

Calibração Automática de um Simulador Aplicado a um Rio de Montanha Empregando Dados Experimentais de Precipitação e Nível – Estudo de Caso: Córrego D'Antas, RJ

Automatic Calibration of a Simulator Applied to a Mountain River Employing Experimental

Data of Rainfall and Level – Case Study: D'Antas Stream, RJ

Wagner Rambaldi Telles¹, Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues² e Antônio José da Silva Neto³

^{1,2} Departamento de Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

wr_telles@yahoo.com.br; pwatts@iprj.uerj.br

³ Departamento de Engenharia Mecânica e Energia, Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

ajsneto@iprj.uerj.br

Recebido: 19/06/15 - Revisado: 20/09/15 - Aceito: 21/10/15

RESUMO

Neste trabalho realizou-se o acoplamento de uma técnica de otimização a um modelo de precipitação-vazão, com o objetivo, dentre outros, de se desenvolver uma ferramenta de calibração automática. A estratégia foi testada na estimativa de alguns parâmetros necessários à modelagem do nível de água em redes de drenagem, sendo avaliada em um estudo de caso, que envolveu a simulação das ondas de cheia no principal curso que drena a bacia hidrográfica do Córrego D'Antas, localizada no município de Nova Friburgo-RJ. O problema dito direto consistiu no cálculo da variação do nível de água em dado ponto daquele curso, tendo sido implementado na plataforma MOHID-Land. Já o problema inverso focou-se na estimativa de três parâmetros hidráulicos característicos da bacia e do curso estudado. Pela aplicação do método de Luus-Jaakola (LJ) foram estimados valores para esses parâmetros que resultaram no melhor ajuste entre simulação e observação. A avaliação da metodologia aqui empregada baseou-se em resultados alcançados para três distintos cenários de precipitação, incluindo o que culminou na amplamente noticiada tragédia ocorrida na região serrana fluminense em janeiro de 2011. De uma forma geral, os resultados foram bastante satisfatórios, tanto pela eficiência computacional nas estimativas, quanto na capacidade de o modelo em reproduzir dados observados.

Palavras Chave: Nova Friburgo. Bacia hidrográfica. Estimativa de parâmetros. Plataforma MOHID. Inundações

ABSTRACT

This work couples an optimization technique to a precipitation-flow model, for the purpose, among others, of developing an automatic calibration tool. The strategy was tested in the estimation of some parameters required for modeling the water level in drainage systems, which were evaluated in a case study, involving the simulation of flood waves in the main course that drains the watershed of D'Antas Stream located in Nova Friburgo-RJ. Here, the direct problem consisted in calculating the water level variation at a given position on that course, implemented on the MOHID-Land platform. On the other hand, the inverse problem focused on the estimation of three hydraulic parameters, which are characteristic of both the basin and the course itself. By applying the method of Luus-Jaakola (LJ) values were estimated for these parameters, resulting in the best fit between simulation and observation. The assessment of the adopted methodology was based on results achieved for three different rainfall scenarios, including the one that led to the reported tragedy in the mountain region of Rio de Janeiro in January 2011. Generally speaking, the results were very satisfactory, both regarding the computational efficiency in the estimates and the ability of the model to fit the observed data.

Keywords: Nova Friburgo. Watershed. Parameter estimation. MOHID platform. Floods

INTRODUÇÃO

Estudos envolvendo bacias hidrográficas são importantes, uma vez que as mesmas têm sido envolvidas pelo crescimento de cidades, provocado pela ocupação indevida das planícies de inundação, o que implica em mudanças na cobertura do solo e na consequente ocorrência de inundações, cada vez mais frequentes e catastróficas, em decorrência de alterações da relação chuva x escoamento superficial direto das águas pluviais (MORUZZI et al., 2007). Tais estudos podem ser realizados por meio de modelos investigativos.

De acordo com Tucci (1998), o uso de modelos hidrológicos se torna ferramenta de extrema utilidade, pois permitem representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica por meio do equacionamento de seus processos. Esses modelos hidrológicos são formulados a partir de equações matemáticas que descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação e evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação, entrada e saída de água subterrânea, e o escoamento superficial, subsuperficial e nos canais de escoamento (RENNÓ, 2004).

Ogden et al. (2001) fazem uma descrição de diversos softwares que utilizam como base informações geoespaciais e podem ser aplicados para diversas finalidades no contexto de bacias hidrográficas, as quais vão desde a previsão de variáveis hidrológicas, passando pela análise do escoamento superficial, até chegar à previsão/estimativa de inundações.

Por outro lado, Fan, Pontes e Paiva (2014) verificaram a aplicabilidade de um modelo inercial unidimensional na simulação de ondas de cheias em rios, confrontando os resultados obtidos com as equações de Saint-Venant completas, utilizadas no software HEC-RAS (USACE, 2010) e com outros dois modelos de base simplificada: o Muskingum-Cunge linear (TUCCI, 1998) e Muskingum-Cunge-Todinônio linear (TODINI, 2007; PONTES; COLLISCHONN, 2012), sendo verificados resultados muito similares, tomando como referência os valores numéricos obtidos pelo HEC-RAS.

Na literatura encontram-se diversas aplicações utilizando modelos matemáticos com abordagens unidimensionais na análise de escoamentos superficiais. Uma dificuldade comumente encontrada nessas simulações reside em se definir os parâmetros necessários para realizar as simulações, tais como o coeficiente de rugosidade e aqueles que parametrizam os aportes laterais e/ou perdas por infiltração. Esses parâmetros muitas vezes são utilizados na calibração dos próprios modelos, em procedimento que, se conduzido por tentativa e erro, pode consumir muito tempo, principalmente se o modelo a ser calibrado apresentar grande número de parâmetros (KONDAGESKI, 2008), uma vez que é difícil alterá-los e manter um domínio ou controle sobre a resposta do modelo (CHAU, 2006). Alternativamente, estes parâmetros podem ser determinados diretamente, através de fórmulas empíricas ou, ainda, estimados por meio de uma abordagem de técnicas inversas baseadas em métodos de otimização.

Neste trabalho é realizada a modelagem do comportamento hidráulico da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Córrego D'Antas, localizada no município de Nova Friburgo-RJ, tendo como base a estimativa dos parâmetros de interesse através

do método de otimização Luus-Jaakola.

MATERIAIS E MÉTODOS

Estudo de Caso

O município de Nova Friburgo está localizado na região serrana do Estado do Rio de Janeiro, limitado pelas coordenadas geográficas dos paralelos Sul 22° 11' e 22° 24' e os meridianos de longitude Oeste 42° 37' e 42° 27' (CORREIA, 2011). Possui área superficial de aproximadamente 933 km² e está distante da capital do estado (Rio de Janeiro) cerca de 140 km, possuindo uma altitude ortométrica de 846 metros em sua sede. O território do município pode ser sub-dividido em três bacias hidrográficas principais: do Rio Grande, do Rio Bengalas e do Rio Macaé.

A bacia hidrográfica do Rio Bengalas possui uma área de aproximadamente 192 km² e abrange a zona mais urbanizada da cidade, tendo como principal curso d'água o rio que dá nome à mesma. O principal afluente do Rio Bengalas é o Córrego D'Antas, cuja bacia possui em torno de 52 km², conforme mostrado na Figura 1.

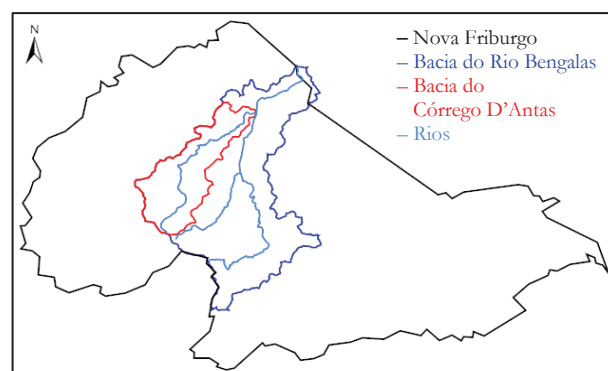


Figura 1 – Limite do município de Nova Friburgo-RJ contendo a bacia do Rio Bengalas e a bacia do Córrego D'Antas

A confluência do Bengalas com o Córrego D'Antas se dá em uma região onde há ocupação desordenada e que sofre constantemente com inundações oriundas de ondas de cheias, essas causadas pela elevação dos níveis de água de sua rede de drenagem durante eventos de precipitação intensa. Vale destacar que essa região foi a mais afetada pela tragédia ocorrida na Serra Fluminense em janeiro de 2011, quando chuvas torrenciais vitimaram milhares de pessoas, com mais de 428 óbitos, e medidas da estação pluviométrica chegando a 271,5 mm em 24 horas, configurando-se no maior desastre ambiental registrado no país (MEDEIROS; BARROS, 2011). Consequentemente, uma análise qualitativa, no que tange ao perfil da lâmina d'água da rede de drenagem e escoamento superficial da bacia do Córrego D'Antas, torna-se de substancial relevância para subsidiar intervenções estruturais que possam atenuar a elevação do nível d'água tanto nesse rio como no trecho do Bengalas a jusante da confluência dos dois cursos.

Nesse contexto, Telles (2014) implementou um modelo de precipitação-vazão para a bacia do Rio Bengalas, com o ob-

jetivo de modelar ondas de cheia em determinados pontos da bacia. No entanto, como esse autor adotou parâmetros únicos para a bacia como um todo, ao serem confrontados os níveis de água simulados com os níveis observados, foram verificadas importantes discrepâncias, notadamente nos dados registrados na bacia do Córrego D’Antas (sub-bacia do Rio Bengalas), levando à conclusão de que essa bacia deveria ser analisada de forma isolada, de modo a se obter um melhor ajuste do modelo em relação aos dados experimentais disponíveis.

Problema Direto

O problema direto proposto neste trabalho consiste na modelagem do comportamento hidráulico da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Córrego D’Antas. Para isso são utilizadas as equações de Saint Venant, com o intuito de simular o escoamento superficial na bacia, com especial ênfase nas bruscas e acentuadas elevações dos níveis d’água nos canais de drenagem, que eventualmente ali são registradas.

As equações de Saint Venant podem ser deduzidas a partir das equações da Continuidade e Conservação da Quantidade de Movimento (Momentum) aplicadas a um volume de controle no interior de um fluido em movimento. Essas equações são formalmente descritas como (STEINSTRASSER, 2005):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + q = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) \\ & + Ag \left[\frac{\partial h}{\partial x} S_0 \left(\beta \frac{Q^2 n^2}{R_h^3 A^2} \right) + S_e \right] \\ & - \beta q v_x + WB = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

onde x (m) e t (s) são as variáveis espacial e temporal, respectivamente; Q (m³/s) é a descarga do canal; A (m²) é a área da seção transversal; q (m²/s) é a contribuição lateral para a descarga; β (-) é o número de Boussinesq; g (m/s²) é a aceleração da gravidade; h (m) é a altura da lâmina d’água; S_0 (m/m) é a declividade do fundo do canal; R_h (m) é o raio hidráulico; n (s/m^{1/3}) é o coeficiente que parametriza a resistência do canal ao fluxo, conhecido também como coeficiente de rugosidade de Manning; S_e (m/m) é a perda de carga por vórtices; v_x (m/s) é a velocidade da contribuição lateral; W (m³/s²) é o coeficiente de resistência do vento e B (m) é a largura da superfície livre.

De acordo com Porto (1999), as equações de Saint Venant, quando aplicadas a escoamentos não-permanentes em canais, requerem técnicas numéricas ou analíticas elaboradas para sua solução, além de uma significativa quantidade de dados hidráulicos a respeito do canal. Isso se torna particularmente crítico na simulação de cursos d’água naturais. Neste trabalho a solução das equações de Saint Venant é implementada numericamente na plataforma MOHID, adotando-se o método dos Volumes Finitos em sua discretização.

Plataforma MOHID

O MOHID Water Modelling System é um sistema de modelagem desenvolvido há mais de 25 anos por uma equipe de técnicos colaboradores do centro de investigação Marine and Environmental Technology Research Center – MARETEC, pertencente ao Instituto Superior Técnico – IST e à Escola de Engenharia da Universidade Técnica de Lisboa, tendo a cooperação da empresa Hidromod Ltda (MARETEC, 2012).

Atualmente, a plataforma MOHID é desenvolvida em ANSI FORTRAN 95 e contém as seguintes ferramentas numéricas: MOHID Water (modelagem dos processos hidrodinâmicos, simulação de fenômenos de dispersão, propagação de ondas, transporte de sedimentos, qualidade da água/processos biogeoquímicos na coluna d’água e trocas com o fundo), MOHID Land (modelo de bacia hidrográfica), MOHID River Network (simulação de redes hidrográficas) e MOHID Soil (fluxo de água através de meios porosos). Todas essas ferramentas estão disponíveis na interface gráfica MOHID GUI (FERNANDES, 2005).

A ferramenta MOHID Land compõe-se de um modelo numérico que simula os processos que ocorrem em bacias hidrográficas, tais como processos hidrológicos e biogeoquímicos (BRAUNSCHWEIG et al., 2010). Cada processo apresenta escalas espaciais próprias, sendo que o módulo que calcula o escoamento nos canais da rede de drenagem é unidimensional na direção do canal, modelado pelas equações de Saint Venant de forma completa; o módulo do escoamento superficial é bidimensional na horizontal, governado pelas equações de Saint Venant de forma simplificada (equação da Onda de Difusão ou Cinemática); e o módulo que calcula o escoamento na zona do solo é tridimensional, regido pela equação de Richards (BRAUNSCHWEIG et al., 2010).

Há uma grande quantidade de parâmetros a serem informados na plataforma MOHID para se realizar uma simulação, os quais estão distribuídos nas suas mais de 200 mil linhas de código (BRAUNSCHWEIG et al., 2004). Apesar disso, esse simulador não dispõe de uma ferramenta de calibração, que só pode ser conduzida, então, por meio de tentativa e erro, o que demanda tempo e nem sempre conduz a uma adequação satisfatória entre simulação e observação (TELLES, 2014).

Em outras palavras, ao criar uma simulação, o próprio MOHID gera os arquivos contendo as palavras-chave (os parâmetros) necessárias à execução da mesma, adotando para tal, valores pré-determinados. Cabe ao usuário alterar esses valores manualmente até que os resultados sejam satisfatórios.

Problema Inverso

O objetivo do problema inverso apresentado neste trabalho é minimizar a diferença entre os dados experimentais referentes aos níveis d’água presentes no principal curso que drena a bacia do Córrego D’Antas e os respectivos valores simulados na plataforma MOHID. Dessa forma, o problema inverso passa a ser formulado implicitamente como um problema de otimização, no qual busca-se minimizar a soma dos resíduos quadrados dados pela seguinte equação (SILVA NETO; BECCENERI, 2012).

$$S(\vec{Y}) = \sum_{j=1}^{Nd} [h_{calc_j}(\vec{Y}) - h_{exp_j}]^2 \quad (3)$$

onde \vec{Y} é o vetor de incógnitas, aqui os próprios parâmetros a serem estimados, que no presente estudo foram definidos como a quantidade mínima de água presente em uma célula do Modelo Digital do Terreno (MDT) necessária para iniciar o escoamento (m), bem como os coeficientes de rugosidade da bacia ($s/m^{1/3}$) e da rede de drenagem ($s/m^{1/3}$), Nd é o número de dados experimentais, h_{exp_j} (m) são os níveis de água medidos no rio e h_{calc_j} (m) são os níveis de água calculados.

A estimativa do vetor \vec{Y} , que contém os parâmetros de interesse, é feita pelo método estocástico de Luus-Jaakola (LJ), tendo como propósito minimizar a soma dos resíduos quadrados dada pela Equação (3).

Método de Luus-Jaakola

O método estocástico de Luus-Jaakola foi proposto por R. Luus e T. H. I. Jaakola em 1973 para resolução de problemas de programação não-linear. A ideia central desse método é considerar uma região de busca ampla que englobe os possíveis valores das variáveis, e gerar soluções aleatórias enquanto a região de busca torna-se menor ao longo das iterações (LUUS; JAAKOLA, 1973).

A seguir, é apresentado o pseudocódigo do método Luus-Jaakola.

```

Escolha um espaço de busca inicial  $\vec{r}^{(0)}$ .
Escolha um número de loops externos  $n_{out}$ .
Escolha um número de loops internos  $n_{int}$ .
Escolha um coeficiente de contração  $\epsilon$ .
Gere aleatoriamente uma solução inicial  $\vec{Y}^{(0)}$ .
Para k = 1 até  $n_{out}$ 
  Para s = 1 até  $n_{int}$ 
     $\vec{Y}_s^{(k)} = \vec{Y}_s^* + R_s^{(k)} \vec{r}^{(k-1)}$ , onde  $R_s^{(k)}$  é uma
    matriz diagonal de números aleatórios
    entre -0,5 e 0,5.
    Se  $Fitness(\vec{Y}_s^{(k)}) < Fitness(\vec{Y}_s^*)$ 
       $\vec{Y}_s^* = \vec{Y}_s^{(k)}$ 
    Fim Se
  Fim Para
   $\vec{r}^{(k)} = (1 - \epsilon) \vec{r}^{(k-1)}$ 
Fim Para
    
```

onde $Fitness(\vec{Y}) = S(\vec{Y})$, dado pelo Equação (3).

CONSTRUÇÃO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO E OBTENÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

A construção do modelo digital do terreno e da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Córrego D'Antas foi realizada por meio da interface gráfica MOHID GIS. Foram utilizados dados topográficos oriundos de Cartas Planialtimétricas veto-

rizadas na escala 1:50.000, fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), todas essas informações tendo sido cedidas pela prefeitura municipal de Nova Friburgo (TELLES; RODRIGUES; SILVA NETO, 2013).

Já a estimativa dos parâmetros de interesse na bacia do Córrego D'Antas e em sua rede de drenagem, que representam as entradas do vetor \vec{Y} apresentado na Equação (3), foi realizada com base na análise de três eventos de precipitação ocorridos na região, sendo conduzida pelo método de Luus-Jaakola acoplado à plataforma MOHID.

Os dados de precipitação (mm) e níveis d'água (m) do córrego durante os eventos de interesse foram obtidos diretamente no site do INEA (<http://inea.infoper.net/inea/>), dados esses gerados, com periodicidade de 15 minutos, por uma estação hidro-fluviométrica instalada às margens do próprio Córrego D'Antas.

A Tabela 1 identifica os três eventos de interesse escolhidos para análise, enquanto as Figuras 2 a 4 apresentam a intensidade das precipitações ocorridas nesses períodos.

Tabela 1 – Eventos de precipitação ocorridos na bacia do Córrego D'Antas

Evento	Período	
	Início	Término
1	11/01/2011 00:00 hora	11/01/2011 18:00 horas
2	26/11/2011 06:00 horas	30/11/2011 00:00 hora
3	11/01/2013 07:00 horas	12/01/2013 11:00 horas

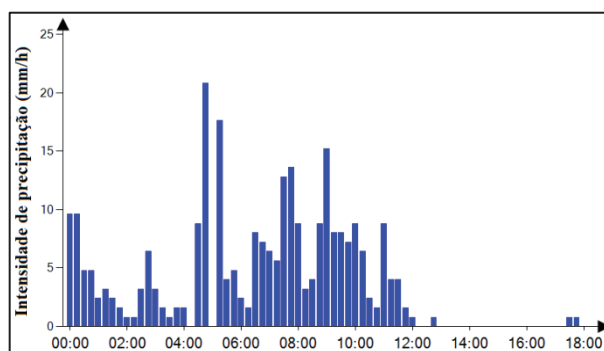


Figura 2 – Intensidade das precipitações ocorridas durante o evento de janeiro de 2011 na bacia do Córrego D'Antas

O primeiro evento também foi utilizado por Telles (2014) para a estimativa dos parâmetros da bacia do Rio Bengalas, compreendendo período imediatamente anterior às precipitações que resultaram na tragédia ocorrida na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, na madrugada do dia 12 de janeiro de 2011. Já o segundo caracteriza-se por apresentar um comportamento diferente dos outros dois eventos analisados, tanto por compreender duas ondas de cheia, como por abranger um período maior, possibilitando, assim, uma análise da performance da plataforma MOHID frente a eventos com períodos superiores

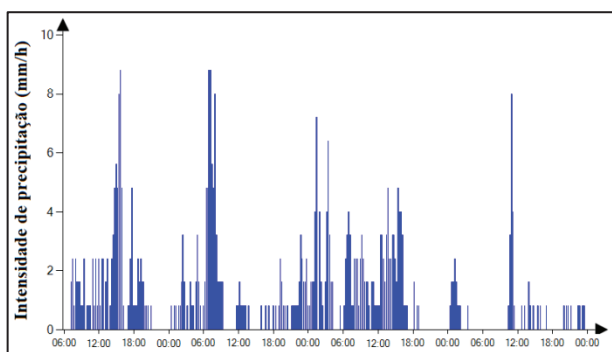


Figura 3 – Intensidade das precipitações ocorridas durante o evento de novembro de 2011 na bacia do Córrego D’Antas

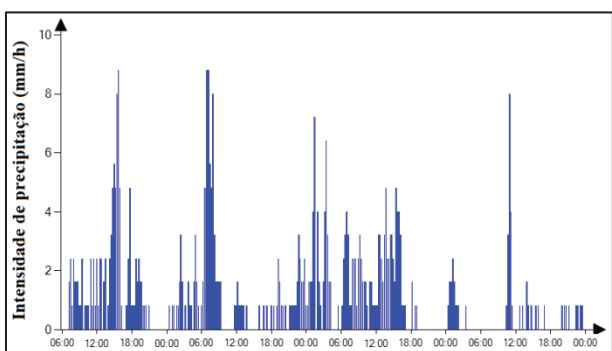


Figura 4 – Intensidade das precipitações ocorridas durante o evento janeiro de 2013 na bacia do Córrego D’Antas

a 24 horas de duração. Por fim, o terceiro evento se refere a um período posterior ao ano de 2011, tendo sido adotado com o intuito de verificar o comportamento da rede de drenagem em resposta a possíveis alterações em sua geometria, que eventualmente decorreram das tempestades registradas em janeiro de 2011. Na Figura 5 é apresentado o modelo digital de terreno da bacia do Córrego D’Antas, bem como a localização da estação hidrológica de Venda das Pedras, instalada pelo INEA.

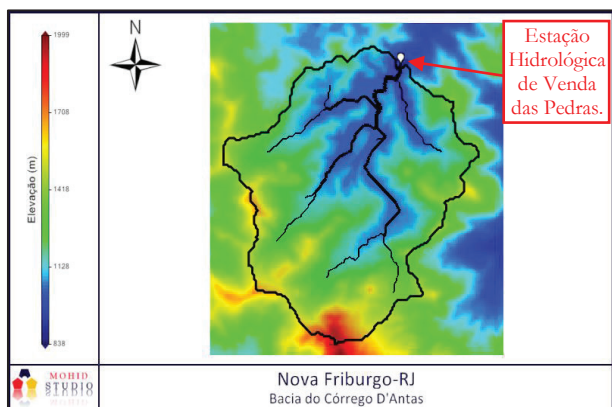


Figura 5 – Bacia hidrográfica do Córrego D’Antas

Este pluviômetro encontra-se próximo ao meio da bacia, cujo ponto de localização na rede de drenagem abrange uma área de aproximadamente 33 km². Essa localização foi escolhida para que a mesma coincidissem com a da única estação fluviométrica instalada pelo INEA no Córrego D’Antas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de Sensibilidade

Para verificar a viabilidade da estimativa dos parâmetros que compõem o vetor foi realizada a análise de sensibilidade dos níveis de água calculados para a rede de drenagem da bacia do Córrego D’Antas, frente às variações dos parâmetros de interesse. Conforme relata Silva et al. (2006), a análise de sensibilidade desempenha um importante papel na estimativa de parâmetros, pois permite estudar, analisar e avaliar o comportamento da grandeza observável frente aos valores atribuídos a estes parâmetros. Além disso, a análise de sensibilidade também permite verificar se dois ou mais parâmetros podem ser estimados simultaneamente, sendo necessária, para tal, a independência entre os mesmos (SILVA NETO, 2012). Essa possível correlação entre parâmetros pode ser percebida, inclusive, graficamente, quando os respectivos coeficientes de sensibilidade apresentam perfis semelhantes. Nesse caso, torna-se difícil distinguir o controle que cada um dos parâmetros possa estar exercendo sobre as variáveis observáveis simuladas.

O coeficiente de sensibilidade pode ser dado pela taxa de variação da grandeza observável em relação a um dado parâmetro (BECK; ARNOLD, 1977). No entanto, em razão de nem sempre as incógnitas de interesse serem expressas pelas mesmas unidades ou possuírem a mesma ordem de grandeza, é conveniente a utilização de coeficientes de sensibilidade modificados, permitindo a comparação direta da sensibilidade de diferentes incógnitas consideradas (BECK; BLACKWELL; St. CLAIR Jr., 1985), o que pode ser feito adotando-se versão modificada desse coeficiente:

$$\chi_i^j(t_j, \vec{y}, \vec{Y}) = Y_i \frac{\partial \Omega(t_j, \vec{y}, \vec{Y})}{\partial Y_i}, \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, m \text{ e } j = 1, \dots, Nd$$

onde $\Omega(t_j, \vec{y}, \vec{Y})$ é uma variável de estado (variável observável), que para o problema aqui tratado é o nível d’água nos canais de drenagem da bacia hidrográfica do Córrego D’Antas; t_j é o instante de tempo no qual é obtido o dado experimental; \vec{y} é o vetor dos parâmetros conhecidos (parâmetros de configuração da plataforma MOHID) e \vec{Y} é o vetor dos parâmetros que se busca estimar, conforme já definido anteriormente. Por fim, χ_i^j é o coeficiente de sensibilidade no instante t_j para o parâmetro Y_i .

Nas Figuras 6 a 8 é apresentada a evolução no tempo dos coeficientes de sensibilidade modificados para os três eventos analisados neste trabalho, onde se observa uma maior sensibilidade da rugosidade do canal nos dois eventos ocorridos em 2011, quando comparado aos dois outros parâmetros do mesmo período. Já no evento de 2013, a quantidade mínima de água e a rugosidade do canal apresentam ordens de grandeza similares, enquanto a rugosidade da bacia é o parâmetro de menor sensibilidade.

É possível verificar, ainda, que nos três eventos de interesse há uma independência entre os parâmetros, fato que pode ser comprovado através da baixa correlação apresentada entre seus coeficientes de sensibilidade (valores calculados, mas

não mostrados aqui).

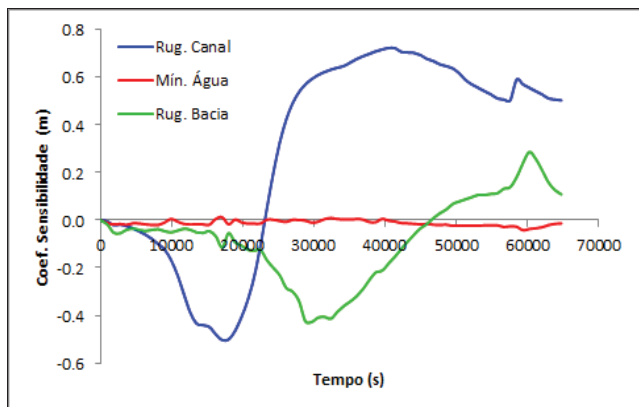


Figura 6 – Análise de sensibilidade do coeficiente de rugosidade do canal e da bacia e mínimo de água na célula necessário para iniciar o escoamento referente ao evento de 11 de janeiro de 2011 na estação de Venda das Pedras (Evento 1)

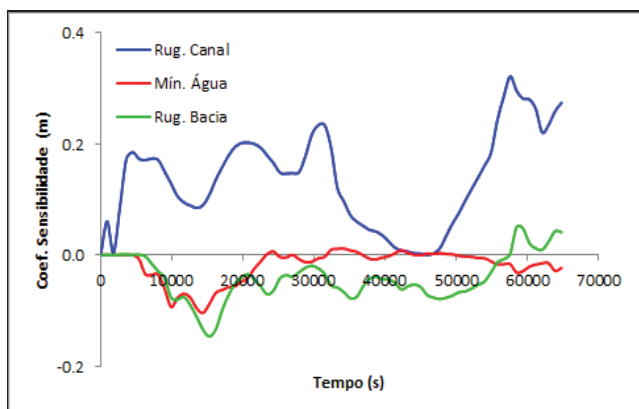


Figura 7 – Análise de sensibilidade do coeficiente de rugosidade do canal e da bacia e mínimo de água na célula necessário para iniciar o escoamento referente ao evento de 26 a 30 de novembro de 2011 na estação de Venda das Pedras (Evento 2)

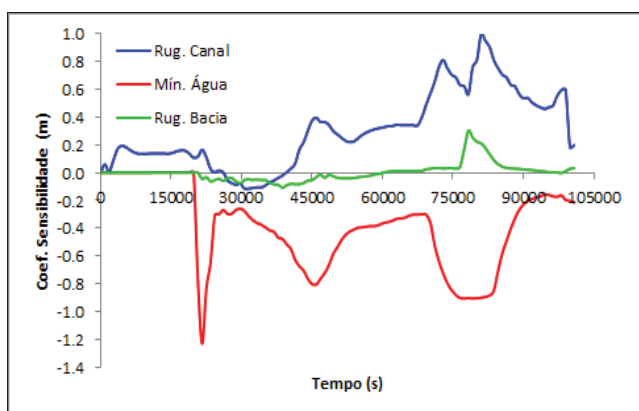


Figura 8 – Análise de sensibilidade do coeficiente de rugosidade do canal e da bacia e mínimo de água na célula necessário para iniciar o escoamento referente ao evento de 11 e 12 janeiro de 2013 na estação de Venda das Pedras (Evento 3)

Estimativa de Parâmetros

A estimativa dos parâmetros que compõem o vetor \vec{Y} , foi conduzida pelo método de otimização Luus-Jaakola, implementado na linguagem de programação Fortran 90/95, tendo sido configurado com dez loops externos ($n_{out} = 10$) e cinco loops internos ($n_{int} = 5$), enquanto o coeficiente de contração do intervalo de busca foi fixado em $\epsilon = 10^{-2}$.

Em todos os testes realizados, o intervalo de busca para a estimativa do coeficiente de rugosidade do canal de drenagem foi $[0,0050; 0,0200]$ ($s/m^{1/3}$), para o coeficiente de rugosidade da bacia adotou-se o intervalo $[0,0200; 0,1000]$ ($s/m^{1/3}$) e para a quantidade mínima de água na célula, $[0,0000; 0,0500]$ (m), sendo realizadas 20 corridas envolvendo o método de Luus-Jaakola para cada um dos três eventos selecionados e tendo como base diferentes sementes iniciais para a rotina estocástica em questão.

Com relação aos demais parâmetros contemplados na plataforma MOHID, tais como, declividade mínima do canal, condutividade hidráulica, esquemas numéricos utilizados, dentre outros, optou-se pela utilização dos valores default, com exceção do nível de água inicial da rede de drenagem ao iniciar a simulação, o qual foi considerado constante em todo o leito do canal (rede) de drenagem, adotando-se o valor de 0,90 metros para o primeiro evento e 0,5 metros para os outros dois. Por fim, o passo de tempo da discretização temporal adotado foi de $\Delta t = 10$ s.

No que se refere ao primeiro evento de precipitação, ocorrido de 00:00 hora do dia 11 de janeiro de 2011 às 18:00 horas do mesmo dia, os resultados da estimativa dos parâmetros, realizada de forma isolada para a bacia do Córrego D’Antas também foram comparados com os resultados obtidos por Telles (2014), que adotou parametrização uniforme para toda a bacia do Rio Bengalas e suas sub-bacias (incluindo a bacia do Córrego D’Antas), conforme relatado acima.

Telles (2014) obteve como melhores valores para a quantidade mínima de água presente nas células do MDT e para os coeficientes de rugosidade da bacia e da rede de drenagem, respectivamente, 0,0625 m, 0,2000 $s/m^{1/3}$, 0,0261 $s/m^{1/3}$. Em contrapartida, a estimativa tomando como base a bacia do Córrego D’Antas de forma isolada originou os seguintes valores ótimos para os referidos parâmetros: 0,0010 m, 0,0301 $s/m^{1/3}$, 0,0102 $s/m^{1/3}$, respectivamente. Na Tabela 2 são mostrados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação obtidos após as simulações, enquanto os resultados do perfil dos níveis d’água na rede de drenagem adotando-se os dois conjuntos de parâmetros são apresentados na Figura 9.

É possível verificar que a evolução no tempo dos níveis d’água simulados neste presente trabalho apresenta um melhor ajuste aos dados experimentais do que o que foi alcançado por Telles (2014) em estudo anterior. Isso ocorre devido à influência da área da bacia no comportamento hidrológico e, conseqüentemente, na estimativa do conjunto de parâmetros médios para a mesma.

A estimativa dos parâmetros de interesse para o segundo evento, ocorrido de 06:00 horas de 26 de novembro de 2011 às 00:00 hora do dia 30 de novembro de 2011, resultou para a quantidade mínima de água presente nas células do MDT o

Tabela 2 – Valores dos parâmetros obtidos pelo método de Luus-Jaakola referentes aos eventos de precipitação ocorridos na bacia do Córrego D’Antas em Jan/2011

Resultados	Rugos. Canal (s/m ^{1/3})	Rugos. Bacia (s/m ^{1/3})	Qtde. Mín. Água (m)
Melhor	0,010200	0,030100	0,001000
μ	0,011300	0,031101	0,001012
σ	0,000659	0,002948	0,000011
$(\sigma/\mu) \times 100$	5,831858	9,478795	1,086957

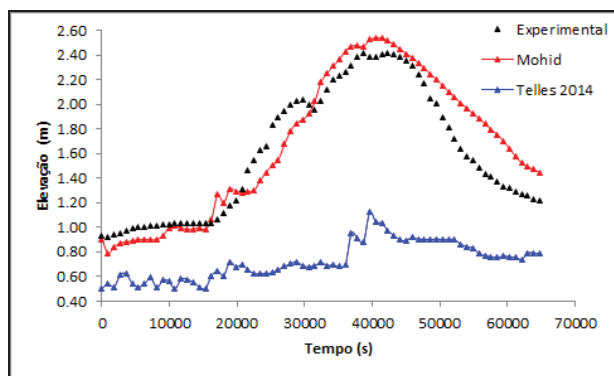


Figura 9 – Nível d’água no Córrego D’Antas durante o evento de janeiro de 2011 na estação de Venda das Pedras tendo como base os melhores valores obtidos durante a execução do método Luus-Jaakola

valor de 0,001 m e, para os coeficientes de rugosidade da bacia e da rede de drenagem, os valores de 0,0805 s/m^{1/3} e 0,0106 s/m^{1/3}, respectivamente. Na Tabela 3 são apresentados os dados estatísticos do evento analisado, enquanto na Figura 10 é apresentada a comparação entre os perfis dos níveis d’água observados e simulados, adotando-se os parâmetros estimados pela solução do problema inverso. É possível observar um melhor ajuste do modelo frente aos dados experimentais na segunda onda de cheia, iniciada às 21:00 horas do dia 27 de novembro, quando comparada à primeira onda de cheia, iniciada às 14:00 horas do dia 26 de novembro.

Por fim, no terceiro e último evento analisado, ocorrido

Tabela 3 – Valores dos parâmetros obtidos pelo método de Luus-Jaakola referentes aos eventos de precipitação ocorridos na bacia do Córrego D’Antas em Nov/2011

Resultados	Rugos. Canal (s/m ^{1/3})	Rugos. Bacia (s/m ^{1/3})	Qtde. Mín. Água (m)
Melhor	0,010600	0,080500	0,001000
μ	0,01101	0,083701	0,001021
σ	0,000779	0,008023	0,000015
$(\sigma/\mu) \times 100$	7,075386	9,585310	1,469148

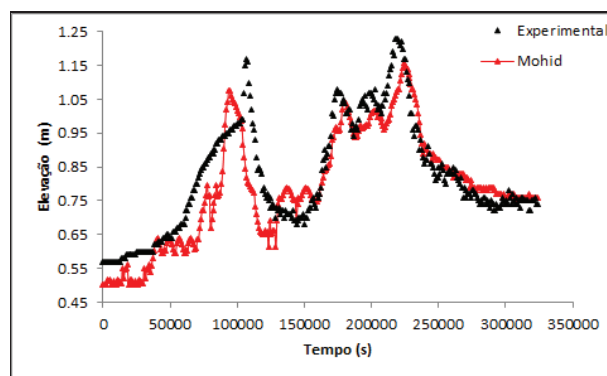


Figura 10 – Nível d’água no Córrego D’Antas durante o evento de novembro de 2011 na estação de Venda das bPedras tendo como base os melhores valores obtidos durante a execução do método Luus-Jaakola

no período de 07:00 horas do dia 11 de janeiro de 2013 às 11:00 horas do dia seguinte, a estimativa dos parâmetros resultou no valor de 0,0207 m para quantidade mínima de água presente nas células do MDT; 0,0810 s/m^{1/3} para o coeficiente de rugosidade da bacia e 0,0104 s/m^{1/3} para o coeficiente de rugosidade da rede de drenagem. Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos após a estimativa dos parâmetros e a comparação com os dados observados é mostrada na Figura 11, onde se verifica que o pico da onda de cheia simulado prolonga-se por período de tempo maior, quando comparado aos resultados experimentais.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros obtidos pelo método de Luus-Jaakola referentes aos eventos de precipitação ocorridos na bacia do Córrego D’Antas em Jan/2013

Resultados	Rugos. Canal (s/m ^{1/3})	Rugos. Bacia (s/m ^{1/3})	Qtde. Mín. Água (m)
Melhor	0,010400	0,081000	0,020700
μ	0,011840	0,084010	0,021304
σ	0,000516	0,009142	0,000197
$(\sigma/\mu) \times 100$	4,358108	10,882040	0,924709

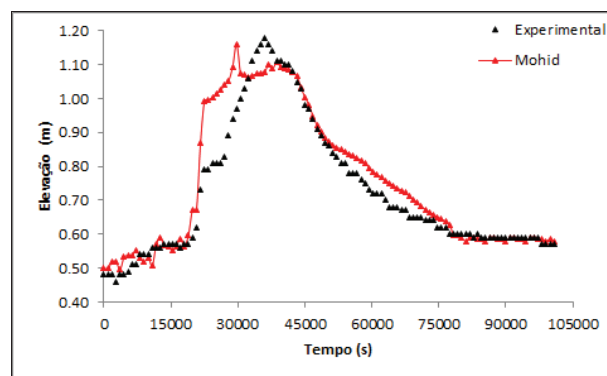


Figura 11 – Nível d’água no Córrego D’Antas durante o evento de janeiro de 2013 na estação de Venda das Pedras tendo como base os melhores valores obtidos durante a execução do método Luus-Jaakola

Verifica-se, com base nas Tabelas 2 a 4, que a rugosidade na rede de drenagem claramente manteve um padrão, independentemente do evento simulado.

Já a quantidade mínima admitida pelas células se manteve invariante entre os eventos de janeiro e novembro de 2011. No entanto, para o evento de janeiro de 2013, a melhor estimativa desse parâmetro resultou em um aumento considerável de seu valor, o que, provavelmente pode ser explicado pela maior capacidade do solo em reter umidade nesse cenário, uma vez que o mesmo ocorreu em um período de verão anormalmente seco.

Por outro lado, a rugosidade estimada para a bacia para o evento de janeiro de 2011 situou-se abaixo dos valores estimados para os demais cenários. Este fato pode estar relacionado à catástrofe que se abateu na região serrana fluminense entre os dias 11 de janeiro e 13 de janeiro de 2011, quando as chuvas torrenciais foram responsáveis por alterar cursos d'água, soterrar edificações e modificar por completo a cobertura do solo em algumas localidades do município de Nova Friburgo, notadamente onde se insere a microbacia do Córrego D'Antas. Possivelmente, tanto o modelo implementado na plataforma MOHID (problema direto), quanto as estimativas para os parâmetros (problema inverso) foram sensíveis a essa drástica alteração.

Por fim, os valores estimados neste trabalho diferem dos valores default disponibilizados pela plataforma MOHID, que são de 0,0001 m para a quantidade mínima de água presente nas células do MDT e, respectivamente, de 0,0150 s/m^{1/3} e 0,1500 s/m^{1/3} para os coeficientes de rugosidade da bacia e da rede de drenagem. Essa discrepância entre os valores sugeridos e os obtidos neste trabalho enfatizam a importância e necessidade de utilização de uma abordagem inversa com base em uma técnica estocástica para a estimativa dos parâmetros de interesse.

CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo central estimar parâmetros de relevância para o controle do nível da lâmina d'água na rede de drenagem da bacia do Córrego D'Antas, através do acoplamento do método de Luus-Jaakola à ferramenta MOHID Land. De uma maneira geral, as simulações conduzidas, adotando-se os parâmetros estimados, levaram a resultados bastante satisfatórios, com pequenas discrepâncias, tanto em magnitude quanto em fase, quando comparados às observações de nível d'água disponíveis. Um melhor ajuste provavelmente ainda seria possível se um número maior de parâmetros fosse considerado na estimativa. Esse estudo também indicou que as simulações tendem a ser mais precisas quanto menor a área na qual serão adotados os parâmetros estimados, pois abordando-se a sub-bacia do Córrego D'Antas de forma isolada, resultados muito melhores foram obtidos do que tratando-a como parte da bacia do Bengalas, da qual, de fato, ela faz parte.

Assim, o acoplamento de um método de otimização a um modelo que forneça o nível d'água em cursos que drenem uma bacia, apresenta-se como uma ferramenta promissora não só de calibração automática, como também de estimativa de processos presentes em simulações hidrológicas de uma maneira geral. Nesse aspecto, é importante enfatizar que o método de

Luus-Jaakola é de fácil implementação (basicamente dois loops) e o acoplamento desse com a plataforma MOHID pode ser generalizado, de modo a permitir estimar um maior número de parâmetros.

Como expectativas para trabalhos futuros, pretende-se refinar a avaliação da estratégia aqui adotada, considerando, por exemplo o coeficiente de rugosidade variável ao longo dos canais, de modo a se reproduzir de forma mais realista as características físicas observadas. Da mesma forma, faz-se necessária a avaliação de outros cenários, distintos dos aqui estudados, de modo a se adquirir maior confiança nas previsões geradas pelo modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro proveniente da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, bem como aos revisores cujos comentários permitiram melhorar o conteúdo do trabalho.

REFERÊNCIAS

- BECK, J. V.; ARNOLD, K. J. *Parameter Estimation in Engineering and Science*. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- BECK, J. V.; BLACKWELL, B.; St. CLAIR Jr., C. R. *Inverse Heat Conduction*. III-Posed Problems. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- BRAUNSCHWEIG, F.; NEVES, R.; LEITÃO, P.; FERNANDES, L. Modelação integrada de sistemas hídricos. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7, 2004, Alvor, Portugal. *Anais...* Alvor: [s.n.], 2004.
- BRAUNSCHWEIG, F.; TRANCOSO, A. R.; GAMBOA, M.; FRANCA, M. J. Análise de risco de cheias utilizando um modelo hidrológico distribuído em regime variável. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 10, 2010, Alvor, Portugal. *Anais...* Alvor: [s.n.], 2010.
- CHAU, K. A. Review on integration of artificial intelligence into water quality modeling. *Journal Marine Pollution Bulletin*, v. 52, p. 726-736, 2006.
- CORREIA, E. F. G. *Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação*. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M.; PAIVA, R. C. D. Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 137-147, 2014.
- FERNANDES, R. *Modelação operacional no estuário do Tejo*. 2005.

- Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2005.
- KONDAGESKI, J. H. *Calibração de modelo de qualidade da água para rio utilizando Algoritmo Genético*. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008.
- LUUS, R.; JAAKOLA, T. H. I. Optimization by direct search and systematic reduction of the size of search region. *AICHE Journal*, v. 19, p. 760-766, 1973.
- MARETEC. MOHID: *Descrição do MOHID*. Campos dos Goytagazes: Essentia Editora, 2012.
- MEDEIROS, V. S.; BARROS, M. T. L. Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do Estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de Janeiro de 2001. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, Maceió, AL. *Anais...* Maceió: [s.n.], 2011.
- MORUZZI, R. B.; PINTO, S. A. F.; ROSSETTI, L. A. F. G.; PEREIRA, L. H.; BERMUDEZ, M. BARBOSA, C. Contribuição metodológica para a caracterização de áreas potenciais de inundação em uma bacia hidrográfica urbanizada, com o suporte de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento: apresentação de dois cenários em um módulo piloto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo, SP. *Anais...* São Paulo: [s.n.], 2007.
- OGDEN, F. L.; GARBRECHT, J.; DeBARRY, P. A.; JOHNSON, L. E. GIS and distributed watershed models. II: modules, interfaces, and models. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 6, n. 6, 2001.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W. Conservação de volume em modelos simplificados de propagação de vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 83-96, 2012.
- PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. 2. ed. São Paulo: EESC-USP, 1999.
- RENNÓ, C. D. *Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas*. 2004. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2004.
- SILVA, C. K. F.; PEREIRA, M. A.; SILVA, M. A. C.; ALENCAR JÚNIOR, J. P.; DA SILVA, Z. E.; Transferência de massa em tomate cereja (*Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*) submetido a desidratação osmótica – modelagem e estimação dos parâmetros. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 2006, Recife, PE. *Anais...* Recife: [s.n.], 2006.
- SILVA NETO, A. J. *Problemas diretos e inversos em transferência radiativa e processos difusivos*. 2012. Tese (Professor Titular) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ, 2012.
- SILVA NETO, A. J.; BECCENERI, J. C. Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza – Aplicação em Problemas Inversos em Transferência Radiativa. São Carlos: *Notas em Matemática Aplicada: SBMAC*, v. 41, 2012.
- STEINSTRASSER, C. E. *Método difusivo de Lax aplicado na solução das equações de Saint Venant*. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.
- TELLES, W. R. *Previsão do comportamento hidráulico de um rio com base na estimativa de coeficientes que controlam seu escoamento. Estudo de caso: rio Bengalas, Nova Friburgo-RJ*. 2014. Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- TELLES, W. R.; RODRIGUES, P. P. G. W.; SILVA NETO, A. J. Use of geographic information systems in the delineation of watersheds. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, v.7, p. 19-30, 2013.
- TODINI, E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 4, p. 1549-1592, 2007.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 669 p.
- USACE. HEC-RAS *River Analysis System*. User's Manual. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Version 4.1, 2010. 790 p.

Contribuição dos autores:

Wagner Rambaldi Telles: Manipulação e organização dos dados, obtenção e interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Pedro Paulo Gomes Watts Rodrigues: Elaboração e organização da metodologia do trabalho, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Antônio José da Silva Neto: Elaboração e organização da metodologia do trabalho, interpretação dos resultados e fechamento do texto.