

## Comparação da evapotranspiração simulada pelo modelo hidrológico MGB-IPH com dados produto de sensoriamento remoto

Germano Gondim Ribeiro Neto  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS/IPH  
Caixa Postal 91501-970, Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Brasil  
germano.gondim@ufrgs.br

**Abstract.** Evapotranspiration has an important role in the processes of the hydrological cycle and its monitoring can be applied to various types of studies and activities related to water resources. This paper presents an analysis of the performance of the hydrological model MGB-IPH in the simulation of evapotranspiration. For this a case a study was realized in the watersheds of the rivers Paraíba and Piancó both located in the state of Paraíba, Brazil. For the evapotranspiration simulation of the MGB-IPH model was utilized as input data, precipitation and discharge information of ANA stations. The validation was done using the data from the remote sensing product MOD16A2. This remote sensing product is from the MODIS sensor that is coupled on NASA's Terra and Aqua satellites. The results showed that even with low data availability for calibration of the MGB-IPH model, it was able to satisfactorily represent the evapotranspiration of the studied region. It was possible to notice that the results generated by the hydrological model used follow the same tendency of variation of the data obtained through the product MOD16A2. The performance of the simulations was evaluated by applying the Kling-Gupta efficiency coefficient, in which the best results were recorded for the catchment area of the Piancó river, where the maximum value was reached of 0.723.

**Palavras-chave:** Hydrologic model, MGB-IPH, evapotranspiration, MOD16A2.

### 1. Introdução

Tão importante quanto diversos outros campos da ciência, estudos de hidrologia trazem oportunidades pertinentes à sociedade de hoje como estimativa de disponibilidade hídrica, consequências de mudança do uso do solo, previsão de variáveis hidrológicas (vazão, evapotranspiração, umidade do solo, etc.), análise de cenários futuros.

Dentro dos estudos sobre Hidrologia surgiu o campo da modelagem hidrológica, que tem como objetivo simular os fluxos e armazenamento da água no solo e sua qualidade no âmbito da bacia hidrográfica (Tucci, 1998). Os modelos hidrológicos podem ser aplicados para determinação de cotas de inundação, regularização de vazão, dimensionamento de canais e infraestrutura de drenagem, estimativa de vazões mínimas, etc. Modelos conceituais e distribuídos podem ser capazes de representar processos como o de evapotranspiração, este tipo de conhecimento pode ser aplicado para monitoramento e previsão de eventos de seca, gestão de recursos hídricos para agricultura e estudo dos processos hidrológicos em escala regional (Ruhoff et al., 2013).

Dentre essas diferentes variáveis que compõe o ciclo hidrológico (precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e evapotranspiração, etc) a que apresenta a maior dificuldade e complexidade no monitoramento é a evapotranspiração (Oliveira, 2012) que corresponde a evaporação da água presente na superfície do solo ou sob a vegetação somado ao volume de água na forma de vapor transpirado pela vegetação quando ocorre a abertura dos estômatos.

Evapotranspiração é fortemente relacionada com o processo de transferência de energia e o monitoramento deste processo, tanto em escala temporal como espacial, é de grande importância para aprimorar o entendimento das interações entre a terra e a atmosfera. A evapotranspiração é uma função complexa que relaciona as propriedades e características do solo, condições climáticas, uso do solo, tipo de vegetação e topografia, sendo influenciada por estes parâmetros no espaço e no tempo (Compaoré et al., 2008).

Nesse contexto surge a necessidade de se encontrar formas mais fáceis e simples para se estimar a evapotranspiração de grandes áreas, o sensoriamento remoto e a modelagem hidrológica podem representar uma alternativa eficaz para solução deste problema e tem sido

foco de diversos estudos nos últimos anos (Ruhoff et al., 2013; Scherer-Warren, 2011; Gerten et al, 2004; Mu et al., 2007; Lian et al.,2015; Larsen et al, 2015).

Produtos de sensoriamento remoto apresentam a vantagem de operar em diversas escalas espaciais e ter uma boa disponibilidade de dados, contudo a maioria destes dados existem apenas a partir do ano 2000, tendo assim uma série histórica limitada. Além de serem aplicados como dado de entrada de diversos estudos, os produtos de sensoriamento remoto podem ainda servir para calibrar e validar os modelos hidrológicos, tornando estes mais precisos e eficazes na simulação de variáveis hidrológicas. Ainda é possível simular estas variáveis para períodos passados ou ainda completar séries históricas tanto de dados in situ como os provenientes dos próprios produtos de sensoriamento remoto. O presente estudo visa abordar estes dois assuntos e tem como objetivo a verificação do desempenho do modelo hidrológico MGB-IPH na simulação de evapotranspiração e vazão, validando os resultados com dados observados e produtos de sensoriamento remoto.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1 – Estudo de caso**

A área estudada corresponde a bacia hidrográfica do rio Piancó e a do rio Paraíba ambas localizadas no do estado da Paraíba. O rio Piancó é o principal afluente do rio Piranhas-Açu e nasce no sertão nordestino em uma região de serra que serve como divisória de águas dos vales dos rios Pajeú, Jaguaribe e Piranhas-Açu e divide os territórios dos estados da Paraíba, Pernambuco e Ceará. A área da bacia hidrográfica do rio Piancó é de aproximadamente 9500 km<sup>2</sup> e sua foz localiza-se no açude de Coremas no município com mesmo nome.

Esta bacia está totalmente inserida em uma região semiárida, com precipitações anuais médias variando entre 400 e 800mm concentradas entre os meses de fevereiro e maio. Somado a isso, e a altos índices de evapotranspiração que chegam a 2000mm/ano, esta bacia é constituída por solos rasos formados sobre um substrato cristalino com pouca capacidade de armazenamento, garantindo ao rio regimes de vazões intermitentes.

A bacia hidrográfica do Rio Paraíba abrange uma área aproximada de 20 mil km<sup>2</sup> que corresponde a 38% do território paraibano e abriga 52% da população paraibana onde estão inseridos os dois maiores centros econômicos desse estado, que são a região metropolitana de João Pessoa (Capital) e a cidade de Campina Grande. O Rio Paraíba nasce na Serra de Jabiticá no município de Monteiro e seus principais afluentes são os rios Taperoá, Gurinhém, Paroeira, Soé e o Sanhauá que faz a ligação do Rio Paraíba com o oceano Atlântico.

O Rio Paraíba tem a característica de passar pelas mesorregiões do Sertão, Agreste e Zona da Mata, isso faz com que a distribuição espacial da precipitação seja bastante variada podendo alcançar os 500mm/ano nas porções mais próximas da nascente e até 2000mm/ano na região da foz. Semelhante ao Rio Piancó, devido aos baixos índices pluviométricos e as características geomorfológicas do solo, em diversos trechos do Rio Paraíba ocorre do leito desaparecer por completo nos períodos de estiagem, contudo a partir de seu curso médio o rio se torna sempre perene.

### **2.2 – MGB-IPH**

O MGB-IPH é um modelo hidrológico conceitual semidistribuído desenvolvido para grandes bacias hidrográficas e descrito minuciosamente em trabalhos anteriores (Collischon ,2001; Collischon et al, 2001) e tem sido amplamente aplicado em diversos estudos hidrológicos (Collischonn et al., 2007; Collischon.B et al, 2007; Ruhoff et al., 2013; Paz et al., 2010; Paiva et al., 2013; Pontes et al, 2015).

Inicialmente o MBG-IPH dividia a bacia hidrográfica em células quadradas o que apresentava uma série de desvantagens e limitações (Collischon.B et al, 2007), esta abordagem foi substituída por delimitações de unidades menores denominadas de minibacias

que são definidas em função do modelo digital de elevação da bacia hidrográfica estudada, além disso divide a bacia em conjunto de Classes de Resposta Hidrológica (CRH), que são definidas em função da combinação de mapas relacionados ao uso da terra, tipo de solo e vegetação (Pontes et al, 2015). O balanço de água no solo é feito seguindo uma metodologia baseada no modelo Arno em que a geração do escoamento superficial ocorre por excesso da capacidade de armazenamento, seguindo uma relação entre a fração de área já saturada. A propagação pela rede de drenagem é simulada através do método de Muskingun-Cunge e mais recentemente feito pelo método inercial (Pontes et al, 2015).

O MGB-IPH calcula a evapotranspiração utilizando a equação de Penmann-Monteith que é apresentada na equação 1, sendo que de maneira separada e por etapas, ou seja, a energia disponível primeiramente é utilizada para evaporar a água interceptada que fica armazenada sobre as folhas da vegetação, caules e sobre o solo, caso ao término deste processo ainda existir energia, esta é destinada a transpiração (Collischonn,2001).

$$E = \left( \frac{\Delta \cdot (RL - G) + \rho_a \cdot c_p \cdot \left( \frac{e_s - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \cdot \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda_{pw}} \quad (1)$$

onde E [m/s] taxa evaporação da água;  $\lambda$  [MJ/kg] calor latente de vaporização;  $\Delta$  [kPa/°C] taxa de variação da pressão de saturação do vapor; RL [MJ/m<sup>2</sup>s] radiação líquida na superfície; G [MJ/m<sup>2</sup>s] fluxo de energia para o solo;  $\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>] massa específica do ar;  $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] massa específica da água;  $c_p$  [MJ/kg. °C] calor específica do ar úmido;  $e_s$  [kPa] pressão de saturação do vapor;  $e_d$  [kPa] pressão do vapor;  $\gamma$  [kPa/°C] constante psicrométrica;  $r_s$  [s/m] resistência superficial da vegetação;  $r_a$  [s/m] resistência aerodinâmica.

### 2.3 – Dados utilizados

Os principais dados de entrada do MGB-IPH são obtidos através de postos pluviométricos e fluviométricos da ANA (Agência Nacional de Águas), além de dados de postos climáticos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Os dados de evapotranspiração foram obtidos através do produto de sensoriamento remoto MOD16A2 proveniente do instrumento científico MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) abordo dos satélites Terra e Aqua da NASA. Estes satélites conseguem varrer toda a superfície terrestre em 1 ou dois dias, coletando informações em 36 bandas espectrais, gerando produtos variados que abrangem temas tais como temperatura terrestre e dos oceanos, vegetação, cobertura de gelo, níveis de clorofila no oceano, entre outros (Rudorff et al., 2007).

O produto MOD16A2 informa a evapotranspiração acumulada de 8 dias com pixel de 1 km<sup>2</sup> de área e a sua série histórica se inicia em janeiro de 2000. O cálculo da evapotranspiração deste produto é feito através do algoritmo proposto por Mu et al (2007) que também é baseado na equação de Penmann-Monteith. O MGB-IPH fornece dados de evapotranspiração diário, sendo assim, foi calculado o acumulado de 8 dias para cada minibacia estudada para se poder fazer as comparações com os dados do MOD16A2.

### 2.4 – Período estudado

O período simulado foi escolhido em função da disponibilidade dos dados de vazão obtidos através de postos fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) e dos dados de evapotranspiração dos produtos de sensoriamento MODIS. Para a bacia hidrográfica do Rio Piancó o período simulado foi entre janeiro de 1998 até dezembro de 2006 e para o Rio Paraíba foi entre janeiro de 1970 até dezembro de 2002.

## 2.5 – Análise dos resultados

A eficiência do MGB-IPH em simular a evapotranspiração e vazão foi analisada utilizando-se o índice de eficiência Kling-Gupta (EKG) proposto por Gupta et al. (2009) que é apresentado na equação 2.

$$KG = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{ob}}\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{ob}}\right)^2} \quad (2)$$

onde KG é o índice de eficiência Kling-Gupta;  $\sigma_{sim}$  e  $\sigma_{ob}$  são respectivamente o desvio padrão dos valores simulados e observados;  $r$  é o coeficiente de correlação linear simples entre os valores simulados e observados e  $\mu_{sim}$  e  $\mu_{ob}$  são respectivamente a média dos valores simulados e observados. O índice de eficiência Kling-Gupta pode variar entre  $-\infty$  e 1 onde o valor ideal é igual 1.

## 3. Resultados e discussões

A modelagem hidrológica utilizando a interface do MGB realiza inicialmente uma série de etapas de pré-processamento dos dados e informações SIG, afim de gerar as divisões chamadas de minibacias anteriormente citadas no item 2.2. Na figura 1, é apresentada a localização de cada bacia hidrográfica estudada.

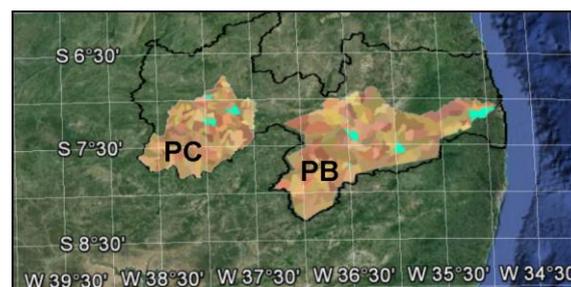


Figura 1. Delimitação das minibacias: PC – bacia hidrográfica do rio Piancó; PB - bacia hidrográfica do rio Paraíba.

As minibacias em azul correspondem àquelas em que existem uma continuidade mais sólida dos dados de vazão observada e os resultados destas minibacias que foram utilizados para as análises propostas por este estudo.

Após a realização de todas as etapas de pré-processamento e completadas todas as fases de preparação do MGB-IPH, foram simuladas as vazões para cada minibacia em azul como consta na figura 2 e comparadas com as vazões observadas. Nas figuras 2 são comparadas as vazões observadas com as simuladas para cada uma das bacias hidrográficas. Visualmente, pode-se perceber que as vazões simuladas não foram satisfatórias e diferiram muito dos dados observados, principalmente se tratando das vazões simuladas para as minibacias do Rio Piancó. Já para o Rio Paraíba pode-se perceber que o modelo conseguiu acompanhar a maioria dos picos das vazões observadas, contudo incoerentes quanto a magnitude, tanto dos valores máximos quanto na capacidade de simular os períodos em que a vazão chega a zero. Uma possível explicação para as falhas dos resultados apresentados na figura 2 pode estar associado ao fato de ambas as bacias hidrográficas estudadas terem uma baixa densidade de postos pluviométricos, fluviométricos e climáticos, somado a isto existindo ainda um grande número de falhas dentro das séries históricas o que prejudica na etapa de calibração do modelo.

Ao se simular as vazões pelo modelo MGB-IPH, automaticamente são geradas as informações referentes a evapotranspiração. Os resultados comparados com os dados do

produto MOD16A2 para cada uma das minibacias indicadas anteriormente também é apresentado na figura 2.

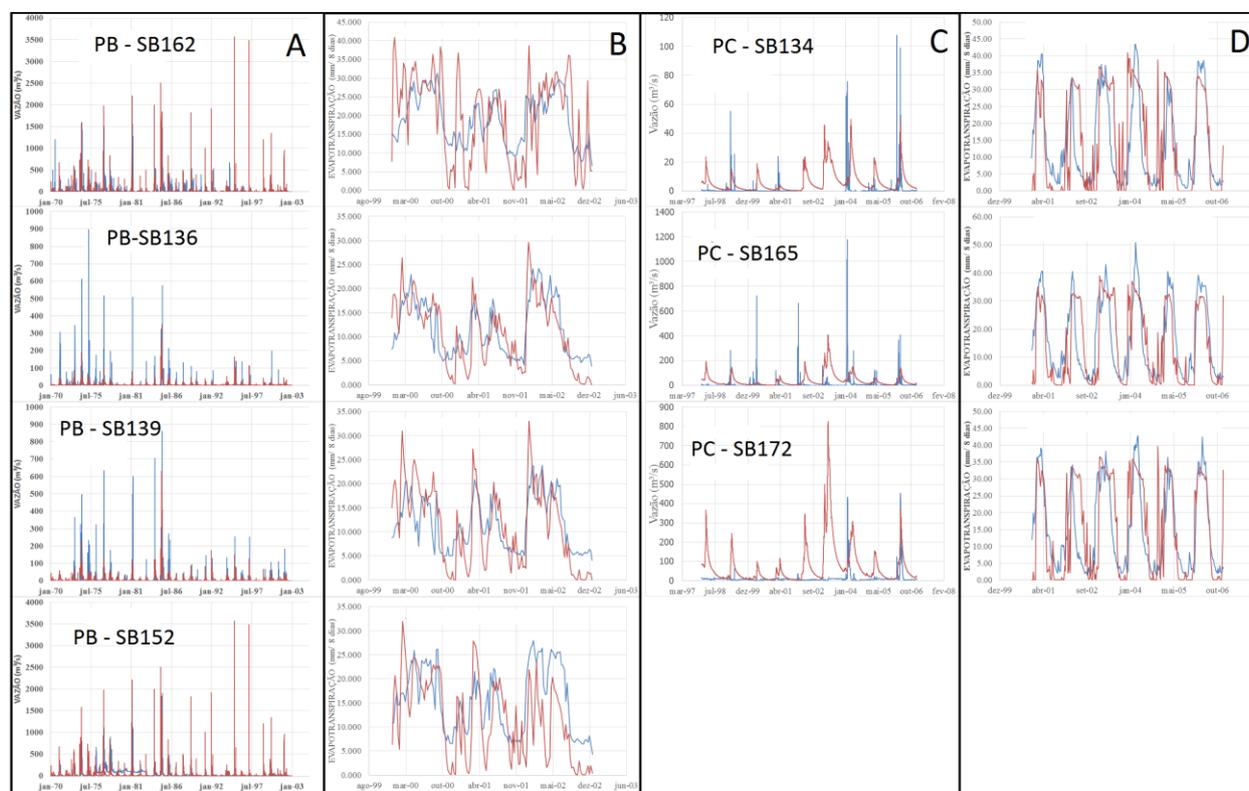


Figura 2. Comparação dos resultados gerados pelo MGB-IPH. A – Vazões geradas pelo modelo (vermelho) e observadas (azul) para as minibacias do rio Paraíba; B – Evapotranspiração gerada pelo modelo (vermelho) e dados do produto MODIS (azul) para as minibacias do rio Paraíba; . C – Vazões geradas pelo modelo (vermelho) e observadas (azul) para as minibacias do rio Piancó; D – Evapotranspiração gerada pelo modelo (vermelho) e dados do produto MODIS (azul) para as minibacias do rio Piancó

Analisando a figura anterior pode-se visualmente perceber que mesmo apresentando desempenho aquém do aceitável na simulação de vazões para as regiões estudadas, o MGB-IPH representou bem o processo de evapotranspiração, sendo capaz de acertar a tendência de variação da série de dados do produto MODIS utilizado. Também pode-se perceber visualmente que houve um desempenho superior para as minibacias do rio Piancó. Para uma comparação mais concisa dos resultados tanto de evapotranspiração como de vazão simulada foi calculado o índice de eficiência de Kling-Gupta seguindo a metodologia apresentada na equação 2, os resultados deste índice para cada minibacias é apresentado na tabela 1

Tabela 1 – Índice de eficiência Kling-Gupta

Rio Paraíba	EKG		Rio Piancó	EKG	
	EVP	Q		EVP	Q
SB136	0.67	0.028	SB134	0.66	-8.741
SB139	0.422	0.219	SB165	0.692	-1.912
SB152	0.474	-0.001	SB172	0.69	-5.287
SB162	0.546	-0.131	Bacia PC	0.723	
Bacia PB	0.722				

Analisando a tabela 1 torna-se mais evidente que os resultados para simulação da evapotranspiração foram melhores que os para vazão, mostrando que mesmo com baixa disponibilidades de dados o MGB-IPH consegue simular satisfatoriamente os processos evapotranspiração para as regiões estudadas.

No geral o MGB-IPH apresentou um melhor desempenho para as minibacias do Rio Piancó, isto pode estar relacionado com o fato da bacia hidrográfica deste rio se tratar de uma região semiárida fazendo com que as variáveis hidrológicas apresentem uma sazonalidade mais acentuada, facilitando a simulação da evapotranspiração.

#### 4. Conclusão

Neste artigo foram apresentados a simulação hidrológica para bacia hidrográfica do Rio Piancó e do Rio Paraíba em que a primeira está inserida completamente em uma região semiárida e a segunda parcialmente neste mesmo tipo de região. Foi analisado o desempenho do modelo hidrológico semidistribuído conceitual MGB-IPH na simulação de vazão e evapotranspiração e comparados com dados de postos fluviométricos da ANA e dados do produto de sensoriamento remoto MOD16A2 MODIS.

Os resultados mostraram que o MGB-IPH apresentou desempenho não satisfatório na simulação de vazão para as bacias estudadas, podendo isto ser explicado pela baixa disponibilidade de dados entrada e a existência de falhas dentro da série histórica de vazões observadas o que compromete a etapa de calibração do modelo. Conclui-se também que o MGB-IPH foi capaz de representar bem a evapotranspiração das regiões estudadas quando comparadas aos dados do produto MOD16A2 e que o desempenho foi melhor para bacia hidrográfica do Rio Piancó onde apresentou o índice de desempenho de Kling-Gupta de 0.723. Para trabalhos futuros é indicado que seja alterado a metodologia do MGB-IPH afim de representar melhor os trechos de rio intermitentes e utilizar os dados evapotranspiração MODIS para calibração do modelo.

Para trabalhos futuros fica a recomendação de se avaliar o desempenho do modelo hidrológico em questão, quando calibrado em função das simulações de evapotranspiração para cada minibacia.

#### 5. Citações e Referências

Campaoré, H.; Hendrickx, J. M.; Hong, S.; Friesen, J.; Van De Giesen, N. C.; Rodgers., C.; Szarzynski, J.; Vlek, P. L. G. Evaporation mapping at two scales using optical imagery in the White Volta Basin, Upper East Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 33, p.127-140, 2008.

Collischonn, B.; Paiva, R. C. D.; Meirelles, F. S. C.; Collischonn, W.; Fan, F. M.; Camano, E. Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, p. 119-133, 2011.

Collischonn, w. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese (Doutorado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n.2, 2001.

Collischonn, W.; Allasia, D. G.; Silva, B. C.; Tucci, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895, 2007.

Gerten, D.; Schaphoff, S.; Haberlandt, U.; Lucht, W.; Sitch, S.; Terrestrial vegetation and water balance – hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, v.286, p.249-270, 2004.

Gupta, hoshin v., harald kling, koray k. Yilmaz, guillermo f. Martinez. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, Volume 377, Issues 1-2, 20 October 2009, Pages 80-91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. ISSN 0022-1694.

Larsen, m.a.d.; refsgaard, j.c.; jensen, k.h.; butts, m.b.; stisen, s.; mollerup, M.; Calibration of a distributed hydrology and land surface model using flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.217, p.74-88, 2016.

Lian, j.; huang, m.; Comparison of three remote sensing based models to estimate evapotranspiration in an oasis-desert region. *Agricultural Water Management*, v.165, p.153-162, 2016.

Mu, Q., F.A. Heinsch, M. Zhao, and S. W. Running, (2007a), Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data, *Remote Sensing of Environment*, 111, 519-536, doi: 10.1016/j.rse.2007.04.015

NASA - National Aeronautics and Space Administration – Modis website. Disponível em: <http://www.modis.gsfc.nasa.gov>. Acesso em: 25/12/2015.

Paiva, R. C. D.; Collischonn, W.; Buarque, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large-scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrological processes (Print)*, v. -, p. n/a-n/a, 2012.

Paz, A. R.; Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, p. 31-43, 2010.

Pontes, P.R.M.; Collischonn, W.; Fan, F.M.; Paiva, R.C.D.; Buarque, D.C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20, n. 4. 2015.

Oliveira, Leidjane Maria Maciel de. Estimativa da evapotranspiração real por sensoriamento remoto na Bacia do Rio Tapacurá-PE. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco – Recife, 2012.

Rudorff, B.F.T; Shimabukuro, Y.E.; Ceballos, J.C.; O Sensor Modis sua aplicações ambientais no Brasil. Primeira edição. São José dos Campos: Editora Parênteses , 2007.

Ruhoff, A.L., Paz, A.R., Aragao, L.E.O.C., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., Rocha, H.R., and Running, S.W., 2013. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, 58 (8), 1658–1676.

Scherer-Warren, Morris. Metodologia para Construção de Séries Temporais de Evapotranspiração por técnicas de Sensoriamento Remoto. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2011.

Tucci, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998.