

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Curso de Engenharia Hídrica**



**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Modelagem hidráulica unidimensional aplicada no estudo de coeficientes de rugosidade**

**Pedro Loguercio de Ávila**

**Pelotas, 2018**

**Pedro Loguercio de Ávila**

**Modelagem hidráulica unidimensional aplicada no estudo de coeficientes de rugosidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Hídrica, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares - UFPel

Coorientador: MSc Guilherme Kruger Bartels

Pelotas, 2018

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram, ao longo desses 5 anos, de forma direta ou indireta, para a minha formação. Com certeza não teria conseguido sem o apoio dado por vocês.

Aos meus pais, um agradecimento especial, por fazerem inúmeros sacrifícios para que eu pudesse ter as melhores condições possíveis e, dessa forma, ter uma caminhada tranquila e proveitosa. À minha avó e meus tios por proporcionarem condições para que eu pudesse chegar até este momento.

A todos meus amigos, sejam aqueles que fiz no decorrer desses anos em Pelotas, sejam aqueles que, mesmo à distância, me deram suporte e tornaram a estadia aqui melhor. Em especial aos colegas Alessandro e Gustavo que, além de participarem e auxiliarem no desenvolvimento deste trabalho, tornaram esses 5 anos ainda mais engraçados.

Aos colegas de laboratório por todo auxílio, seja no ambiente da faculdade, seja ajudando nas saídas de campo. Aos técnicos Reginaldo Bonczynski e Lucas Viegas por todas as ajudas em saídas de campo e ensinamentos. Ao colega George Marino Soares Gonçalves pela ajuda no desenvolvimento do trabalho e pelos conselhos dados.

Ao meu professor e orientador, Professor Gilberto Loguercio Collares por sua orientação, incentivo e pela possibilidade de desenvolver este trabalho. Ao meu coorientador Guilherme Kruger Bartels por todo o auxílio e paciência que foi necessário ao longo desse período.

## Resumo

LOGUERCIO, P.A. **Modelagem hidráulica unidimensional aplicada no estudo de coeficientes de rugosidade.** 2018, 57p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) - Engenharia Hídrica, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

Manter um controle e monitoramento dos mais diversos cursos d'água para que se obtenham dados de vazão e nível d'água podem ser tarefas bastante dispendiosas de tempo e recursos financeiros. Dessa forma, diferentes modelos se apresentam como alternativa mais viável para que se consiga uma série contínua de dados. Modelos hidrológicos geram hidrogramas para diferentes bacias hidrográficas e, a partir desses hidrogramas e utilizando-se modelos hidráulicos, é possível manter um controle e acesso a diversos dados, adequados e precisos, como nível de água e velocidade do fluxo. Para que se tenha um modelo preciso, é necessário o emprego de uma variedade de parâmetros. Dentre esses parâmetros, o coeficiente de rugosidade de Manning se destaca como sendo de grande importância, eleja que expressa a resistência do canal ao fluxo que por ele escoar. Portanto, é um parâmetro sensível e exige um alto grau de conhecimento e cuidado para ser calibrado corretamente. Portanto, buscou-se calibrar e validar um modelo hidráulico em um determinado curso d'água, avaliando o coeficiente de rugosidade de Manning e buscando aqueles valores que melhor se adequam ao local de estudo.

**Palavras-Chave:** modelagem hidráulica; HEC-RAS; coeficiente de rugosidade de Manning.

## **Abstract**

LOGUERCIO, P.A. **One-dimensional hydraulic modelling applied in the study of roughness coefficients**.2018, 57p.Coursework (Undergraduate Course in Water Resources Engineering), Center of Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

Maintaining a control and monitoring of the most diverse watercourses in order to obtain data of flow and water level can be very expensive task and demand a lot of time. In this way, different models present themselves as a more viable alternative for keeping a continuous series of data. Hydrological models generate hydrographs for different watersheds and, from these hydrographs and using hydraulic models, it is possible to maintain a control and access to several data, adequate and precise, such as water level and flow velocity. In order to have a precise model, it is necessary to use a variety of parameters. Among these parameters, the Manning's roughness coefficient stands out as being of great importance, which expresses the resistance of the channel to the flow that flows through it. Therefore, it is a sensitive parameter and requires a high degree of knowledge and care to be calibrated correctly. So, this paper sought to calibrate and validate a hydraulic model in a given watercourse, evaluating Manning's roughness coefficient and searching for those values that best fit the study site.

**Key-Words:** hydraulic modelling; HEC-RAS; Manning's roughness coefficient.

## Lista de Figuras

Figura 1 - Fases de um Hidrograma.....	15
Figura 2 - Representação dos termos da equação da energia. (Fonte: Hydraulic Reference Manual, 2010).....	22
Figura 3 - Aplicação do princípio da quantidade de movimento. (Fonte: HydraulicReference Manual, 2010) .....	23
Figura 4 - Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS. (Fonte: adaptado de Hammouri& El-Naqa, 2007) .....	24
Figura 5 - Mapa de localização da bacia de estudo. ....	27
Figura 6 - Fotos do levantamento topográfico do curso d'água. Legenda: (a) Visada da estação total no prisma; (b) Estação total instalada em um ponto do levantamento. ....	29
Figura 7 - Seção mais a montante do curso d'água. ....	30
Figura 8 - Seção mais a jusante do curso d'água. ....	31
Figura 9 - Modelo da bacia no programa HEC-HMS.....	32
Figura 10 - Perfil longitudinal do curso d'água. ....	34
Figura 11 - Hidrograma de entrada. ....	35
Figura 12 - Fotos do curso d'água em diferentes trechos. Legenda: (a) Foto do trecho onde se encontram as primeiras seções; (b) Foto de quando o curso d'água apresenta diversos meandros. ....	37
Figura 13 - Hidrogramas usados na calibração do modelo HEC-RAS.....	40
Figura 14 - Hidrogramas resultantes da calibração.....	41
Figura 15 - - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 1.....	43
Figura 16 - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 2.....	43
Figura 17 - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 3.....	44
Figura 18 - Perfil longitudinal do trecho inicial da modelagem com os erros apresentados.....	46

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de modelos hidrodinâmicos. ....	17
Tabela 2 - Comparação dos valores estimados e observados.....	38
Tabela 3- Valores dos quatro eventos escolhidos para a validação do modelo.....	39
Tabela 4 - Coeficientes de rugosidade de Manning usados na primeira tentativa de simulação. ....	39
Tabela 5 - Coeficientes de rugosidade de Manning usados na calibração .....	41
Tabela 6– Coeficientes de rugosidade de Manning resultantes da calibração.....	42
Tabela 7 - Coeficientes de Nash-Sutcliffe resultantes da validação dos três eventos .....	42
Tabela 8 - Variações do coeficiente de rugosidade de Manning em cada teste e o coeficiente de Nash-Sutcliffe resultante .....	45

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Bacia Hidrográfica .....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Curva- Chave.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Hidrograma.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4</b>	<b>Modelagem Hidráulica.....</b>	<b>15</b>
<b>2.5</b>	<b>Modelos Hidrodinâmicos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5.1</b>	<b>Modelos Hidrodinâmicos Simplificados .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Modelos Hidrodinâmicos Completos.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6</b>	<b>HEC-RAS .....</b>	<b>20</b>
<b>2.7</b>	<b>HEC-HMS .....</b>	<b>23</b>
<b>2.8</b>	<b>Coeficiente de Rugosidade de Manning .....</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Material e Métodos.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Local de Estudo .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodologia Aplicada.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Levantamento Topográfico .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Seções Transversais .....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Modelo HEC-HMS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Modelo HEC-RAS .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Coeficiente de Rugosidade de Manning .....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Calibração e Validação do Modelo HEC-HMS .....</b>	<b>38</b>



<b>4.3 Calibração e Validação do Modelo HEC-RAS.....</b>	<b>39</b>
<b>4.4 Estimativa da Modificação do Coeficiente de Rugosidade.....</b>	<b>44</b>
<b>4.5 Limitações da Modelagem .....</b>	<b>45</b>
<b>5 Conclusão .....</b>	<b>47</b>
<b>Referências .....</b>	<b>48</b>
<b>Apêndice.....</b>	<b>53</b>

## 1 Introdução

Dados adequados e precisos de vazão e nível d'água em corpos hídricos possuem uma grande importância nos propósitos de gerenciamento dos recursos hídricos, tanto em ambientes urbanos como em ambientes rurais. Calibração e validação de modelos chuva-vazão, análise de frequência de inundações, condições de contorno de inundação e emissão de alertas hidrológicos, estudos geomorfológicos e a gestão de sedimentos fluviais são alguns propósitos que requerem tais dados. Porém, a medição direta e contínua de vazões é complexa e economicamente dispendiosa. Ainda, as vazões de pico são geralmente observadas durante as passagens das ondas de cheia, o que torna difícil a realização de medições impostas pelos riscos à equipe de medição, pois implica numa elevação do nível d'água em um pequeno intervalo de tempo.

Existem diversos métodos de medição de vazão e a escolha por um deles depende das condições do local tais como largura do curso d'água, altura do nível d'água, entre outras. Essas condições podem implicar em dificuldades adicionais às medições de vazão em cursos d'água. Diante dessas adversidades, é usual que se opte pela determinação da vazão de maneira indireta, utilizando dados que podem ser obtidos mais facilmente. Em geral, dados de nível d'água são utilizados para se obter vazões através da curva-chave, ou seja, a curva que estabelece uma relação biunívoca entre medições simultâneas e instantâneas de nível e vazão, característica de determinada seção de um curso d'água. Todavia, há certas incertezas quanto ao uso da curva-chave e, por isso, ela deve ser periodicamente atualizada para considerar as alterações, principalmente em relação a geometria e rugosidade, sofridas pela seção transversal diferente das condições para a qual foi construído esse modelo.

Segundo Di Baldassarre e Claps (2011), as curvas-chaves apresentam algumas incertezas como: erros nas medidas individuais de nível e vazão, erros induzidos pelas condições de escoamento transitório e erros induzidos pelas extrapolações da curva chave além da faixa de medida usada para a sua construção.

Com a finalidade de se contornar as dificuldades apresentadas, novas abordagens para a modelagem das relações nível-descarga têm sido buscadas. Uma

delas é baseada na resolução numérica das equações que incorporam as leis da física de balanço de massa e quantidade de movimento, que regem o escoamento dinâmico e não uniforme dos fluidos, conhecidas como equações de Saint-Venant.

Com a ajuda de hidrogramas de escoamento obtidos de modelos hidrológicos, calibra-se os modelos hidráulicos, os quais tratam sobre as propriedades mecânicas do escoamento. Esse tipo de modelo leva em consideração os dados de vazão, nível de água, geometria, coeficiente de rugosidade, etc. Dito isso, percebe-se que há uma enorme necessidade de se obter dados adequados e precisos para que os resultados sejam satisfatórios e condizentes com a realidade. Através dessa calibração, pode-se obter os níveis de água, velocidade do fluxo, qualidade da água e transporte de sedimentos. Essas informações são de extrema importância pois permitem inferir sobre a estabilidade das margens e das áreas propensas a maiores riscos de erosão ou inundação.

Para chegar a um modelo hidráulico preciso, precisa-se de muito esforço na implementação das equações de Saint-Venant e na calibração dos parâmetros, que empregam o coeficiente de rugosidade de Manning. Esse coeficiente expressa a resistência do canal para o fluxo contido nele. O valor é influenciado pelo material de fundo, a sinuosidade do rio, a presença de macrófitas, entre outros (COWAN, 1956). O coeficiente de Manning nas equações de Saint-Venant é calculado a partir da declividade, da vazão e das características geométricas do canal (CHOW, 1959). É bem conhecido que o coeficiente de rugosidade de Manning é o parâmetro mais sensível e precisa ser calibrado cuidadosamente (JINKANG et al., 2007).

Dito isso, este trabalho buscou calibrar e validar um modelo hidráulico unidimensional, o HEC-RAS, a partir de observações obtidas em campo e ainda atentou às variações do coeficiente de rugosidade de Manning comparando os valores tabelados com aqueles que obtiveram os melhores resultados no modelo.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de um modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS) conforme a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, em um trecho do Arroio do Ouro, localizado em Pelotas – Rio Grande do Sul.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- I) Realizar o levantamento topográfico de um trecho do Arroio do Ouro;
- II) Calibrar e validar o modelo HEC-RAS a partir de observações obtidas em campo.

## **2 Revisão de literatura**

### **2.1 Bacia Hidrográfica**

Segundo Mello (2013), bacias hidrográficas, também chamadas bacias de captação ou de drenagem, são áreas delimitadas espacialmente pelos divisores de água, constituídas por uma rede de drenagem interligada, cujo escoamento converge para uma seção comum, denominada de seção de controle ou exutório da bacia, local onde se observa os processos de transformação da chuva em vazão e todas as equações de balanço hídrico. Portanto, consiste de uma área na qual ocorre captação da água proveniente da atmosfera e, a drenagem de uma parte que é convertida em escoamento, considerando limites topográficos, direcionamento dos fluxos para uma seção de controle.

É possível entender a bacia hidrográfica como um sistema fechado, onde o principal componente temporal de entrada é a precipitação, enquanto que o componente temporal de saída é a vazão efluente no exutório. Porém, esse modelo hidrológico não considera os processos de perdas que ocorrem por toda a bacia, como a infiltração, evaporação e interceptação da água precipitada (SILVEIRA, 2001).

Silveira (2001) ainda afirma que a evaporação é um processo que ocorre a todo instante e por toda a extensão da bacia. Ela acontece quando o escoamento está no terreno assim como na superfície de cursos d'água. O volume de água evaporado é maior quando na superfície livre dos componentes, como em grandes reservatórios, onde a área inundada possui grandes dimensões e sofre ação das intempéries, que fazem acelerar as perdas. Em casos de bacias com menor densidade de drenagem, as perdas mais expressivas acontecem devido à infiltração da água no solo.

A taxa de variação da infiltração depende de uma grande variedade de fatores, tais como o nível de saturação do solo, a vegetação presente no local, a composição geológica e a declividade do terreno. A água infiltrada no solo alimenta o lençol freático, movimentando-se lateralmente e surgindo na própria bacia, como escoamento superficial, ou então em bacias de drenagem adjacentes.

## 2.2 Curva- chave

Curva-chave, ou curva de descarga de um rio, define graficamente a relação entre a altura da lâmina d'água, medida em uma seção de controle, e a vazão que passa nesse mesmo ponto. Essa função é muito complexa e envolve características geométricas da seção transversal considerada e características hidráulicas do canal (JACCON e CUDO, 1989).

Um curso d'água pode ser definido hidráulicamente como um canal prismático de seção não regular. Dessa forma, as leis da hidráulica podem ser aplicadas aos rios, desde que se considere um escoamento não uniforme e não permanente. No caso de escoamentos em rios, essa relação entre cota e vazão não possui uma só interpretação, e segue a seguinte expressão (SANTOS et al, 2001):

$$Q = Q_o \sqrt{1 + \frac{1}{S_o c} \frac{dy}{dt}} \quad (1)$$

Onde  $Q_o$  é a vazão em regime uniforme;  $y$  é a profundidade do escoamento;  $S_o$  é a declividade do fundo do canal e,  $c = \frac{dQ}{dA}$  é a celeridade da onda cinemática.

O valor de  $Q_o$  diz respeito a canais com escoamento uniforme e pode ser calculado pela fórmula de Manning:

$$Q_o = \frac{AR^{2/3}S_o^{1/2}}{n} \quad (2)$$

Onde  $A$  é a área molhada da seção transversal;  $R$  é o raio hidráulico e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Ainda segundo Santos (2001), a disposição da curva-chave depende da geometria da seção onde está se medindo a vazão. Considerando um canal prismático de seção retangular, onde as paredes do canal são muito superiores à sua largura, a curva gerada terá tendência linear, pois o acréscimo do nível d'água,  $\Delta y$ , ocasionará um acréscimo de vazão,  $\Delta Q$ , os quais serão proporcionais entre si. Já para canais trapezoidais, a curva-chave terá uma forma logarítmica, indicando que a relação entre o acréscimo de nível d'água e a vazão não é proporcional, variando para cada leitura de cota.

Dessa forma, pode-se afirmar que qualquer estudo de disponibilidade hídrica de uma bacia ou região, seja qual for seu uso e que necessite o uso de dados de vazão em cursos d'água, depende de uma curva-chave bem elaborada.

### **2.3 Hidrograma**

Hidrograma pode ser definido como qualquer gráfico que relacione posição, velocidade, vazão ou outras propriedades do fluxo d'água com o tempo. Entre essas opções, o hidrograma que relaciona vazão com o tempo é o mais utilizado por hidrólogos, principalmente para estudar o escoamento superficial de uma bacia hidrográfica, pois representa a variação do fluxo do canal após a ocorrência de um evento de precipitação ou outros processos que afetam a vazão do trecho estudado.

De acordo com Magalhães (1989) o hidrograma em uma determinada parte de um rio pode ser interpretado como o resultado de vários fatores, dentre eles, os fisiográficos, os hidrometeorológicos e os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica. Podendo ser determinado como a resposta de uma dada bacia hidrográfica, em função da quantidade de precipitação que ela recebe, sendo esta responsável pelas relações entre chuva e escoamento. Portanto, é muito importante o seu estudo, devido a sua grande utilidade para compreender as mudanças da bacia e proteção de cheias, por exemplo.

Um hidrograma resultante de uma chuva concentrada é representado por uma curva de pico único. Esse hidrograma consiste em três partes principais segundo CHOW, 1959: o trecho inicial, chamado de segmento de aproximação, onde a vazão mantém-se relativamente constante ao longo do intervalo; o trecho de ascensão, anterior ao pico, que é representado por uma curva ascendente e indica um acréscimo na vazão gerado pelo deflúvio superficial; e o trecho de recessão, posterior ao pico, representado por uma curva descendente, onde não há mais a ação da precipitação sobre a bacia e o volume d'água está sendo extravasado ou perdido por evapotranspiração e infiltração no solo. Um exemplo de hidrograma com suas fases pode ser visto na Figura 1.

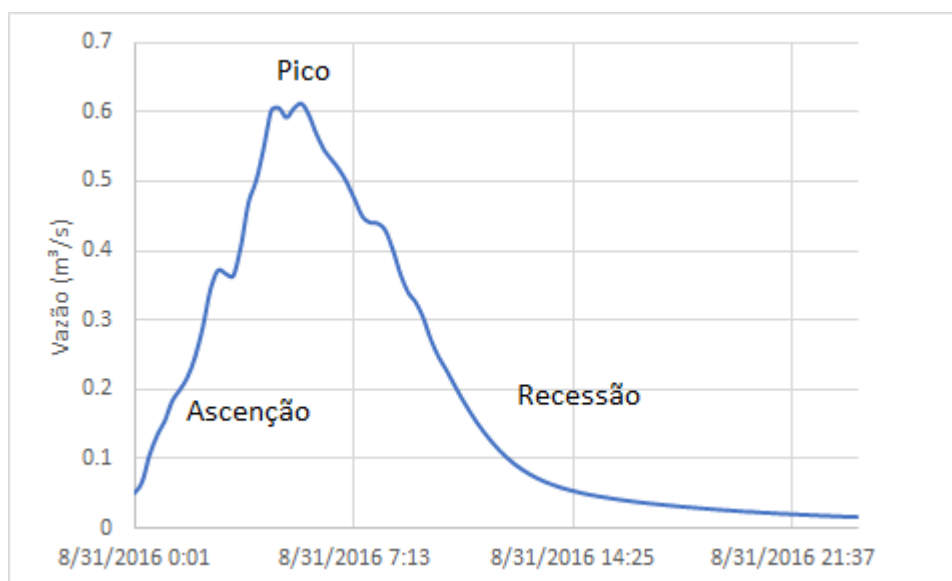


Figura 1 - Fases de um Hidrograma.

A forma do hidrograma está relacionada a uma série de fatores da bacia hidrográfica, sendo os principais apresentados a seguir (TUCCI, 1993):

- Cobertura superficial, como a presença de vegetações de maior ou menor porte que causem a retenção do escoamento;
- Modificações no rio, como reservatórios e canalizações;
- Distribuição, duração e intensidade da precipitação;
- Características do solo, como propriedades e saturação.

## 2.4 Modelagem hidráulica

Modelos hidráulicos e hidrológicos são ferramentas essenciais na simulação instantânea e previsão de cenários futuros, em perspectiva de gestão de recursos hídricos, controle de inundações e mitigação (DE DONCKER et al. 2009; SHAHROKHNIA e JAVAN 2007). Dados adequados e precisos de vazão, nível de água, geometria, resistência, etc., são a base da configuração e calibração do modelo (BAKRY, 1996; HORRITT e BATES, 2002; SONG et al., 2014). Entre todos esses parâmetros, a resistência do leito e das margens é imensurável e depende



principalmente da estimativa no campo (DE DONCKER et al. 2011; MAHMOUDI et al. 2013; PAPPENBERGER et al. 2005).

Tipicamente, o hidrograma de escoamento resultante de modelos hidrológicos fornece a entrada em modelos hidráulicos para investigação de propriedades de escoamento mecânico em uma rede de fluxo. Este tipo de modelagem é capaz de prever tais quantidades e processos como níveis, velocidades de fluxo, qualidade da água e transporte de sedimentos. Esta informação é importante para determinar a estabilidade das margens e áreas propensas a maiores riscos de erosão ou inundação. Mapeamento de planícies de inundação, determinação do fluxo em torno das estruturas hidráulicas e direcionamento de fluxo são aplicações comuns de modelos hidráulicos (CHIN, 2013).

## **2.5 Modelos hidrodinâmicos**

Os modelos hidrodinâmicos fornecem uma base física para a modelagem e têm a capacidade de simular uma ampla gama de condições de fluxo. Vários pesquisadores desenvolveram modelos hidrodinâmicos baseados na equação da onda dinâmica unidimensional ou na equação de onda difusiva. Com essas abordagens, os pesquisadores consideram a seção de várzea do canal do rio unidimensional.

Modelos hidrodinâmicos podem ser divididos considerando as suas características espaciais em modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais, cada um com suas vantagens e desvantagens, as quais podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens de modelos hidrodinâmicos.

	Definição	Vantagens	Desvantagens	Exemplos de Modelos
<b>Unidimensionais</b>	- Assume apenas o sentido longitudinal	- Muito eficiente - Simples de usar - Requer poucos dados	- Apenas modela parâmetros básicos - Pode não ser tão preciso	- HEC-RAS - MIKE 11
<b>Bidimensionais</b>	- Assume os sentidos lateral e longitudinal ou vertical e longitudinal	- Pode modelar mais parâmetros	- Pode não ser adequado para alguns processos de modelagem complexos	- MIKE 11 - TELEMAC
<b>Tridimensionais</b>	- Assume os sentidos longitudinal, lateral e vertical	- Opções mais complexas de modelagem	- Computacionalmente intensivo - Pode ser computacionalmente mais caro (mais custos associados com dados de entrada e calibração do modelo)	- SSIIM - MIKE 3

(Fonte: adaptado de KOKAS, 2016).

Os modelos unidimensionais assumem apenas a direção longitudinal. Com base nisso, apenas os parâmetros básicos podem ser determinados, como velocidade média, elevação do nível d'água e transporte de sedimentos (PAPANICOLAOU et al. 2008). Estes tipos de modelos são comumente usados para projetos de engenharia e análise de risco de inundação para canais abertos (WANG e YANG 2014).

O modelo unidimensional pode ser usado para calcular níveis de água e hidrogramas de fluxo, e também é computacionalmente mais eficiente que os modelos bidimensionais e tridimensionais. No entanto, esses modelos hidrodinâmicos exigem dados precisos da geometria do rio, que podem não estar disponíveis nos locais desejados para as medições. Uma grande desvantagem do uso dos modelos é que os parâmetros são frequentemente difíceis de determinar a partir dos dados observados. Devido à sua impraticabilidade e complexidade, é necessária uma vasta experiência para operar e aplicar esses sofisticados modelos hidrodinâmicos.

Ainda se tratando de modelos hidrodinâmicos, há a divisão desse tipo de modelo devido à sua complexidade, sendo eles os modelos hidrodinâmicos simplificados e completos.

### 2.5.1 Modelos hidrodinâmicos simplificados

Os modelos hidrodinâmicos simplificados utilizam a equação da continuidade (Equação 3) e uma versão simplificada da equação da quantidade de movimento (Equação 4), ambas apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_o - S_f) \quad (4)$$

Onde  $A$  é a área da seção transversal,  $Q$  é a vazão,  $ql$  é a vazão de contribuição lateral,  $t$  e  $x$  são respectivamente o tempo e a distância longitudinal,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_o$  é a declividade do fundo do rio,  $h$  a profundidade da linha d'água e  $S_f$  é a declividade da linha de energia, que pode ser dada pela equação 5 a seguir:

$$S_f = \frac{|Q| \cdot Q \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{4/3}} \quad (5)$$

As simplificações consistem na retirada de um ou mais termos da equação da quantidade de movimento. Tucci (1993) mostra o significado de cada termo da equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_o - S_f) \quad (6)$$

Termos de gravidade e atrito

Termos de pressão

Termos de inércia

Os modelos simplificados podem ainda ser classificados em modelos do tipo armazenamento, onda cinemática e difusão.

Esses modelos simplificados são capazes apenas de representar o hidrograma na seção considerada, além de características como amortecimento e translação. Porém, por se tratar de uma simplificação, existem algumas vantagens em usá-los, como o seu custo computacional menor, a possibilidade de se obter respostas em um menor tempo, ou ainda ser desnecessário definir a geometria da seção com detalhes.

### **2.5.2 Modelos hidrodinâmicos completos**

Modelos hidrodinâmicos completos possuem a vantagem de, além de representarem a vazão de montante e jusante, representam também variáveis como o nível d'água e as áreas alagadas.

Os modelos hidrodinâmicos completos unidimensionais utilizam as equações da conservação de massa e da quantidade de movimento para representar o escoamento em rios e canais. A combinação das equações 3 e 4 formam o sistema de equações conhecido como equações de Saint-Venant.

Existem várias formas de se apresentar esse conjunto de equações, combinando diferentes formas às suas variáveis. As equações apresentadas anteriormente estão expressas em função da vazão e da profundidade. É possível ainda expressá-las em função da velocidade e profundidade, vazão e nível.

Para o desenvolvimento das equações de Saint-Venant foram consideradas as seguintes hipóteses (CHOW et al., 1988):

- As variáveis devem ser representadas por funções contínuas;
- Fluido incompressível e homogêneo;
- O escoamento é unidimensional, a velocidade é uniforme e igual à média e o nível de água é horizontal na seção transversal;
- A pressão é hidrostática, ou seja, depende apenas da profundidade;
- É possível utilizar equações para perda de carga, semelhante às usadas em escoamento permanente, como a equação de Manning;
- A declividade do canal é baixa.

É importante dizer que, como o conjunto de equações na sua forma completa é composto por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, do tipo hiperbólico, não existe uma solução analítica. Portanto, é necessária a utilização de técnicas numéricas para a resolução das equações. Ao longo do tempo, inúmeros métodos de resolução foram sendo desenvolvidos e, conseqüentemente uma variedade de programas computacionais utilizando modelos hidrodinâmicos, em sua forma completa, como é o caso do modelo HEC-RAS.

## 2.6 HEC-RAS

O modelo HEC-RAS foi desenvolvido por USACE – United States Army Corps of Engineers - (2008) o qual permite análises unidimensionais de rios no regime permanente e não-permanente. Além desses dois módulos, o programa também possui um módulo de análise de transporte e deposição de sedimentos e modelos de qualidade da água, sendo que estes quatro componentes usam o mesmo procedimento de cálculo geométrico e hidráulico.

Os tipos de dados necessários para que esse programa realize os cálculos de simulação hidráulica são divididos em dois grupos: os dados geométricos, os quais devem ser os primeiros dados de entrada; e os dados de escoamento e condições de contorno.

Os cálculos do HEC-RAS são feitos a partir de conceitos hidráulicos que incluem teoria e aplicação de equações de movimento. Cada estudo tem suas peculiaridades na formulação para realização da simulação, contudo, alguns conceitos são comuns a todos os estudos hidráulicos. Podem ser definidos de acordo com (POTTER e WIGGERT, 2004):

- Escoamento permanente: velocidade média ( $v$ ) e profundidade ( $y$ ) são independentes do tempo;
- Escoamento não permanente: o tempo ( $t$ ) é uma variável independente;
- Escoamento uniforme:  $v$  e  $y$  independem da coordenada de posição na direção do escoamento;

- Escoamento não uniforme:  $v$  e  $y$  variam em magnitude ao longo da coordenada de posição na direção do escoamento;
- Número de Froude: parâmetro que representa o efeito gravitacional que sustenta o escoamento em um canal aberto  $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$ , onde  $v$  é a velocidade média,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $L$  é um parâmetro representativo de comprimento (no caso de escoamentos fluviais, esse parâmetro deve ser a profundidade hidráulica);
- Escoamento subcrítico: a velocidade de escoamento é relativamente baixa e a profundidade grande ( $Fr < 1$ );
- Escoamento supercrítico: a velocidade de escoamento é relativamente alta e a profundidade pequena ( $Fr > 1$ ).

Nas análises do perfil da superfície da água em escoamento permanente, gradualmente variado, o procedimento computacional básico é baseado na solução unidimensional da equação da energia. As perdas são avaliadas por atrito (Equação de Manning) e por contração/expansão. A equação da quantidade de movimento é utilizada em situações em que o escoamento é permanente e rapidamente variado.

A equação da energia deve ser aplicada às simulações em canal aberto, já que, nessa condição, os efeitos viscosos do escoamento não podem ser desprezados, tornando impossível a utilização da equação de Bernoulli. Esta é calculada entre seções transversais consecutivas em um procedimento iterativo e pode ser escrita como:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 v_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 v_1^2}{2g} + h_e \quad (7)$$

onde  $a$  é o Coeficiente de Coriolis e  $h_e$  é a perda de energia. Os termos desta equação estão representados na Figura 2.

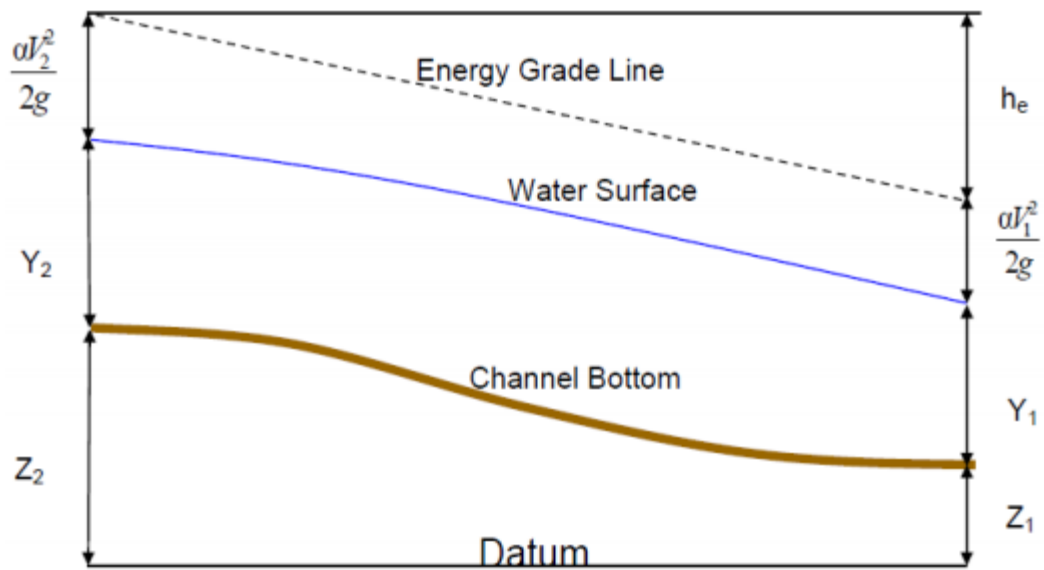


Figura 2 - Representação dos termos da equação da energia. (Fonte: Hydraulic Reference Manual, 2010).

A equação da quantidade de movimento afirma que a força resultante agindo em um sistema é igual à taxa de variação da quantidade de movimento do sistema.

$$\sum F_x = ma \quad (8)$$

Aplicada a um volume de água incluso entre duas seções transversais, esta equação pode ser reescrita como:

$$P_1 - P_2 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (9)$$

onde,  $P$  é a pressão,  $W_x$  é a força peso na direção  $x$ ,  $F_f$  é a força de atrito,  $Q$  é a vazão,  $\rho$  é a massa específica da água e  $\Delta V_x$  a variação da velocidade entre 1 e 2.

A Figura 3 representa a aplicação do princípio da quantidade de movimento aplicado a um volume de controle.

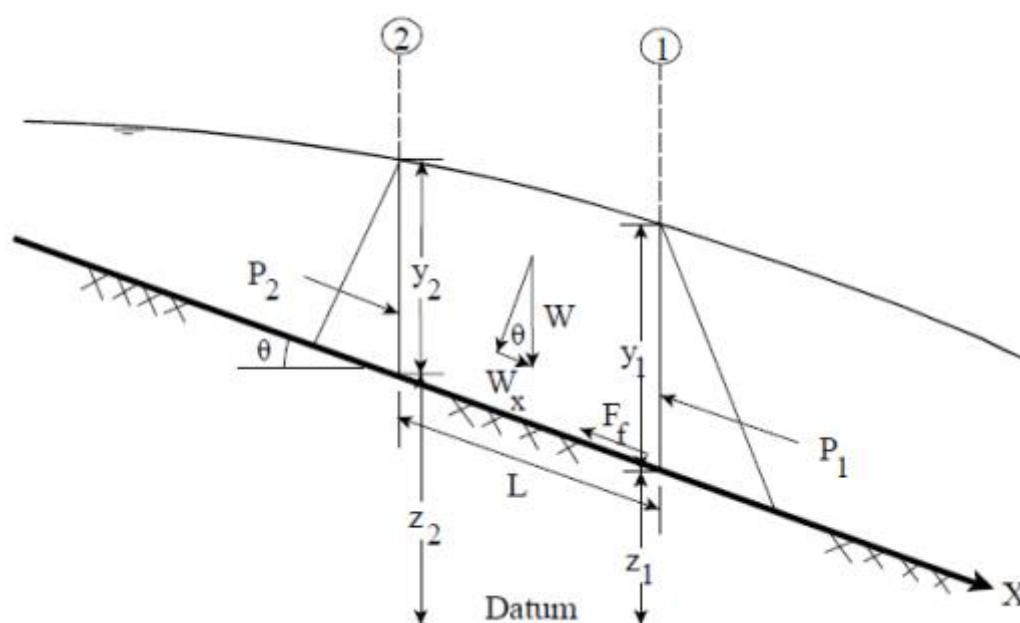


Figura 3 - Aplicação do princípio da quantidade de movimento. (Fonte: HydraulicReference Manual, 2010)

## 2.7 HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System* foi um aplicativo desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – U.S. Army Corps of Engineers), e é utilizado para modelar processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas em uma ampla gama de áreas geográficas, como grandes bacias hidrográficas e pequenas bacias urbanas ou naturais (USACE-HEC, 2008a). Através da simulação do comportamento hidrológico da bacia, o modelo gera hidrogramas e informações quanto ao volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento, que podem ser usados para diversos fins: drenagem urbana, disponibilidade hídrica, impacto de urbanização, dimensionamento de vertedores em barragens, etc (USACE-HEC, 2008b). O funcionamento e as características do modelo estão descritos em várias publicações disponibilizadas pelos seus idealizadores (USACE-HEC, 2008), porém o modelo ainda apresenta algumas deficiências quanto à facilidade de manipulação pelo usuário (MILDE et al., 2002). Segundo Tavares & Castro (2005),



apesar de o HEC-HMS se apresentar como uma ferramenta computacional simplificadora para o processo de cálculo do hidrograma, isto não deixa de exigir do profissional operador, experiência e sensibilidade quanto aos métodos a serem adotados. Na Figura 4 observam-se os principais dados e etapas no processo de modelagem do HEC-HMS.

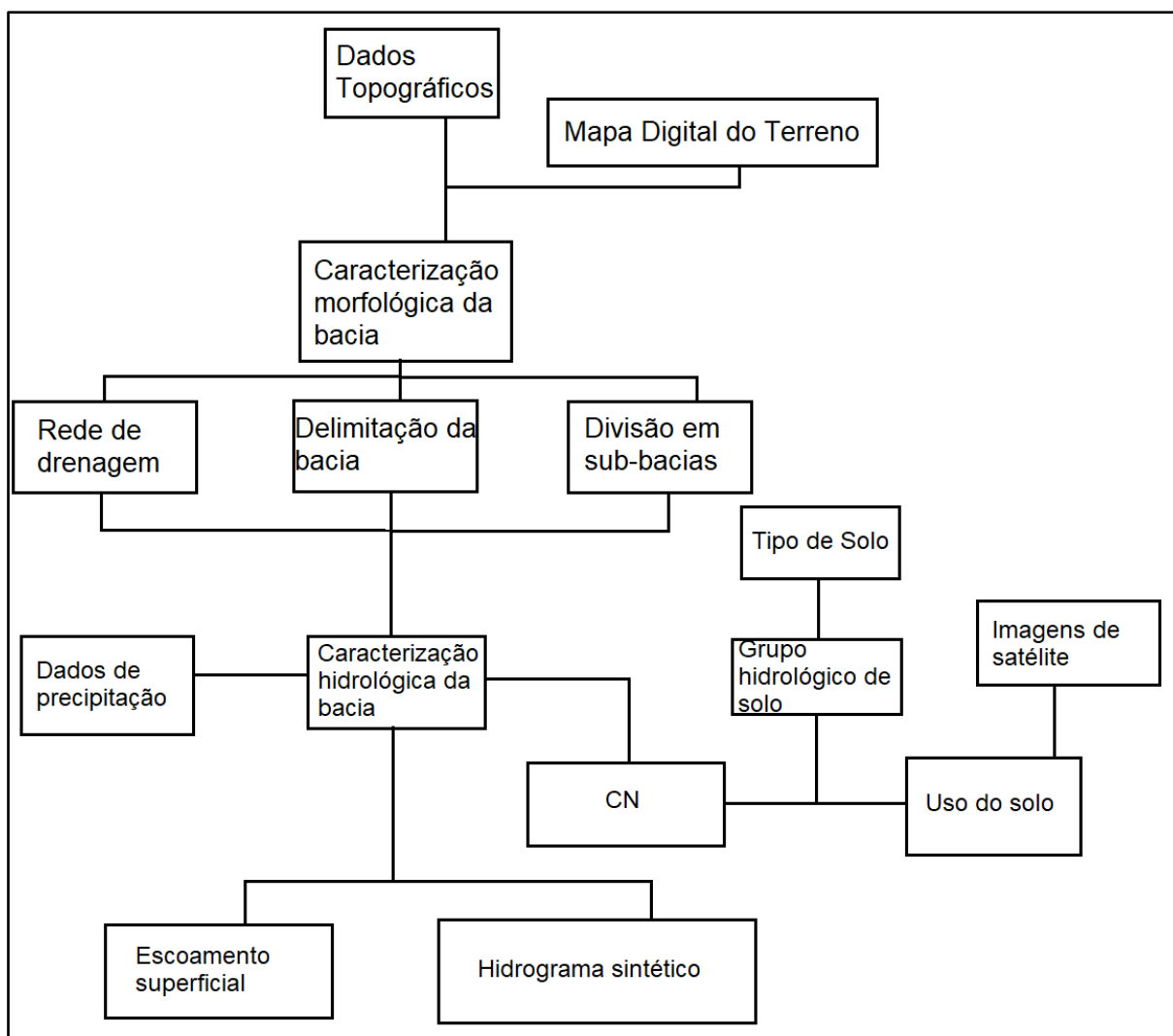


Figura 4 - Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS. (Fonte: adaptado de Hammouri e El-Naqa, 2007)

Resumidamente, o modelo HEC-HMS é constituído por três componentes: o Modelo de Bacia, o Modelo Meteorológico e as Especificações de Controle (USACE-HEC, 2008a). Segundo Tavares & Castro (2005), o processamento do modelo hidrológico no HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como dados meteorológicos. Posteriormente, são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação chuva-vazão, de composição

do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros. Estes mesmos autores relatam que a composição de um projeto no HEC-HMS é realizada de maneira modular, em que conjuntos de dados podem ser independentemente manipulados, mas que respeitam uma sequência de acionamento para a realização de simulações. As informações são agrupadas nos três componentes:

a) Modelagem da bacia hidrográfica: nesta categoria são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais. Inclui a definição dos métodos e respectivos parâmetros referentes a perda por infiltração, evaporação, interceptação, os métodos de transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e propagação em rios;

b) Modelagem meteorológica: constitui na entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes;

c) Especificações de controle: refere-se aos períodos de tempo para os quais serão realizadas as análises, incluindo data e horário de início e fim do período, bem como o intervalo ou “passo” de computação dos dados.

Conforme Milde et al. (2002), o modelo assume que uma bacia hidrográfica é reproduzida como um grupo interligado de áreas e os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que refletem as condições médias dentro da área. Se essas médias não forem apropriadas para uma sub-área, será necessário considerar sub-áreas menores, nas quais os dados médios possam ser aplicados. Os autores apontam ainda algumas limitações do modelo como: a) as simulações devem preferencialmente referir-se a eventos isolados de chuva devido ao fato de não ser feita nenhuma provisão para recuperação da umidade do solo durante períodos sem precipitação; b) os resultados do modelo são em termos de descarga; c) o direcionamento da onda de cheia é calculado por métodos de direcionamento hidrológico e não refletem as equações de St. Venant.

## **2.8 Coeficiente de rugosidade de Manning**

A teoria do escoamento em canais abertos é frequentemente aplicada na modelagem hidrológica para determinação da vazão. Devido à simplicidade de sua forma e dos resultados satisfatórios em aplicações práticas, a equação de Manning para canais abertos é utilizada intensamente na modelagem hidrológica de cursos d'água (AB. GHANI et al., 2007). O coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) é parâmetro fundamental para descrição da vazão sobre uma superfície (LI e ZHANG, 2001). O ajuste da rugosidade de cursos d'água a um modelo hidrodinâmico fornece informações relativas ao nível de água, vazão e a velocidade do escoamento em qualquer trecho (MARTONI & LESSA, 1999a, AB. GHANI et al., 2007), porém uma das dificuldades da aplicação da equação de Manning é justamente a definição do valor do coeficiente de rugosidade do rio ou canal (YÉPEZ et al., 2000); este pode ser determinado por valores médios observados em campo (AZMON, 1992; MARTONI e LESSA, 1999b; JULIEN et al., 2002; VIEIRA & SILVA, 2004; AB. GHANI et al., 2007; LÓPEZ et al., 2007) ou em experimentos de laboratório (ALMEIDA NETO et al., 2000; WONG e LIM, 2006; LYRA et al., 2007). Em geral, os condutos sob pressão são circulares, com poucos tipos de rugosidade, ao passo que nos canais as formas variam de circulares a irregulares (cursos d'água naturais), sendo a determinação dos coeficientes de rugosidade fator que influencia nas fórmulas de cálculo da vazão mais complexas (NEVES, 1989).

### 3 Material e Métodos

#### 3.1 Local de Estudo

A área de estudo escolhida foi uma sub-bacia do Arroio do Ouro (Figura 5), a qual se localiza entre os municípios de Pelotas e Morro Redondo, Rio Grande do Sul. A bacia está inserida na região geomorfológica do Escudo Sul-Rio-Grandense e possui uma extensão de 2,215 km<sup>2</sup>. As principais ocupações dessa sub-bacia são lavouras, campos e mata nativa.

Uma seção de controle hidrométrico foi definida como base para o monitoramento (31°61'38" de latitude sul e 52°58'51" de longitude oeste), localizada no exutório da sub-bacia.

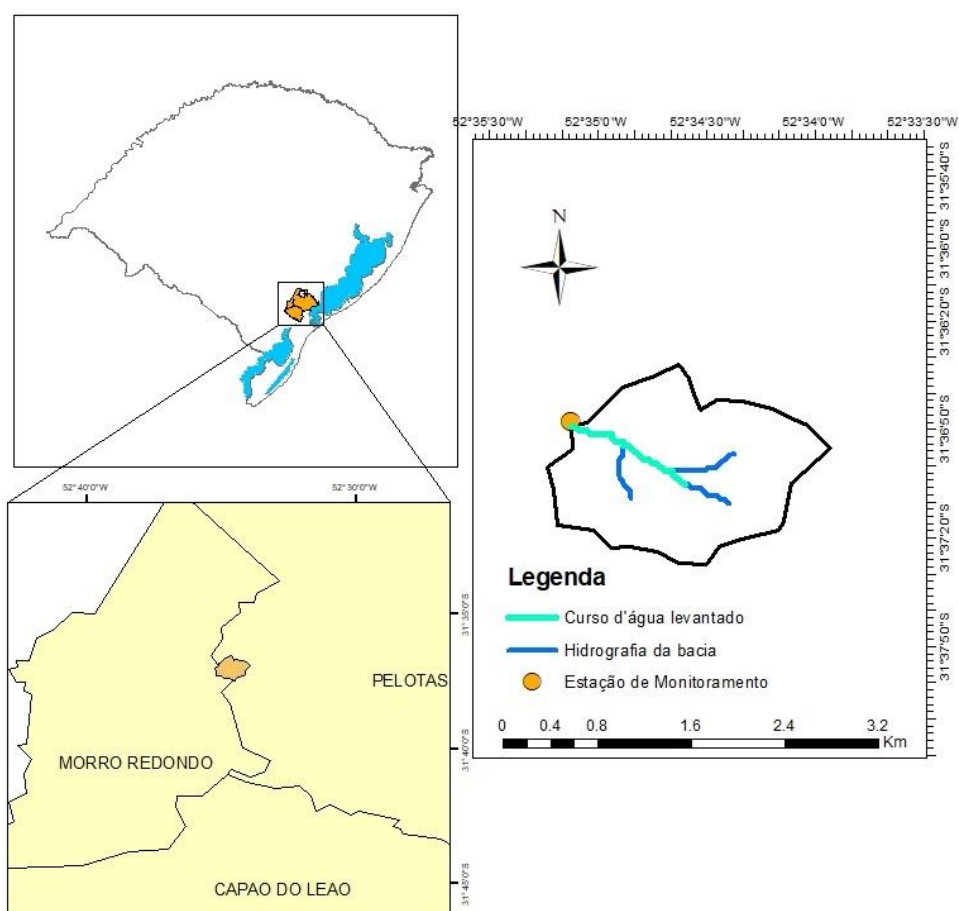


Figura 5 - Mapa de localização da bacia de estudo.

## 3.2 Metodologia aplicada

### 3.2.1 Levantamento topográfico

Inicialmente, obteve-se as coordenadas de um marco próximo ao local através de um Relatório de Informação de Marco de Referência, realizado pelo grupo do Laboratório de Hidrometria e Hidrossedimentologia. Posteriormente, foram escolhidos dois pontos distantes entre si para serem pontos fixos do levantamento, e então foi utilizado o GNSS PROMARK 500 para rastrear as coordenadas desses pontos, durante trinta minutos. O GNSS (Global Navigation Satellite System) é um sistema de navegação utilizado para determinar a posição de um objeto na Terra e requer no mínimo quatro satélites para determinar Latitude, Longitude, Altitude e Tempo. Em seguida, com o auxílio do *software* GNSS Solutions, foram processadas as coordenadas e alturas elipsoidais dos dois pontos materializados no terreno. Esses pontos foram processados com base nas coordenadas do marco de referência. Posteriormente, foram obtidos os valores de ondulação geoidal para esses pontos, através do *software* MAPGEO, com a finalidade de se obter a altura ortométrica, a qual é necessária para a realização do levantamento topográfico.

Com as coordenadas desses dois pontos iniciais devidamente processadas, iniciou-se o levantamento, posicionando a estação total em cada ponto fixo, nivelando-a em um tripé e medindo a altura dessa estação até à estaca e então realizando visadas nos prismas ao longo do curso d'água. A estação foi mudada de local sempre que o campo de visão se tornou limitado, sendo instalada em um novo local para continuar o levantamento topográfico. Na Figura 6 podem ser observados exemplos de como o levantamento foi realizado, apresentando o prisma posicionado em um bastão, assim como a estação total instalada em um determinado ponto do levantamento.

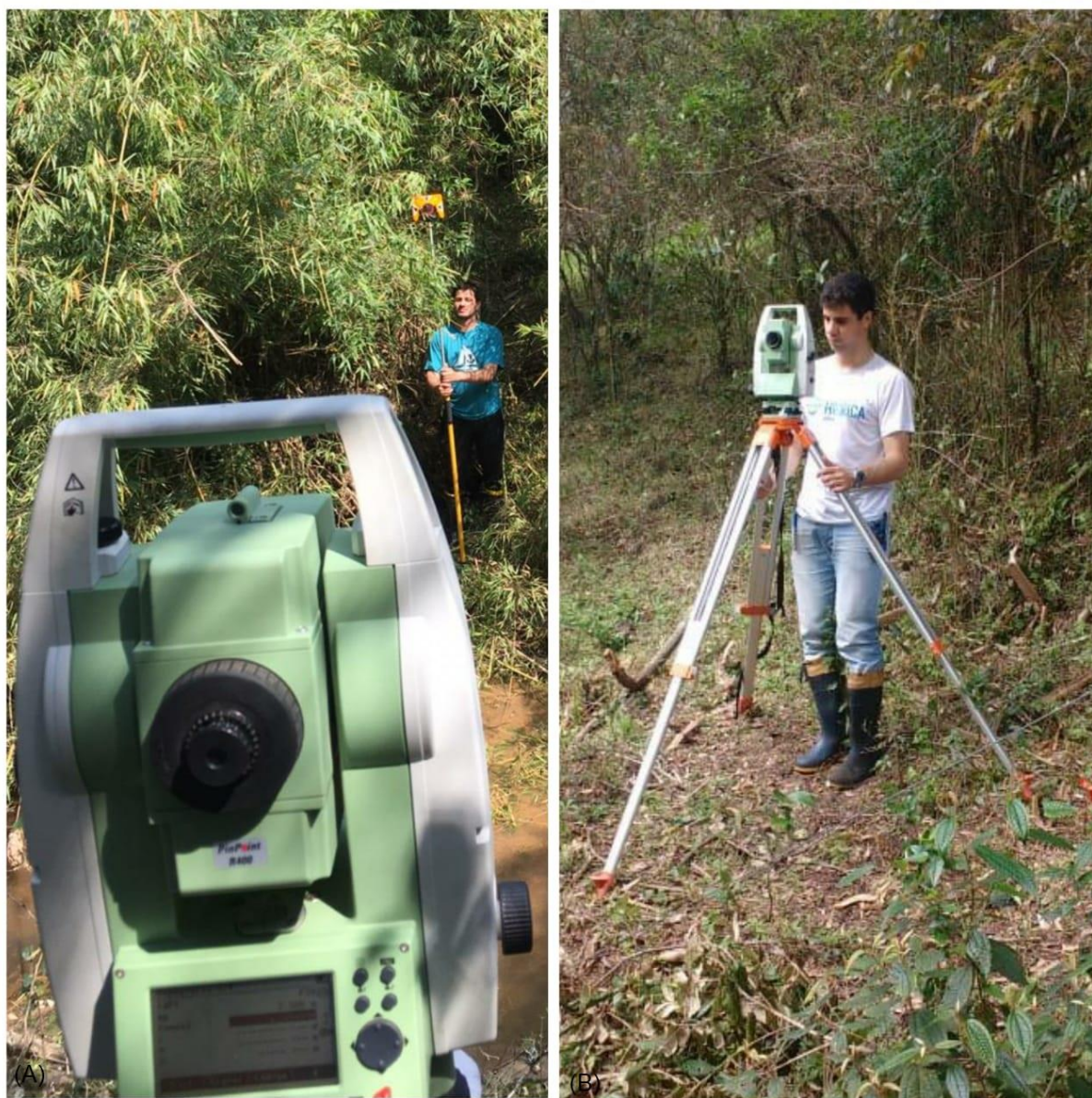


Figura 6 - Fotos do levantamento topográfico do curso d'água. Legenda: (a) Visada da estação total no prisma; (b) Estação total instalada em um ponto do levantamento.

O levantamento topográfico foi realizado para um trecho de aproximadamente 1 km do curso d'água, resultando em 1738 pontos com coordenadas conhecidas (Latitude, longitude e altitude). Neste trecho do curso d'água foram levantadas 47 seções transversais, compostas por diversos pontos, de modo a representar fielmente a topografia do local.

### 3.2.2 Seções transversais

A obtenção de seções transversais é de extrema importância para a modelagem pelo HEC-RAS, portanto, sempre que possível foi escolhido um local e realizado a medição de uma seção. Essas seções foram obtidas com o deslocamento do prisma em uma mesma linha, transversal ao fluxo do curso d'água, visando diversos pontos, incluindo as margens, assim como alguns pontos dentro do curso d'água para que se obtivesse a geometria dessa seção com a maior precisão possível.

Dessa forma, foram definidas 47 seções transversais ao longo do curso d'água e posteriormente, no próprio modelo HEC-RAS, foi realizada uma interpolação dessas seções com espaçamento máximo de 5 metros, o que melhora o desempenho computacional do modelo e por consequência a qualidade dos resultados. Em alguns casos, onde a declividade do curso d'água era mais significativa, o espaçamento máximo de interpolação foi diminuído para evitar problemas na simulação do modelo. Ao fim da interpolação, obteve-se 293 seções transversais. As Figuras 7 e 8 apresentam a seção mais a montante, assim como a seção mais a jusante do curso d'água modelado.

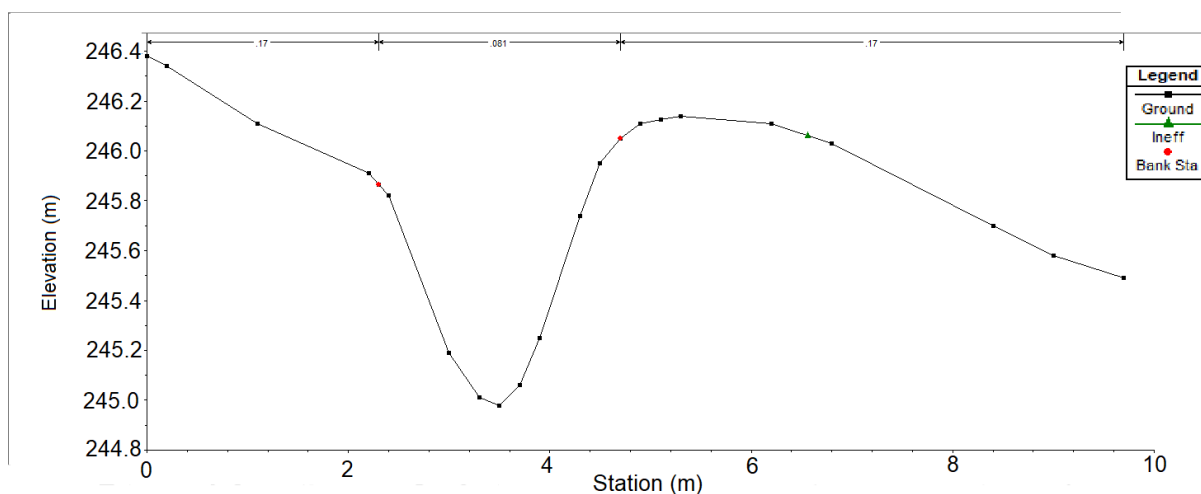


Figura 7 - Seção mais a montante do curso d'água.

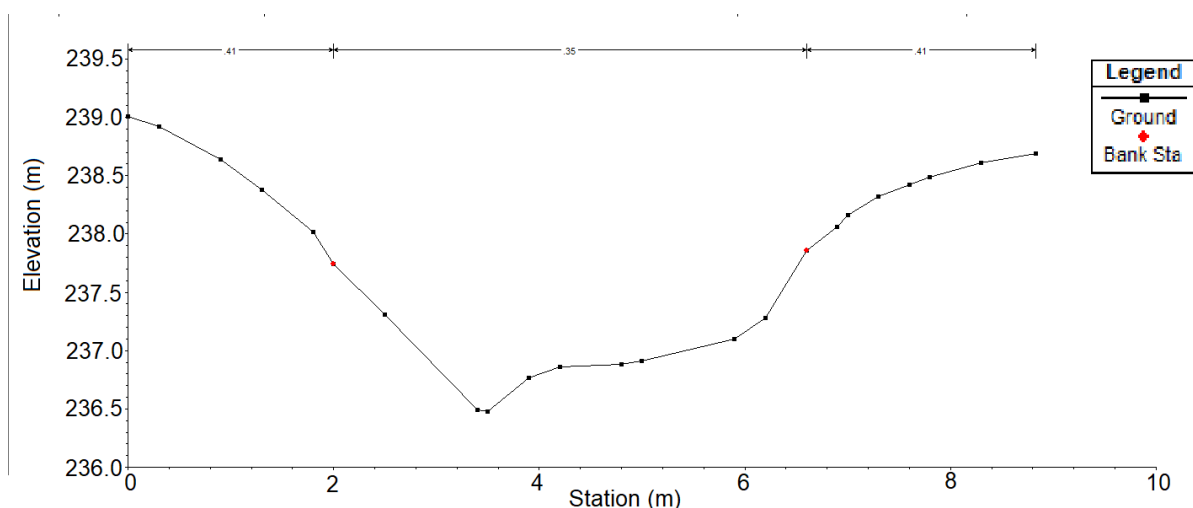


Figura 8 - Seção mais a jusante do curso d'água.

### 3.2.3 Modelo HEC-HMS

Inicialmente, foi necessário realizar a modelagem hidrológica da bacia de estudo, com a finalidade de obter um hidrograma que servirá para a propagação no modelo hidrodinâmico.

O modelo hidrológico HEC-HMS é constituído de três componentes: o modelo de bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle. Inicialmente, a bacia hidrográfica foi dividida em quatro sub-bacias, conforme a Figura 9, e para cada uma delas foram inseridos os dados de entrada tais como: como a área de cada sub-bacia, definição dos métodos para o cálculo das perdas, da transformação chuva-vazão, de composição do escoamento de base e da propagação em rios, bem como os dados meteorológicos. Em seguida foram inseridos os dados para essas metodologias, que incluem o valor de número da curva (CN), o tempo de concentração, os fatores de perda por infiltração e o escoamento de base.



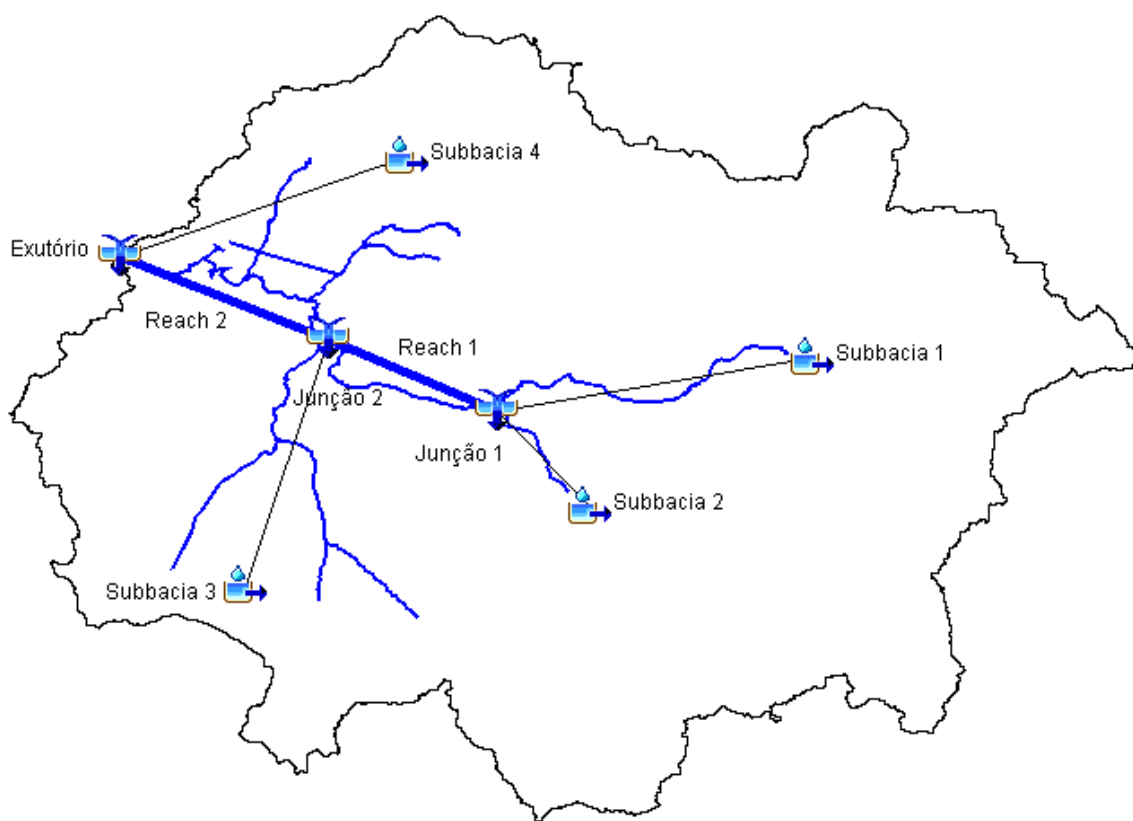


Figura 9 - Modelo da bacia no programa HEC-HMS.

Para a calibração do modelo foi inserido uma série de dados de precipitações ocorridas na região, que compreende o período de 31 de agosto de 2016 até o dia 1 de novembro de 2016. Foi, também, inserido uma série de dados de vazões obtidas da seção de controle, a qual compreende o mesmo período da série de precipitações. Para finalizar a calibração, foram criadas as especificações de controle que compreendem ambos os espaços temporais das séries, com o intuito de se realizar a computação dos dados.

O modelo simula, para cada evento de precipitação, as vazões na seção de controle e então compara com a série de vazões inserida no modelo, demonstrando graficamente essa comparação, assim como analisa com base no coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Por fim, quatro séries de precipitações e vazões foram escolhidas para realizar a validação do modelo. Essas séries compreendem períodos entre 14 de dezembro de 2016 e 4 de abril de 2017.

### 3.2.4 Modelo HEC-RAS

A modelagem através do HEC-RAS exige alguns dados de entrada. Primeiramente, com os pontos do levantamento topográfico, foi criado um terreno na ferramenta RAS Mapper, inclusa no próprio *software*. A partir desse terreno, inseriu-se os dados geométricos do arroio. Inicialmente foi desenhado o leito do arroio, com o auxílio do terreno e dos pontos levantados com localização ao longo de todo esse leito. Em seguida, foi feito o mesmo procedimento para ambas as margens, assim como as linhas de fluxo. Por último, as seções transversais foram desenhadas, perpendiculares ao curso d'água e acompanhando os pontos também feitos durante o levantamento topográfico. Essas seções apresentavam sua topografia conforme o terreno gerado.

Posteriormente, foi necessário inserir os valores de coeficiente de rugosidade de Manning para cada seção transversal. Foram adotados valores que variaram de 0.081 a 0.41, conforme o material presente no leito do arroio, assim como nas margens. Esse parâmetro será melhor explicado no item 3.2.5.

As seções transversais foram analisadas para verificar possíveis erros relativos ao terreno e à posição das margens em cada uma, e então, ajustes necessários foram feitos. Em seguida, foi realizada a interpolação a cada duas seções transversais, com o espaçamento máximo de 5 metros. A partir dessas seções transversais, foi gerado o perfil longitudinal do curso d'água para que o escoamento fosse simulado e, posteriormente, calibrar e validar o modelo conforme o coeficiente de Manning, buscando uma melhor adequação do hidrograma de resposta.

A Figura 10 apresenta o perfil longitudinal do curso d'água.

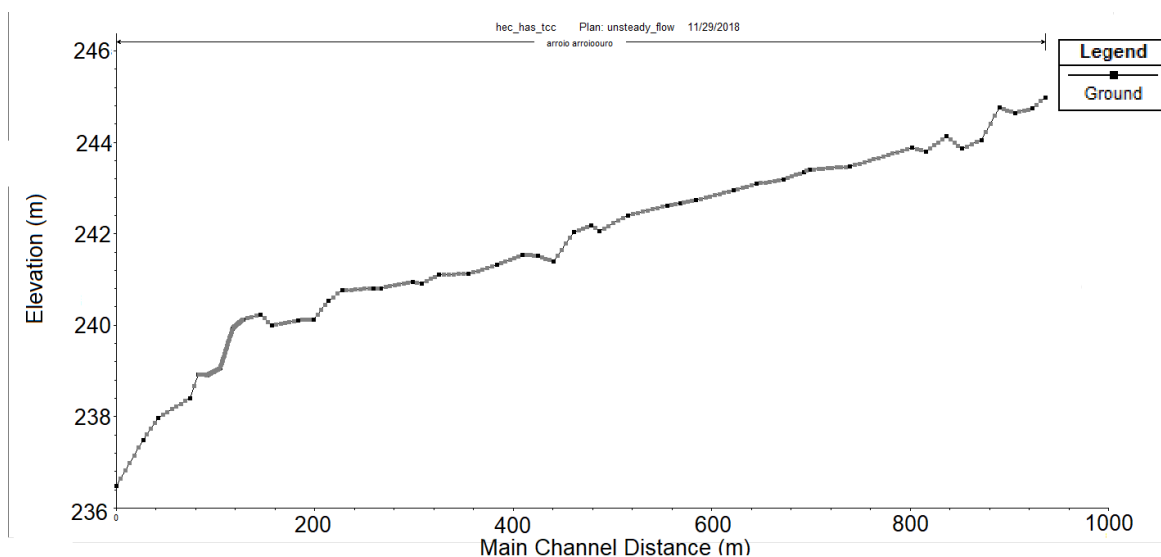


Figura 10 - Perfil longitudinal do curso d'água.

Com os dados geométricos devidamente inseridos, optou-se pelo módulo de regime não-permanente para a modelagem do curso d'água, já que representa melhor as condições locais. Foi utilizado um hidrograma como condição de contorno para a seção transversal mais a montante do curso d'água. Esse hidrograma, que varia de 31 de agosto de 2016 a 14 de setembro de 2016, é proveniente de dados de vazão estimados através da modelagem hidrológica dessa mesma bacia através do *software* HEC-HMS e está expresso na Figura11. Para a última seção transversal, localizada no exutório da bacia, foi utilizado como condição de contorno a declividade média entre as duas últimas seções transversais. Por fim, foi inserido o intervalo temporal de simulação, de agosto a setembro de 2016 e realizada a simulação.

### Hidrograma de entrada

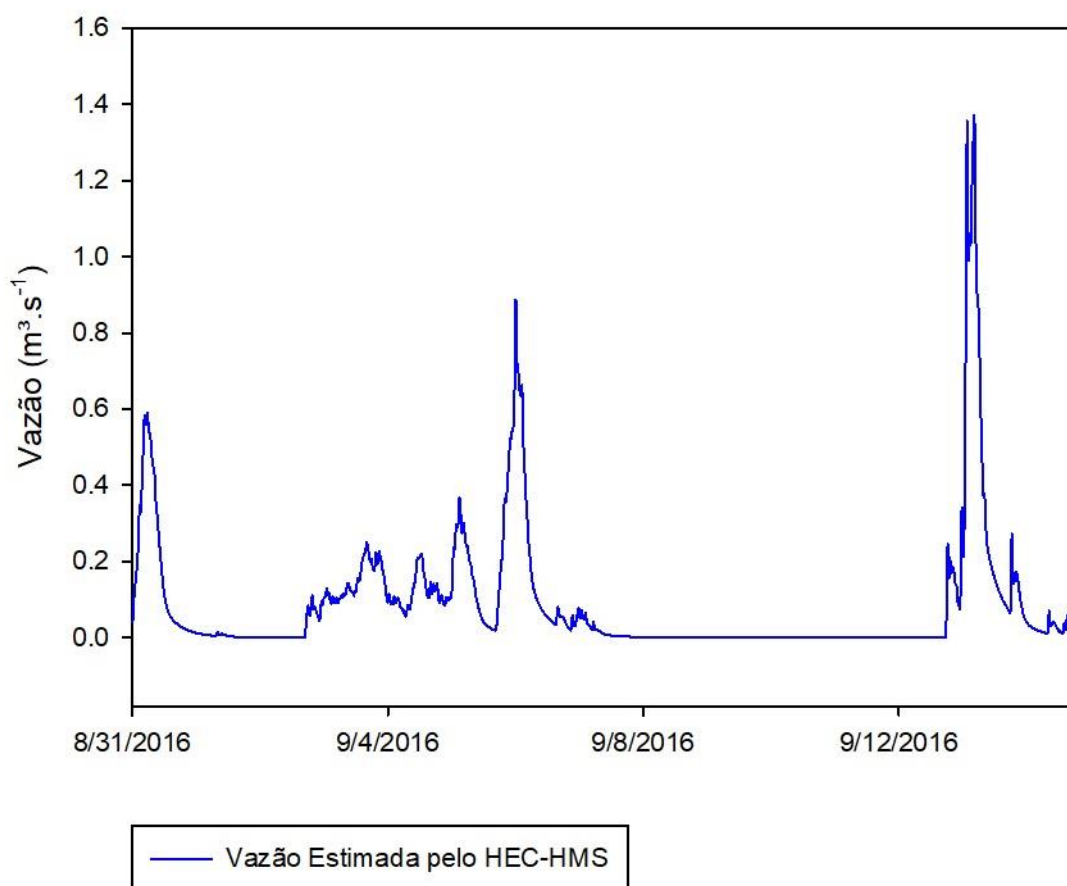


Figura 11 - Hidrograma de entrada.

Para validar o modelo, foram escolhidos três eventos com acréscimos de vazões significativas. Esses eventos compreendem o espaço temporal de dezembro de 2016 a abril de 2017.

#### 3.2.5 Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning, que é de extrema importância na modelagem pelo HEC-RAS, visto que define a fricção pelo qual o escoamento está sujeito. Com isso a modelagem irá ser validada e calibrada considerando esse coeficiente e, a opção por cada valor desse coeficiente, tanto para os taludes quanto para o leito do curso d'água, exigiram uma maior precisão.

Com base em observações de campo e embasado nas tabelas de coeficiente de rugosidade de Manning confeccionadas por Ven Te Chow(1959) e em um guia fotográfico feito por Yochumet. al (2014), foram adotados diferentes valores para cada trecho do curso d'água, considerando as mudanças no material situado no leito, assim como nas margens. No APÊNDICE A estão apresentadas as tabelas elaboradas por Ven Te Chow com os coeficientes de rugosidade de Manning para canais naturais.

O guia fotográfico foi a referência mais observada na escolha dos coeficientes de rugosidade de Manning. Esse guia apresenta diversos cursos d'águas de alguns países e, para cada curso d'água, além da foto do local, apresenta valores de velocidade, vazão, número de Froude, declividade média, comprimento, raio hidráulico e largura. Esses dados foram obtidos através de medições de vazão ao longo do tempo, perfis longitudinais e seções transversais conhecidas.

Baseado no hidrograma das vazões, observadas na seção de controle, no período da simulação e no hidrograma gerado pelo HEC-RAS para esse mesmo intervalo de tempo, foram feitas variações no coeficiente de rugosidade de Manning, procurando não extrapolar os limites verificados na bibliografia. Os hidrogramas de saída para cada simulação foram comparados e calculado o coeficiente de Nash-Sutcliffe correspondente e então escolhido o melhor valor de coeficiente de rugosidade de Manning para a simulação.

Foram realizadas observações *in loco* para avaliar o material do leito do curso d'água, assim como o material presente nas margens. Percebeu-se que nos 85 primeiros metros de jusante para montante, o curso d'água é composto por material rochoso (*bedrock*), junto com sedimento arenoso, nessa extensão do leito, observado também em algumas margens, conforme pode ser visto na Figura 12a. Neste trecho também é possível observar a maior declividade do leito com  $0.03 \text{ m.m}^{-1}$ . No trecho entre 85 e 940 metros, de jusante para montante, observa-se uma redução da declividade ( $0.007 \text{ m m}^{-1}$ ), com a formação de meandros e características de canais aluviais, com margens bem definidas e material do leito arenoso, como mostra a Figura 12b.



Figura 12 - Fotos do curso d'água em diferentes trechos. Legenda: (a) Foto do trecho onde se encontram as primeiras seções; (b) Foto de quando o curso d'água apresenta diversos meandros.

### 3.2.6 Eficiência dos Modelos

A eficiência de ambos os modelos foi baseada no coeficiente de Nash-Sutcliffe, que é um coeficiente proposto por Nash e Sutcliffe (1970), amplamente utilizado para análise estatística de estudos hidrológicos. Sendo  $y$  a variável de saída, que na

maioria dos estudos hidrológicos é a vazão. O coeficiente de Nash-Sutcliffe é definido como:

$$n = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

Onde  $\hat{y}_i$  e  $y_i$  são as vazões observadas e computadas no tempo t, respectivamente, e  $\bar{y}_i$  é a média das vazões observadas e computadas.

Esse coeficiente pode variar entre 0 e 1, com 1 indicando um ajuste perfeito dos dados. De acordo com Motovilov et. al. (1999), os resultados da simulação são considerados bons para valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe maiores ou iguais a 0,75, enquanto para valores entre 0,75 e 0,36 os resultados da simulação são considerados satisfatórios.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Calibração e validação do Modelo HEC-HMS

Na calibração do modelo, considerando os eventos de precipitação e vazão compreendidos entre 31 de agosto de 2016 e 01 de novembro de 2016, foram obtidos os seguintes valores para vazão de pico, volume total de chuva e coeficiente de Nash-Sutcliffe, apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 - Comparação dos valores estimados e observados.

	Vazão de Pico (m³/s)	Volume total de chuva (mm)	Nash-Sutcliffe
Observado	3,82	179,94	0,95
Estimado	4,01	208,13	

Na validação do modelo, considerando quatro eventos de precipitação e vazão que compreendem o espaço temporal de dezembro de 2016 a abril de 2017, foram

obtidos os seguintes valores para vazão de pico, volume total e coeficiente de Nash-Sutcliffe, apresentados na Tabela 3:

Tabela 3- Valores dos quatro eventos escolhidos para a validação do modelo.

	Vazão de Pico (m <sup>3</sup> /s)	Volume total de chuva (mm)	Nash-Sutcliffe
<b>Evento 1</b>			
Observado	1,18	28,24	0,98
Estimado	1,14	27,16	
<b>Evento 2</b>			
Observado	0,42	13,09	0,98
Estimado	0,42	13,04	
<b>Evento 3</b>			
Observado	2,05	42,64	0,97
Estimado	2,03	32,05	
<b>Evento 4</b>			
Observado	0,43	11,95	0,87
Estimado	0,57	13,66	

Percebe-se que os valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe obtidos se encaixam no intervalo considerado como bom.

#### 4.3 Calibração e validação do Modelo HEC-RAS

Na calibração do modelo foi inserido o hidrograma referente ao espaço temporal de 31 de agosto de 2016 a 14 de setembro de 2016, obtido da modelagem através do HEC-HMS. Inicialmente foram utilizados coeficientes de rugosidade de Manning baseados nas tabelas de Ven Te Chow (1959) e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficientes de rugosidade de Manning usados na primeira tentativa de simulação.

Trecho	Margem Esquerda	Leito	Margem Direita
85 a 940 metros	0.15	0.1	0.15
0 a 85 metros	0.12	0.05	0.12



Porém, ao utilizar esses valores, a simulação apresentou diversas inconsistências e não pode ser completada. Portanto, variou-se os valores de coeficiente de rugosidade de Manning, baseando-se no guia fotográfico de Yochum et. al (2014).

O hidrograma de saída da modelagem pelo HEC-RAS, assim como o hidrograma das vazões observadas na seção de controle podem ser vistos na Figura 13.

### Calibração do Modelo

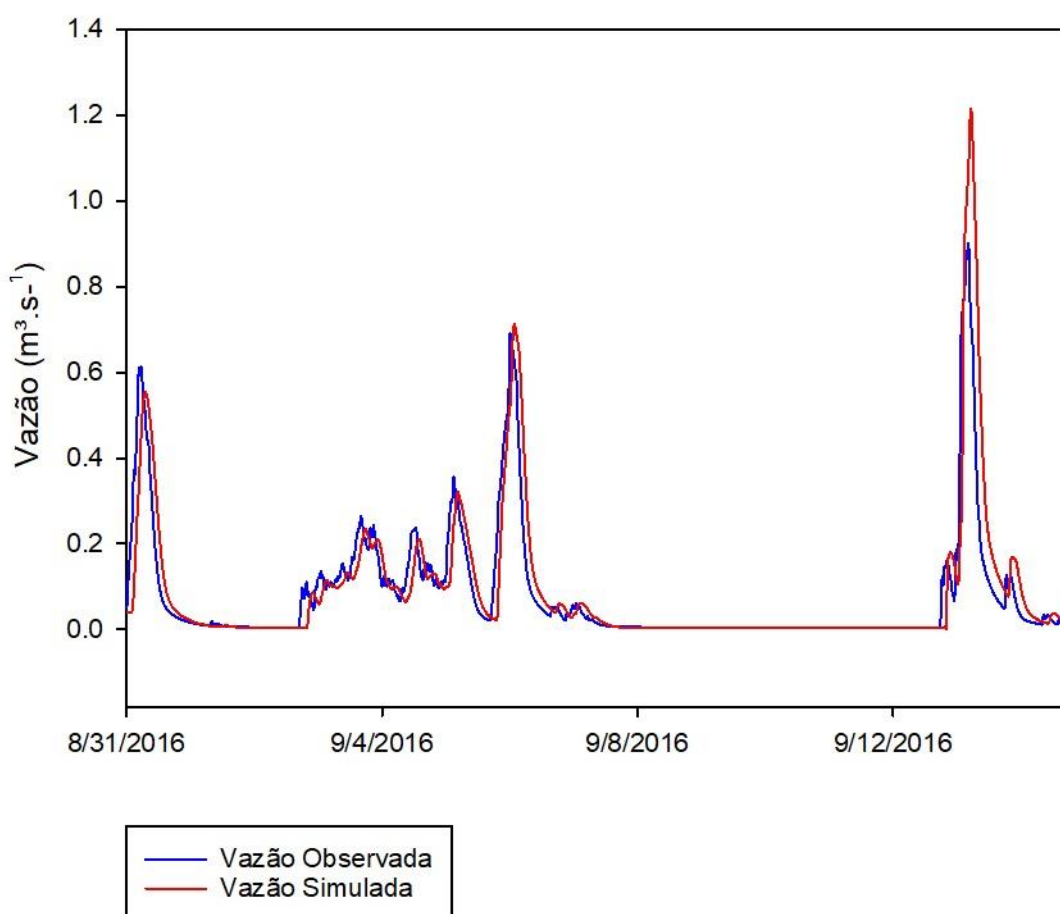


Figura 13 - Hidrogramas usados na calibração do modelo HEC-RAS.

A Tabela 5 apresenta os valores de coeficiente de rugosidade de Manning usados em cada intervalo de seções transversais e os diferentes valores usados para as margens e para o leito. Obteve-se um valor de coeficiente de Nash-Sutcliffe igual

à 0.69, portanto, percebe-se que esse valor calculado se encaixa no intervalo considerado como “satisfatório”.

Tabela 5 - Coeficientes de rugosidade de Manning usados na calibração

Trecho	Margem Esquerda	Leito	Margem Direita
85 a 940 metros	0.55	0.52	0.55
0 a 85 metros	0.15	0.13	0.15

Devido ao valor do coeficiente Nash-Sutcliffe não se encaixar na faixa de resultados considerados bons, e também sabendo que o coeficiente de rugosidade de Manning é um coeficiente que interfere bastante na estimativa do fluxo do curso d'água, foi feita uma variação desse coeficiente buscando melhores resultados. A Figura14 apresenta o hidrograma obtido da modelagem através do HEC-RAS com a variação do coeficiente de rugosidade de Manning, assim como o hidrograma das vazões observadas na seção de controle.

Calibração do Modelo

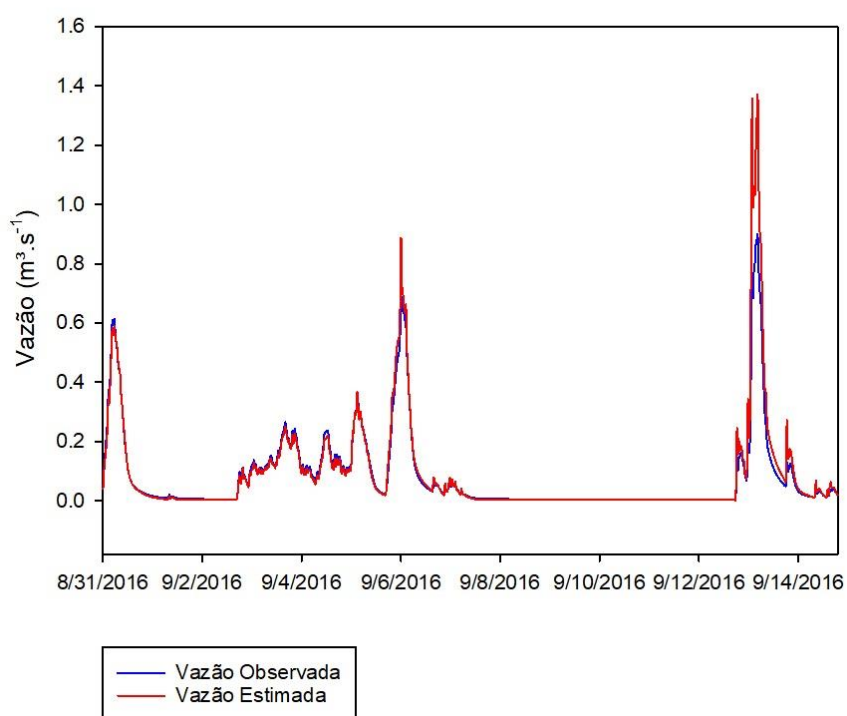


Figura 14 - Hidrogramas resultantes da calibração.

Com os novos valores de coeficiente de rugosidade de Manning obteve-se um hidrograma que se adequa melhor às vazões observadas na seção de controle. Foi também calculado o coeficiente de Nash-Sutcliffe, obtendo um valor igual à 0.89, o considerado “bom”.

A Tabela 6 apresenta os valores de coeficiente de rugosidade de Manning usados em cada intervalo das seções transversais e os diferentes valores usados para as margens e para o leito.

Tabela 6– Coeficientes de rugosidade de Manning resultantes da calibração

<b>Trecho</b>	<b>Margem Esquerda</b>	<b>Leito</b>	<b>Margem Direita</b>
85 a 940 metros	0.17	0.081	0.17
0 a 85 metros	0.41	0.35	0.41

Na validação do modelo, considerando os três eventos, foram obtidos os seguintes valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe, apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 - Coeficientes de Nash-Sutcliffe resultantes da validação dos três eventos

	<b>Nash-Sutcliffe</b>
Evento 1	0.81
Evento 2	0.91
Evento 3	0.88

Os hidrogramas utilizados para a validação do modelo, estão apresentados nas Figuras 15, 16 e 17, assim como os hidrogramas observados na seção de controle para cada evento.

## Validação - Evento 1

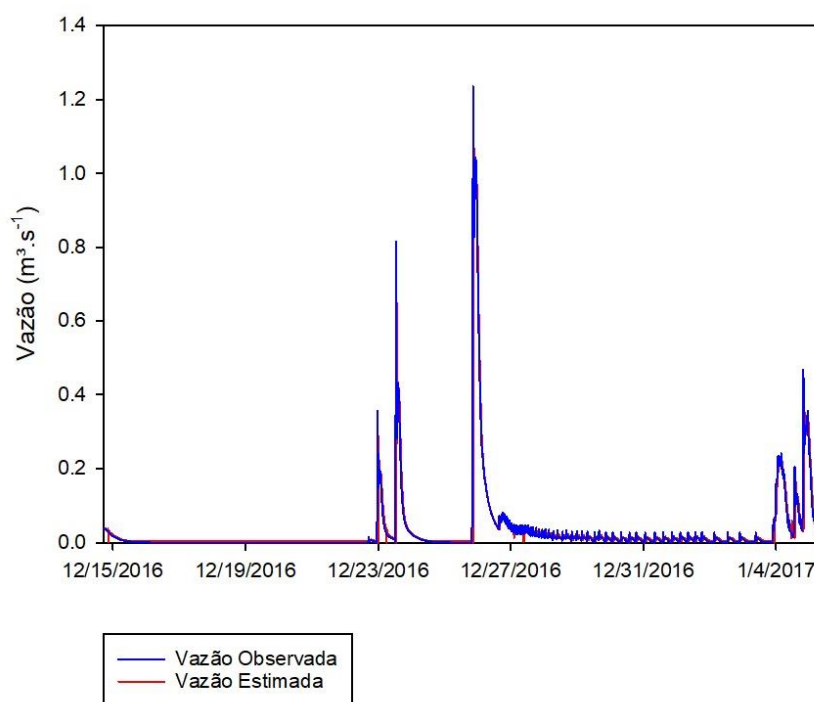


Figura 15 - - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 1.

## Validação - Evento 2

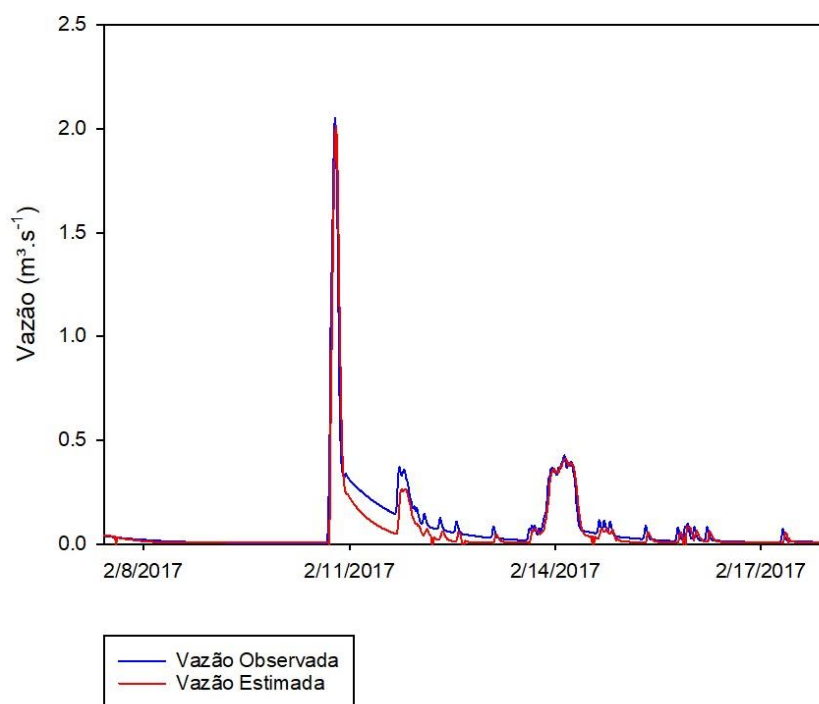


Figura 16 - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 2.

## Validação - Evento 3

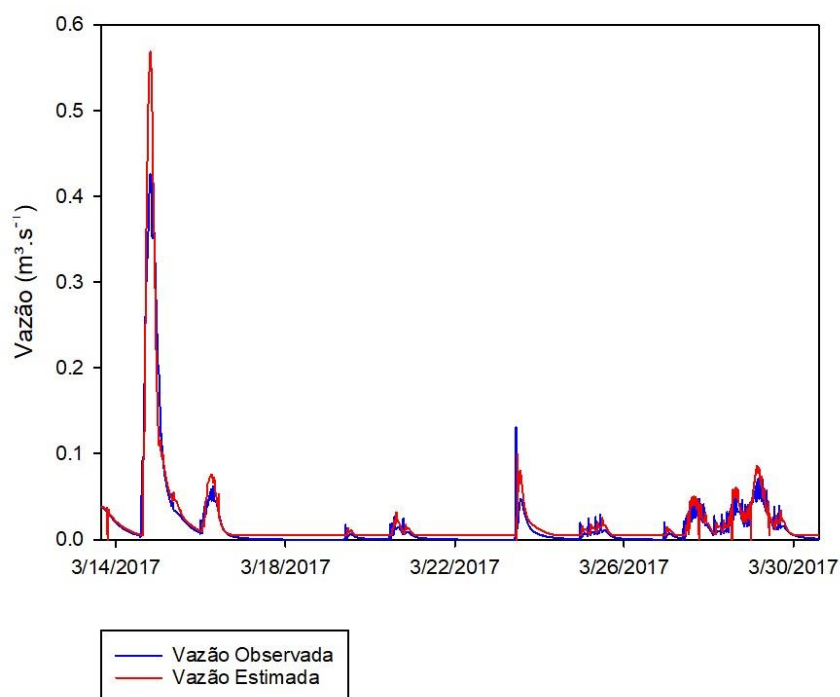


Figura 17 - Hidrogramas resultantes da simulação do Evento 3.

#### 4.4 Estimativa da modificação do coeficiente de rugosidade

Baseado nas observações de campo, foram adotados coeficientes de rugosidade de Manning para as margens e para o leito. A Tabela 8 mostra todos os valores de coeficiente de rugosidade de Manning testados na calibração, assim como os valores obtidos de coeficiente de Nash-Sutcliffe.

Tabela 8 - Variações do coeficiente de rugosidade de Manning em cada teste e o coeficiente de Nash-Sutcliffe resultante

Teste	Trecho do curso d'água	Margem Esquerda	Leito	Margem Direita	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
1	85 a 940 metros	0.15	0.1	0.15	-
	0 a 85 metros	0.12	0.05	0.12	
2	85 a 940 metros	0.55	0.52	0.55	0.69
	0 a 85 metros	0.15	0.13	0.15	
3	85 a 940 metros	0.5	0.41	0.5	0.73
	0 a 85 metros	0.74	0.65	0.74	
4	85 a 940 metros	0.17	0.081	0.17	0.88
	0 a 85 metros	0.41	0.35	0.41	

Foram testadas grandes variações no coeficiente, buscando a melhor adequação do modelo e, com isso pode ser constatado valores mais baixos de coeficiente de rugosidade de Manning para o trecho mais longo do curso d'água e valores mais altos para as últimas seções, nas quais se observa granulometria de fundo composta de “grandes rochas”, inferindo os melhores resultados.

#### 4.5 Limitações da modelagem

Segundo o manual de aplicação do HEC-RAS, a modelagem possui algumas limitações, as quais podem causar instabilidades e, por consequência, fazer com que o modelo pare a simulação por excesso de erros.

Inicialmente, a modelagem do curso d'água em estudo compreendia um trecho maior, caracterizado por grandes declividades, incluindo uma queda d'água de aproximadamente 6 metros, com declividade média de  $0.71 \text{ m.m}^{-1}$ . Esse trecho (940 a 1370 m), quando simulado, resultou em inúmeras instabilidades e erros, impossibilitando a continuação da simulação. Segundo USACE (2008), declividades maiores que 14%, verificado nesse trecho, a modelagem está sujeita a diversos erros, podendo interromper a simulação. A Figura 18 apresenta o perfil longitudinal do curso d'água, incluindo as partes mais declivosas no momento em que a simulação foi interrompida.

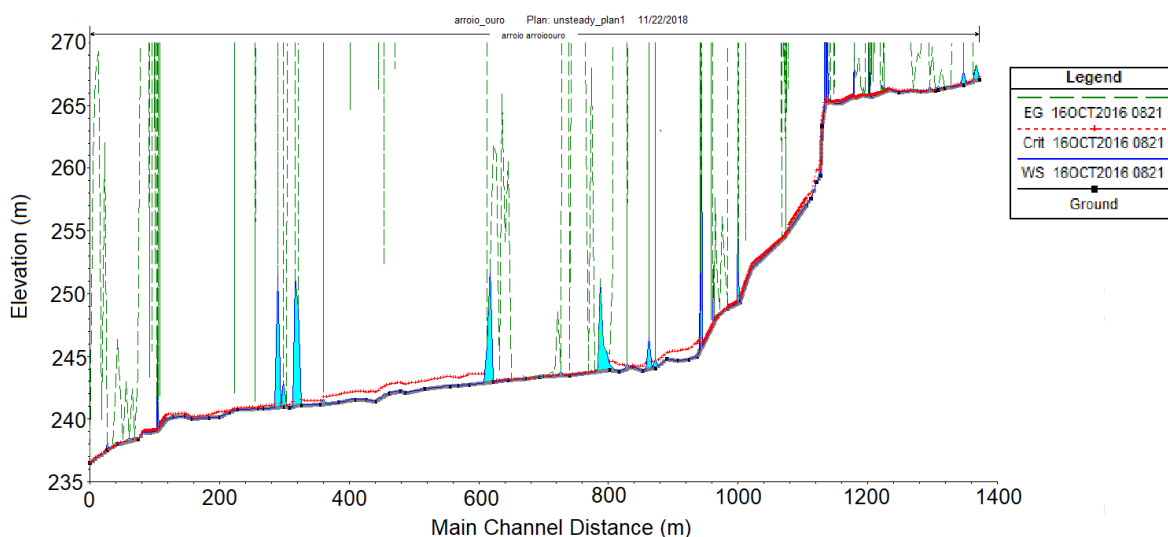


Figura 18 - Perfil longitudinal do trecho inicial da modelagem com os erros apresentados.

Outra limitação da modelagem através do HEC-RAS é o fato de que o curso d'água nunca pode possuir uma vazão de valor zero, ou bem próximo de zero. Isso também ocasiona problemas na simulação e leva a mesma a ser interrompida.

## **5 Conclusão**

Com a calibração e validação do modelo HEC-RAS através de distintos eventos, percebeu-se que o mesmo é adequado para simular o fluxo no trecho escolhido do Arroio do Ouro.

Com o modelo devidamente validado, foi possível observar que os valores adequados para o coeficiente de rugosidade de Manning, que apresentaram os melhores resultados, não são aqueles sugeridos por tabelas mais convencionais e sim valores mais elevados, constatados em guias fotográficos elaborados com base em estudos de campo mais recentes.

Foi constatado que locais com elevada declividade do curso d'água não apresentaram resultados satisfatórios de coeficiente de Nash-Sutcliffe e, portanto, exigem estudos posteriores para que possam ser incluídos na modelagem.



## Referências

AB. GHANI, A.; ZAKARIA, N. A.; KIAT, C. C.; ARIFFIN, J.; HASAN, Z. A.; GHAFFAR, A. B. A. Revised equations for Manning's coefficient for sand-bed rivers. **International Journal River Basin Management**, 2007, v.5, n.4, p.329–346.

ALMEIDA NETO, J. A.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. Características hidráulicas de tubos de bambu gigante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2000, v.4, n.1, p.1-7.

AZMON, B. Manning coefficient of roughness – A case study along Soreq stream, 1971-1981. **Journal of Hidrology**, 1992, v.132, n.1-4, p.361-377.

BAKRY, M.F. Impact of mechanical cutting on the channel roughness. **Water Resource Management**, 1996, 10:479–486.

CHIN, D. A. **Water-Resources Engineering (3rd ed.)**. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc, 2013.

CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. Reimpressão da edição de 1959. Caldwell, NJ. 1959.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1ª edição. McGraw-Hill Book Co. 1988.

COWAN, W. Estimating hydraulic roughness coefficients. **Agricultural Engineering** **37(7)**. p. 473–475, 1956.

DE DONCKER L, TROCH P, VERHOEVEN R, BAL K, MEIRE P, QUINTELIER J. Determination of the manning roughness coefficient influenced by vegetation in the river Aa and Biebrza river. **Environ Fluid Mech**.p. 549– 567, 2009.

DE DONCKER L, TROCH P, VERHOEVEN R, BUIS K. Deriving the relationship among discharge, biomass and Manning's coefficient through a calibration approach. **Hydrol Process**,p. 1979–1995, 2011.

DI BALDASSARRE, G.; CLAPS, P. A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. **Journal of Hydrology Research**, 42 (1). p. 10-19, 2011.

HORRITT MS, BATES PD. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, p. 268:87–99, 2002.

JACCON, G.; CUDO, K.J. Curva-chave: análise e traçado, Brasília, **DNAEE**, 1989.

JINKANG, D.; SHUNPING, X.; CHONG-YU, X.; VIJAY, PS. Development and testing of a simple physically-based distributed rainfall-rainoff model for storm runoff simulation in humid forested basins. **Journal of Hydrology**, 336 (3-4). p. 334-346, 2007.

JULIEN, P. Y.; KLAASSEN, G. J.; TEN BRINKE, W. B. M.; WILBERS, A. W. E. Case study: Bed resistance of a river during 1998 flood. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.128, n.12, p.1042– 1050, 2002.

LI, Z.; ZHANG, J. Calculation of field Manning's roughness coefficient. **Agricultural Water Management**, v.49, n.2, p.153-161, 2001.

LÓPEZ, R.; BARRAGÁNA, J.; COLOMERB, A. Flow resistance equations without explicit estimation of the resistance coefficient for coarse-grained rivers. **Journal of Hydrology**, v.338, n.1-2, p.113-121, 2007.

LYRA, G. B.; CECON, P. R.; DENICULI, W.; DA SILVA, D. D.; OLIVEIRA, R. A. Determinação experimental dos coeficientes de rugosidade de Manning e Bazin em tubulações de PVC. **Engenharia na Agricultura**, v.15, n.4, 428-436, 2007.

MAGALHÃES, P. C. **Engenharia hidrológica: hidrologia superficial**. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 1989. cap. 4, p. 201.

MAHMOUDI M, NALESSO M, GARCIA RF, MIRALLES-WILHELM F. The effect of Manning's roughness calibration on flow and sediment transport in wetlands: vegetation drag approach. **AGU Spring Meet Abstr**, 22:7, 2013.

MARTONI, A. M.; LESSA, R. C. Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José – Porto 18. Parte I: Caracterização física do canal. **Acta Scientiarum**, v.21, n.4, p.949-959, 1999a.

MARTONI, A. M.; LESSA, R. C. Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José – Porto 18. Parte II: Calibragem do modelo. **Acta Scientiarum**, v.21, n.4, p.961-970, 1999b.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: Ed. UFLA, 2013.

MILDE, L.C.E.; MORAES, J.M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, F.F.B.; GROppo, JULIANO. Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia. **Revista de Ciência & Tecnologia**, V. 10, nº 19 – pp. 61-69, 2002.

MOTOVILOV, YU G., et al. ECOMAG: Regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region. **Department of Geophysics. University of Oslo. Inst. Rep. Ser 105**, 1999.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, 10(3), 282–290, 1970.

NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. 9.ed. São Paulo: Globo, 1989. 577p.

PAPANICOLAOU, A. N., ELHAKEEM, M., KRALLIS, G., PRAKASH, S., & EDINGER, J. Sediment Transport Modeling Review - Current and Future Developments. **Journal of Hydraulic Engineering**, 134(1), 1-14, 2008.

PAPPENBERGER F, BEVEN K, HORRITT M, BLAZKOVA S. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. **Journal of Hydrology**, p. 302:46–69, 2005.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. Tradução de Antonio Pacini e AllTaskslanguage Technology. 3a Ed. São Paulo: Thomson, 2004. p. 390-417.

SANTOS, I; FILL, H. D. et al. **Hidrometria Aplicada**. 1ª edição. Curitiba, PR. CEHPAR - Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza. 2001.

SHAHROKHNIA MA, JAVAN M. Influence of roughness changes on offtaking discharge in irrigation canals. **Water Resource Management**, 21:635–647, 2007.

SILVEIRA, A.L.L. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: EDUSP, 2001. p 35-51.

SONG S, SCHMALZ B, FOHRER N. Simulation and comparison of stream power in-channel and on the floodplain in a German lowland area. **Journal of HydrologyHydromech**, 62:133–144, 2014.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de. Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação Relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização. In: **Anais** do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 1ª edição. São Paulo, SP. Edusp - Editora do Estado de São Paulo. 1993.

USACE. (2008). HEC-RAS River Analyses System. Release Notes. US Army Corps of Engineers. **Hydrologic Engineering Center**. Version 4.0.0. 2008.

USACE-HEC (a). "Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.3 – User's Manual", US Army Corps of Engineers, **Hydrologic Engineering Center**, 2008.

USACE-HEC (b). "Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Applications Guide", US Army Corps of Engineers, **Hydrologic Engineering Center**, 2008.

USACE-HEC "Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual". US ArmyCorps of Engineers, **HydrologicEngineering Center**, 2000.

VIEIRA, D. B.; SILVA, R. T. Estudo hidráulico de sulcos largos de infiltração. **Irriga**, v.9, n.2, p.193-206, 2004.

WANG, L. K., & YANG, C. T. **Modern Water Resources Engineering (Vol. 15)**. New York, NY: Springer Science & Business Media, 2014.

WONG, T. S. W; LIM, C.K. Effect of loss model on evaluation of Manning roughness coefficient of experimental concrete catchment. **JournalofHydrology**, v.331, n.1-2, p.205-218, 2006.

YÉPEZ, M. G. O.; VENTURA, F. F. V.; GUEVARA, E.; CARTAYA, H. Cálculo del coeficiente de rugosidad "n" de Manning en los grandes ríos de Venezuela. **Revista de la Facultad de Ingeniería**, v.7, n.2, p.1-12, 2000.

YOCHUM, S.E.; COMITI, F.; WOHL, E.; DAVID, G.C.L.; MAO, L.  
Photographic Guidance for Selecting Flow Resistance Coefficients in High Channels.  
US. **Department of Agriculture, Forest Service**, Rocky Mountain Research Station,  
General Technical Report, RMRS-GTR-323.

## Apêndice

APÊNDICE A: Tabelas com os coeficientes de rugosidade de Manning elaboradas por Ven Te Chow (1959) para canais naturais.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at floodstage < 100 ft)			
<b>1. Main Channels</b>			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as "d" with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
<b>2. Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stages</b>			
a. bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
<b>3. Floodplains</b>			
a. Pasture, no brush			
1. short grass	0.025	0.030	0.035
2. high grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. no crop	0.020	0.030	0.040

2. mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. mature field crops	0.030	0.040	0.050
<b>c. Brush</b>			
1. scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
<b>d. Trees</b>			
1. dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
2. cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
3. same as above, but with heavy growth of sprouts	0.050	0.060	0.080
4. heavy stand of timber, a few down trees, little undergrowth, flood stage below branches	0.080	0.100	0.120
5. same as 4. with flood stage reaching branches	0.100	0.120	0.160
<b>4. Excavated or Dredged Channels</b>			
<b>a. Earth, straight, and uniform</b>			
1. clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
2. clean, after weathering	0.018	0.022	0.025
3. gravel, uniform section, clean	0.022	0.025	0.030
4. with short grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
<b>b. Earth winding and sluggish</b>			
1. no vegetation	0.023	0.025	0.030
2. grass, some weeds	0.025	0.030	0.033



3. dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.030	0.035	0.040
4. earth bottom and rubble sides	0.028	0.030	0.035
5. stony bottom and weedy banks	0.025	0.035	0.040
6. cobble bottom and clean sides	0.030	0.040	0.050
c. Dragline-excavated or dredged			
1. no vegetation	0.025	0.028	0.033
2. light brush on banks	0.035	0.050	0.060
d. Rock cuts			
1. smooth and uniform	0.025	0.035	0.040
2. jagged and irregular	0.035	0.040	0.050
e. Channels not maintained, weeds and brush uncut			
1. dense weeds, high as flow depth	0.050	0.080	0.120
2. clean bottom, brush on sides	0.040	0.050	0.080
3. same as above, highest stage of flow	0.045	0.070	0.110
4. dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140