribeiro, Aline da Silva.</p> <p>Modelagem chuva-vazão utilizando framework JAMS em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.. / Aline da Silva Ribeiro ; orientador Edson Cezar Wendland. São Carlos, 2012.</p> <p>Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.</p> <p>1. Hidrologia. 2. J2K/JAMS. 3. Balanço hídrico. 4. Escoamento superficial. 5. Bacia do Ribeirão da Onça. 6.Sistema Aquífero Guarani. Título.</p>
-------	---

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ALINE DA SILVA RIBEIRO**.

Título da dissertação: "Modelagem chuva-vazão utilizando *framework* JAMS em área de afloramento de Sistema Aquífero Guarani".

Data da defesa: 01/06/2012

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof^a. Titular **Luisa Fernanda Ribeiro Reis**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Dr. **Walter Collischonn**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Titular **Edson Cezar Wendland**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo Cesar Lima Segantine**

DEDICATÓRIA

*À Nilza e ao Jorge, meus pais,
que me deram a melhor herança: a educação.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me ilumina me dá forças e me ampara nos momentos difíceis.

Ao meu namorado Daniel, por estar sempre ao meu lado, pela sua compreensão e apoio, por me oferecer sua paciência e dedicação nos momentos difíceis. Por me inspirar a querer sempre mais. Sem você eu não teria alcançado mais essa realização. Obrigada meu amor!

Aos meus pais, que se dedicaram ao máximo na minha educação e ainda se empenham em me fazer feliz. Sem o amor deles eu não existiria.

Às minhas queridas irmãs Simone e Adriane e ao meu cunhado Rodrigo, que mesmo de longe, ou nem tão longe assim, mostram meus erros sempre exigindo o meu melhor.

Ao meu sobrinho que é minha inspiração, mesmo não podendo acompanhar de perto o seu crescimento.

Ao meu orientador Edson Cezar Wendland, por acreditar neste projeto, me dar suporte e apoio e cobrar sempre o meu melhor. And by the help and fellowship of the people from Institute for Technology and Resources Management in the Tropics and Subtropics at Cologne University of Applied Sciences, Especialy to prof. Jackson Roehrig, Annika Kuenne and Julia Schwerdtfeger and Friedrich-Schiller-Universität Jena: Prof. Peter Krause, Björn Pfennig and Markus Wolf, Dank Sehr!!!

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

À Marjolly, que sempre se mostrou motivada a aprender sobre o JAMS comigo! E me ajudou muito com meus trabalhos.

Aos amigos do LHC, que me ajudarem com minhas dúvidas, com o trabalho de campo, e principalmente por me alegrarem com suas piadas. Valeu pessoal!

Ao técnico Roberto Bérghamo, pela ajuda nas atividades práticas, e pelas animadas conversas.

E por fim, aos meus queridos amigos campo-grandenses, e agregados, que aliviaram o peso da distância e me proporcionaram os melhores momentos nesta cidade. Em especial às meninas da Rep. Melhor de Três, Drica e Taís, a melhor república de todas!

“Não chegamos a mudar as coisas
conforme nosso desejo, mas aos poucos
o nosso desejo muda.”

Marcel Proust

RESUMO

RIBEIRO, A. S. **Modelagem chuva-vazão utilizando *framework* JAMS em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**, 2012. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

O Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos (SNIRH) ainda não monitora todos os rios brasileiros. Esta carência de informações reflete em falhas na estimativa da disponibilidade hídrica para os usos múltiplos da água. 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 à flexibilidade na escolha dos processos hidrológicos a serem simulados, este trabalho utilizou o *framework* JAMS (*Jena Adaptable Modelling System*) na construção de um modelo chuva-vazão específico para a bacia piloto do Ribeirão da Onça, a qual está inserida em zona de afloramento de um dos mais importantes aquíferos do mundo, o Sistema Aquífero Guarani (SAG). O JAMS apresentou-se como um sistema simplificado e flexível diante das adaptações necessárias para tratar e gerar dados compatíveis com as características climatológicas e hidrológicas da área de estudo. O modelo construído mostrou-se eficiente na predição da resposta hidrológica da bacia avaliada, apresentando um coeficiente de *Nash-Sutcliffe* de 0,76 e 0,81, para os períodos de calibração e validação do modelo, respectivamente. Foi ainda satisfatória a predição do volume escoado, apresentando uma porcentagem de viés de -1.13 e -1.03% para os dois períodos. A reconstituição da série histórica de vazão mostrou que o escoamento de base representa de 79 a 89% do escoamento total anual da bacia do Ribeirão da Onça. Portanto, o modelo construído torna-se uma importante ferramenta para a reconstituição da série histórica dos dados fluviométricos da bacia do Ribeirão da Onça, importante para o aperfeiçoamento dos estudos de recarga e proteção do SAG.

Palavras-chave: J2K/JAMS. Balanço hídrico. Escoamento superficial. Bacia do Ribeirão da Onça. Sistema Aquífero Guarani.

ABSTRACT

RIBEIRO, A. S. **Rainfall-runoff modelling using framework JAMS in the outcrop zone of the Guarani Aquifer System**, 2012. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

The National System of Information Resources (SNIRH) has not monitored all Brazilian rivers. This lack of information reflects in the fault estimation of water availability for the multiple uses. In this context, the hydrological models stood out for trying to address this lack of data. However, it is noted that many models do not generate good results when performed outside of the study area where they were created. Therefore, due to flexibility in the choice of hydrological processes to be simulated, this study used the framework JAMS (Jena Adaptable Modelling System) in the construction of a specific rainfall-runoff model to the basin of the *Ribeirão da Onça* monitored watershed, which is embedded in an outcrop area of one of the most important aquifers in the world, the Guarani Aquifer System (SAG). The JAMS presented as a simplified and flexible for use on the necessary adaptations to process and generate consistent data with the climatological and hydrological characteristics of the study area. The constructed model was effective in predicting the hydrological response of the basin evaluated, with a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.76 and 0.81, for periods of calibration and validation of the model, respectively. It was also satisfactory prediction of runoff volume, with a bias of -1.3 and -1.03% for the two periods. The runoff time series' reproduction showed that the baseflow represents from 79 to 89% of the annual total runoff in the *Ribeirão da Onça* watershed. Therefore, the constructed model becomes an important tool for reconstructing the time series fluviometric data from *Ribeirão da Onça* basin, important for the improvement of the recharge studies and SAG protection.

Keywords: J2K/JAMS. Water balance. Runoff. Ribeirão da Onça watershed. Guarani Aquifer System.

FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo - Bacia piloto do Ribeirão da Onça - Brotas/SP/Brasil.	39
Figura 2: Armazenamentos de água nas zonas não-saturada e saturada. Adaptado de: Instituto Geológico e Mineiro (2001).	41
Figura 3: Fluxograma de Simulação do modelo J2K/JAMS	42
Figura 4: Escoamentos do modelo J2K/JAMS.....	50
Figura 5: Fluxo em cascata de URH para URH	51
Figura 6: Juice Builder, interface do sistema <i>framework</i> JAMS	53
Figura 7: Módulos dos modelos a)J2K e b) modelo construído; com destaques para os módulos	53
Figura 8: Interface de execução (JAMS Launcher) do modelo construído; com destaque para o menu de escolha dos períodos de cálculo dos coeficientes de eficiência.....	54
Figura 9: Etapas da construção do modelo.....	55
Figura 10: Local de inserção das tabelas de dados de entrada no banco de dados dos modelos JAMS.....	56
Figura 11: Local de inserção de parâmetros de solo, uso do solo e geologia, no banco de dados dos modelos JAMS.....	57
Figura 12: a) Mapa digital de tipos de solo Escala 10.000. Fonte: CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008; b)Profundidade do nível freático (m). Fonte: Guanabara, 2011.....	59
Figura 13: Formações Geológicas existentes na Bacia Ribeirão da onça.	60
Figura 14: Distribuição espacial das culturas de soja, cana, pasto, citros e eucalipto na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, nos anos de 2000(a), 2003(b), 2005(c), 2008(d) e 2010(e).	61
Figura 15: Sobreposição de mapas	63
Figura 16: Localização das Estações pluviométricas e da seção de medição de vazão da Bacia do Ribeirão da Onça.	65
Figura 17: Esquema da seção de medição de vazão do Ribeirão da Onça. Adaptado de: MALDONADO, 2009.....	66
Figura 18: a)Unidades de Resposta Hidrológica discretizadas para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça com suas respectivas áreas.	76

Figura 19: Correlação entre os dados de precipitação diária: a) estações do CRHEA e da ANA b) estações do CRHEA e Santo Inácio c) estação do CRHEA e do pluviômetro P01 d) estações da ANA e Santo Inácio; e) Estação da ANA e pluviômetro P01.	77
Figura 20: Série histórica de vazão observada. O período de represamento é destacado pelo tracejado vermelho e o período sem dados pelo tracejado verde. O tracejado preto mostra a relação $H/D = 0,8$, para a equação de Henderson (1966).	78
Figura 21: Resultado da simulação do escoamento superficial da bacia do Ribeirão da Onça com o modelo chuva-vazão construído, apresentado pela ferramenta JADE.	80
Figura 22: Sensibilidade dos parâmetros do modelo J2K/JAMS na variação do volume escoado.	82
Figura 23: Sensibilidade dos parâmetros do modelo J2K/JAMS na variação da vazão de pico	82
Figura 24: Distribuição espacial da média de escoamento direto resultado da simulação entre os anos de 2003-2011 com o modelo construído	83
Figura 25: Resultado teste para escolha do período de aquecimento	84
Figura 26: Comparação entre as vazões simuladas (linha preta tracejada) e as vazões observadas (linha vermelha) no período de calibração.	85
Figura 27: Comparação entre as vazões simuladas (linha preta tracejada) e as vazões observadas (linha vermelha) no período de validação	85
Figura 28: Comparação entre o escoamento de base dos dados observados estimado através do filtro digital recursivo (linha vermelha), o escoamento do hidrograma simulado obtido também através do filtro (linha preta tracejada) e o escoamento de base estimado diretamente pelo modelo (linha verde).	89
Figura 29: Volume total escoado, escoamento de base anual e precipitação anual.	90
Figura 30: Fluxograma do módulo de inicialização dos parâmetros do solo e hidrogeológicos do modelo J2K/JAMS	109
Figura 31: Fluxograma dos módulos de interceptação e ETPpot do modelo J2K/JAMS	110
Figura 32: Fluxograma do módulo solo-água do modelo J2K/JAMS	111
Figura 33: Fluxograma do módulo de águas subterrâneas do modelo J2K/JAMS	112
Figura 34: Série completa de vazão, com destaque para os períodos de aquecimento, calibração e validação.	141
Figura 35: Série de vazão para os períodos de calibração e validação	142

TABELAS

Tabela 1: Modelos Hidrológicos discretizados por células de grade e com os respectivos modelos de infiltração utilizados.....	30
Tabela 2: Modelos hidrológicos discretizados por sub-bacias.....	31
Tabela 3: Modelos Hidrológicos discretizados por URH.....	31
Tabela 4: Elementos da caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Pompêo, 1990.....	40
Tabela 5: Parâmetros da Equação de Penman-Monteith. Fonte: KRAUSE, 2001.....	45
Tabela 6: Ocupação do solo por hectare e porcentagem de área para os anos 2000, 2003, 2005, 2008 e 2010.	62
Tabela 7: Estações pluviométricas.....	64
Tabela 8: Parâmetros das propriedades físicas da bacia para entrada no modelo J2K/JAMS .	67
Tabela 9: Parâmetros da cobertura vegetal utilizados no modelo	67
Tabela 10: Parâmetros de processos do modelo J2K/JAMS	69
Tabela 11: Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes NSE e PBIAS. Fonte Moriasi et al. (2007).	72
Tabela 12: Período de represamentos na seção de medição de vazão do Ribeirão da Onça....	79
Tabela 13: Coeficientes de eficiência do modelo para a etapa de avaliação	79
Tabela 14: Valores obtidos para a avaliação estatística para as etapas de calibração e validação.....	86
Tabela 15: Valores dos parâmetros de processo do modelo após a calibração	87
Tabela 16: Volume escoado para os anos hidrológicos de 2004 a 2011 e a razão destes volumes pela precipitação	88
Tabela 17: Volume do escoamento de base para os anos hidrológicos 2004 a 2011 e a razão destes volumes pela precipitação.....	90
Tabela 18: Escoamento de base (mm) estimados para o ano de 2005 pelo modelo J2K/JAMS e por Wendland et al. (2007) e Barreto (2006).....	91

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Recarga
P	Precipitação
Q _e	Fluxo de entrada do sistema
Q _s	Fluxo de saída do sistema
ETP	Evapotranspiração
ΔS	Varição do armazenamento de água
R _p	Recarga profunda
ir	Irrigação
E _s	Escoamento superficial direto
Q _b	Escoamento de base
x(t)	Variáveis de entrada
y(t)	Variáveis de saída
θ_1, θ_2	Parâmetros medidos de um protótipo ou estimados
ε_t	Residual
maxLPS	Armazenamento máximo nos poros grandes da zona não saturada
maxMPS	Armazenamento máximo nos poros médios da zona não saturada
F _c	Capacidade de campo do solo
A _c	Capacidade de ar do solo
mF _c	Multiplicador da Capacidade de Campo
mA _c	Multiplicador da Capacidade de Ar
θ_{soil}	Saturação relativa do solo
θ_{MPS}	Saturação relativa dos poros médios da zona não saturada
θ_{LPS}	Saturação relativa dos poros grandes da zona não saturada
maxRG1	Armazenamento máximo da franja capilar na zona saturada
maxRG2	Armazenamento máximo da zona saturada
W _i	I-ésimo peso dado à i-ésima estação climatológica

$h(x, x_i)$	Distância entre o ponto x e a i -ésima estação climatológica
p	Parâmetro de potência para a ponderação pelo inverso da distância
$Z(x)$	Valor da variável climática regionalizada
$Z(x_i)$	Valor da variável climática na i -ésima estação climatológica
$Intmáx$	Capacidade máxima de armazenamento das folhas
α	Capacidade máxima de armazenamento das folhas
$\Delta Intercep$	Capacidade remanescente do armazenamento das folhas
ETP_{potd}	Evapotranspiração potencial no dia
ETP_{potn}	Evapotranspiração potencial a noite
$L_{d,n}$	Calor latente de evaporação (dia e noite)
$S_{d,n}$	Declividade da curva de vapor de pressão
$R_{Nd,n}$	Saldo de Radiação
$G_{d,n}$	Fluxo de calor do solo
ρ	Densidade do ar
c_p	Capacidade de calor específico do ar para pressão constante
$e_{sd,n}$	Pressão de saturação do vapor
$e_{d,n}$	Pressão de vapor
r_a	Resistência aerodinâmica da cobertura vegetal
$\gamma_{d,n}$	Constante do psicrômetro
$rsd_{d,n}$	Resistência superficial da cobertura do solo
S_o	Duração da insolação astronomicamente possível
$T_{d,n}$	Temperatura do ar no dia e na noite
z	Altitude
g	Aceleração da gravidade
p_0	Pressão do ar no nível do mar
R	Constante universal dos gases
T_{abs}	Temperatura absoluta do ar
R_G	Radiação global
α	Parâmetro α para a fórmula de Angstrom
β	Parâmetro β para fórmula de Angstrom
α	Albedo da cobertura vegetal
R_L	Radiação efetiva
R_o	Irradiação no topo da atmosfera

S	Total de horas de brilho solar
ζ	Ângulo para conversão da latitude para graus
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
MaxInf _{summer,winter}	Volume máximo de infiltração para no verão e inverno
Infatual	Infiltração atual
MPSin	Fluxo de água para os poros médios da zona não saturada
distMPSLPS	Coefficiente para distribuição da infiltração entre poros médios e grandes da zona não saturada
LPSin	Afluxo de água para os poros grandes
Coered	Fator de correção da evapotranspiração
LinRed	Fator de redução linear da ETP _{pot}
MaxTransf	Máxima transferência de água dos poros médios da zona não saturada para a transpiração
LPSout	Volume escoado dos poros grandes da zona não saturada
LPSatual	Volume atual armazenado nos poros grandes da zona não saturada
Lout, OutLPS	Coefficiente de definição da saída dos poros grandes da zona não saturada
LatVert	Coefficiente de distribuição entre interfluxo e percolação
perc	Percolação
RD2out	Interfluxo lateral da zona não saturada
ConcRD2	Coefficiente de retenção do interfluxo lateral
RD1	Escoamento direto
concRD1	Coefficiente de retenção do escoamento superficial
RG1in	Afluxo de água para a franja capilar
RG2in	Afluxo de água para a zona saturada
kRG1	Coefficiente de armazenamento da franja capilar
kRG2	Coefficiente de armazenamento da zona saturada
RG1Fact	Fator de dinâmica do escoamento RG1
RG2Fact	Fator de dinâmica do escoamento RG2
RG1act	Volume atual na franja capilar
RG2act	Volume atual na zona saturada
RG1out	Volume escoado da franja capilar
RG2out	Volume escoado da zona saturada
Rk	Coefficiente de recessão da propagação de cheia
fl	Comprimento de fluxo
TA, RouteTA	Tempo de concentração do escoamento

A	Área molhada da calha do rio
Rh	Raio hidráulico da calha do rio
v_0	Velocidade inicial
v_{new}	Velocidade calculada a cada passo do processo iterativo
b	Largura do rio
q	Soma de todos os escoamentos
r^2	Coeficiente de determinação
Y_i^{obs}	Valor da i-ésima vazão observada
Y_i^{sim}	Valor da i-ésima vazão simulada
NSE	Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
PBIAS	Porcentagem de BIAS
d	Índice de concordância de Willmott
RSME	Raiz do erro quadrático médio
qt	Escoamento superficial filtrado
t	Tempo
β	Parâmetro de filtro
Qt	Escoamento superficial
bt	Fluxo de base
InitRG1	Fração de preenchimento do reservatório RG1
InitRG2	Fração de preenchimento do reservatório RG2
MaxDPS	Máxima capacidade do reservatório superficial de água
PolRed	Fator de redução polinomial da ETPpot
GT80	Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização maiores que 80%
LT80	Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização menores que 80%
DiffLPS	Coeficiente de difusão do LPS para o MPS no final de um passo de tempo
Max Perc	Capacidade máxima de percolação
CapRise	Fator para a definição de capilaridade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	OBJETIVOS	25
2.1	GERAL	25
2.2	ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
3.1	ESCOAMENTO SUPERFICIAL	27
3.1.1	Modelos Hidrológicos Chuva-Vazão	27
3.1.2	Classificação de Modelos Hidrológicos	28
3.1.3	<i>Framework</i> JAMS	32
3.1.4	Construção de modelos hidrológicos	34
3.1.5	Análise de Sensibilidade	34
3.1.6	Calibração	34
3.1.7	Validação	35
3.2	SISTEMA AQUÍFERO GUARANI	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	ÁREA DE ESTUDO	39
4.2	AVALIAÇÃO DO MODELO J2K/JAMS	40
4.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO	52
4.3.1	Discretização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça	58
4.3.2	Dados climáticos	64
4.3.3	Parametrização	66
4.3.4	Análise de Sensibilidade	68
4.3.5	Calibração	70
4.3.6	Validação	73
4.3.7	Aplicação do modelo construído	73

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
5.1	DISCRETIZAÇÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO DA ONÇA	75
5.2	DADOS DE ENTRADA.....	77
5.3	AValiação INICIAL DO MODELO J2K/JAMS.....	79
5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	80
5.5	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	84
5.6	VOLUME ESCOADO	88
5.7	ESCOAMENTO DE BASE	88
6	CONCLUSÃO.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	ANEXO 1: fluxograma dos módulos do J2K/JAMS.....	107
	ANEXO 2: manual de utilização do <i>JUICE builder</i>	113
	ANEXO 3: série completa de vazão.....	139

1 INTRODUÇÃO

Dentre as componentes do ciclo hidrológico, a resposta do rio aos fenômenos climáticos e à modificação da paisagem – desmatamento, expansão da agricultura e urbanização – é de interesse especial, pois a vazão representa uma síntese complexa de precipitação, evapotranspiração e outras variáveis da bacia hidrográfica. Por isso, é fundamental conhecer o regime pluviométrico de uma bacia hidrográfica, o comportamento de seus rios, suas sazonalidades e vazões, para o controle dos impactos das alterações no comportamento do escoamento superficial. No entanto, o monitoramento dos corpos d'água ainda não atende à demanda por dados no Brasil – menos de 17% dos rios brasileiros cadastrados no sistema nacional de informações de recursos hídricos são monitorados – justificando-se o interesse pelo desenvolvimento de métodos e ferramentas que auxiliem a gestão das águas.

Os modelos hidrológicos surgiram na década de 50, 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 o modelo que apresente 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. Portanto, 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 modelo chuva-vazão, visando à reconstituição da série histórica de escoamento superficial para a bacia do Ribeirão da Onça.

Por pertencer à zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), a bacia do Ribeirão da Onça tornou-se uma área piloto para estudos hidrológicos da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). O grupo de pesquisas do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) iniciou seus estudos na bacia piloto com a sua instrumentação por

Barreto (2006) com reativações e construções de poços no ano de 2004, a fim de estimar a recarga direta e a recarga profunda do SAG, através do método do balanço hídrico. Posteriormente, Gomes (2008) estudou a recarga profunda do SAG, estimando o valor médio do rendimento específico (S_y) e aplicando o balanço hídrico na bacia piloto. Apenas a partir de 2007 foi instalada uma seção de medição de vazão, com monitoramento contínuo do escoamento superficial da bacia (MALDONADO, 2009).

Portanto, a construção de um modelo chuva-vazão para a bacia do Ribeirão da Onça tornou-se necessária para a reconstituição da série histórica de vazão e para o preenchimento de falhas do monitoramento do escoamento superficial. São necessárias ainda estimativas para o escoamento superficial direto e escoamento de base importante ao cálculo de recarga da bacia piloto.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Construção de modelo chuva-vazão para reconstituição da série histórica de vazão do Ribeirão da Onça e estimativa do escoamento de base, visando aprimorar o cálculo do balanço hídrico nesta bacia hidrográfica.

2.2 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

- Avaliar o sistema *framework* JAMS para a construção do modelo;
- Calibração e validação do modelo;
- Preenchimento de falhas da série histórica de vazão do Ribeirão da Onça.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Dados de escoamento superficial são necessários à gestão dos recursos hídricos, ao desenvolvimento da política de uso da água, para soluções da engenharia e de diversos problemas ambientais. No Brasil, o monitoramento dos recursos hídricos não atende à demanda potencial por dados (MAGALHÃES JÚNIOR, 2000). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2007) são monitorados menos de 17% dos rios cadastrados no sistema de informações de recursos hídricos brasileiro (ANA/HidroWeb). Dorum et al. (2010) mencionam ser necessário a previsão dos dados de vazão não amostrados através de modelos hidrológicos, uma vez que os parâmetros hidrológicos, geológicos e topológicos, dos quais o escoamento superficial depende, são mais acessíveis.

3.1.1 Modelos Hidrológicos Chuva-Vazão

Os modelos chuva-vazão foram desenvolvidos devido à necessidade de obtenção de séries hidrológicas mais longas e representativas para diferentes projetos de recursos hídricos utilizando os dados de precipitação, geralmente com maior disponibilidade (TUCCI, 1998). A urgência em se determinar os impactos das mudanças climáticas, mudanças da cobertura vegetal e de práticas de manejo do solo sobre a qualidade e quantidade de água têm resultado no desenvolvimento de uma série de modelos de simulação hidrológica (VAN LIEW et al., 2005). Deste modo, os modelos hidrológicos têm-se tornado uma ferramenta importante na abordagem de um amplo espectro de problemas ambientais e de recursos hídricos, incluindo o planejamento de recursos hídricos, desenvolvimento, projeto, operação e gestão (SINGH & FREVERT, 2006).

O objetivo da utilização de modelos é estudar a operação do sistema e prever suas saídas, através de aproximações. Para os modelos hidrológicos as entradas e saídas são variáveis hidrológicas medidas e a estrutura do modelo contém uma série de equações que ligam essas variáveis (CHOW et al., 1988). Segundo Beven (2000), o desenvolvimento de um modelo hidrológico segue as etapas de: (1) Decisão dos principais processos envolvidos (modelo sensorial); (2) Decisão relativa à representação ou equacionamento dos processos

(modelo conceitual); (3) Desenvolvimento do código do modelo; (4) Calibração do modelo; (5) Validação do modelo. Segundo Butts *et al.* (2004), na maioria dos casos tanto o modelo sensorial quanto o modelo conceitual são pré-estabelecidos, determinando a estrutura do modelo, que, na maioria das vezes, só pode ser modificada mediante a seleção de outro código. Por isso a estrutura do modelo é geralmente utilizada como forma de classificação e distinção entre os diferentes modelos hidrológicos (Butts *et al.*, 2004).

3.1.2 Classificação de Modelos Hidrológicos

3.1.2.1 Classificação quanto à descrição do processo

A classificação quanto à descrição do processo inclui todos os processos hidrológicos que contribuem para a geração da saída do sistema. Baseado na definição destes processos o modelo é classificado como determinístico ou estocástico e dentro da categoria dos modelos determinísticos em concentrado ou distribuído (SINGH, 1995). Considerando esta classificação Clarke (1973) dividiu os modelos hidrológicos em quatro grupos principais:

- (1) Estocástico-conceitual
- (2) Estocástico-empírico
- (3) Determinístico-Conceitual
- (4) Determinístico-Empírico

Para exemplificar tal classificação o autor generalizou as equações dos modelos matemáticos com a Equação 3, na qual $x(t)$ e $y(t)$ denotam respectivamente as variáveis de entrada e saída de um sistema em um tempo t .

$$f \left[y(t), x(t), \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial x}{\partial t}; \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \dots; \theta_1, \theta_2 \dots \right] = 0 \quad (1)$$

Sendo $f[.]$ uma função de uma dada forma e θ_1, θ_2 parâmetros medidos de um protótipo ou estimados dos dados. Segundo o autor quando um sistema a ser modelado é muito complexo, faz-se necessária a adoção de uma forma relativamente mais simples $f^*(.)$ para a função da equação 1, expressando a falha no ajuste pelo residual ε_t . Então com as derivadas parciais sendo aproximadas pelo método das diferenças finitas, a Equação 3 resulta na Equação 4.

$$f^*(y_t, x_t; y_{t-1}, x_{t-1}; y_{t-2}, x_{t-2}; \dots \theta_1, \theta_2 \dots) + \varepsilon_t = 0 \quad (2)$$

Segundo o autor se pelo menos uma das variáveis y_t, x_t, ε_t na Equação 2 for considerada variável aleatória e tiver distribuição de probabilidade, então o modelo é considerado estocástico. Se as variáveis da equação 2 forem consideradas livres de variações aleatórias, de modo que nenhuma delas seja considerada como tendo uma distribuição em probabilidade então o modelo é dito determinístico.

Segundo Trzesniak (1998), os modelos que pertencem à categoria dos determinísticos são aqueles em que a causa e o efeito estão ligados diretamente. Assim, a presença (ou uma variação) da primeira variável implica necessariamente no surgimento (ou uma alteração) da segunda, frequentemente obedecendo a uma lei matemática conhecida. Já no caso dos modelos estocásticos, a presença (ou uma variação) da causa reflete-se não no efeito, mas na probabilidade dele surgir (ou se modificar). Para Singh (1995), a maioria dos modelos é determinística e praticamente nenhum modelo é inteiramente estocástico.

Quanto à diferença entre conceitual e empírico, Clarke (1973) considera que no modelo conceitual a função $f^*(.)$ da equação 2 é proposta considerando-se os processos físicos atuantes sobre os dados de entrada.

Os modelos determinísticos podem ser classificados ainda em concentrados ou distribuídos, enquanto que os modelos estocásticos são classificados como espaço-independentes ou espaço-correlacionados de acordo com a existência ou não de variáveis aleatórias em diferentes pontos do espaço (CHOW et al., 1988).

Em um modelo concentrado considera-se uma média espacial do sistema, ou um simples ponto no espaço sem dimensões (CHOW et al., 1988). As equações de um modelo concentrado são expressas por equações diferenciais ordinárias, omitindo a variabilidade espacial dos parâmetros que caracterizam os processos físicos do sistema, dados de entrada, condições de contorno e características geométricas do sistema (SINGH, 1955; CLARKE, 1973).

Modelos distribuídos consideram que os processos hidrológicos ocorrem em vários pontos do espaço e definem as variáveis do modelo como funções das dimensões do espaço (CHOW et al., 1988). Kajami *et al.* (2004) apontou que apesar das previsões de fluxo não terem melhorado com o aumento da complexidade espacial do modelo em bacias relativamente homogêneas, foi observada melhora nas previsões de escoamento de base.

3.1.2.2 Classificação quanto à discretização espacial

Os avanços da capacidade computacional e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm levado à sofisticação dos modelos hidrológicos, com a incorporação das características climáticas, dos solos, da topografia e dos usos do solo na discretização espacial da bacia hidrográfica (VAN LIEW et al., 2005).

Segundo Singh & Frevert (2006) os vários métodos de simplificação da geometria fracionam a bacia em subáreas. Estas subáreas são conectadas por elementos que realizam a propagação do escoamento. Os métodos podem ser divididos em (1) métodos de grade e (2) métodos conceituais. Segundo os autores, os métodos de grade tentam manter os padrões de fluxo do modelo similares àqueles da resposta do protótipo do sistema.

Vários tipos de estruturas de grade são usados, como grade de elementos-finitos e grade retangular, dependendo do esquema numérico do modelo. Na Tabela 1 alguns modelos que utilizam essa discretização são mostrados.

Tabela 1: Modelos Hidrológicos discretizados por células de grade e com os respectivos modelos de infiltração utilizados.

Modelo	Discretização Espacial	Modelo de infiltração/Escoamento	Autor	Referência	Descrição
CASC2D	Distribuído (células de grade)	Green & Ampt	Ogden, 1998	Singh & Frevert, 2002	Two-dimensional physically-based, Hortonian Hydrologic Model
DHSVM	Distribuído (células de grade)	Relações empíricas	Wigmosta et al., 1994	Singh & Frevert, 2002	Distributed Hydrology Soil Vegetation Model
HEC-HSM	Concentrado /Distribuído (Células de Grade)	IC; SCS; Green & Ampt; Smith-Parlange	US-ACE, 2000	Lastoria, 2008	Hydrologic Modeling System
MIKE11 / MIKE SHE	Distribuído (células de grade)	Modelo de fluxo da zona não-saturada	DHI, 1998	Lastoria, 2008	
MODHMS (MODFLOW)	Distribuído (células de grade)	3D variably saturated subsurface hillslope runoff by Richards' equation	Beeson et al., 2004	Beckers et al., 2009	MODFLOW-Hydrologic Modelling System
SHE	Distribuído (células de grades)	Equação de Richards	Abbott et al., 1986	-Beven, 2008	Système Hydrologique Européen
SHETRAN	Distribuído (células de grade)	Modelo de sub-superfície variavelmente saturado	Ewen et al., 2000	Singh & Frevert, 2002	Physically-based distribution river basin modelling system

Métodos conceituais representam a geometria da bacia hidrográfica usando uma rede de seções elementares, na qual cada elemento representa uma porção particular da bacia hidrográfica (SINGH & FREVERT, 2006). São exemplos deste tipo de método: a) discretização por sub-bacias (Tabela 3) e b) unidades de resposta hidrológica (URH).

Tabela 2: Modelos hidrológicos discretizados por sub-bacias.

Modelo	Discretização Espacial	Modelo infiltração	Autor	Referência	Descrição
ARNO	Semi-distribuído (Sub-Bacias)	Relações empíricas	Todini, 1996	- Lastoria, 2008	Hydrological rainfall-runoff models
DWSM	Distribuído (Sub-bacias)	SCS (Runoff Curve-Number Method)	Borah, 1979	Singh & Frevert, 2002	Dynamic Watershed Simulation Model
SWMM	Distribuído (Sub-Bacias)	Definido pelo usuário entre: Horton; Green & Ampt; SCS	Metcalf & Eddy, 1971	Rossman, 2010	Storm Water Management Model
TOPMODEL	Semi-distribuído (Sub-Bacias)	Green & Ampt	Beven & Kirkby, 1979	Lastoria, 2008	Topography and Physical runoff generation processes

Unidades de resposta hidrológica

O conceito de Unidades de Resposta Hidrológica (URH) foi inicialmente apresentado em Flügel (1995), que vislumbrou o desafio de expandir os processos empíricos desenvolvidos em microescalas, para bacias hidrográficas médias e grandes. As URH são definidas como entidades do modelo topologicamente conectadas e representam áreas de ambiente topográfico e fisiográfico homogêneo (WOLF et al., 2009). São delineadas pela intersecção de parâmetros da paisagem como, topografia, uso do solo, tipo de solo e geologia. Supõe-se que a variação dos processos hidrológicos dentro de cada URH deve ser menor se comparado com uma URH diferente (FLÜGEL, 1995). Segundo o autor, as URH são capazes de preservar a heterogeneidade tridimensional das propriedades fisiográficas da bacia hidrográfica. Na Tabela 4, três modelos que utilizam esta discretização espacial são mostrados.

Tabela 3: Modelos Hidrológicos discretizados por URH.

Modelo	Discretização Espacial	Modelo infiltração	Autor	Referência	Descrição
J2K/JAMS	Distribuído (URH)	Relações empíricas	Krause, 2002	Krause, 2002	J2K- Jena Adaptable Modelling System
PRMS (MMS)	Distribuído (URH)	Relações empíricas	Leavesley et al., 2005	Beckers et al., 2009	Precipitation-Runoff Modelling System
SWAT	Distribuído (URH)	SCS (Runoff Curve-Number Method)	Arnold et al., 1998	Nasr et al., 2007	Soil Water and Analysis Tools

3.1.2.3 Classificação quanto à extensão temporal

Matematicamente, uma função contínua é aquela que possui uma derivada em qualquer ponto do domínio, assim como funções discretas, contrariamente, não têm essa

propriedade (PONCE, 1982). Segundo Singh (1995), um modelo hidrológico é dito discreto (por evento) quando objetiva modelar períodos isolados da série, dadas as condições iniciais, normalmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Os modelos contínuos buscam representar longos períodos da série, muitas vezes contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes (CHIN, 2000). Estes modelos requerem alguma forma de cálculo de armazenamento da umidade do solo (SINGH, 1982).

3.1.3 *Framework JAMS*

O grande desafio da modelagem hidrológica é a necessidade de adequação dos modelos hidrológicos existentes segundo o comportamento hidrológico e a disponibilidade de dados das bacias hidrográficas (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). Por isso, diferentes necessidades e abordagens em recursos hídricos têm resultado em uma grande variedade de modelos hidrológicos. Segundo Kiker et al. (2006), o advento da programação orientada a objeto (POO) possibilitou a criação de novas maneiras de descrever o meio ambiente resultando em modelos mais duráveis, e mais facilmente ampliáveis.

Um *framework* de programação utiliza a POO para dividir 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). 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.

Com a propriedade de herança da POO, um modelo existente pode ser ampliado com a adição de novo código, ao invés da modificação do código existente (KIKER et al., 2006). Isso permite 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 (Jena Adaptable Modelling System)* foi desenvolvido na Universidade Friedrich Schiller de Jena, através de POO em linguagem JAVA (KRAUSE, 2002). O sistema contempla as diferentes partes do ciclo da água – evapotranspiração, interceptação, água-solo, águas subterrâneas – como módulos de processos hidrológicos. Dispõe de módulos para análise da distribuição de soluto e do transporte de sedimento ao

longo de uma bacia hidrográfica em diferentes escalas espaço-temporais (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 (JAMS User Interface Component Editor)*. A configuração e execução do modelo bem como a comunicação entre seus componentes são estabelecidas pelo sistema de execução. Este sistema junto com a biblioteca de funcionalidades básicas (por exemplo, mecanismos de entrada e saída de dados), forma o núcleo do JAMS. Este núcleo não pode ser modificado durante a construção de novos modelos.

Alguns modelos já foram criados a partir do JAMS para diferentes aplicações. Entre eles destacam-se os modelos hidrológicos J2K (ou J2000) e J2000-g e o modelo de balanço de água e nutrientes, J2000-S. Entretanto, por não haver documentação detalhada sobre as funcionalidades desses programas, estes modelos ainda não são difundidos na comunidade científica. Ainda assim a utilização do JAMS é vantajosa uma vez que o seu código é aberto e as modificações são fáceis de ser 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 e umidade do solo *versus* tempo, o que ajuda o usuário durante a calibração dos parâmetros do modelo.

3.1.3.1 Modelo J2K/JAMS

O desenvolvimento do modelo J2K iniciou-se em 1997 como um projeto de PhD para modelagem processo-orientada em grandes bacias hidrográficas. O conceito de URH de Flügel (1995) ainda não havia sido adaptada para grandes escalas, por essa razão optou-se pelo desenvolvimento do novo modelo (KRAUSE & FLÜGEL, 2005). O modelo J2K foi escolhido por contar com módulos que abrangem as principais componentes do ciclo hidrológico: regionalização dos dados climáticos, interceptação da cobertura vegetal, evapotranspiração, solo-água, águas subterrâneas e propagação do escoamento.

Estes módulos são suplementos pelo JAMS, permitindo assim a manipulação de sua estrutura, bem como a troca de módulos sem a necessidade de reconstrução de todo o código (KRAUSE, 2001).

3.1.4 Construção de modelos hidrológicos

A construção de modelos é um processo de preparação de dados em formato correto e a inserção desses dados como arquivos de entrada com a extensão requerida pelo código do modelo (ABBOTT & REFSGAARD, 1996). Nesta etapa além dos dados de entrada os parâmetros físicos do modelo também são inseridos (parametrização). Segundo Sorooshian & Gupta (1995) estes parâmetros representam as propriedades físicas medidas na bacia hidrográfica entre eles: a área da bacia, a fração de área impermeável, características topográficas do terreno. Após este procedimento o modelo estará completo para uma simulação inicial como um primeiro passo para a calibração subsequente.

3.1.5 Análise de Sensibilidade

Anteriormente ao processo de calibração é usual fazer-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. Segundo Janssen & Heuberger (1992), o estudo de sensibilidade pode revelar problemas potenciais já durante as fases iniciais do processo de calibração, podendo oferecer sugestões úteis para prevenir a sua ocorrência. Além disso, segundo Huang & Liang (2006), a análise de sensibilidade pode diminuir as incertezas na simulação ao reduzir o número de parâmetros que devem ser estimados durante a calibração. Por isso, Krause & Flügel et al. (2005) chamam a atenção para a necessidade de uma profunda revisão dos parâmetros do modelo J2K/JAMS, ainda não realizada completamente.

3.1.6 Calibração

O processo de calibração consiste no ajuste dos parâmetros do modelo para que os resultados simulados coincidam com as medições de campo, tais como a vazão (BECKERS et al., 2009). Sorooshian & Gupta (1995) dividiram os parâmetros dos modelos em duas classes:

- Parâmetros físicos: representam as propriedades físicas mensuráveis da bacia hidrográfica. Por exemplo: área da bacia, a fração de área impermeáveis e declividade.

- Parâmetros de processo: representam as propriedades da bacia hidrográfica que não são mensuráveis diretamente. Estes parâmetros devem ser definidos através do processo de calibração.

Segundo Sorooshian & Gupta (1995), o processo de calibração consiste em duas etapas: (1) especificação dos parâmetros, etapa na qual a primeira estimativa dos parâmetros é feita pelo conhecimento prévio tanto sobre a área de estudo quanto sobre os cálculos do modelo. (2) Estimativa dos parâmetros, etapa de refinamento dos parâmetros para o ajuste dos resultados da simulação.

Alguns modelos como o SWAT, HEC_HMS e HSPF, contêm algoritmos internos que permitem a calibração automática dos seus parâmetros (BECKERS et al., 2009). Segundo os autores, existem ainda procedimentos externos para a calibração automática como Simulação de Monte Carlo, GLUE (sigla em inglês para *generalized likelihood uncertainty estimation*) e SCE (sigla em inglês para *shuffled complex evolution*). Apesar disso, Ewen (2011) garante que mesmo o melhor método de calibração automática já inventado é apenas um substituto fraco para a calibração manual realizada por modeladores experientes, especialmente na identificação e interpretação de padrões, embora diminua o tempo demandado pela calibração manual. Além disso, segundo Steenbergen & Willems (2012), a calibração automática compensa os erros dos dados de entrada no ajuste de parâmetros, por não conseguir distinguir entre as diferentes fontes de erros. Isto torna os valores dos parâmetros fisicamente irreais. Um resultado pode ser a ineficácia do modelo para um período diferente do da calibração.

A calibração manual consiste no método de tentativa e erro, no qual a cada ajuste de parâmetro uma simulação é realizada e os hidrogramas simulado e observado são comparados visualmente para avaliar se houve melhora na correlação (Sorooshian & Gupta, 1995).

3.1.7 Validação

Mesmo que a calibração tenha sido considerada satisfatória, o modelo pode estar predizendo de forma errônea, com uma interação de erros levando a resultados aparentemente corretos (BECKERS et al., 2009). Além disso, os resultados do processo de calibração são condicionados a uma série de fatores – os dados para calibração, as funções objetivo e o método de otimização utilizado (SOROOSHIAN & GUPTA, 1995). Por isso, um teste de verificação do modelo calibrado é importante.

O método de verificação usualmente utilizado é o teste com amostras repartidas (*split-sample test*) (KLEMES, 1986), no qual parte dos dados de entrada disponíveis é utilizada para a calibração do modelo e o restante utilizado para testar o modelo calibrado, processo chamado de validação. Este método também é utilizado para testar a transponibilidade do modelo para diferentes tipos de uso do solo, clima e outras mudanças ambientais (KLEMES, 1986). Segundo o autor, o modelo pode ser utilizado para simulação de cenários climáticos apenas se for validado em condições climáticas diferentes das do período de calibração. Assim, se o intuito é simular o escoamento em um cenário de chuvas intensas, o modelo deve ser calibrado em um período seco e validado em um período chuvoso.

Não é incomum que o modelo calibrado se ajuste bem aos dados do período de calibração, mas não tenham o mesmo desempenho para o período de validação. Este fenômeno é chamado de divergência (SOROOSHIAN & GUPTA, 1985). A convergência é alcançada quando a solução matemática está de acordo com o sistema físico.

3.2 SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) consiste num corpo hídrico subterrâneo que abrange parte dos territórios da Argentina, do Brasil, do Paraguai e do Uruguai (OEA, 2009). Este sistema chama atenção por ser considerado um dos maiores recursos hídricos transfronteiriços do mundo, abrangendo uma área de cerca de 1.200.000 km² (ARAÚJO et al., 1999). O SAG constitui uma importante fonte de água potável para uso urbano, industrial e agrícola e mais de 20 milhões de pessoas vivem na sua área de exploração (Gómez et al., 2010).

Em algumas partes do reservatório do SAG existe uma espessa camada de rocha basáltica não permeável, podendo atingir até 1,5 km de profundidade (AMORE, 2011). Suas zonas de recarga e descarga são localizadas em afloramentos de arenito, na fronteira com a bacia geológica (AMORE, 2011). Segundo Rabelo & Wendland (2009), o volume de recarga do aquífero é umas das variáveis mais difíceis de quantificação, devido às dificuldades de utilização de escalas adequadas às medições diretas.

Com o intuito de estudar as variáveis hídricas para aquíferos, desde o ano de 2004, o grupo de estudos do Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da EESC/USP estuda a recarga hidráulica do Aquífero Guarani, na bacia piloto do Ribeirão da Onça, uma de suas

áreas de afloramento (BARRETO, 2006). Entretanto, as pesquisas no Ribeirão da Onça iniciaram-se em 1981 com o estudo de Contin Neto sobre a interação rio-aquífero através de análise do hidrograma de vazão. Meira Neto et al. (2011) realizaram um levantamento bibliográfico de estudos na Bacia do Ribeirão da Onça e concluíram que as pesquisas nesta área têm foco principal no estudo do balanço hídrico com intuito de melhorar a quantificação das fases do ciclo hidrológico com destaque para a recarga do aquífero livre.

O método de estimativa de recarga baseado no balanço hídrico é uma técnica que considera os principais processos hidrológicos como entradas e saídas de um balanço volumétrico. Scanlon et al. (2002) descreve o balanço hídrico para estimativa da recarga (R) segundo a Equação 1, na qual P é a precipitação, Q_e e Q_s são os fluxos de água que entram e saem do sistema, ETP é a evapotranspiração e ΔS a variação do armazenamento. Todos os componentes são expressos como taxas (mm/d ou mm/ano).

$$R = P + Q_e - Q_s - ETP - \Delta S \quad (3)$$

A partir da equação do balanço hídrico, Barreto (2006) propôs o método da Equação 2 para a estimativa da recarga profunda (R_p) para a bacia do Ribeirão da Onça, sendo ES o escoamento superficial direto (mm), i_r a irrigação (mm) e Q_b o escoamento de base (mm).

$$R_p = P + i_r - ES - Q_b - \Delta S - ET \quad (4)$$

O ES em uma bacia hidrográfica é a parte do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. O Q_b é uma componente do escoamento associado à descarga do armazenamento subterrâneo (Eckhardt, 2007). O Q_b é geralmente calculado através de métodos de separação. Estes métodos repartem a vazão em duas componentes: escoamento direto e escoamento de base.

Segundo Scanlon et al. (2002), a maior limitação do uso do balanço hídrico está na acurácia da medição dos componentes do balanço hídrico, que reflete na acurácia com que a recarga é estimada. A acurácia das estimativas de recarga na bacia piloto do Ribeirão da Onça é limitada pelos dados de escoamento superficial (Barreto, 2006; Gomes 2008; Maldonado 2009), o que contribui para a imprecisão das estimativas de ES e Q_b .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

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.
Fonte: GOMES, 2008.

O Ribeirão da Onça é um dos formadores do Rio Jacaré-Guaçu, afluente pela margem direita do rio Tietê. A caracterização fisiográfica da bacia foi realizada por Mattos et al. (1984) e Preto Filho (1985) apud Pompêo (1990) sobre mapas em escala de 1:10.000. Os elementos obtidos por esta caracterização foram elencados na Tabela 4.

Tabela 4: Elementos da caracterização fisiográfica da Bacia do Ribeirão da Onça. Fonte: Pompêo, 1990.

Elemento	Unidade	Valor
Área de drenagem	km ²	65
Perímetro	km	42
Comprimento axial	km	11
Extensão do curso d'água principal	km	16
Comprimento total dos cursos d'água	km	55
Altitude máxima	m	840
Altitude mínima	m	640
Declividade média	m/km	7,6

A classificação do clima da bacia do Ribeirão da Onça, seguindo a sistemática de Koeppen, indica 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. A temperatura média da região é de 20,5°C. A bacia é coberta por sedimentos cenozóicos encontrados em grande parte do interior do Estado de São Paulo, caracterizados por serem pouco compactos, com partículas razoavelmente selecionadas, proporcionando uma estrutura bastante porosa à bacia (WENDLAND *et al.*, 2007).

4.2 AVALIAÇÃO DO MODELO J2K/JAMS

Um modelo chuva-vazão foi construído para ser aplicado ao caso particular da bacia piloto do Ribeirão da Onça. O resultado da simulação primária foi utilizado na avaliação do modelo J2K/JAMS. A avaliação foi feita a partir da comparação entre os gráficos de escoamento superficial observado e simulado e do cálculo de coeficientes de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE), coeficiente de determinação (r^2) e a porcentagem de viés (PBIAS). Os resultados obtidos foram apresentados inicialmente em Ribeiro *et al.* (2011).

Além disso, foi realizada uma revisão detalhada da estrutura e equacionamento do modelo J2K. 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 calibração do modelo.

Equacionamento do Modelo J2K/JAMS

Não existe um tutorial específico para o modelo J2K/JAMS. Os materiais com maior nível de detalhamento sobre este modelo foram encontrados no site da Universidade Friedrich Schiller de Jena, Alemanha, escritos e/ou disponibilizados pelo criador do JAMS, o Professor Dr. Peter Krause, como uma tradução para o inglês de Krause (2001). São disponibilizados ainda materiais com exemplos de aplicações no *site* criado para a divulgação deste sistema *framework* (<http://jams.uni-jena.de/>).

No modelo a classificação do solo é realizada uma única vez para todo o processo de simulação. O solo e a zona não-saturada são divididos entre poros grandes (LPS) (diâmetro $> 50\mu\text{m}$) e poros médios (MPS) ($0,2 > \text{diâmetro} > 50\mu\text{m}$). A zona saturada é dividida entre 2 reservatórios: a) franja capilar (RG1) e b) zona saturada (RG2). Todos os armazenamentos são mostrados na 2.

Figura 2: Armazenamentos de água nas zonas não-saturada e saturada. Adaptado de: Instituto Geológico e Mineiro (2001).

O fluxograma do processo de simulação do modelo J2K/JAMS é mostrado na Figura 3, na qual são destacados os módulos dos processos hidrológicos de regionalização das variáveis climáticas, interceptação da cobertura vegetal, solo-água e água subterrânea para o espaço de tempo de simulação de um dia. Os fluxogramas com detalhes de cada módulo encontra-se no Anexo 1.

Figura 3: Fluxograma de Simulação do modelo J2K/JAMS

Cálculo dos parâmetros do solo e hidrogeológicos não temporais

Para o cálculo do armazenamento máximo no LPS (MaxLPS) toda a coluna do solo é levada em consideração, incluindo a zona não saturada (Equação 5). Para o armazenamento máximo no MPS (MaxMPS), a profundidade considerada coincide com a profundidade das raízes (Equação 6). Os parâmetros do solo: a) capacidade de campo por decímetro de solo (Fc) e b) capacidade de ar (Ac) são parâmetros de entrada do modelo, e não são calibrados. Os parâmetros mFC (multiplicador da capacidade de campo) e Mac (multiplicador da capacidade de ar) são parâmetros de processo do modelo, e assim são definidos por calibração.

$$MaxLPS = Ac \cdot \text{Área da bacia} \cdot mAc \quad (5)$$

$$MaxMPS = \left(\sum Fc \right) \cdot \text{Área da bacia} \cdot mFc \quad (6)$$

O somatório da capacidade de campo é realizado até a profundidade das raízes.

As saturações relativas iniciais do MPS (θ_{MPS}) e do LPS (θ_{LPS}), [mm], são definidas pelo usuário. Se estes valores não forem indicados, o modelo atribui saturação inicial igual a 0. A saturação do solo é definida pela Equação 7

$$\theta_{Soil} = \frac{\theta_{MPS} \cdot MaxMPS + \theta_{LPS} \cdot MaxLPS}{MaxMPS + MaxLPS} \quad (7)$$

O armazenamento máximo dos dois compartimentos de águas subterrâneas (maxRG1 e maxRG2) é realizado conforme os parâmetros de entrada $RG1_{max}$ e $RG2_{max}$ (Equações (8 e (9).

$$MaxRG_1 = RG1_{max} \cdot \text{Área} \quad (8)$$

$$MaxRG_2 = RG2_{max} \cdot \text{Área} \quad (9)$$

O preenchimento inicial desses armazenamentos é definido pelo usuário (initRG1 e initRG2) durante o processo de calibração.

Módulo de regionalização das variáveis climáticas

A simulação dos processos hidrológicos inicia-se no módulo de regionalização dos dados climáticos de entrada. Neste módulo são realizados 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. Isto fornece ao modelo um conjunto de dados distribuídos. A transferência é realizada utilizando-se a técnica de interpolação IDW (*inverse distance*

weighted – Ponderação pelo inverso da distância), na qual um peso (W) é dado a cada estação dependendo da distância até o ponto considerado a partir da Equação (10).

$$W_i = \frac{1}{(h(x, x_i))^p} \quad (10)$$

Os termos $h(x, x_i)$ e p da Equação (10) representam respectivamente a distância entre o ponto x e a estação x_i [m] e o parâmetro de potência. Segundo Marcuzzo et al. (2011), o parâmetro de potência p geralmente é igual a 2. Valores maiores enfatizam estações mais próximas, enquanto que valores menores enfatizam estações mais afastadas. A interpolação se completa com a Equação (11), na qual $Z(x)$ é o valor no ponto que se deseja interpolar, $Z(x_i)$ o valor na estação i e n o número de estações climatológicas disponíveis.

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (11)$$

Com exceção da precipitação, as variáveis climáticas eram medidas apenas na estação climatológica do CRHEA. Portanto, apenas a precipitação foi interpolada para obtenção da chuva regionalizada.

Módulo de interceptação da cobertura vegetal

Após o processo de regionalização, a interceptação pela cobertura vegetal é calculada. 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, $m^2.m^{-2}$. A capacidade máxima de armazenamento ($Intmáx$) é calculada pela Equação (12), na qual α é um fator que descreve a capacidade de armazenamento por metro quadrado de área foliar em milímetros (KRAUSE, 2001). A cada passo do processo de simulação, um $\Delta Intercep$ é calculado como a capacidade remanescente para o armazenamento de água nas folhas, após o processo de evaporação do passo anterior. A precipitação que excede essa capacidade é encaminhada para o módulo solo-água com o nome de $netRain$ (mm).

$$Intmáx = \alpha \cdot IAF \quad [mm] \quad (12)$$

Módulo de Evapotranspiração Potencial

O cálculo da evapotranspiração potencial é realizado pela 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 (KRAUSE, 2002). Dois valores de ETP_{pot} são gerados para cada intervalo de tempo, um para o dia e um para a noite (Equações (13) e (14). Esta diferenciação é feita porque o balanço de radiação, necessária ao cálculo, é muito diferente entre o dia e a noite (KRAUSE, 2001).

$$ETP_{pot_d} = \frac{1}{L_d} \cdot \frac{s_d \cdot (R_{Nd} - G_d) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_{sd} - e_d}{r_a}}{s_d + \gamma_d \cdot \left(1 + \frac{r_{sd}}{r_a}\right)} \cdot \left(\frac{S_o}{24}\right) \quad (13)$$

$$ETP_{pot_n} = \frac{1}{L_n} \cdot \frac{s_n \cdot (R_{Nn} - G_n) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_{sn} - e_n}{r_a}}{s_n + \gamma_n \cdot \left(1 + \frac{r_{sn}}{r_a}\right)} \cdot \left(1 - \frac{S_o}{24}\right) \quad (14)$$

Os parâmetros das equações 16 e 17 são listados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros da Equação de Penman-Monteith. Fonte: KRAUSE, 2001

Parâmetro	Descrição	Unidade
L_{d,n}	Calor latente de evaporação (dia e noite)	Wm ⁻² .mm ⁻¹ .d
S_{d,n}	Declividade da curva de vapor de pressão	hPaK ⁻¹
R_{Nd,n}	Saldo de Radiação	Wm ⁻²
G_{d,n}	Fluxo de calor do solo	Wm ⁻²
ρ	Densidade do ar	Kgm ⁻³
c_p	Capacidade de calor específico do ar para pressão constante	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
e_{sd,n}	Pressão de saturação do vapor	hPa
e_{d,n}	Pressão de vapor	hPa
r_a	Resistência aerodinâmica da cobertura vegetal	sm ⁻¹
γ_{d,n}	Constante do psicrômetro	hPaK ⁻¹
rsd_n	Resistência superficial da cobertura do solo	sm ⁻¹
S_o	Duração da insolação astronomicamente possível	h

As temperaturas do ar para o dia e para a noite são calculadas segundo as Equações (15) e (16). Estes valores são utilizados no cálculo de L_{d,n}.

$$T_d = \frac{T_{max} + T_{média}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (15)$$

$$T_n = \frac{T_{min} + T_{média}}{2} \quad [^{\circ}C] \quad (16)$$

O valor aproximado de $L_{d,n}$ é obtido utilizando-se a Equação (17).

$$L_{d,n} = 28,9 - 0,028 \cdot T_{d,n} \quad [Wm^{-2} \cdot mm^{-1} \cdot d^{-1}] \quad (17)$$

O valor da $e_{sd,n}$ é calculado segundo a fórmula de Magnus (1844) com os coeficientes de Sonntag (1990) (Equação (18)).

$$e_{s_{d,n}} = 6,11 \cdot e^{\frac{17,62 \cdot T_{d,n}}{243,12 + T_{d,n}}} \quad [hPa] \quad (18)$$

O valor de $e_{d,n}$ resulta de $e_{sd,n}$ e da umidade relativa do ar (U em %) (Equação (19)).

$$e_{d,n} = e_{s_{d,n}} \cdot \frac{U}{100} \quad [hPa] \quad (19)$$

$S_{d,n}$ é calculado a partir da Equação (20).

$$s_{d,n} = e_{s_{d,n}} \cdot \left(\frac{4284}{(243,12 + T_{d,n})^2} \right) \quad [hPaK] \quad (20)$$

A pressão do ar na altitude z é gerada pela adaptação da fórmula barométrica (Equação (21), na qual g é a aceleração da gravidade (aproximadamente $9,811 \text{ m.s}^{-1}$), p_o é a pressão do ar no nível do mar (1013 hPa), R é a constante universal dos gases ($8314,3 \text{ JKmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) e T_{abs} é a temperatura absoluta do ar (K). O valor $p_{z_{d,n}}$ é utilizada no cálculo de $\gamma_{d,n}$ (Equação (22)).

$$p_{z_{d,n}} = p_o \cdot e^{-\left(\frac{g}{R \cdot T_{abs_{d,n}}} \cdot z\right)} \quad [hPa] \quad (21)$$

$$\gamma_{d,n} = \frac{c_p \cdot p_{d,n}}{0,622 \cdot L_{d,n} \cdot 86400} \quad \left[\frac{hPa}{K} \right] \quad (22)$$

O valor 0,622 é a relação do peso molar do vapor de água e do ar seco.

O valor de $R_{Nd,n}$, é calculado no módulo de radiação utilizando-se a radiação global (R_G), o albedo da cobertura vegetal (α) e a radiação efetiva de ondas longas (R_L) (Equações (23) e (24)).

$$R_{Nd} = (1 - \alpha) \cdot R_G - R_{L_d} \quad (23)$$

$$R_{N_n} = 0 - R_{L_n} \quad (24)$$

A R_G [MJ/m^2] é calculada pela fórmula de Angstrom (Angstrom 1924), mostrada na Equação (25). Esta fórmula é um modelo estatístico (MARTINEZ-LOZANO et al., 1984), no

qual R_o é a irradiação no topo da atmosfera [$W.m^{-2}$] (Equação (26)), S o total de horas de brilho solar diário [h] e α e β são constantes da equação. α expressa a fração de radiação extraterrestre que atinge a Terra em dias nublados ($S=0$); $\alpha + \beta$ é a fração da radiação extraterrestre que atinge a Terra em dias claros ($S=S_o$). Seguindo orientação do documento da FAO (1998), serão utilizados os valores de $\alpha = 0,25$ e $\beta = 0,50$ para o presente trabalho.

$$R_G = R_o \left(\alpha + \frac{\beta \cdot S}{S_o} \right) \quad [MJ/m^2] \quad (25)$$

$$R_o = \frac{1}{8,64} \cdot [245 \cdot (9,9 + 7,08 \cdot \text{sen}(\zeta)) + 0,18 \cdot (\phi - 51) \cdot (\text{sen}(\zeta - 1))] \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (26)$$

$$\zeta = 0,0172 \cdot (\text{dia Juliano}) - 1,39 \quad (27)$$

Com o ângulo ζ e o fator $1/8,64$ para a conversão de Jcm^{-2} para Wm^{-2} assim como de latitude (ϕ) para graus.

O valor de S_o é calculado pela Equação (28).

$$S_o = 12,3 + \text{sen}(\zeta) \cdot \left(4,3 + \frac{\phi - 51}{6} \right) \quad [h] \quad (28)$$

A $R_{Ld,n}$ é calculada pela Equação (29), da qual fazem parte a radiação de corpo negro de Boltzmann (1884), o grau de nuvens e uma função empírica da quantidade de vapor de água contida no ar.

$$R_{Ld,n} = \sigma \cdot T_{absd,n}^4 \cdot \left(0,1 + 0,9 \cdot \frac{S}{S_o} \right) \cdot (0,34 - 0,044 \cdot \sqrt{e_{d,n}}) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (29)$$

Na Equação (29) σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8}$) [$Wm^{-2}K^{-4}$] e $T_{absd,n}$ é a temperatura absoluta do ar [K].

O cálculo do G é feito de acordo com uma relação simplificada (Equação (30) (KRAUSE, 2001).

$$G_{d,n} = 0,2 \cdot R_{N,n,d} \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (30)$$

Módulo solo-água

O módulo solo-água é parte fundamental do núcleo de modelagem (KRAUSE, 2002), refletindo a atuação central do solo atuante como sistema de regulação e de distribuição, influenciando quase todos os processos do ciclo hidrológico.

A Infiltração é calculada a partir de uma equação empírica, pois segundo Krause (2001), 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 (31)) é a subtração de um volume máximo de infiltração ($MaxInf$, em mm), definido pelo usuário, pela saturação relativa do MPS (θ_{MPS}). Os valores de $MaxInf$ são obtidos para duas épocas do ano, verão ($MaxInfsummer$) e inverno ($MaxInfwinter$).

$$Inf_{atual} = (1 - \theta_{soil}) \cdot MaxInf_{summer,winter} \quad [mm] \quad (31)$$

A água infiltrada é distribuída entre LPS e MPS de acordo com a θ_{MPS} . Quanto mais seco estiver o MPS maior será o aporte de água para esta zona. O afluxo de água para o MPS (MPS_{in}) é calculado por meio da infiltração atual (Inf_{atual}), da umidade relativa do MPS (θ_{MPS}) e de um parâmetro “dist” calibrável pelo usuário (Equação (32)).

$$MPS_{in} = Inf_{atual} \cdot \left[1 - e^{(-dist/\theta_{MPS})} \right] \quad [mm] \quad (32)$$

O restante do volume de água infiltrada é repassado para o LPS (Equação (33)).

$$LPS_{in} = Inf_{atual} - MPS_{in} \quad [mm] \quad (33)$$

O conteúdo do MPS é esgotado apenas pelo processo da transpiração da cobertura vegetal. O cálculo da máxima transferência da umidade no MPS para a evapotranspiração ($MaxTransf$) é pela Equação (35). Na Equação (34) $LinRed$ é o fator de redução linear da ETP_{pot} , parâmetro calibrável do modelo.

$$Coered = \frac{\theta_{MPS}}{linRed} \quad [-] \quad (34)$$

$$MaxTrans = \Delta ETP \times Coered \quad [mm] \quad (35)$$

O cálculo do θ_{MPS} é realizado, considerando o valor de entrada (MPS_{in}), o volume transferido para a transpiração ($MaxTrans$) e a saturação do passo anterior ($\theta_{MPS_{n-1}}$) pela Equação (36).

$$\theta_{MPS} = \theta_{MPS_{n-1}} + \frac{(MPS_{in} - MaxTrans)}{maxMPS} \quad [mm] \quad (36)$$

Já o conteúdo do LPS é a fonte de água para a percolação e interfluxo lateral no módulo do solo. O volume escoado do LPS (LPS_{out}) depende da saturação do LPS (θ_{LPS}), do conteúdo atual (LPS_{atual}) do LPS e de um coeficiente calibrável L_{out} (Equação (37)).

$$LPS_{out} = \theta_{LPS}^{L_{out}} \cdot LPS_{atual} \quad [mm] \quad (37)$$

O LPS_{out} é distribuído entre $perc$ e interfluxo lateral pelas Equações (38) e (39), dependendo da declividade da topografia (em graus) e do coeficiente de distribuição definido pelo usuário ($latVert$).

$$perc = LPS_{out} \cdot [1 - \tan(declividade) \cdot latVertLPS] \quad [mm] \quad (38)$$

$$interfluxo = 1 - perc \quad [mm] \quad (39)$$

Enquanto a $perc$ é limitada pela capacidade máxima de percolação ($MaxPerc$), definida pelo usuário, o interfluxo pode ser desacelerado através do parâmetro calibrável $concRD2$ pela Equação (40). O volume de água que excede a $MaxPerc$ é tratado como interfluxo.

$$RD2_{out} = interfluxo \times \frac{1}{concRD2} \quad [mm] \quad (40)$$

No módulo solo-água, o volume de água escoado superficialmente é calculado. O volume de água que não infiltra é considerado escoamento direto (RD_1 , em mm). 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 URH ou para a calha do rio.

O escoamento RD_1 pode ser desacelerado utilizando o parâmetro calibrável $concRD1$ (Equação (41)).

$$RD_1 = Escoamento\ direto \cdot \frac{1}{concRD_1} \quad [mm] \quad (41)$$

Módulo de Águas-Subterrâneas

No último módulo da simulação, o volume de águas subterrâneas é dividido entre zona capilar ($RG1$) e zona saturada ($RG2$). Durante a fase de parametrização, o usuário define as capacidades máximas de armazenamento para essas duas zonas (em mm). Para a condição inicial, o usuário deve definir a fração inicial de preenchimento para estas zonas ($initRG1$ e $initRG2$).

O dado de entrada para o módulo de águas subterrâneas é a taxa de água percolada, $perc$, calculado no módulo solo-água. Este volume é distribuído entre $RG1$ e $RG2$ seguindo as Equações (42) e (43). Na Equação (39) $distRG1RG2$ representa um coeficiente de distribuição entre as duas zonas, definido pelo usuário.

$$RG_{1in} = perc. (1 - (\tan(slope))^{RG1RG2dist}) \quad [mm] \quad (42)$$

$$RG_{2in} = 1 - RG_{1in} \quad [mm] \quad (43)$$

Os escoamentos destes dois armazenamentos são calculados seguindo as Equações (44) e (45), nas quais $kRG1$ [-] é o coeficiente de armazenamento do RG1 e $kRG2$ [-] é o coeficiente de armazenamento do RG2, parâmetros de entrada do modelo e $RG1Fact$ e $RG2Fact$ representam as dinâmicas de escoamento do RG1 e do RG2. Se o volume de água RG_{2in} exceder a capacidade de armazenamento atual do RG2, o restante de água é repassado para a RG1. Caso a capacidade de armazenamento atual do RG1 seja excedida, o restante da água é tratado como interfluxo lateral, seguindo para a próxima URH ou para a calha do rio.

$$RG1_{out} = \frac{RG1_{act}}{kRG1 \times RG1Fact} \quad [mm] \quad (44)$$

$$RG2_{out} = \frac{RG2_{act}}{kRG2 \times RG2Fact} \quad [mm] \quad (45)$$

O volume atual dos armazenamentos RG1 e RG2 ($RG1act$ e $RG2act$) é atualizado, considerando a quantidade de água que entra nestas zonas (Equações (42) e (43)), o volume de $RG1act_{(n-1)}$ do passo anterior e a quantidade de água que escoou (Equações (44) e (45)).

Um esquema é mostrado na Figura 4 com os escoamentos: RD1, RD2_out, RG1_out e RG2_out.

Figura 4: Escoamentos do modelo J2K/JAMS

Propagação Lateral

O módulo de propagação lateral descreve a transferência de água, em um fluxo de cascata de URH para URH, da área mais alta da bacia até o canal receptor. A relação de transferência entre URH é uma relação de $n:1$. Assim, uma URH pode ter várias entradas de água, mas apenas uma saída (Figura 5). A ordem de transferência de água entre as URH é determinada pelo usuário utilizando-se técnicas de geoprocessamento. Além do caminho entre as URH o usuário ainda define as URH que drenam água para o rio.

Figura 5: Fluxo em cascata de URH para URH

Propagação Rio

Finalmente, a propagação no rio é implementada pela abordagem da onda cinemática e pela equação de Manning-Strickler (Equação (47)) 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 (46), dependendo do comprimento do fluxo (fl) de cada trecho de rio e de um coeficiente de propagação definido pelo usuário (TA , em h). O parâmetro TA representa o tempo que a onda de propagação leva para se mover através do canal até o exutório da bacia após um evento de chuva.

$$R_K = \frac{v_{new}}{fl} \cdot TA \cdot 3600 \quad [-] \quad (46)$$

$$v_{new} = M \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (47)$$

$$Rh = \frac{A}{b + 2 \cdot \frac{A}{b}} \quad [m] \quad (48)$$

$$A = \frac{q}{v_0} \quad [m^2] \quad (49)$$

O valor da área molhada (A) é necessário para o cálculo do raio hidráulico (Rh; Equação (48) da fórmula de Manning-Strickler. Para tanto na Equação (49) um valor de velocidade inicial (v_0) é necessário. Este é assumido como sendo 1 m/s. Um processo iterativo se inicia com v_0 sendo substituído por v_{new} a cada iteração. A iteração só termina quando a diferença entre as velocidades for menor que 0,001 m/s. O valor de q da Equação (49) é a soma dos escoamentos RD1, RD2_{out}, RG1_{out} e RG2_{out} transformados em (m³/s)

O escoamento no rio é determinado pela Equação (50).

$$\text{vazão} = q \cdot e^{\left(\frac{-1}{R_K}\right)} \quad [m^3/s] \quad (50)$$

Os parâmetros que devem ser definidos pelo usuário são os parâmetros de processo do modelo, como definido por Sorooshian & Gupta (1995). Estes devem ser calibrados para melhor ajuste dos dados simulados aos dados observados.

4.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Anteriormente ao processo de construção do modelo pequenas adaptações foram realizadas na estrutura do modelo J2K/JAMS. Como resultado das mudanças, um arquivo XML foi gerado. As adaptações foram realizadas utilizando-se o *JUICE Builder*, uma interface do framework JAMS para construção de arquivos XML (Figura 6). No anexo 2 encontra-se o manual de utilização do *JUICE Builder*.

Figura 6: Juice Builder, interface do sistema *framework* JAMS

A primeira manipulação foi a retirada do módulo que fazia a correção dos erros sistemáticos das medições da precipitação por radar (Módulo RCRichter) (Figura 7), 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.

Figura 7: Módulos dos modelos a) J2K e b) modelo construído; com destaques para os módulos RCRichter e AhumComputation.

Foi inserido um módulo para o cálculo da umidade absoluta (AhumComputation) (Figura 7), variável necessária para estimativa do fluxo de radiação na bacia, já que no CRHEA eram coletados apenas valores de umidade relativa.

Por fim foram feitas modificações na interface gráfica de execução (JAMS-Launcher) do J2K/JAMS, para possibilitar a escolha do período para o cálculo dos coeficientes de eficiência (Figura 8).

Figura 8: Interface de execução (JAMS Launcher) do modelo construído; com destaque para o menu de escolha dos períodos de cálculo dos coeficientes de eficiência

A construção do modelo utilizando o J2K/JAMS seguiu as etapas de discretização da bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, tabulação dos dados de entrada e inserção dos parâmetros físicos exigidos pelo modelo. As etapas de construção do modelo podem ser melhor visualizadas através do fluxograma da Figura 9. A entrada de dados climáticos e precipitação no modelo é realizada através da inserção de tabelas no banco de dados do modelo. É exigida a extensão .dat para as tabelas (Figura 10). Mesmo procedimento é realizado para inserção dos parâmetros de solo, uso do solo e geologia. Porém as tabelas para estes parâmetros têm a extensão .par (Figura 11).

Figura 9: Etapas da construção do modelo

Figura 10: Local de inserção das tabelas de dados de entrada no banco de dados dos modelos JAMS.

Figura 11: Local de inserção de parâmetros de solo, uso do solo e geologia, no banco de dados dos modelos JAMS

4.3.1 Discretização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça

A bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça foi dividida em unidades de resposta hidrológica (URH). O delineamento das URH foi realizado utilizando ferramentas do sistema de informação geográfica (SIG) ArcGis9.3 e o seguinte banco de dados que descreve o tipo de solo, a geologia e uso e ocupação do solo e a topografia:

- Mapa digital de tipos de solo Escala 10.000 (CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008)
- Mapa digital de geologia Escala 1:750.000 (PERROTTA et al., 2005)
- Mapa digital de uso e ocupação do solo (TANIKAWA & MANZIONE, 2010)
- Modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 90 x 90m (imagens SRTM);

Tipos de solo

O mapa de solo (CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008) foi avaliado (Figura 11a), percebendo-se que a maior parte da bacia era formada por neossolo-quartzarênico (AQ). Segundo Gomes (2008), este tipo de solo na área de estudo possui uma ampla variação de espessura em diferentes partes da bacia (de 3 a 19,1 m). Essa informação foi relevante, pois o modelo J2K/JAMS permite a atribuição de apenas uma espessura para cada tipo de solo.

Portanto, para melhor avaliação da infiltração na área de estudo, considerou-se apenas um tipo de solo (neossolo-quartzarênico) para a bacia do Ribeirão da Onça. Adicionalmente foi criado um mapa de saturação do solo, ao qual foram atribuídos valores distintos de espessura, através do mapa de profundidade do nível do lençol freático gerado por Guanabara (2011) (Figura 11b). O mapa de saturação foi considerado como mapa de solo da bacia. No total foram definidas 8 espessuras de solo: 2, 4, 15, 25, 35, 45, 60 e 100 m.

Figura 12: a) Mapa digital de tipos de solo Escala 10.000. Fonte: CASTRO JUNIOR & WENDLAND, 2008; b) Profundidade do nível freático (m). Fonte: Guanabara, 2011.

Geologia

Para obtenção do mapa de geologia da bacia piloto (Figura 13), utilizou-se o mapa digital de geologia do Estado de São Paulo (PERROTA et al., 2005). A bacia do Ribeirão da Onça está inserida no grupo São Bento de idade mesozoica, com formações originadas inicialmente em ambiente aquoso com clima quente e úmido, passando para desértico e terminando o ciclo com vulcanismo básico, ocorrido nos processos tectono-magnéticos de reativação de plataforma (CASTRO JÚNIOR & WENDLAND, 2008).

Figura 13: Formações Geológicas existentes na Bacia Ribeirão da onça.
Adaptado de Perrota et al., 2005.

Uso e Ocupação do solo

A agricultura e a pecuária são predominantes na região e vêm substituindo sua cobertura vegetal original – Cerrado – por citros, pastagem, cana-de-açúcar, soja e principalmente por eucalipto, que cobre a maior parte da bacia. A Figura 14 mostra a evolução temporal do uso do solo na bacia piloto.

Figura 14: Distribuição espacial das culturas de soja, cana, pasto, citros e eucalipto na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, nos anos de 2000(a), 2003(b), 2005(c), 2008(d) e 2010(e).

Fonte: TANIKAWA & MANZIONE (2010).

A cobertura de cada cultura em hectares e porcentagem de área em relação à área total da bacia é mostrada na Tabela 6. Percebe-se a predominância do eucalipto sobre as outras culturas no ano de 2010. Observa-se que entre os anos de 2000 e 2003 houve grande aumento na área plantada com eucalipto, principalmente em área que era anteriormente solo exposto. Nos anos de 2011 e 2012 vem sendo observada a troca entre pastagem e eucalipto. Apesar de todas estas mudanças no uso e ocupação da bacia, foi considerado apenas o mapa de usos do solo do ano de 2010 (TANIKAWA & MANZIONE, 2010) para o delineamento das URH. Com esta simplificação é possível que o modelo superestime a interceptação pela cobertura vegetal e a infiltração. Porém, para o período de simulação (2003-2011), o aumento da

porcentagem de solo exposto variava apenas no período de preparação do solo para o replantio do eucalipto.

A classificação do uso do solo foi realizada de forma automática por Tanikawa & Manzione (2010). Isso justifica a utilização apenas do mapa de 2010, que pôde ser avaliado em campo.

Tabela 6: Ocupação do solo por hectare e porcentagem de área para os anos 2000, 2003, 2005, 2008 e 2010.

Classes	2000		2003		2005		2008		2010	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Eucalipto	1484	23	2393	37	1613	25	2201	34	2265	35
Solo exposto	2933	45	1940	29	2186	34	1608	25	1084	17
Citros	736	11	969	15	1222	19	1126	17	992	15
Pasto	351	5	472	7	471	7	502	8	486	7
Mata	471	7	517	8	574	9	558	9	626	10
Soja	0	0	0	0	120	2	135	2	345	5
Capim	0	0	0	0	18	0	19	0	9	0
Cana	524	8	209	3	298	5	351	5	693	11

Adaptado de TANIKAWA & MANZIONE (2010).

Modelo digital de elevação

Os modelos digitais de elevação (MDE) são a principal fonte de informações topográficas, necessárias ao delineamento das URH (declividade, elevação e orientação da vertente) (EHSANI et al., 2010). Saran et al. (2010) avaliaram três fontes de MDE: *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (90 m), *optical stereo pair from* (ASTER) (15 m) e CARTOSAT (2,5 m) em comparação com um mapa topográfico (Escala 1:50.000) da área de estudo. A avaliação foi realizada segundo a acurácia da elevação e das características morfométricas. Os autores concluíram que os mapas de URH derivados de MDE com resolução mais fina (ASTER e CARTOSAT) foram mais detalhados, mas não forneceram muitas vantagens para os estudos hidrológicos da bacia de Sitla Rao, com 5800 ha. Além disso, o SRTM forneceu uma melhor morfometria do que o mapa topográfico.

As imagens SRTM foram obtidas do site da Embrapa: Monitoramento por Satélites*. Neste site estão disponíveis MDE para todos os estados brasileiros.

Do MDE foram derivadas informações de elevação, declividade (dividida em 5 classes) e orientação da vertente em 9 classes:

- Planície (-1°);

- Norte ($0 - 22,5^\circ$; $337,5^\circ - 360^\circ$);
- Nordeste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$);
- Leste ($67,5^\circ - 112,5^\circ$);
- Sudeste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$);
- Sul ($157,5^\circ - 202,5^\circ$);
- Sudoeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$);
- Oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$);
- Noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$)

Os dados de declividade e orientação da vertente são utilizados na análise da direção e do sentido do fluxo de água entre as URH e os trechos de rios. A direção da água segue a direção dada pela orientação da vertente. A água flui no sentido da maior declividade.

Geoprocessamento

Para o delineamento das URH foi utilizado o sistema de informações geográficas ArcGis 9.3. Os mapas digitais foram alterados para formato raster para o início do processo de sobreposição. A sobreposição dos mapas é mostrada na Figura 15.

Figura 15: Sobreposição de mapas

As sub-bacias foram geradas automaticamente utilizando-se os dados do MDE e com o auxílio da extensão ArcHydro. Para tanto, a direção do fluxo de água foi gerada (com os dados de declividade e orientação da vertente). O processo posterior é a acumulação de fluxo, no qual as células que recebem o fluxo da vizinhança são acumuladas formando as linhas de drenagem e os trechos de rio. Todas as células que têm o fluxo direcionado para determinado trecho de rio são consideradas de uma mesma sub-bacia.

Os mapas foram sobrepostos 2 a 2 e após cada uma das sobreposições, os polígonos resultantes foram generalizados para redução do número total de polígonos. A generalização foi realizada observando os polígonos vizinhos. Um polígono menor foi agregado a um polígono maior de mesmo atributo (solo, geologia e uso do solo). A área mínima determinada para os polígonos foi de 0,01 km².

Finalmente, a tabela de atributos para as URH foi gerada com as informações de área, declividade, orientação da vertente, tipos de solo, geologia e uso do solo, e informações de propagação da água de uma URH para outra.

4.3.2 Dados climáticos

Os dados climatológicos diários (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 7 km do centro da bacia. Outras 3 estações pluviométricas foram utilizadas para obtenção da precipitação regionalizada da bacia: pluviômetro da Agência Nacional de Águas (ANA), estação meteorológica instalada no centro da bacia na fazenda Santo Inácio e pluviômetro P01 utilizado no projeto de Barreto (2006). Na Tabela 7 estão elencadas as estações e suas coordenadas geográficas, mostradas no mapa da Figura 16.

Tabela 7: Estações pluviométricas

Estação	CRHEA	ANA	INÁCIO	P01*
Altitude	733	747	749	727
Latitude (S)	22°10'13,7"	22°14'27"	22°13'55,31"	22°11'20,7"
Longitude (O)	47°53'55"	47°57'31"	47°56'16,41"	47°57'12,9"
Período de dados**	set/2000-nov/2011	set/2000-ago/2011	abr/2010-nov/2011	01/2005-01/2006

*Fonte: BARRETO, 2006. **Período utilizado no estudo

No mapa da Figura 16, é mostrada a localização da seção de medição de vazão. 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 de 15 em 15 min através de um datalogger instalado no linígrafo e de um equipamento medidor de velocidade, o Flo-Tote, conforme descrito em Maldonado (2009).

Figura 16: Localização das Estações pluviométricas e da seção de medição de vazão da Bacia do Ribeirão da Onça.

A seção de medição de vazão do Ribeirão da Onça tem leito móvel de areia, por isso a definição de uma curva-chave não é possível. Como existem dois bueiros à jusante da seção de medição (Figura 17), Maldonado (2009) propôs a utilização da equação de Henderson (1966) para o cálculo de vazão em canal circular alimentado por um reservatório a montante (Equações (51) e (52). Nas Equações (51) e (52), D representa o diâmetro do bueiro e Ec a energia específica mínima, que corresponde ao valor da carga hidráulica sobre a geratriz

inferior do bueiro. Se a relação H/D estiver entre 0 e 0,8 utiliza-se a Equação (51), e se essa relação estiver entre 0,8 e 1,2, utiliza-se a Equação (52).

$$Q = 1,503 \cdot H^{1,9} \cdot D^{0,6} \quad (51)$$

$$Q = 1,378 \cdot H^{1,5} \cdot D \quad (52)$$

Figura 17: Esquema da seção de medição de vazão do Ribeirão da Onça. Adaptado de: MALDONADO, 2009.

4.3.3 Parametrização

Muitos parâmetros das propriedades físicas da bacia são exigidos como dados de entrada para o modelo J2K/JAMS. Na Tabela 8 são enumerados os parâmetros demandados para a caracterização de cada tipo de solo, cobertura vegetal e hidrogeologia. Esses parâmetros foram obtidos de trabalho realizado anteriormente na bacia para caracterização do solo e hidrogeologia (GOMES, 2008) e de literatura brasileira para a caracterização da cobertura vegetal (Tabela 9) na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça.

Tabela 8: Parâmetros das propriedades físicas da bacia para entrada no modelo J2K/JAMS

Cobertura vegetal	Solo	Hidrogeologia
Albedo (%)	Profundidade (cm)	Capacidade de armazenamento do aquífero (mm)
Resistência superficial (s/m)	Condutividade hidráulica (m/d)	Coefficiente de armazenamento (-)
Índice de área foliar (-)	Capacidade de ar (mm)	
Crescimento efetivo (m)	Capacidade de campo (mm)	
Profundidade da raiz (dm)		

Parâmetros da cobertura vegetal

Os parâmetros da cobertura vegetal foram obtidos através de estudos brasileiros realizados no bioma Cerrado. Foi considerado um valor de 70 s/m para a resistência superficial de todos os usos do solo como recomendação do paper 56 da FAO (FAO, 1956). Na Tabela 9 são apresentados os intervalos dos parâmetros utilizados no modelo e suas respectivas referências.

Tabela 9: Parâmetros da cobertura vegetal utilizados no modelo

Uso do Solo	Albedo (%)	Resistência superficial (s/m)	IAF (-)	Cresc. Efetivo (m)	Prof. raiz (dm)	Referência
Capim	0,23	70	2,0-6,0	1,2	10	Santos et al., 2007
Soja	0,24	70	0,6-13,1	1,2	2	Fontana et al., 1992; Silva, 2009.
Cana de Açúcar	0,13	70	3-7,6	6	9	Almeida et al., 2008; Castilho, 2000; Waldheim et al., 2006; Carneiro et al., 2008
Pasto	0,25	70	2	0,5	6	Santos et al., 2007; Correia et al., 2005
Citros	0,15	70	4,7-10	4	5	Testezlaf et al., 2007; Sena et al., 2004
Mata Cerrado	0,1	70	0,3-1,0	20	120	Sanches et al., 2008; Miranda et al., 1997; Carvalho, 1993
Eucalipto	0,15	70	1,5-4,4	35	63	Xavier et al., 2002; Vital, 2007; Witschioreck et al., 2003; Carneiro et al., 2008;

Parâmetros do solo

Os parâmetros do solo foram derivados de Gomes (2008), que realizou coletas de solo indeformado em vários pontos da bacia obtendo a porosidade total e a capacidade de ar (rendimento específico) em várias profundidades. Com estes dados foi possível a obtenção da capacidade de campo (Retenção Específica) através da relação da Equação (53).

$$\text{Porosidade Total} = \text{Capacidade de ar} + \text{capacidade de campo} \quad (53)$$

A profundidade do solo foi considerada igual à profundidade do nível do lençol freático obtida do estudo de Guanabara (2011).

A condutividade hidráulica, de 3,14 m/d, foi estimada em campo por outros pesquisadores na área de estudo. Apesar do modelo exigir este dado na etapa de parametrização, percebe-se pelo equacionamento do modelo que o valor de condutividade hidráulica não foi utilizado.

Parâmetros hidrogeológicos

Para a parametrização da hidrogeologia quanto ao armazenamento de água máximo na zona saturada do solo (RG2) foi suposto que a espessura saturada era de 20 m com porosidade média de 10%. Portanto, calculou-se uma altura máxima de armazenamento igual a 2000 mm. Para o armazenamento da franja capilar (RG1) a espessura considerada foi de 2 m, chegando-se a um valor de 200 mm de armazenamento máximo do RG1. Foram atribuídos valores iniciais de 20 e 200 para os coeficientes de armazenamentos adimensionais (k_{RG1} e k_{RG2}), respectivamente. Estes parâmetros são utilizados nas Equações (44) e (45), e foram posteriormente calibrados.

4.3.4 Análise de Sensibilidade

Após a especificação dos parâmetros físicos da bacia, foi realizada a análise de sensibilidade dos parâmetros de processo do modelo, os quais não são diretamente mensuráveis. Foram realizadas simulações com passo de tempo diário para avaliar a influência destes parâmetros na geração do volume escoado e da vazão de pico. Considerou-se uma variação dos parâmetros de -30 a +30%. Na Tabela 10, foram mostrados os parâmetros de processo, o valor inicial e seus valores mínimos e máximos. No total, foram estimadas as sensibilidades dos 26 parâmetros do modelo.

Tabela 10: Parâmetros de processos do modelo J2K/JAMS

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Inicial	Mínimo	Máximo
Multiplicador da Capacidade de Campo	MFc	[-]	1,5	0	5
Multiplicador da Capacidade de Ar	Mac	[-]	1	0	5
Fração de preenchimento do reservatório RG1	InitRG1	[-]	1	0	1
Fração de preenchimento do reservatório RG2	InitRG2	[-]	0,3	0	1
Parâmetro α para a fórmula de Angstrom	α	[-]	0,25	0	1
Parâmetro β para fórmula de Angstrom	β	[-]	0,5	0	1
Capacidade máxima de armazenamento da interceptação por m ² de área foliar	α, rain	mm	10	0	10
Máxima capacidade do reservatório superficial de água	MaxDPS	mm	10	0	20
Fator de redução polinomial da ETP _{pot}	PolRed	[-]	5	0	10
Fator de redução linear da ETP _{pot}	LinRed	[-]	1	0	10
Capacidade máxima de infiltração no verão	MaxInf Summer	mm	100	0	200
Capacidade máxima de infiltração no inverno	MaxInf Winter	[-]	100	0	200
Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização maiores que 80%	GT80	[-]	0,25	0	1
Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização menores que 80%	LT80	[-]	0,6	0	1
Coefficiente de calibração para distribuição da infiltração entre LPS e MPS	DistMPSLPS	[-]	0,4	0	10
Coefficiente de difusão do LPS para o MPS no final de um passo de tempo	DiffLPS	[-]	0,68	0	10
Coefficiente de definição da saída do LPS	OutLPS	[-]	0,1	0	10
Capacidade máxima de percolação	Max Perc	mm	35	0	100
Coefficiente de distribuição entre interfluxo e percolação	LatVertLPS	[-]	3	0	10
Coefficiente de retenção do escoamento superficial	ConcRD1	[-]	0,1	0	10
Coefficiente de retenção do interfluxo lateral	ConcRD2	[-]	2	0	50
Coefficiente de distribuição entre os reservatórios RG1 e RG2	RG1RG2dist	[-]	0,7	0	1
Fator de dinâmica do escoamento RG1	RG1Fact	[-]	10	0	20
Fator de dinâmica do escoamento RG2	RG2Fact	[-]	1,1	0	10
Fator para a definição de capilaridade	CapRise	[-]	0,5	0	1
Tempo de concentração do escoamento	RouteTA	[h]	2,5	0	100

4.3.5 Calibração

O ajuste dos parâmetros foi realizado de forma manual. O modelo J2K/JAMS possui uma interface gráfica que auxiliou no processo de calibração manual, pois realiza o cálculo dos coeficientes de eficiência e o mostra juntamente com o gráfico da vazão simulada e observada *versus* tempo, além dos gráficos de ETP, umidade do solo, e um gráfico da separação entre os escoamentos de base, interfluxo lateral e superficial. A calibração foi realizada utilizando-se os registros diários de vazão da bacia do Ribeirão da Onça no período de 01/06/2008 a 01/06/2010. Foram testados dois períodos para aquecimento das condições iniciais de armazenamento do modelo. O primeiro período utilizado foi o ano hidrológico 2002/2003, enquanto que o segundo período compreendeu os anos de 2000 a 2003. Os resultados da simulação do período de aquecimento escolhido foram ignorados para a avaliação do ajuste dos parâmetros do modelo, assim como feito por Perrin et al. (2001).

A calibração foi avaliada de forma visual e por meio do coeficiente de determinação (r^2), do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), da porcentagem de viés (PBIAS), do índice de concordância de acordo com Willmot (d) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE), conforme Equações (54), (55), (56), (57) e (58).

Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação r^2 (Equação (54)) é o valor do coeficiente de correlação de acordo com Bravais-Pearson elevado ao quadrado (KRAUSE et al., 2005; JOHNSON & BHATTACHARYYA, 1992).

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs}) (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - \bar{Y}^{sim})^2}} \right]^2 \quad (54)$$

O valor de r^2 varia entre 0 e 1. O valor de $r^2 = 0$ indica que a relação linear é fraca enquanto que um valor de $r^2 = 1$ significa uma forte relação linear entre os dados. Segundo Legates & McCabe (1999), o r^2 é limitado por não distinguir entre as médias e variâncias dos dados observados e simulados, uma vez que avalia apenas a relação linear entre as variáveis. Assim, um modelo que sistematicamente superestima ou subestima as suas predições durante todo o tempo ainda vai resultar em valores próximos a $r^2 = 1$, apesar de todas as previsões estarem erradas (KRAUSE, 2005).

Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe

O coeficiente de eficiência E foi proposto por Nash & Sutcliffe em 1970 e por isso é conhecido pelo nome de seus autores. Este coeficiente vem sendo amplamente utilizado na avaliação do desempenho de modelos hidrológicos (ALE et al., 2012). O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é descrito pela Equação (55), na qual Y_i^{obs} é vazão observada, Y_i^{sim} a vazão simulada e a média da vazão observada é Y_i^{med} (MORIASI et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i^n [Y_i^{obs} - Y_i^{sim}]^2}{\sum_i^n [Y_i^{obs} - Y_i^{med}]^2} \quad (55)$$

O coeficiente de NSE varia entre $-\infty$ e 1. Uma eficiência menor que 0 indica que a média é um melhor preditor do que o modelo, e uma eficiência ótima tem o valor de 1 (GUPTA et al., 1999). A maior desvantagem deste coeficiente está no fato de que a diferença entre os valores observados e previstos é elevada ao quadrado, o que superestima os picos do hidrograma enquanto os baixos valores são negligenciados (LEGATES & McCABE, 1999).

Porcentagem de viés

A porcentagem de viés (PBIAS) mede a tendência dos dados simulados em serem menores ou maiores do que os dados observados (GUPTA et al., 1999). O seu valor ótimo é 0, com valores baixos indicando uma simulação acurada (MORIASI et al., 2007). A equação do PBIAS é descrita pela equação (56).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \right] * 100 \quad [\%] \quad (56)$$

Valores positivos de PBIAS indicam que o modelo está superestimando os valores de vazão, enquanto que valores negativos indicam que o modelo subestima esses valores.

Uma avaliação proposta por Moriasi et al. (2007) determinou diretrizes para avaliação dos modelos hidrológicos distribuindo os valores dos coeficientes NSE e PBIAS em quatro categorias (insatisfatório, satisfatório, bom e muito bom), conforme Tabela 11.

Tabela 11: Avaliação do desempenho de modelos a partir dos coeficientes NSE e PBIAS. Fonte Moriasi et al. (2007).

Avaliação do desempenho	NSE	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,75 < \text{NSE} < 1,00$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Bom	$0,65 < \text{NSE} \leq 0,75$	$\pm 10 < \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfatório	$0,50 < \text{NSE} \leq 0,65$	$\pm 15 < \text{PBIAS} < \pm 25$
Insatisfatório	$\text{NSE} \leq 0,50$	$\text{PBIAS} > \pm 25$

Índice de concordância

O coeficiente NSE e o r^2 fornecem apenas as estimativas do erro médio e não o tamanho relativo da diferença média e a natureza das diferenças (SINGH et al., 2008). Portanto, o índice de concordância (d) foi proposto por Willmott (1981) para superar as desvantagens desses coeficientes. Segundo Harmel & Smith (2007), o índice de concordância não foi concebido para ser uma medida da correlação, mas do grau em que as previsões de um modelo são isentos de erro.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{(|Y_i^{sim} - \bar{Y}^{obs}| + |Y_i^{obs} - \bar{Y}^{obs}|)^2} \quad (57)$$

O índice de concordância varia entre 0 e 1, com valores altos indicando melhor concordância entre os dados simulados e observados (KRAUSE et al., 2005). Segundo Legates & McCabe (1999), este índice é mais adequado que o r^2 para avaliação do modelo, porém, é muito sensível aos picos do hidrograma assim como o coeficiente NSE. Segundo Krause et al. (2005), valores relativamente altos como 0,65 podem ser alcançados para este índice, mesmo com ajustes insatisfatórios do modelo, devido a insensibilidade deste à superestimação ou subestimação sistemática das previsões do modelo.

Raiz do erro quadrático médio

A raiz do erro quadrático médio (RMSE) é uma medida bem aceita do erro absoluto das predições dos modelos (HARMEL & SMITH, 2007). O menor valor de RMSE indica o melhor ajuste dos valores simulados com os valores observados.

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_i^{obs})^2 \right]^{0,5} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (58)$$

4.3.6 Validação

Para testar a transponibilidade do modelo, foi realizado o teste com amostras repartidas (*split-sample test*) (KLEMES, 1986), para o qual parte dos dados de entrada disponíveis foi utilizada para a calibração do modelo e o restante foi utilizado para testar o modelo calibrado, processo chamado de validação. O período de validação compreendeu os dados de 15/08/2010 a 15/08/2011.

4.3.7 Aplicação do modelo construído

Após a validação do modelo este foi utilizado para a simulação da bacia do Ribeirão da Onça desde o ano hidrológico 2003/2004, com passo de tempo diário. Isto foi realizado a fim de se ajustar o volume de escoamento de base calculado por Barreto (2006) e Wendland et al. (2007) para a estimativa da recarga do aquífero Guarani. Estes autores utilizaram o método de Rushton & Tomlinson (1979) para o ajuste.

A separação do escoamento de base do hidrograma observado foi realizada com o auxílio do filtro digital recursivo, seguindo as Equações (59) e (60), na qual q_t representa o escoamento superficial filtrado (resposta rápida) no tempo t , β o parâmetro do filtro (escolhido valor de 0,925), Q_t o escoamento superficial original no tempo t e b_t o fluxo de base (ARNOLD & ALLEN, 1999).

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{(1 + \beta)}{2} \times (Q_t - Q_{t-1}) \quad (59)$$

$$b_t = Q_t - q_t \quad (60)$$

O filtro pode ser passado pelo escoamento superficial três vezes (ARNOLD et al., 1995). Em geral, cada passagem do filtro resulta em menor fluxo de base como uma porcentagem do fluxo total (ARNOLD et al., 1995). A justificativa para o uso deste método reside no fato que a filtragem de sinais de alta frequência é análoga à separação do fluxo de base (sinal de baixa-frequência) do escoamento rápido (sinal de alta frequência) (NATHAN & MCMAHON, 1990).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA DO RIBEIRÃO DA ONÇA

A área de contribuição da bacia hidrográfica de 53,3 km² foi definida considerando-se a seção de medição de vazão como exutório da bacia. Para cada URH foi escolhida a área mínima de 0,01 km². Polígonos menores que a área mínima foram considerados insignificantes, sendo agregados aos polígonos vizinhos maiores com ao menos um atributo igual (solo, geologia e uso do solo). Este processo é chamado de generalização.

Após todas as generalizações, foi gerado um mapa com um total de 974 URHs. Arabi et al. (2006) sugerem que a área das URH devem ser 0,04% da área da bacia hidrográfica. Para a bacia do Ribeirão da Onça seriam necessárias no mínimo 250 URHs. Um número maior gera melhores resultados para a análise do transporte de sedimentos e de nutrientes (ARABI et al., 2006) , viabilizando futuros trabalhos na área de estudo.

Na Figura 18a é mostrado o mapa com a delimitação das URHs na bacia do Ribeirão da Onça. No fim do geoprocessamento, as linhas de fluxo foram determinadas, sendo possível o cálculo das larguras tanto do Ribeirão da Onça quanto das outras drenagens. Estes valores de largura são exigidos como dados de entrada do modelo. No mapa da Figura 18b são mostradas essas larguras.

A cota topográfica em relação ao nível do mar das URHs, obtidas a partir do MDE, ficou entre 700 e 830 m, estando na faixa das altitudes máximas e mínimas relatadas por Mattos et al. (1984) e Preto Filho (1985) apud Pompêo (1990), de 640 a 840 m. As declividades ficaram entre 0 e 13°.

Figura 18: a) Unidades de Resposta Hidrológica discretizadas para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça com suas respectivas áreas.
b) linhas de drenagem da bacia do Ribeirão da Onça com suas respectivas larguras.

5.2 DADOS DE ENTRADA

Precipitação

A estação climatológica do CRHEA e a estação pluviométrica da ANA apresentam séries completas de precipitação, com medições para todo o período de estudo, de 2000 a 2011. O pluviômetro P01, no centro da bacia, apresentou dados apenas para o ano de 2005 e início do ano de 2006, tendo sido parte do experimento de Barreto (2006). A estação meteorológica Santo Inácio foi instalada em abril de 2010.

Barreto (2006) verificou haver forte correlação mensal entre os dados pluviométricos da estação do CRHEA e do pluviômetro ($r = 1$). Entretanto se constatou haver correlação diária moderada ($r = 0,73$) entre as chuvas medidas em pluviômetros do CRHEA e a estação pluviométrica da ANA e correlação diária fraca ($r = 0,49$) entre os dados das estações do CRHEA e Santo Inácio no período chuvoso de 2010/2011 (Figura 19). Portanto, a regionalização da precipitação foi necessária.

Figura 19: Correlação entre os dados de precipitação diária: a) estações do CRHEA e da ANA b) estações do CRHEA e Santo Inácio c) estação do CRHEA e do pluviômetro P01 d) estações da ANA e Santo Inácio; e) Estação da ANA e pluviômetro P01.

Vazão do Ribeirão da Onça

A série histórica de vazão do Ribeirão da Onça e a carga hidráulica medida pelo linígrafo são apresentadas na Figura 20. Observa-se que a carga hidráulica medida pelo linígrafo não ultrapassou a relação H/D de 0,8, da fórmula de Henderson (1966).

Figura 20: Série histórica de vazão observada. O período de represamento é destacado pelo tracejado vermelho e o período sem dados pelo tracejado verde. O tracejado preto mostra a relação $H/D = 0,8$, para a equação de Henderson (1966).

No segundo semestre de 2009 o equipamento de medição de velocidade, Flo-Tote, apresentou problemas no seu funcionamento e foi retirado da seção de medição de vazão, uma vez que o reparo não foi possível. Durante os anos de 2010 e 2011 houve, ainda, algumas falhas nas leituras do linígrafo devido a problemas de conexão do *datalogger* com o computador. O problema era verificado durante o trabalho de campo quinzenal, e o *datalogger* trocado apenas no trabalho de campo seguinte. Por isso existem falhas nos dados de vazões observadas do Ribeirão da Onça no período entre 16/09/2010 a 23/11/2010 e entre 05/04/2011 a 15/06/2011.

Foram retirados ainda os dados de vazão das épocas de estiagem (Tabela 12), pois nestes períodos são realizados represamentos à jusante da seção de medição para fins de irrigação da fazenda Santa Maria da Fábrica e, conforme descrito em Maldonado (2009), a equação de Henderson (1966) para vertedor circular superestima as vazões nestas condições.

Tabela 12: Período de represamentos na seção de medição de vazão do Ribeirão da Onça

Início Represamento	Fim do represamento
15/08/2008	10/10/2008
05/11/2008	07/11/2008
30/08/2009	25/10/2009
02/09/2010*	23/11/2010

*parte deste período também sem dados

5.3 AVALIAÇÃO INICIAL DO MODELO J2K/JAMS

Os resultados aqui apresentados foram inicialmente publicados em Ribeiro et al. (2011). Após a construção do modelo chuva-vazão, foi realizada a simulação com passo de tempo diário, 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 21, 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 apresentada 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.

Na análise da eficiência do modelo foram gerados valores para os coeficientes de *Nash-Sutcliffe* (NSE), de determinação (r^2) e porcentagem de BIAS (PBIAS) que são mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Coeficientes de eficiência do modelo para a etapa de avaliação

Coeficiente	Valor
PBIAS (%)	6,6
r^2	0,59
NSE	0,04

Apesar da baixa eficiência do modelo na predição dos picos do hidrograma, evidenciado pelo valor calculado de NSE, o volume escoado foi satisfatoriamente simulado pelo modelo, com o valor do PBIAS abaixo de +15%, valor relatado como bom pela literatura (VAN LIEW et al., 2005; SHI et al., 2011). O valor positivo do coeficiente NSE 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 valor ótimo. Entretanto, com estes resultados considerou-se que o modelo atendeu satisfatoriamente às expectativas da pesquisa, uma vez que nenhum processo de calibração foi realizado anteriormente à avaliação.

Figura 21: Resultado da simulação do escoamento superficial da bacia do Ribeirão da Onça com o modelo chuva-vazão construído, apresentado pela ferramenta JADE.

Com essa avaliação, o modelo construído utilizando o J2K/JAMS se mostrou visivelmente melhor do que o modelo construído por Barreto (2006), para a bacia piloto do Ribeirão da Onça, utilizando o modelo IPHS1. Calibrando o modelo a partir do volume escoado, Barreto (2006) obteve valor de PBIAS igual a -7%.

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Diversas simulações foram feitas com o modelo construído, tendo como objetivo a análise da sensibilidade individual dos parâmetros do modelo J2K/JAMS (Tabela 10). Uma análise dos gráficos mostrados nas Figura 22 e Figura 23 destaca a grande influência dos parâmetros: ConcRD2, Fc, Ac, MaxInfWinter, MaxPerc, RG1RG2dist, initRG2, RG2Fact, α , β e LinRed sobre o cálculo do volume escoado e sobre a variação da vazão de pico. Fischer *et al.* (2009) sugerem que dentre os parâmetros do solo, o ConcRD₁, o ConcRD₂ e o LatVertLPS

teriam maior influência na simulação do modelo. Wolf et al. (2009) também citaram estes parâmetros após uma análise dos parâmetros sensíveis à declividade do terreno. Na presente análise, dentre estes três parâmetros, apenas o ConcRD_2 foi considerado influente na variação da vazão de pico da bacia piloto sendo inversamente proporcional a esta.

O parâmetro ConcRD_2 é responsável pela correção do escoamento RD_2 (interfluxo lateral da zona não-saturada do solo) mostrada na Equação (40).

O parâmetro LatVertLPS responde pela divisão do escoamento do LPS entre percolação e interfluxo. Essa relação foi mostrada nas Equações (38) e (39). Na presente análise não foi constatada uma alta sensibilidade para este parâmetro. Segundo Wolf et al. (2009), este parâmetro é sensível a altas declividades, as quais não são observadas na bacia do Ribeirão da Onça.

Uma baixa sensibilidade foi encontrada para o parâmetro ConcRD_1 . Este parâmetro é responsável pela correção do escoamento direto (RD_1) mostrada na Equação (41). A baixa sensibilidade deste parâmetro justifica-se pela insignificante taxa de escoamento direto, em termos de volume total escoado. Isto é devido à alta capacidade de infiltração do solo, estimada em 55,6 % da precipitação (da CUNHA, 2003). O mapa apresentando a média de escoamento direto nas URH, em todo o período de 2003-2011 é mostrado na Figura 24.

Como na bacia não existem áreas efetivamente impermeabilizadas, os parâmetros que ditam a infiltração nestas áreas (GT80 e LT80) não tiveram influencia na simulação do modelo.

Um dos parâmetros mais sensíveis do modelo, tanto no cálculo do volume escoado quanto na variação da vazão de pico, é o mFc , parâmetro responsável pelo cálculo do armazenamento máximo de umidade no MPS (Equação 6). O parâmetro responsável pelo cálculo do armazenamento máximo de umidade no LPS, o mAc (Equação 5), foi sensível apenas na variação da vazão de pico, pois o armazenamento no LPS ocorre somente nas chuvas com grande intensidade. Isto também é observado para os parâmetros MaxInfWinter , capacidade máxima de infiltração no inverno (Equação (31)), e MaxPerc , capacidade máxima de percolação.

Todos os parâmetros que controlam o escoamento das águas subterrâneas foram considerados sensíveis. O RG1RG2dist faz a distribuição da água entre os armazenamentos RG1 (franja capilar) e RG2 (zona saturada), seguindo a Equação (42). O parâmetro initRG2 é fração de preenchimento inicial do RG2 . E, por fim, o parâmetro RG2Fact , é um fator que controla a dinâmica do escoamento do RG2 pela Equação (45).

Figura 22: Sensibilidade dos parâmetros do modelo J2K/JAMS na variação do volume escoado

Figura 23: Sensibilidade dos parâmetros do modelo J2K/JAMS na variação da vazão de pico

Outro parâmetro também sensível é o linRed , necessário ao cálculo do coeficiente de redução linear (Coered) da evapotranspiração atual (ΔETP), seguindo a Equação (34), utilizado no cálculo da máxima transferência da umidade no MPS para a evapotranspiração

(MaxTransf) são. Por último, o modelo também é sensível aos coeficientes α e β da fórmula de Angstrom (1884), responsável pelo cálculo do saldo de radiação para a equação de ETPpot (Equação 25). Porém estes dois últimos parâmetros não serão calibrados. Seguindo as orientações do paper 56 da FAO (FAO, 1998), os valores utilizados para estes parâmetros foram $\alpha=0,25$ e $\beta=0,50$.

No total, 11 dos 26 parâmetros do modelo foram considerados mais importantes para a área estudada, dos quais 9 foram priorizados no processo de calibração. Através da análise de sensibilidade, foi possível reduzir o número de parâmetros para a calibração, o que diminuiu muito o tempo de calibração, uma vez que esta foi feita manualmente.

Figura 24: Distribuição espacial da média de escoamento direto resultante da simulação entre os anos de 2003-2011 com o modelo construído

5.5 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Foram escolhidos os anos de 2000 a 2003 como período de aquecimento. A escolha foi baseada na avaliação visual do gráfico da Figura 25, que mostra a estabilização no ano de 2004 com o período escolhido.

Figura 25: Resultado teste para escolha do período de aquecimento

O tempo de simulação do modelo foi de 2 minutos com 11 anos de dados. Foram consumidos aproximadamente 3 meses para completar a calibração manual do modelo. Os valores obtidos para os parâmetros são mostrados na Tabela 15. Os parâmetros hidrogeológicos $kRG1$ e $kRG2$ (Equações 44 e 45) não tiveram seus valores iniciais modificados pelo processo de calibração.

A análise visual das curvas de vazão simulada mostra satisfatório ajuste com as curvas de vazão observada, tanto no período de calibração (Figura 26) quanto no período de validação (Figura 27). No anexo 3 encontra-se a série completa de vazão para todo o período de entrada. Pode-se perceber pelos gráficos das Figura 26 e 27 que os picos, ascensões e recessões do hidrograma foram satisfatoriamente representados. Os valores de vazão na estiagem ficaram bem próximos das vazões observadas, o que garante uma adequada estimativa do escoamento de base.

Figura 26: Comparação entre as vazões simuladas (linha preta tracejada) e as vazões observadas (linha vermelha) no período de calibração.

Figura 27: Comparação entre as vazões simuladas (linha preta tracejada) e as vazões observadas (linha vermelha) no período de validação

Segundo Sorooshian & Gupta (1995), uma das desvantagens da calibração manual é a ausência de certeza se o melhor ajuste já foi alcançado, para que o processo seja encerrado. Por isso, a calibração foi realizada até que se chegou a um valor do coeficiente NSE maior que 0,75, pois a partir deste valor, o NSE é considerado muito bom por Moriasi et al. (2007). A comparação entre os dados de vazão observados e simulados para o período de validação resultou em um coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,81.

Na Tabela 14, são mostrados os valores obtidos para os coeficientes de eficiência calculados para os períodos de calibração e validação. A análise estatística dos resultados do

modelo mostrou uma satisfatória previsão das vazões e do volume escoado na bacia do Ribeirão da Onça. O valor negativo da PBIAS mostra uma subestimação do volume escoado, porém muitos trabalhos na literatura relatam como bom ajuste um valor de PBIAS entre $\pm 15\%$ (VAN LIEW et al., 2005; SHI et al., 2011), e um valor entre $\pm 10\%$ é referido como nível muito bom de ajuste pela diretriz proposta por Moriasi et al. (2007). Segundo Mendenhall & Sincich (1995), um valor de r^2 igual a 0,77 significa que o modelo responde corretamente a 77% da variação dos dados observados. O índice d ficou bem próximo do valor ótimo 1 (LEGATES et al., 1999). Por fim, os valores pequenos do RMSE confirmam a qualidade do modelo.

Tabela 14: Valores obtidos para a avaliação estatística para as etapas de calibração e validação

	Calibração	Validação
NSE	0,76(muito bom)*	0,81 (muito bom)*
r^2	0,77	0,82
PBIAS (%)	-1,13 (muito bom)*	-1,03 (muito bom)*
d	0,92	0,95
RMSE (m³/s)	0,15	0,20

*Segundo Moriasi et al. (2007).

O período de validação faz parte do chuvoso ano hidrológico de 2010/2011, com precipitação anual de 1766 mm, 20,2% acima da média de precipitações do período de calibração (1460 mm). Segundo Klemes (1986), isto confirma a transponibilidade do modelo para diferentes condições de clima.

Tabela 15: Valores dos parâmetros de processo do modelo após a calibração

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Inicial	Calibrado
Multiplicador da Capacidade de Campo	MFC	[-]	1,5	4,7
Multiplicador da Capacidade de Ar	MAc	[-]	1	1,5
Fração de preenchimento do reservatório RG1	InitRG1	[-]	1	0,96
Fração de preenchimento do reservatório RG2	InitRG2	[-]	0,3	0,10
Parâmetro α para a fórmula de Angstrom	α	[-]	0,25	0,25
Parâmetro β para fórmula de Angstrom	β	[-]	0,50	0,50
Capacidade máxima de armazenamento da interceptação por m ² de área foliar	α, rain	Mm	10	4,4
Máxima capacidade do reservatório superficial de água	MaxDPS	mm	10	10
Fator de redução polinomial da ETP _{pot}	PolRed	[-]	5	0
Fator de redução linear da ETP _{pot}	LinRed	[-]	1	1
Capacidade máxima de infiltração no verão	MaxInf Summer	mm	100	150
Capacidade máxima de infiltração no inverno	MaxInf Winter	[-]	100	200
Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização maiores que 80%	GT80	[-]	0,25	0,25
Capacidade relativa de infiltração para áreas com impermeabilização menores que 80%	LT80	[-]	0,6	0,6
Coefficiente de calibração para distribuição da infiltração entre LPS e MPS	DistMPSLPS	[-]	0,4	0,28
Coefficiente de difusão do LPS para o MPS no final de um passo de tempo	DiffLPS	[-]	0,68	0,25
Coefficiente de definição da saída do LPS	OutLPS	[-]	0,1	0,06
Capacidade máxima de percolação	Max Perc	mm	35	40
Coefficiente de distribuição entre interfluxo e percolação	LatVertLPS	[-]	3	0,8
Coefficiente de retenção do escoamento superficial	ConcRD1	[-]	0,1	1,0
Coefficiente de retenção do interfluxo lateral	ConcRD2	[-]	2	30
Coefficiente de distribuição entre os reservatórios RG1 e RG2	RG1RG2dist	[-]	0,7	0,95
Fator de dinâmica do escoamento RG1	RG1Fact	[-]	10	20
Fator de dinâmica do escoamento RG2	RG2Fact	[-]	1,1	1,2
Fator para a definição de capilaridade	CapRise	[-]	0,5	0
Tempo de concentração do escoamento	RouteTA	[h]	2,5	12

5.6 VOLUME ESCOADO

As razões do volume escoado pela precipitação para os anos hidrológicos de 2004 a 2011 (de 01 de outubro a 30 de setembro do próximo ano) tiveram média de 32% com desvio padrão de 3% (Tabela 16).

Segundo Maldonado (2009), as razões do volume escoado pela precipitação, para o ano Juliano de 2008 foram de 34,7% e de abril de 2008 a abril de 2009 de 32,9%. Os valores calculados para os mesmos períodos a partir dos dados simulados pelo modelo construído geraram valores de 33,7% e 33,9%.

Tabela 16: Volume escoado para os anos hidrológicos de 2004 a 2011 e a razão destes volumes pela precipitação

Ano Hidrológico	Volume escoado (mm)	Precipitação CRHEA (mm)	Razão entre volume escoado e precipitação (%)
2004/2005	415	1492	28%
2005/2006	396	1176	34%
2006/2007	457	1657	28%
2007/2008	461	1394	33%
2008/2009	443	1464	30%
2009/2010	530	1522	35%
2010/2011	613	1755	35%

O volume escoado diretamente na bacia simulado pelo modelo foi desprezível alcançando a margem de 1% da precipitação para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro dos anos hidrológicos de 2006/2007, 2009/2010 e de 2% para o ano hidrológico 2010/2011. Estes períodos apresentaram precipitação maior que 1500 mm. Na Figura 24, é mostrada a distribuição espacial da média de escoamento direto na bacia. O escoamento direto pode ter sido maior para o ano hidrológico de 2005/2006 quando na bacia foram observadas grandes áreas com solo exposto na entressafra do eucalipto (Figura 14c), não consideradas na simulação do uso do solo na bacia.

5.7 ESCOAMENTO DE BASE

A avaliação visual da estimativa do fluxo de base foi realizada com base no gráfico da Figura 28, na qual foi mostrada a comparação entre o escoamento de base dos dados

observados e simulados estimados através do filtro digital recursivo (ARNOLD & ALLEN, 1999) e o escoamento de base estimado diretamente pelo modelo. A comparação estatística entre os escoamentos de base filtrados resultou em um coeficiente NSE de 0,76. Segundo Huyck et al. (2005), uma avaliação separada da predição do modelo quanto ao escoamento de base e o escoamento superficial não é possível, uma vez que observações destes dois componentes não são disponíveis.

O escoamento de base foi satisfatoriamente reproduzido pelo modelo (linha verde), com um tempo de resposta do escoamento de base mais provável do que o estimado pela separação do hidrograma, apesar do módulo de águas subterrâneas do modelo J2K/JAMS ser apenas um simples conceito de armazenamento com uma função linear de fluxo (KRAUSE & FLUGEL, 2005). Segundo Huyck et al. (2005), os métodos de estimativas do escoamento de base, como a separação gráfica e a filtragem do hidrograma, não são fisicamente fundamentadas, o que reforça a utilização dos resultados originados pelo modelo.

Figura 28: Comparação entre o escoamento de base dos dados observados estimado através do filtro digital recursivo (linha vermelha), o escoamento do hidrograma simulado obtido também através do filtro (linha preta tracejada) e o escoamento de base estimado diretamente pelo modelo (linha verde).

Os resultados das simulações dos anos hidrológicos de 2004 a 2011 mostram que a razão entre o volume do fluxo de base pela precipitação variou de 25 a 32% e que 79 a 89% do volume anual escoado possivelmente seja contribuição do escoamento de base (Tabela 17).

Tabela 17: Volume do escoamento de base para os anos hidrológicos 2004 a 2011 e a razão destes volumes pela precipitação

Ano Hidrológico	Volume escoamento de base (mm)	Precipitação CRHEA (mm)	Razão entre volume escoado e precipitação (%)
2004/2005	384	1492	26%
2005/2006	378	1176	32%
2006/2007	413	1657	25%
2007/2008	434	1394	31%
2008/2009	408	1464	28%
2009/2010	473	1522	31%
2010/2011	521	1755	30%

Na Figura 29 é mostrada a comparação entre o volume total anual escoado, volume do escoamento de base anual e a precipitação anual. Foi realizado o cálculo da razão escoamento de base pelo volume total escoado. A correlação entre esta razão com a precipitação anual foi de -0,92. Assim quanto menor a precipitação maior é a contribuição do escoamento de base para o volume escoado na bacia e vice-versa.

Figura 29: Volume total escoado, escoamento de base anual e precipitação anual.

Foram estimados ainda os valores dos volumes do escoamento de base para o ano Juliano de 2005, para comparação com os valores obtidos por Wendland et al. (2007) e Barreto (2006) que utilizaram o método de Rushton & Tomlinson (1979). Os resultados são mostrados na Tabela 18. Os valores obtidos pelo modelo foram bem próximos dos valores estimados anteriormente pelos autores, com uma diferença total de 30 mm.

Tabela 18: Escoamento de base (mm) estimados para o ano de 2005 pelo modelo J2K/JAMS e por Wendland et al. (2007) e Barreto (2006)

mês/2005	Escoamento de base (mm)	
	Wendland et al. (2007); Barreto (2006)	J2K/JAMS
jan	33	30
fev	38	30
mar	44	33
abr	41	32
mai	41	32
jun	38	31
jul	37	31
ago	34	30
set	31	29
out	30	29
nov	27	28
dez	26	29
soma	419	364

6 CONCLUSÃO

O objetivo da construção de um modelo chuva-vazão capaz de simular o comportamento hidrológico da bacia piloto do Ribeirão da Onça foi alcançado com a construção de um modelo utilizando o sistema *framework* JAMS. Este sistema não possui literatura específica sobre 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 J2K. O presente estudo buscou reunir os trabalhos sobre este modelo e a partir do seu código o equacionamento foi reescrito e um fluxograma de simulação foi definido.

A adaptação do modelo J2K para a realidade brasileira foi satisfatória uma vez que o JAMS possui ferramentas (*Juice Builder* e *JADE*) que auxiliaram tanto na criação e modificação dos módulos quanto na execução das simulações e análise visual dos resultados.

Uma análise de sensibilidade abrangendo todos os 26 parâmetros como a realizada no presente estudo não foi encontrada na literatura. No total, 11 parâmetros foram considerados sensíveis evidenciando assim a complexidade do modelo. Outro aspecto de complexidade do modelo, que restringe a sua utilização para bacias com poucos dados é a discretização espacial da área simulada que exige mapas digitais de uso e ocupação do solo, tipos de solo, geologia e dados topográficos. Porém, a discretização por URH foi importante para a avaliação da variabilidade espacial dos processos hidrológicos na bacia.

O modelo construído foi capaz de simular o comportamento hidrológico da bacia quando foram comparados os hidrogramas de vazões observadas e simuladas. O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe para o período de calibração foi de 0,76 e para o período de validação de 0,81, ambos considerados muito bons pela literatura. Apesar da precipitação total do ano hidrológico 2010/2011, utilizado para validação do modelo, ter sido 20,2% maior que a média de 1460 mm no período de calibração, o modelo teve um satisfatório desempenho na predição dos picos e recessões do hidrograma. Isto demonstrou a transponibilidade do modelo, podendo este ser utilizado para avaliar os efeitos das mudanças climáticas na bacia do Ribeirão da Onça.

Finalmente, a reconstituição e o preenchimento de falhas da série histórica de vazão do Ribeirão da Onça auxiliará nos estudos de recarga do Sistema Aquífero Guarani, realizadas na bacia piloto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M.B. AND REFSGAARD, J.C. **Distributed Hydrological Modelling**, Kluwer Academic, Dordrecht, 1996, 321 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, ANA. **Evolução da rede hidrometeorológica nacional**. / Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. – v. 1, n. 1, (abr. 2007). Brasília : ANA, 2007. Disponível em: <www.ana.gov.br/hidrometeorologia/>. Acesso em: 06 ago 2010.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar e unidades térmicas. **Ciênc. Agrotec.**, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, 2008.

ALE, S.; BOWLING, L. C.; OWENS, P. R.; BROUDER, S. M.; FRANKENBERGER, J. R. Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management. **Agricultural Water Management**, v. 107, 2012, p. 23-33.

AMORE, L. The Guarani Aquifer: From Knowledge to Water Management, **International Journal of Water Resources Development**, 27:3, p. 463-476, 2011.

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.

•ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Q. J.R. Meteorol. Soc.**, v. 50, 1924, p. 121-125.

ARABI, M; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M.; ENGEL, B. A. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 42, n. 2, 2006, p. 513-528.

ARAÚJO, L. M., FRANÇA, A. B., POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná d Chaco-Paraná Basins, South america, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal**, 7, p. 317-336, 1999.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; MUTTIAH, R.; BERNHARDT, G. Automated base flow separation and recession analysis techniques. **GroundWater**, v. 33, n. 6, p. 1010-1018, 1995.

ARNOLD, J. G., AND ALLEN, P. M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records.” **Journal of the American Water Resources Association**, 35, n.2, 1999, p. 411–424.

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

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of Hydrologic Models for Forest Management and Climate Change Applications in British Columbia and Alberta**. Forum for Research and Extension in Natural Resources Society, Canada, 166 p., 2009.

BEDIENT, P. B.; HUBER, W. C. **Hydrology and Floodplain Analysis**. Addison-Wesley Publishing Company, 2 ed., 1992.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling**: The Primer, Wiley, England: 2000.

_____. **Rainfall-Runoff Modelling**. John Wiley & Sons, Inc., Chichester, 1-360, 2008.

BOLTZMANN, L. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie, em: *Annalen der Physik und Chemie*, Bd. 22, 1884, p. 291-294

BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing base-flow from stream hydrographs. **Proceedings...** of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference, 28 november–2 December, Auckland, New Zealand, 2005.

BRUTSAERT, W. **Hydrology**: An introduction. Cambridge University Press, 2005.

BUTTS, M. B.; PAYNE, J. T.; KRISTENSEN, M.; MADSEN, H. (2004). An Evaluation of the Impact of Model Structure on Hydrological Modelling Uncertainty for Streamflow Simulation. **Jornal of Hydrology**, 298, p. 242-266.

CARNEIRO, R. L.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C. A. M.; LEITE, F. P.; SEDIYAMA, G. C.; NEVES, J. C. L. Consumo de água em plantios de Eucalipto: Parte 2 Modelagem da resistência estomática e estimativa da transpiração em tratamentos irrigados e não-irrigados. **R. Árvore**, v. 32, n. 1, 2008, p. 11-18.

CARVALHO, Dilma Lúcia Resende. **Balanço de energia em folhas de *Rapanea guianensis* Aubl.**, Brasília, Universidade de Brasília - UnB, 1993, Dissertação de Mestrado, 68 p.

CASTILHO, C. P. G. **Interceptação de Chuvas na cultura da cana-de-açúcar**. 2000. Dissertação (mestrado em engenharia agrícola)-UNICAMP, Campinas, 2000, 256 p.

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).

CHIN, D. A. **Water – resources engineering**. Prentice Hall, 2000. 750 p.

CHOW, V.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, Inc., 1988, 572 p.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, v. 19, 1973, p. 1-20.

CORREIA, F. W. S.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; GIELOW, R.; KUBOTA, P. Y. Calibração do “simplified simple biosphere model- SSIB” para áreas de pastagem e floresta amazônica com dados do LBA. **Acta Amazonia**, v. 35, n.2, 2005, p. 273-288.

da CUNHA, A. T. **Estimativa experimental da taxa de recarga na zona de afloramento do aquífero guarani, para a região de São Carlos – SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)-EESC/USP, São Carlos, 2003.

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

DORUM, A.; YARAR, A.; SEVIMLI, M. F.; ONÜÇYILDIZ, M. Modelling the rainfall–runoff data of susurluk basin. **Expert Systems with Applications**, n. 37, 2010, p. 6587-6593.

ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, wich were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, 2008, p. 168-173.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F.; MALEKIAN, A. Effect of SRTM resolution on mosphometric feature identification using neural network – self organizing map. **Geoinformatica**, v. 14, 2010, p. 405-424.

EWEN, J. Hydrograph matching method for measuring model performance. **Journal of Hydrology**, v. 408, 2011, p. 178-187.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crop Evapotranspiration - Guidelines For Computing Crop Water Requirements**, v. 56, 1998.

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

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. Prentice Hall, 4 ed., 2001, 598 p.

FISCHER, C.; KRALISCH, S.; KRAUSE, P.; FINK, M.; FLÜGEL, W. A. Calibration of hydrological model parameters with the JAMS framework. **Anais...**In: 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia, 13-17 July 2009.

FLÜGEL, W. A. Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the river Bröl, Germany. **Hydrological Processes**, v. 9, 1995, p. 423-436.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 5, 1992, p. 661-669.

GOMES, L. H. **Mecanismos de infiltração e recarga em zona de afloramento do Aquífero Guarani**. 2008. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)-EESC/USP, São Carlos, 2008.

GOMÉZ, A. A.; RODRÍGUEZ, L. B.; VIVES, L. S. The Guarani Aquifer System: estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. **Hydrogeology Journal**, v. 18, 2010, p. 1667-1684.

GUANABARA, R. C. **Modelo transiente de fluxo em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. 2011. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)-EESC/USP, São Carlos, 2011.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of Hydrologic Engineering**, 1999, p. 135-143.

HARMEL, R. D.; SMITH, P. K. Consideration of measurement uncertainty in the evaluation of goodness-of-fit. **Journal of Hydrology**, v. 337, 2007, p. 326-336.

HENDERSON, F. M. **Open channel flow**. The Macmillan Company, 1966. 522 p.

HUANG, M.; LIANG, X. On the assessment of the impact of reducing parameters and identification of parameter uncertainties for a hydrologic model with applications to ungauged basins. **Journal of Hydrology**, v. 320, pp. 37-61, 2006.

HUYCK, A. A.; PAUWELS, V. R. N.; VERHOEST, N. E. C. A base flow separation algorithm based on the linearized Boussinesq equation for complex hillslopes. **Water Resources Research**, v. 41, 2005, p. 1-18.

Instituto Geológico e Mineiro (2001). Água Subterrânea: Conhecer para Preservar o Futuro. Instituto Geológico e Disponível em: <http://eGeo.ineti.pt/geociencias/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm>. Acesso em: 21/04/2012.

JANSSEN, P.H.M.; HEUBERGER, P.S.C., **The role of sensitivity analysis and identifiability analysis in model calibration**. In: RIVM report nr. 723001007, RIVM, Bilthoven, the Netherlands (1992)

JOHNSON, R. A.; BHATTACHARYYA, G. K. **Statistics: Principles and Methods**. University of Wisconsin at Madison. 2nd Ed, 1992.

KAJAMI, N.; GUPTA, H.; WAGENER, T.; SOROOSHIAN, S. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of Hydrology**, n. 298, p. 112-135, 2004.

KIKER, G. A.; CLARK, D. J.; MARTINEZ, C. J.; SCHULZE, R. E. A JAVA-based, object-oriented modeling system for Southern African hydrology. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 49, n. 5, 2006, p. 1419-1433.

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.

KRALISCH, S.; ZANDER, F.; KRAUSE, P. Coupling the RBIS Environmental Information System and the JAMS Modelling Framework. In: 18th World IMACS / MODSIM Congress, **Anais...** Cairns, Australia, p. 13-17, 2009.

KRAUSE, P. Das hydrologische Modellsystem J2000 – **Beschreibung und Anwendung in großen Flußgebieten** (The hydrological modelling system J2000 – Documentation and application in large river basins); Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Band 29, 2001.

KRAUSE, P. Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. **Physics and chemistry of the Earth**, n. 27, p. 663-673, 2002.

KRAUSE, P.; FLÜGEL, W. A. Integrated research on the hydrological process dynamics from the Wilde Gera catchment in Germany. In: Headwater Control VI: Hydrology, Ecology and Water Resources in Headwaters, **Anais...**IAHS Conference, Bergen, Norway, 2005.

KRAUSE, P.; BENDE-MICHL, U.; FINK, M.; HELMSCHROT, J. KRALISCH, S.; KÜNNER, A. 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: 18th World IMACS / MODSIM Congress, **Anais...**Cairns, Australia, p. 13-17, 2009.

KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences**, v. 31, n. 1, 1986.

LASTORIA, B. **Hydrological processes on the land surface:** a survey of modeling approaches. FORALPS Technical Report, 9. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy, 2008, 56 p.

LEGATES, D. R.; McCABE Jr., G. J. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, 1999, p. 233-241.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. A situação do monitoramento das águas no Brasil: instituições e iniciativas. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n.3, p. 113-135, 2000.

MALDONADO, L. H. **Validação experimental de metodologias para quantificação contínua de vazão no Ribeirão da Onça**. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento)-EESC/USP, São Carlos, 2009.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 04, p. 793 – 804, 2011.

MARTINEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUNIA, J. The hitorical evolution of the Angstrom formula and its modification: Review and Bibliography. **Agricultural and forest meteorology**, v. 33, 1984, p. 109-128.

MEIRA NETO, A. A.; MELO, D. C. D.; WENDLAND, E. C. Bacia representativa em região de afloramento do aquífero Guaraní. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...Maceió, AL**, 2011.

MENDENHALL, W.; SINCICH, T. **Statistics for engineering and the sciences**. Prentice-Hall Internacional, 4th ed., 1995, 1182 p.

MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; FRANCEY, R. J.; MCINTYRE, J.A.; MEIR, P.; RIGGAN, R.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. Fluxes of carbon, water and energy over Brazilian cerrado: an analysis using eddy covariance and stable isotopes. **Plant, Cell and Environment**, v. 20, 1997, p. 315-328.

MONTEITH, J.L. (1975) **Vegetation and atmosphere**, v.1, Principles, Academic Press, London

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. **Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 50, n. 3, 2007, p. 885-900.

NASR, A. E.; BRUEN, M.; JORDAN, P.; MOLES, R.; KIELY, G.;BYRNE, P. A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland. **Water Research**, v. 41, n 5, 2007, p. 1065-1073.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, 1990, p. 1465–1473.

ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS (OEA). **Aquífero Guaraní**: programa estratégico de ação. Edição Bilíngue. Brasil, Argentina, Paraguai, Uruguai, 424 p., 2009.

PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **Journal of Hydrology**, v. 242, 2001, p. 275-301.

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.

PÔMPEO, C. A. **Balanço Hídrico da zona não-saturada do solo na bacia do Ribeirão da Onça (SP)**. Tese de Doutorado, São Carlos, SHS-EESC-USP, 1990.

PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices**. Water Resources Publications, 1982.

PINCELLI, R. P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. Dissertação (mestrado), UNESP, Botucatu/SP, 2010, 65 p.

RABELO, J. L.; WENDLAND, E. Assessment of groundwater recharge and water fluxes of the Guarani Aquifer System, Brazil. **Hydrogeology Journal**, n. 17, p. 1733–1748, 2009.

REBOUÇAS, A. C.; AMORE, L. O Sistema Aquífero Guarani – SAG. **Revista Brasileira de Águas Subterrâneas**, v. 16, 2002, p. 135-143.

RIBEIRO, A. S.; SHINZATO, M. P.; WENDLAND, E. C.; ROEHRIG, J. Avaliação do Framework JAMS na construção do modelo chuva-vazão para a bacia hidrográfica em zona de afloramento do aquífero Guarani. In: Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Maceió, AL, 2011.

ROSSMAN, L. A. **Storm Water Management Model, Version 5.0: User's manual**. U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, O.H., 2010.

RUSHTON, K. R.; TOMLINSON, L. M. Possible mechanisms for leakage between aquifers and rivers. **Journal of Hydrology**, v. 40, 1979, p. 49-65.

SAMUEL, J.; COULIBALY, P.; METCALFE, R. A. Identification of rainfall-runoff model for improved baseflow estimation in ungauged basins. **Hydrological Processes**, v. 26, 2012, p. 356-366.

SANCHES, L.; ANDRADE, N. L. R.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L. Índice de área foliar em floresta de transição Amazônia cerrado em diferentes métodos de estimativa. **Ciência e Natura**, UFSM, v. 30, n.1, 2008, p. 57-69.

SANTOS, R. S. M.; OLIVEIRA, I. P.; MORAIS, R. F.; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVEZ, B. J. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria sp.* em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente cerrado. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 37, n. 2, 2007, p. 119-124.

SARAN, S.; STERK, G.; PETERS, P.; DADHWAL, V. K. Evaluation of digital elevation models for delineation of hydrological response units in Himalayan watershed. **Geocarto International**, v. 25, n. 2, 2010, p. 105-122.

SCALON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 1, p. 18-39.

SENA, J. O. A.; LABATE, C. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Caracterização fisiológica da redução do crescimento de mudas de citros micorrizadas em altas doses de fósforo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, 2004, p. 827-832.

SILVA, R. N. **Características fisiológicas e bioquímicas de plantas de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] sob condições de hipoxia**. Pelotas, 2009. – 96f. ; Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal. Instituto de Biologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2009.

SILVA, F.D.S.; PEREIRA FILHO, A.J.; HALLAK, R. 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, 2009, p. 292-307.

SINGH, V. P. **Computer Models of Watershed Hydrology**, Water Resources Publication, 1995, 1130 p.

SINGH, A. K.; TRIPATHY, R.; CHOPRA, U. K. Evaluation of CERES-Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. **Agricultural Water Management**, v. 95, 2008, p. 776-786.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications**. Water Resources Publications, ed. 1, 2002.

SINGH, V. P.; FREVERT D. K. **Watershed models**. Taylor & Francis Group, 2006.

SHI, P.; CHEN, C.; SRINIVASAN R.; ZHANG, X.; CAI, T.; FANG, X.; QU, S.; CHEN, X.; LI, Q. Evaluating the SWAT model for hydrological modeling in the Xixian watershed and a comparison with the XAJ model. **Water Resources Management**, v. 25, 2011, p. 2595-2612.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model Calibration. In: SINGH, V. P. **Computer Models of Watershed Hydrology**, Water Resources Publication, 1995.

STEENBERG, N. V.; WILLEMS. Method for testing the accuracy of rainfall-runoff models in predicting peak flow changes due to rainfall changes, in climate changing context. **Journal of Hydrology**, v. 414-415, 2012, p. 425-434

TANIKAWA, D. H.; MANZIONE, R. L. Análise temporal do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica em área de recarga do aquífero Guarani. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, II., 2010, Aracajú. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 2010. p. 724-729.

TESTEZLAF, R.; COLETTI, C.; MATSURA, E. E. Distribuição de raízes da laranja 'Valência' irrigada por autopropelido. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 42, n. 6, 2007, p. 905-908.

TRZESNIAK, P. Indicadores quantitativos: reflexões que antecedem seu estabelecimento. **Ci. Inf.**, v. 27, n.2, 1998, p. 159-164

TUCCI, C. E M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, ed. 1, 1998

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; BOSCH, D. D. Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 48, n. 03, 2005, p. 1025-1040

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, v. 14, n. 28, 2007, p. 235-276.

WALDHEIM, P. V.; CARVALHO, V. S. B.; CORREA, E.; FRANÇA, J. R. A. Zoneamento climático da cana-de-açúcar, da laranja e do algodão para região nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 29, n. 2, 2006, p. 30-43.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, 2007, p. 261-269.

WITSCHORECK, R. SCHUMACHER, V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no município de Santa Maria-RS, **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, 2003, p. 177-183.

WOLF, M.; PFENNIG, B.; KRAUSE, P.; FLÜGEL, W. A. Delineation of topographic process entities using SRTM for hydrological modeling. In: 18th World IMACS/MODSIM Congress, **Proceedings...**Cairns, Australia, 2009.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo do ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, 2002, p. 421-427

ANEXO 1: fluxograma dos módulos do J2K/JAMS

Figura 30: Fluxograma do módulo de inicialização dos parâmetros do solo e hidrogeológicos do modelo J2K/JAMS

Figura 31: Fluxograma dos módulos de interceptação e ETPpot do modelo J2K/JAMS

Figura 32: Fluxograma do módulo solo-água do modelo J2K/JAMS

Figura 33: Fluxograma do módulo de águas subterrâneas do modelo J2K/JAMS

ANEXO 2: manual de utilização do *JUICE builder*

JUICE - *Jams User Interface Component Editor**

O JAMS *Builder* (JUICE) foi desenvolvido a fim de construir e / ou configurar modelos ambientais. Usando JUICE, quaisquer modelos podem ser combinados e configurados pelo "princípio do módulo". Para este efeito, existem dois tipos de módulos disponíveis. Por um lado, há componentes que descrevem os processos individuais. Por outro lado, há componentes de contexto que controlam a execução do modelo. Para a troca de dados entre os componentes e contextos são necessários atributos, que podem ser variáveis, e também parâmetros.

JUICE: Estrutura e Âmbito de utilização.

A interface do JAMS *Builder* será explicada abaixo.

A instalação do JAMS cria um ícone JAMS *Builder* no desktop e no menu Iniciar, Referente ao JAMS *User Interface Component Editor* (JUICE). Depois de iniciar o *JUICE*, aparece a seguinte janela que é dividida em três áreas. Na janela superior esquerda você pode ver as bibliotecas que são carregadas. A janela inferior esquerda mostra os processos em execução. A área da direita mostra o modelo.

*http://jams.uni-jena.de/ilmswiki/index.php/Tutorial_Advanced_Users

Estrutura da barra de menu

A barra de menu contém os itens *File*, *Edit*, *Model*, *Logs*, *Windows* e *Help*. Além disso, as funções a seguir são integradas sob a forma de ícones.

Open new model

Load model

Save model

Jams settings

Start model

Open JAMS Launcher

Open JAMS Datastore Editor

Open JADE

Copy model surface

Paste model surface

Show info log

Show error log

JAMS Website

Close

No item menu *File* os modelos podem ser carregados, guardados e fechados.

O item de menu *Edit* permite editar, carregar ou salvar as configurações e oferece uma função de pesquisa.

No item *Edit Preferences* você pode editar as bibliotecas que são utilizadas, a extensão dos dados de saída, a saída de registros e informações na janela *Model*. Essas configurações podem ser salvas para posterior modelagem no item *Save Preferences* e podem ser reutilizadas, clicando em *Load Preferences*.

O menu *Model* é apenas ativado quando um modelo é carregado. Sendo possível iniciar ou configurar o modelo. Carregar e salvar conjuntos de parâmetros podem ser feitos usando *Load Model Parameters* e *Save Model Parameters*.

No menu *Help* pode-se obter ajuda online clicando em *JAMS online*.

Aplicando o JUICE para o desenho e configuração do Modelo

Criação de um modelo

Com o JUICE é possível a criação de modelos. Nos próximos passos, o procedimento é exemplificado pelo modelo ABC.

Passo 1

Selecione o item *New Model* no menu *File*. Um modelo vazio é aberto. A parte esquerda da janela aberta exhibe os componentes (contexto), que faz parte do modelo. A parte direita da janela pode mostrar 2 abas diferentes. A primeira é a aba *Component Configuration*, na qual os componentes dos modelos (contexto) são editados, os seus atributos são ligados e a parametrização pode ser realizada. A segunda aba mostra o GUI (guide user interface) *builder*, no qual edita-se o menu do usuário.

Passo 2

Criação de um component de contexto do tipo "JAMS *Temporal Context*". Isto permite uma iteração temporal de simulação. Clique na biblioteca jams-main.jar, que está listada no topo da janela esquerda. Lá estará o JAMSTemporalContext abaixo do jams.model. Carregue isto para a janela da direita em cima do "New Model".

Criação do contexto de atributo *modelTimeInterval* dentro do modelo. Clique no *Component Attributes* na lista de atributos abaixo do item *New Model*.

Clique em adicionar. Nomeie como *modelTimeInterval*. Selecione *TimeInterval* como tipo de atributo (*attribute type*). Você deve determinar um intervalo de tempo para a simulação. (Note que os dados para o tempo selecionada devem estar disponíveis). Selecione 01.01.1970 até 01.01.1975 como intervalo de tempo. Seleccionem mês (*Month*) como unidade temporal. Então clique em *Set*. O atributo *modelTimeInterval* está agora ligado ao intervalo de tempo selecionado.

Vá até o componente JAMSTemporalContext. Linque o component de timeInterval ao atributo de modelo modelTimeIntervall, que foi criado. Selecione isto da lista de atributos no botão da caixa à direita. Clique em LINK.

Crie um novo atributo *time* e linque ao componente de atributo *current*.

Passo 3

Adicione um componente ABCDataReader ao modelo. Você achará isto na biblioteca jams-democomponents.jar na pasta jams.components.demo.abc. O componente ABCDataReader permite a leitura dos dados. Ele lê as datas e valores de precipitação e vazão do arquivo de texto.

O local do arquivo de texto deve ser adicionado ao componente de atributo *fileName*. Para tanto, você deve entrar com o caminho do arquivo do seu arquivo de dados como valor do atributo *fileName*. Clique em *SET*.

Crie o atributo *precip* (para precipitação) e *obsQ* (para medidas de vazão) no *JAMSTemporalContext*. Eles devem conter os valores de precipitação e vazão que foram medidos no intervalo de tempo selecionado anteriormente. Selecione o componente *precip*. Entre como nome *precip* na caixa *Modified Attribute*. Clique em *LINK*. O contexto attribute *precip* do contexto *JAMSTemporalContext* foi criado e lincado.

Agora selecione o component de atributo vazão. Entre com obsQ na caixa Modified Attribute. Clique em LINK. O atributo de contexto obsQ do contexto JAMSTemporalContext foi criado e lincado.

Passo 4

O componente central do modelo é o componente do ABC model. O modelo ABC é um modelo linear que relaciona a precipitação com a vazão. Adicione o componente ABCModel ao modelo. Você o achará na biblioteca jams-democomponents.jar na pasta jams.components.demo.abc.

Linque os dados de precipitação ao componente. Selecione o componente de atributo precip. Na caixa Modified Attribute da the lists de atributos, que já está no contexto JAMSTemporalContext. Clique em LINK. Crie novos atributos para armazenamento de água

(storage) e vazão simulada (simQ) como descrito no passo 3. A próxima janela deve aparecer.

Os componentes de atributos a,b,c e initStorage permitem a parametrização do componente.

Insira os seguintes valores: a=0.2, b=0.2, c=0.75 e initstorage=50.

Passo 5

Para a visualização dos resultados você precisará do componente TSPlot. Adicione isto ao componente do modelo. Você o achará na biblioteca jams-components.jar na pasta jams.components.gui.

Linque o componente de atributo tempo (*time*) ao atributo *time* do contexto *New Model*. Selecione componente de atributo *time*. Selecione o contexto *New Model* do botão da caixa da direita e selecione o atributo *time*. Clique em **LINK**. Linque o componente de *valueLeft* aos atributos *simQ* e *obsQ* do contexto *JAMSTemporalContext*. A seguinte janela deverá aparecer.

Passo 6

Agora a interface do modelo deve ser criada para o modelo. Vá para a aba GUI Builder.

Os atributos a,b, e c devem ser editados na interface do modelo. Para isso, crie um novo grupo clicando em *add Group* e de o nome de "ABC model". Clicando em *Add Property* um caixa deve ser criada para cada atributo. Note que o atributo deve estar lincado ao componente da direita. Além disso, o intervalo dos valores deve ser definido.

O grupo ABC Model está finalizado e deve se parecer com isto:

A exibição dos resultados da modelagem em termos de cor devem ser ajustadas no diagrama. Portanto, crie um novo grupo clicando em *Add Group* e nomeie como "diagram". Crie editores para o atributo *colorLeft*. Nomeie como *colors left* e linque os atributos criados ao componente de atributo TSPlot.

O grupo diagrama está finalizado e deve ser parecer com isto.

Passo 7

Salve o modelo.

O modelo está terminado. Agora você pode iniciá-lo diretamente utilizando o *JUICE* ou usando o *JAMSLauncher*. Se você iniciá-lo pelo *JAMSLauncher*, você poderá editar os atributos pela interface gráfica.

A seguinte saída deverá aparecer. A vazão medida é mostrada em azul e a simulada em vermelho.

Configurando os Componentes do Modelo

O JUICE permite a configuração dos componentes do modelo. O procedimento será explicado pelo componente TSPlot do modelo ABC como exemplo

No modelo criado não foram definidos os valores de parâmetros. Como resultado, os valores foram assumidos por padrão do modelo. Porém eles podem ser modificados para tornar os resultados mais atrativos.

Nos selecionamos os seguintes valores para a modificação.

titleLeft (título do eixo esquerdo) : vazão simulada

titleRight (título do eixo da direita): precipitação

colorLeft (cor dos valores mostrados na esquerda): *red; green*

colorRight (cor dos valores mostrados na direita): *cinza*

typeLeft (tipo de gráfico da esquerda, linha ou barra): *0* (linha)

typeRight (tipo de gráfico da esquerda, linha ou barra): *1* (barra)

xAxisTitle (título do eixo x): *time*

leftAxisTitle (título do eixo y da esquerda): *runoff [m³/s]*

rightAxisTitle (título do eixo y da direita): *precipitation[mm]*

rightAxisInverted: *1*

O componente de atributo *valueright* deve ser lincado a *precip* no contexto JAMSTemporalContext para mostrar os valores de precipitação. A janela deve se parecer com isto :

O gráfico seguinte resulta das modificações feitas:

Trocando componentes

O JUICE permite a substituição dos componentes do modelo por outros componentes. Para isso, os atributos de entrada e saída devem ser corretamente lincados.

Como exemplo, o componente *CalcPotentialET* será substituído pelo componente Penman no modelo chuva-vazão J2K. Os dois componentes calculam a ETPpot porém utilizando algoritmos diferentes.

Passo 1: abrir modelo e Passo 2: Apagar componente

Carregue o modelo *j2k_gehlberg.jam* do exemplo que é disponibilizado quando o software é baixado. Clicando no componente *CalcPotentialET* do *HRULoop* cria-se a seguinte imagem. Apague o componente *CalcPotentialET* a fim de integrar o outro componente de evapotranspiração no modelo. Clique com a direita no componente e selecione delete.

Passo 3: Adicionar o novo componente

Na biblioteca *J2K.jar* na pasta *org.unijena.j2k.potET* você achará o componente Penman. Carregue-o até a antiga posição do componente *CalcPotentialET*.

Passo 4: Parametrização

Atribua o valor d ao atributo tempRes e o valor 1.2 ao atributo et_cal.

Passo 5: Lincando os atributos de contexto

Linque os atributos de contexto wind,tmean,rhum,netRad,elevation,area,potET e actET aos correspondentes atributos de contexto do HRULoop.

O antigo componente usado (CalcPotentialET) criou os atributos rs e ra. Estes atributos continuam ligados no componente SpatialWeightedSumAggregator1. Uma vez que não serão mais utilizados, eles devem ser apagados do linque do componente SpatialWeightedSumAggregator1.

Selecione o componente SpatialWeightedSumAggregator1 e apague os linques do componente de atributo apagando os valores de rs e ra da caixa *Modified Attribute* e depois linque de novo.

Inicie o novo modelo. A seguinte imagem mostra o gráfico do resultado da simulação.

ANEXO 3: série completa de vazão

Figura 34: Série completa de vazão, com destaque para os períodos de aquecimento, calibração e validação.

Figura 35: Série de vazão para os períodos de calibração e validação