

CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO SMAP PARA A BACIA DO RIO SALITRE CONSIDERANDO DIFERENTES CENÁRIOS CLIMÁTICOS

*Bárbara Valois Coutinho Dias dos Santos*¹; & Andrea Sousa Fontes²*

Resumo – A necessidade de gestão dos recursos hídricos, associada ao monitoramento escasso de variáveis hidrológicas leva à adoção de ferramentas para atenuação deste problema, tais como os modelos hidrológicos. A bacia do rio Salitre é uma sub-bacia do rio São Francisco, totalmente inserida no estado da Bahia em uma região semiárida e é palco de conflitos pelo uso no estado. O trabalho apresentado realizou a calibração do modelo hidrológico do tipo chuva-vazão SMAP, considerando a classificação dos anos do período analisado em cenários climáticos seco, médio e úmido, visando melhor representatividade do modelo. A análise da representatividade julgou o modelo adequado para estimativa de vazões no rio Salitre sendo o cenário o seco o que obteve melhores resultados.

Palavras-Chave – Modelagem chuva-vazão; rio Salitre; Semiárido.

CALIBRATION OF SMAP HYDROLOGICAL MODEL TO SALITRE RIVER CONSIDERING DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS

Abstract – The need for water management, coupled with scarce monitoring of hydrological variables leads to the adoption of tools to mitigate this problem, such as the hydrological models. The basin of the Salitre river is a sub-basin of the São Francisco river, fully inserted in the state of Bahia in a semiarid region and hosts conflicts in the state. The presented work performed calibration of rainfall-runoff hydrological model SMAP, considering the classification of the years analyzed in climate scenarios dry, medium and wet, seeking better representation. Analysis of the model representative deemed the model appropriate to estimate flows in the Salitre river and the dry scenario achieved the best results.

Keywords – Rainfall-runoff modeling; Salitre river; Semiarid.

INTRODUÇÃO

Diante da necessidade de gestão dos recursos hídricos, juntamente com a escassez de dados hidrológicos medidos, surge a modelagem hidrológica como ferramenta para atenuação de tal problema. Através da sintetização de dados fluviométricos a partir de dados pluviométricos, uma vez que estes são mais comuns que os primeiros, os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são amplamente utilizados para auxiliar o planejamento estratégico dos recursos hídricos.

A aplicação de um modelo hidrológico é realizada através das etapas de calibração, validação e simulação. Destas, destaca-se a calibração como uma etapa determinante na adequação da representatividade do modelo à bacia hidrográfica motivo de estudo, condicionando a qualidade dos resultados da simulação.

¹ Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental da UFRB. e-mail: b_valois@hotmail.com

² Professora Adjunto, CETEC/UFRB – Campus Cruz das Almas, Bahia. e-mail: andreafontes@ufrb.edu.br

A representação do regime de escoamento de um rio por meio da modelagem hidrológica, especialmente em bacias hidrográficas mais complexas, é muitas vezes um processo dificultoso e exige experiência do modelador. O presente trabalho sugere a realização de multicalibrações para obtenção de melhores resultados de representatividade do modelo, nas quais são realizadas calibrações distintas para diferentes condições hidroclimatológicas.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar e analisar a representatividade da calibração do modelo hidrológico SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) para a bacia hidrográfica do rio Salitre, sub-bacia do rio São Francisco com regime de escoamento complexo e totalmente inserida no estado da Bahia. Adotou-se metodologia de multicalibração visando obtenção de melhor representatividade do modelo, considerando-se períodos úmidos, secos e médios.

METODOLOGIA

A metodologia adotada para calibração do modelo SMAP consistiu em: (i) levantamento e tratamento de dados hidroclimatológicos; (ii) definição dos cenários climáticos de acordo com a classificação da condição hidrológica; (iii) calibração do modelo SMAP em sua versão diária; (iv) análise da representatividade do modelo.

Levantamento e tratamento de dados

Os dados de precipitação e vazão, necessários para calibração do modelo, foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível no Hidroweb, e no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de evapotranspiração inseridos no modelo foram calculados a partir de dados de temperatura disponíveis no BDMEP. A metodologia de cálculo adotada foi desenvolvida por Hargreaves-Samani (CHAGAS et. al., 2006) e baseia-se em valores de temperaturas média, máxima e mínima e radiação extraterrestre. Eventuais falhas nas séries de precipitação no período de análise foram preenchidas através do método da ponderação regional, descrito por Tucci (2007).

Definição dos cenários climáticos

Devido à complexidade de representação das fases do escoamento e visando obter melhor representatividade do modelo, as séries de vazão e precipitação obtidas no levantamento de dados foram separadas de acordo com o período correspondente ao ano hidrológico da bacia hidrográfica em estudo e o comportamento hidroclimatológico do ano classificado como seco, úmido ou médio. Foi testada a classificação dos anos hidrológicos de acordo com a metodologia da classe hidrológica (CHid), proposta por Genz e Luz (2008) e a partir do valor de precipitação anual, sendo os anos hidrológicos classificados de acordo com limites definidos pela precipitação mais o desvio padrão e precipitação menos o desvio padrão.

Estrutura do modelo SMAP

O modelo SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) é um modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão, classificado como determinístico, conceitual e concentrado. Segundo Lopes (1999), o SMAP foi desenvolvido por Lopes J. E. G., Braga B. P. F. e Conejo J. G. L. em 1981, sendo apresentado no International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling e publicado pela Water Resources Publications em 1982.

A metodologia de simulação de vazão diária pelo modelo é constituída pela representação das fases do escoamento (superficial, base e subterrâneo) em três reservatórios: reservatório do solo (zona aerada), reservatório da superfície da bacia e reservatório subterrâneo (zona saturada), com variáveis atualizadas a cada dia. O eventual transbordo do reservatório do solo é transformado em escoamento superficial. Para calibração são necessários de 30 a 90 dias de dados de vazão, incluindo eventos de cheia. A Figura 1 representa a estrutura do SMAP em sua versão diária, apresentando os dados de entrada, parâmetros e formulações do modelo.

DADOS DE ENTRADA	PROCESSO SIMULADO	REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	PARÂMETROS	DADOS DE SAÍDA
<p>Precipitação</p> <p>Evapotranspiração</p> <p>Tipo de solo</p>	<p>Vazão</p>	$R_{solo}(i+1) = R_{solo}(i) + P - Es - Er - Rec$ $R_{sup}(i+1) = R_{sup}(i) + Es - Ed$ $R_{sub}(i+1) = R_{sub}(i) + Rec - Eb$ <p>Inicialização: $R_{solo}(1) = Tu_{in} \cdot Str$ $R_{sup}(1) = 0$ $R_{sub}(1) = Ebin / (1 - k_k) / Ad \cdot 86.4$</p> <p>Onde: R_{solo} = reservatório do solo (zona aerada) R_{sup} = reservatório da superfície da bacia R_{sub} = reservatório subterrâneo (zona saturada) P = chuva Es = escoamento superficial Er = evapotranspiração real Rec = recarga subterrânea Ed = escoamento direto Eb = escoamento básico Tu_{in} = teor de umidade inicial (adimensional) $Ebin$ = vazão básica inicial (m³/s) Ad = área de drenagem (km²)</p>	<p>Str - capacidade de saturação do solo (mm)</p> <p>$K2t$ - constante de recessão do escoamento superficial (dias)</p> <p>$Crec$ - parâmetro de recarga subterrânea (%)</p> <p>Ai - abstração inicial (mm)</p> <p>$Capc$ - capacidade de campo (%)</p> <p>Kkt - constante de recessão do escoamento básico (dias)</p> <p>Faixas de variação: $100 < Str < 2000$ $0.2 < K2t < 10$ $0 < Crec < 20$ $2 < Ai < 5$ $30 < Capc < 50$ $30 < Kkt < 180$</p>	<p>Série sintética de vazão diária</p>

Figura 1: Representação do modelo SMAP em sua versão diária (Fonte própria)

Calibração do modelo

A verificação do ajuste dos parâmetros na calibração do modelo baseia-se em três aspectos: verificação da aderência do gráfico de vazão calculada ao de vazão observada, através de observação visual; cálculo do coeficiente de correlação; e cálculo dos valores de funções objetivo para valores médios, mínimos e máximos, que devem ser minimizadas. Sendo que a versão diária do modelo hidrológico foi calibrada para períodos de diferentes condições climatológicas, através de uma multicalibração realizada para anos hidrológicos úmidos, médios e secos, sendo obtidos diferentes conjuntos de parâmetros calibrados para cada um destes períodos.

Análise da representatividade do modelo

Para análise da representatividade do modelo, são adotados como parâmetros comparativos, além dos valores de correlação e funções objetivo obtidos na calibração e na validação; valores de vazões médias, máximas e mínimas; coeficiente de Nash-Sutcliffe (The Nash-Sutcliffe Efficiency –

NSE); Erro médio quadrático (RMSE); Erro percentual no volume (EV); e proporção de acertos. O valor máximo de NSE, correspondente ao ajuste perfeito das vazões calculadas às vazões observadas, é de 1. Segundo Collischonn (2001), o valor do NSE é fortemente sensível a valores de vazões máximas, sendo que a representatividade do modelo é considerada adequada para valores de NSE superiores a 0,75 e aceitável para valores entre 0,36 e 0,75. A proporção de acertos relaciona o número de vezes que ocorreu estimativa correta da vazão à quantidade de estimativas realizadas. Considera-se acerto um valor de vazão calculada pelo modelo dentro da faixa de variação correspondente a uma diferença máxima de 10% da vazão observada.

Com a análise da representatividade do modelo SMAP para a bacia hidrográfica em estudo, define-se a faixa de vazões que é melhor representada, considerando-se período seco e período úmido na sazonalidade do escoamento durante o ano, bem como verificação dos parâmetros calibrados pelo modelo para anos mais secos e anos mais úmidos.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo será a bacia hidrográfica do rio Salitre, sub-bacia do Rio São Francisco, totalmente inserida no estado da Bahia, abrangendo uma área de 14.351 Km², localizada conforme apresentado na Figura 2.

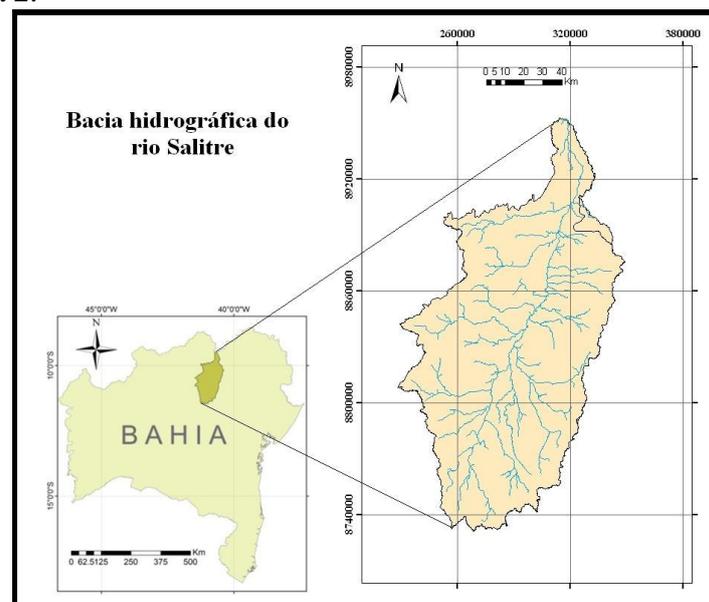


Figura 2: Localização da área de estudo (Fonte própria)

Localizada na região semiárida, a bacia do rio Salitre é caracterizada por uma distribuição (espacial e temporal) irregular das chuvas e ocorrência de déficit hídrico. Conseqüentemente há trechos de intermitência ao longo do rio. Sua nascente está localizada no município de Morro do Chapéu e deságua na margem direita do rio São Francisco, perto de Juazeiro, ao norte, a jusante da barragem de Sobradinho. Na margem esquerda do Rio Salitre, ao norte da bacia, está localizado o rio Pacuí. A vazão deste afluente é a de maior influência no escoamento superficial do rio Salitre em seu trecho baixo. Cabe ressaltar ainda que, por volta de 1983, foi construída a barragem Ouro Branco no município de Ourulândia, modificando a contribuição da área de drenagem à montante do reservatório. Desde que foi construído o barramento, não houve extravasamento e, portanto, a contribuição da área a sua montante se tornou nula.

O cenário atual da bacia hidrográfica em estudo é de ocorrência de demanda maior que a disponibilidade da água, o que a torna foco na gestão de recursos hídricos no estado da Bahia, uma vez que é palco de diversos conflitos pelo uso da água.

RESULTADOS

Levantamento de dados e definição de cenários de calibração

Através da comparação da disponibilidade dos dados pluviométricos com dados fluviométricos, pôde-se inferir que os períodos quando há maior disponibilidade de informações, comum entre precipitação e vazão, é de 1984 a 1991 e de 2003 a 2012. Devido à preferência pelo período mais recente na tentativa de contribuir para ações de gestão das águas na região, uma vez que, em decorrência de alterações no uso do solo, há mudanças no regime hidrológico de uma bacia ao longo do tempo; o período escolhido para estudo foi de 2003 a 2012.

Definido o período de estudo, foram selecionadas cinco estações pluviométricas com melhor disponibilidade de dados para este período para aplicação no modelo. A entrada de dados do modelo correspondeu, portanto, às séries das cinco estações selecionadas, sendo inserida para calibração série fluviométrica da estação de Abreus.

Os resultados obtidos com a classificação hidrológica apontaram um comportamento mediano, sendo observada classe úmida nos anos hidrológicos classificados, apenas no período de 2007 a 2008 e nenhuma ocorrência de classe seca. Já para classificação dos anos hidrológicos quanto a precipitação, foram obtidos valores de precipitação média anual (pelo método dos polígonos de Thiessen) e de desvio padrão dos cinco postos de estudo iguais, respectivamente, a 489 mm e 60 mm. Desta forma foi definida a faixa de variação de precipitação entre 429 e 549 mm para cenário climático médio, acima desta faixa o cenário climático foi considerado úmido e abaixo, seco. Os resultados mostram que a precipitação total dos períodos apresentou-se variável, enquanto que o regime da vazão foi mais contínuo. Pode ser motivo deste comportamento a considerável contribuição do escoamento básico na seção de estudo, que diminui a recessão do escoamento, tornando o regime de vazão menos sensível às variações de precipitação direta na bacia. Dessa forma para a definição das condições climáticas para o procedimento de multicalibração do modelo SMAP na bacia do rio Salitre foi utilizado a classificação com base na precipitação.

Foram definidos para calibração dos diferentes cenários, considerando-se a quantidade de dados disponíveis, os anos hidrológicos correspondentes aos períodos de 2004 a 2005 para o cenário úmido, 2006 a 2007 para o cenário médio e de 2010 a 2011 para o cenário seco.

Calibração

Com a calibração da versão diária do modelo SMAP, observou-se uma tendência a um melhor resultado extrapolando-se a faixa de variação determinada para o parâmetro de abstração inicial, considerando-a negativa. Um motivo para melhor representatividade do modelo em tal situação pode ser a contribuição do escoamento básico da região do Pacuí, responsável pela condição perene do rio na seção de medição de vazão em estudo. Deste modo, a situação inicial da dinâmica do escoamento no rio seria de uma contribuição do escoamento básico de maior dimensão que a quantidade de água infiltrada para preenchimento dos vazios do solo.

Considerando o comportamento mencionado, bem como a complexidade das interações de escoamento na bacia hidrográfica do rio Salitre, foram definidos quatro critérios de calibração distintos, para verificação de qual critério melhor representa cada cenário climático. Em virtude da importante influência do rio Pacuí no escoamento do rio Salitre, principalmente no período seco, quando não há contribuição do rio principal a montante dessa confluência, optou-se por critérios considerando apenas a área de drenagem deste rio. O Quadro 1 apresenta a descrição de cada critério de calibração.

Quadro 1: Descrição dos critérios de calibração para versão diária do modelo SMAP

Critério	Descrição
Critério 1	Calibração considerando-se área de drenagem total da bacia hidrográfica, desconsiderando-se a área de drenagem da barragem de Ouarolândia, e sem extrapolação do parâmetro abstração inicial
Critério 2	Calibração considerando-se área de drenagem total da bacia hidrográfica, desconsiderando-se a área de drenagem da barragem de Ouarolândia, com extrapolação do parâmetro abstração inicial
Critério 3	Calibração considerando-se área de drenagem do rio Pacuí, sem extrapolação do parâmetro abstração inicial
Critério 4	Calibração considerando-se área de drenagem do rio Pacuí, com extrapolação do parâmetro abstração inicial

Realizada a calibração de cada cenário climático para cada um dos quatro critérios foi definido o Critério 4 como mais representativo para o período seco, o que se justifica pela maior influência do rio Pacuí no escoamento em períodos secos. Para o cenário climático médio, o critério que melhor representou as vazões foi o Critério 1. Para cenário climático úmido os melhores resultados foram obtidos para o Critério 3, o que não era esperado, uma vez que neste período a influência do escoamento básico do Pacuí deveria ser menos significativa que no cenário climático médio. A calibração do modelo SMAP para os diferentes cenários climáticos obteve, para os melhores critérios, os valores de correlação e Funções Objetivo apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de correlação e Funções Objetivo obtidos nas calibrações

Coefficiente	Cenário seco	Cenário médio	Cenário úmido
Correlação	0,75	0,65	0,67
F _O mín	9,03	38,12	180,79
F _O máx	15,70	205,85	49,75
F _O méd	8,17	56,63	92,88

Foram alcançados melhores resultados de correlação e Funções Objetivo para o cenário climático seco, sendo a faixa de valores médios a melhor representada no cenário seco, mínimos no cenário médio e máximos no cenário úmido. A Figura 3 apresenta os gráficos de vazões calculadas e observadas para cada um dos cenários climáticos.

No cenário climático seco observou-se ajuste adequado entre as séries de vazões calculada e observada, sendo que apenas um pico de vazão observada não foi bem representado. Houve coerência em termos de volume escoado, entre as duas curvas de vazão, uma vez que a subestimativa de valores de vazões em alguns pontos, são compensadas pela superestimativa em outros.

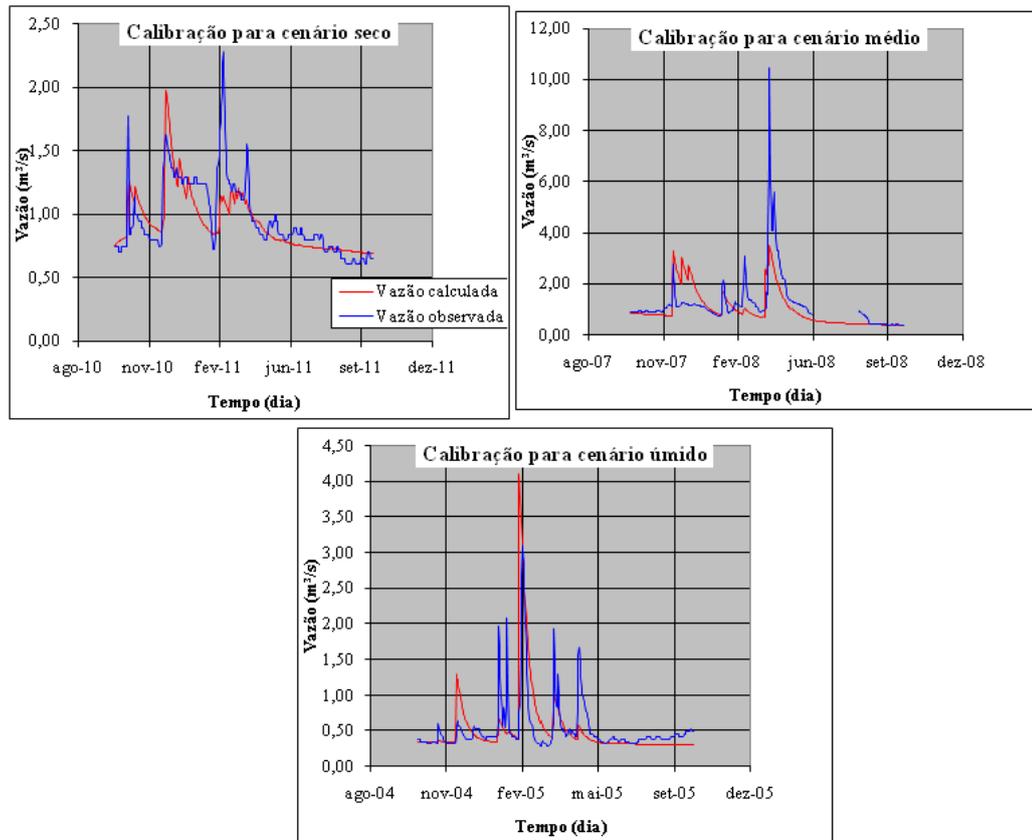


Figura 3: Gráficos de vazões observadas e calculadas pelo modelo SMAP para os diferentes cenários (Fonte própria)

Já na calibração para o cenário médio a ocorrência de falha na série de vazão observada prejudicou a análise gráfica no período de junho a setembro de 2008. Apesar disso, nota-se que o ajuste das séries calculada e observada foi pouco satisfatório em sazonalidade, havendo ocorrência de superestimativas e subestimativas de vazão. No entanto, os volumes escoados nas duas séries se aproximaram. Enquanto que no cenário climático úmido observou-se, assim como no cenário climático médio, representatividade satisfatória em volume escoado, no entanto o modelo não representou adequadamente dois picos de vazão e superestimou os valores em outros dois picos.

Análise da representatividade

Os valores de coeficientes de desempenho obtidos estão apresentados na Tabela 2. De modo geral, os resultados dos coeficientes foram satisfatórios para os três cenários climáticos; com exceção do valor de NSE, que considerou a representatividade inadequada nas três situações. Os valores de erro médio quadrático, erro percentual no volume e proporção de acertos apresentaram-se compatíveis entre si e indicaram uma representatividade satisfatória na etapa de calibração diária.

Tabela 2: Coeficientes de desempenho para cenários de calibração diária do modelo SMAP

Coeficiente	Valor		
	Período Seco	Período Médio	Período Úmido
NSE	-1,05	-0,37	-0,77
RMSE	0,20	0,73	0,52
EV (%)	11,89	25,52	30,03
Proporção de acertos	0,50	0,21	0,27

No período seco, foi obtida uma diferença entre os volumes calculado e observado de aproximadamente 12%. Conforme o valor da proporção de acerto obtido, metade das vazões calculadas estiveram dentro de uma faixa de variação máxima de 10% em relação à vazão observada, valor este, considerado representativo. Nos períodos médio e úmido, as diferenças entre volumes calculados e observados foram, respectivamente, de 25% e de 30%. A porcentagem de vazões calculadas para estes dois períodos, que estiveram dentro da faixa de variação máxima de 10% em relação à vazão observada, esteve na ordem de 20%, indicando baixa representatividade.

CONCLUSÃO

A dinâmica do escoamento no rio Salitre é bastante complexa. Desta forma, foi sugerida a calibração do modelo para diferentes cenários climáticos, com objetivo de alcançar melhor representação do escoamento considerando o comportamento distinto entre os períodos úmido, médio e seco. Os cenários climáticos definidos com base na precipitação apontaram um comportamento variável do clima ao longo do período de análise, ocorrendo períodos úmidos, médios e secos. A definição do cenário climático considerando os valores de vazão da seção da estação fluviométrica de Abreus apresentou um comportamento médio para o período analisado, evidenciando a forte influência do escoamento básico na manutenção da vazão ao longo do tempo.

A etapa de calibração diária realizada para diferentes cenários climáticos obteve um melhor resultado de desempenho do modelo para o período correspondente ao cenário seco. Conclui-se que devido a complexidade do rio salitre com interferências significativas do escoamento subterrâneo que contribui para a vazão do afluente Pacuí, o modelo aplicado tem melhor representatividade para simulação das vazões no período seco.

REFERÊNCIAS

CHAGAS, Glayson F. B. das; SOUZA, Adriano Marlison L. de; ROCHA, Edson J. Paulino da. (2006). Estimativa da taxa de evapotranspiração pelos métodos de Hargreaves-Samani (1985) e Linacre (1977) em área de floresta tropical - Caxiuana/PA. In: *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis, Nov. 2006. Disponível em: < <http://www.cbmet.com/edicoes.php>>. Acesso em: 27, jan. 2013.

COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica em grandes bacias. 2001. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000320696&loc=2002&l=f46397692f2221cf>.

GENZ, Fernando; LUZ, Lafayette Dantas da. (2008). Considerando a variabilidade hidrológica na avaliação das alterações na curva de permanência das vazões no baixo curso do rio São Francisco. In: *Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Salvador, Nov. 2008. CD-ROM.

LOPES, João Eduardo G. Modelo SMAP. 1999.

TUCCI, E. M. (2007). *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos- RS, 944 p.