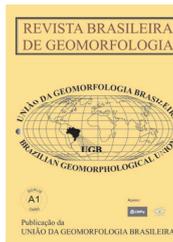


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, n° 4 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1512>



GEOMETRIA HIDRÁULICA DE UM TRECHO DE CANAL FLUVIAL APLICANDO HEC-RAS

HYDRAULIC GEOMETRY IN A STREAM REACH APPLYING HEC-RAS

Edinei Coser

*Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul
Rodovia SC 484 - Km 02, Fronteira Sul, Chapecó. CEP 89815-899. Brasil
ORCID: 0000-0002-6686-9468
E-mail: edinei.acm@gmail.com*

Fernando Grison

*Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul
Rodovia SC 484 - Km 02, Fronteira Sul, Chapecó. CEP 89815-899. Brasil
ORCID: 0000-0002-5256-8744
E-mail: fernando.grison@uffs.edu.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
08/09/2018
Aceito (Accepted):
26/05/2019

Palavras-chave:

Geometria Hidráulica de
Seção Transversal; HEC-RAS;
Modelagem Hidráulica.

Keywords:

At-a-station Hydraulic
Geometry; HEC-RAS;
Hydraulic Modeling.

Resumo:

O fluxo de água é o principal agente modificador de canais naturais e uma ferramenta útil para entender essas modificações é a teoria da geometria hidráulica. Neste contexto, parâmetros hidráulicos como velocidade média, profundidade hidráulica e largura variam com a vazão como funções potenciais. O objetivo deste trabalho foi obter os coeficientes e expoentes das funções potenciais da geometria hidráulica para 17 seções transversais em um trecho de canal natural de 132 m do rio da Divisa, com largura em torno de 4 m e profundidade média variando de 0,40 a 1,00 m, entre os municípios de Chapecó e Guatambú em Santa Catarina. Também foi analisada a utilização do modelo HEC-RAS 4.1 em estado estacionário e não estacionário para obtenção dos parâmetros hidráulicos. A análise da geometria hidráulica para cada seção foi baseada no diagrama de Rhodes. Os resultados mostraram que *não houve diferenças significativas utilizando as simulações em regime permanente e não permanente* e que a maioria das seções transversais apresentam margens estáveis e competência para transporte de sedimentos. Assim, foi possível diagnosticar o trecho de estudo bem como demonstrar a praticidade e confiabilidade do modelo HEC-RAS como ferramenta no auxílio de estudos da geometria hidráulica.

Abstract:

The water flow is the main modifier of natural channels. A useful tool to understand these modifications is through the hydraulic geometry theory. In this context, hydraulics components, such as mean channel velocity, hydraulic depth and top width vary with the discharge as power laws. Thus, the aim of this work was to obtain the hydraulic geometry coefficients and exponents for 17 cross-sections in a stretch of natural stream channel 132 m of the Divisa River, with an average width of 4m and

average depth varying between 0.40 and 1.00 m, between the municipalities of Chapecó and Guatambú – SC, in Santa Catarina, Brazil. It was also analyzed the use of HEC-RAS model in steady and unsteady state to obtain the hydraulic parameters. The hydraulic geometry interpretation for each section was based on the Rhodes Diagram. The results showed that there were no significant differences using the permanent and nonpermanent simulations and that the majority of cross sections have stable margins and competence for sediment transport. Thus, it was possible to characterize the channel and demonstrate the practicality and reliability of HEC-RAS as a tool in the study of hydraulic geometry.

Introdução

A vazão sólida e líquida de uma bacia hidrográfica são respostas de variáveis referentes à hidrologia, geologia e aspecto da bacia de drenagem (LEOPOLD; MADDOCK, 1953). As interações entre esses mecanismos norteiam o equilíbrio dos processos naturais que nela ocorrem. Dentro da bacia a água, sedimentos e materiais dissolvidos são drenados para um ponto em comum ao longo de um curso de água, seja oceano, lago ou rio (DUNNE; LEOPOLD, 1978).

Rios são componentes muito importantes do ciclo hidrológico, pois direcionam água dos continentes aos oceanos, recarregam os lençóis freáticos, além de oferecer água para agricultura e consumo humano (GLEASON, 2015). Ações antrópicas, tais como atividades agrícolas na bacia hidrográfica, obras de engenharia e modificações na vegetação do entorno de rios têm causado alterações na vazão e na dinâmica dos recursos hídricos. Como o fluxo de água é o principal agente modificador da hidráulica e morfologia do canal de um rio (CHRISTOFOLLETTI, 1981), a análise das características fluviais relacionadas à vazão é importante para o adequado planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Uma maneira de estudar os mecanismos que veem a modificar as características fluviais é por meio de seções transversais. A forma de uma seção transversal de qualquer rio, basicamente descrita por sua largura e profundidade, é função do fluxo d'água e da quantidade e característica do sedimento carregado de suas margens e da bacia (GRISON, 2010). Uma ferramenta interessante para um melhor entendimento das mudanças que ocorrem na forma dos rios é a teoria da geometria hidráulica.

A teoria da geometria hidráulica foi proposta por Leopold e Maddock em 1953, na qual os parâmetros hidráulicos, como velocidade, largura e profundidade, que ajudam a determinar a forma dos rios naturais variam com a vazão líquida como simples funções potenciais. Essas relações podem ser aplicadas para descrever variações nas propriedades hidráulicas de um rio

em relação a uma dada vazão (denominada geometria hidráulica de jusante, ou *downstream*) ou em relação a um intervalo de vazões em uma dada seção transversal (denominada *at-a-station*).

O uso das relações de geometria hidráulica já é consolidado nos estudos de rios desde a apresentação do seu conceito. Relações de geometria hidráulica têm sido aplicadas em processos de avaliação geomorfológica (KNIGHTON, 1975; MERIGLIANO, 1997; PASTERNAK, 2011), regeneração de rios (COPELAND *et al.*, 2001; SHIELDS *et al.*, 2003), classificação de córregos (LEOPOLD; WOLMAN, 1957; ROSENGEN, 1994), sistematização de cascatas (WYRICK E PASTERNAK, 2008), avaliação de ecossistemas aquáticos (HOGAN; CHURCH, 1989; JOWETT, 1998; ROSENFELD *et al.*, 2007), estimativa de vazão por satélites (GLEASON; SMITH, 2014), projetos de canais de irrigação (RIGGS, 1978), ferramenta de auxílio no manejo florestal (HEEDE, 1972), e em estudos de regionalização de vazão (GRISON, 2011).

Para estimar os parâmetros da geometria hidráulica é necessário descrever fisicamente a seção transversal para obter sua profundidade média e largura, bem como ter um monitoramento de vazão. A descrição da seção transversal é feita geralmente por levantamento topobatiométrico, enquanto há diversas maneiras de medir a vazão, tanto manualmente quanto automaticamente por estações fluviométricas. Uma possibilidade para facilitar, otimizar e expandir o estudo de geometria hidráulica seria com auxílio de programas de simulação hidrodinâmica, como o *US Hydraulic Engineering Center - Rivers Analysis System* (HEC-RAS). Este modelo é capaz de estimar níveis de água em regime permanente e não permanente em uma dimensão e duas dimensões, transporte de sedimentos e modelagem em temperatura de água (USACE, 2010b).

O HEC-RAS pode ser usado como uma ferramenta de auxílio, gerenciamento e limitação de áreas de inundações de rios (HORRITT, BATES, 2002; GOERL, 2010; RAY *et al.*, 2011; SURIYA, MUDGAL, 2012; MENDES, 2013; LUZ, 2017; COUTINHO, 2015; MONTE *et al.*,

2016; NETO; BATISTA; COUTINHO, 2016), análises de alterações no perfil de água (WANG, 2014), análise de transporte de sedimentos (MOHAMMAD *et al.*, 2016, PENDER *et al.*, 2016), análise de qualidade de água (DRAKE; BRADFORD; JOY, 2010; MOORE *et al.*, 2013, análise de efeitos de estruturas hidráulicas como bueiros, pontes e barragens (LEE; HO; CHYAN, 2006; NAGHSHINE; RAO; KHOSHROFTAR, 2013; QASIM, 2013), propagação de onda de maré em estuário (LOITZENBAUR; MENDES, 2016) e propagação de ondas de cheias de rompimentos de barragens (MONTE-MOR, 2004; LAURIANO, 2008; XIONG 2011; MOECKE, 2014; KUHLKAMP, 2016). Poucos são os estudos que usam HEC-RAS para determinar parâmetros para determinação da geometria hidráulica, sendo apenas usados por vezes para determinação de parâmetros hidráulicos para seções de margem plena (GARCIA, LORENZO, 2009). Com o HEC-RAS é possível obter os parâmetros de geometria hidráulica para diversos locais em um trecho de rio a partir de algumas seções transversais.

Tendo em vista esse cenário, objetivou-se com esse trabalho estimar os expoentes de geometria hidráulica *at-a-station* (AHG) de 17 seções transversais de um trecho do Rio da Divisa, entre os municípios de Chapecó e Guatambú em Santa Catarina, com o aporte do modelo HEC-RAS, analisando a aplicabilidade do modelo em estado estacionário e não estacionário.

Materiais e Métodos

Área de estudo

A área de estudo compreende um trecho do Rio da Divisa, localizado na divisa dos municípios de Chapecó e Guatambú em Santa Catarina, nas proximidades da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) (Figura 1). O trecho de estudo tem uma distância de 132 m e foram posicionadas 17 seções transversais levantadas em campo, nomeadas de jusante (XS0) para montante (XS16).

O trecho do rio é caracterizado como perene e calmo, com declividade média de 0,0022 m/m, profundidade média de 1 metro, largura variável entre 3 e 4 m, estando dentro de um fragmento de floresta ombrófila mista, vegetação predominantemente ripária. Na margem esquerda do trecho também existe uma faixa de reflorestamento de *Pinus*. Em geral as margens são compostas por um bosque bem definido, sendo ligeiramente mais espesso na margem esquerda que na margem direita. O trecho de estudo também é caracterizado pela presença de um sistema *step-pool* (um pequeno desnível no leito do canal, seguido de um pequeno represamento), nas proximidades da seção transversal XS8. O Rio da Divisa faz fronteira com a área do *Campus* Chapecó da Universidade Federal da Fronteira Sul. O perfil transversal do rio e suas seções transversais de estudo podem ser vistos nas figuras 2 e 3, respectivamente.

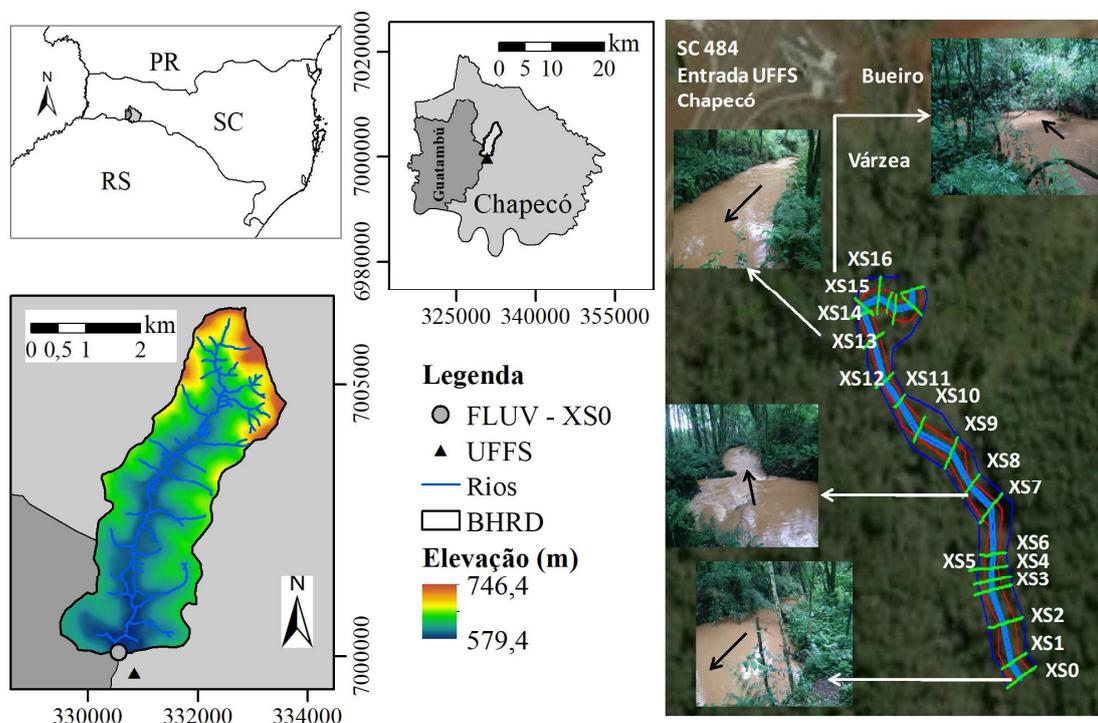


Figura 1 - Localização do local de estudo e posicionamento das seções transversais. Imagens de algumas seções transversais após evento extremo.

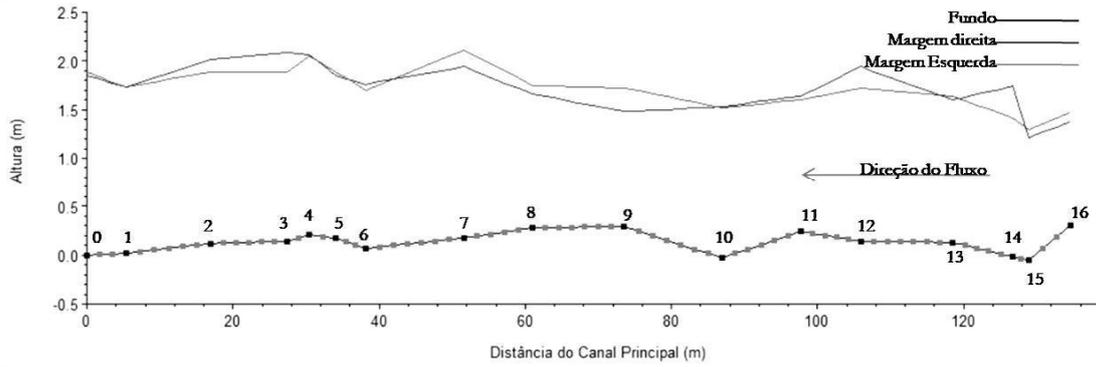


Figura 2 - Perfil longitudinal do trecho de estudo.

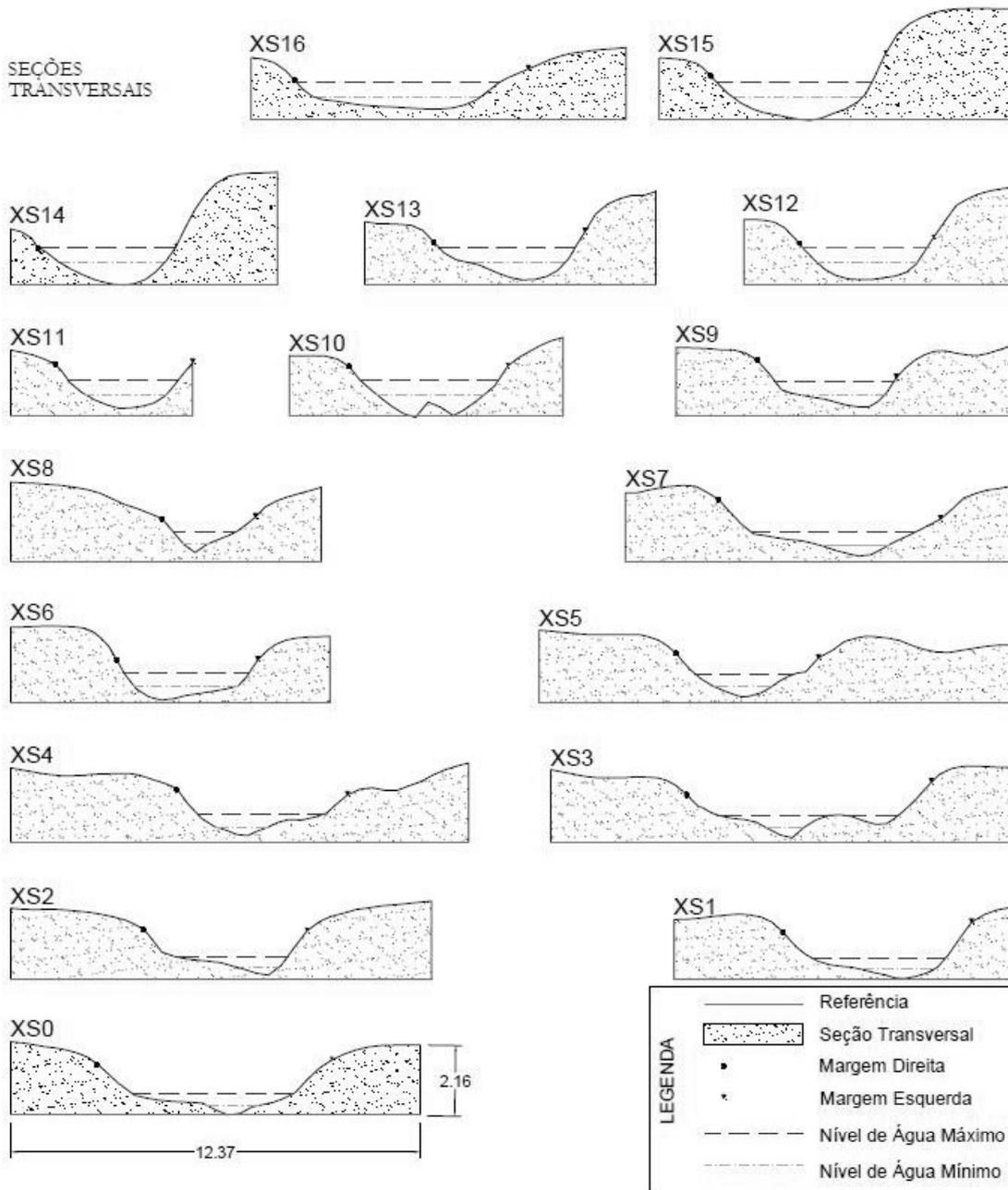


Figura 3 - Seções transversais do trecho de estudo.

Dados de topografia e levantamento das seções

Foi obtido um modelo digital de terreno de base (MDT) do levantamento aerofotogramétrico realizado pelo Governo do Estado de Santa Catarina, por meio da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) georreferenciados via WGS 1894, na Zona 22S. O MDT foi então refinado no *ArcGIS* através da ferramenta *Topo to Raster* tendo como base 17 seções transversais levantadas em campo em locais de perceptível mudança de geometria, sendo que XS0 coincide com uma estação fluviométrica, que possui monitoramento automático de nível d'água. As altimetrias das seções foram obtidas com auxílio de uma estação total *Leica*. Com o MDT refinado, usou-se a extensão HEC-GeoRAS para traçar os *layers* referentes ao canal principal, margens e seções transversais, sendo que esse último resultava na geometria da seção. Os *layers* então foram processados e exportados para o modelo HEC-RAS 4.1, onde foram interpoladas as seções transversais a cada 2 m para melhorar os resultados.

Dados Hidrológicos

Foram utilizados hidrogramas obtidos dos dados do monitoramento automático de nível d'água da estação fluviométrica do rio da Divisa, com intervalo de dez minutos, e por meio de uma curva-chave definida para essa estação. Os dados de precipitação foram obtidos por meio de pluviômetro automático que mede chuvas maiores ou igual que 0,2 mm em intervalos de 10 minutos. Os dados pluviométricos serviram para identificar eventos de chuva que gerassem hidrogramas com vazões dentro dos limites da curva-chave da seção XS0. A curva-chave foi obtida por Cauvilla (2016), e adaptada para este trabalho conforme a Equação 1:

$$Q = 3,541 \cdot y^{2,752} \quad (1)$$

onde y é a cota (m) e Q é a vazão (m^3/s). A Figura 4 mostra os pontos e o ajuste da curva.

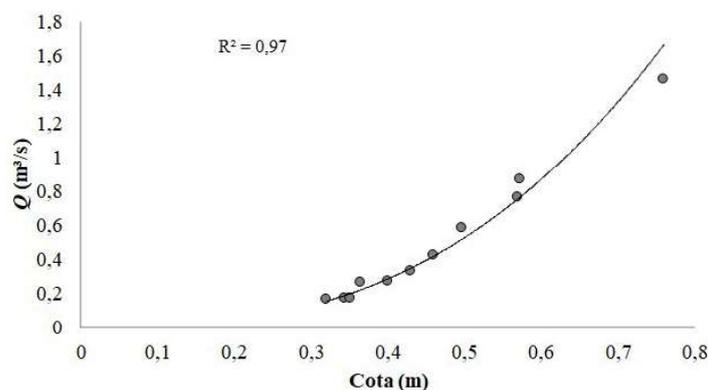


Figura 4 - Curva-chave seção XS0 (Adaptada de Cauvilla (2016))

Simulações no HEC-RAS

Para as simulações utilizou-se o modelo HEC-RAS 4.1. O modelo hidrodinâmico *Hydrological Engineering Center – River Analysis System* (HEC-RAS) foi desenvolvido pelo *US Army Corp of Engineers*, o qual foi planejado para executar cálculos hidráulicos e obter níveis de água em uma dimensão e duas dimensões para uma completa rede de canais artificiais e naturais (USACE, 2010a), seja em regime permanente ou não permanente.

Em estado estacionário foram simuladas 10 vazões dentro dos limites da curva-chave, sendo elas: 0,15, 0,25, 0,35, 0,45, 0,55, 0,65, 0,75, 0,85, 0,95 e 1,00 m^3/s . Como condição de contorno a jusante usou-se a curva-chave (Figura 4). Como condição de contorno a

montante usou-se profundidade crítica (*critical depth*).

As condições de contorno para o modelo no estado não estacionário foram hidrogramas a montante e curva-chave a jusante. Para a condição de contorno a montante foram escolhidos seis eventos de chuva os quais resultassem em vazões na calha do rio dentro dos limites da curva chave da seção XS0 (Figura 5). Apesar dos hidrogramas serem referentes à seção de jusante, como o trecho de estudo é curto, considerou-se que os mesmos hidrogramas poderiam ser usados como condição de contorno da seção de montante.

Como condição inicial para as simulações em regime estacionário e não estacionário usou-se as vazões iniciais dos hidrogramas. As principais informações sobre os eventos estão na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos eventos. Pt: precipitação total; Qi: vazão inicial; Qmin: vazão mínima; Qp: vazão de pico.

Evento	Início	Fim	Pt (mm)	Qi (m ³ /s)	Qmin (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)
1	01/02/2017 14:00	02/02/2017 05:00	34,00	0,14	0,13	0,98
2	11/02/2017 00:00	12/02/2017 00:50	19,20	0,14	0,14	0,45
3	12/03/2017 12:30	13/03/2017 03:40	23,80	0,20	0,20	0,80
4	16/03/2017 07:50	16/03/2017 20:40	25,00	0,17	0,17	0,59
5	05/04/2017 04:10	05/04/2017 16:40	57,20	0,11	0,11	1,04
6	13/05/2017 16:20	14/05/2017 03:30	29,00	0,13	0,13	0,64

Figura 5- Séries de vazão e precipitação para o primeiro semestre de 2017 com destaque aos seis eventos escolhidos. Linhas horizontais representam os limites de vazão da curva chave.

Para a calibração, as condições de contorno e inicial utilizadas foram: i) inicial: vazão antecedente ao hidrograma; ii) montante: hidrogramas de seis eventos distintos; iii) jusante: *Normal Depth*. Para o programa, a entrada para essa condição de contorno é a declividade do canal, a qual se optou por usar a inclinação entre as duas últimas seções transversais como aproximação, sendo esse valor igual a 0,00375 m/m.

Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning (n) para o trecho de estudo foi utilizado como parâmetro de calibração do modelo HEC-RAS. O valor n foi escolhido com base no material do leito, nas características do canal do rio e na descrição da vegetação das margens direita e esquerda. Após uma análise visual considerou-se para a margem direita bosques densos e para margem esquerda arbustos mais leves e árvores de maior porte. Dessa forma, definiu-se n igual a 0,075 para a margem direita e n igual a 0,05 para a margem esquerda (CHOW, 1959). Durante a calibração do HEC-RAS o coeficiente n foi considerado constante no tempo e espacializado na direção do fluxo, no intervalo de 0,030 e 0,040. O mesmo intervalo confere com as tabelas de Chow (1959) para um rio descrito como limpo, estágio completo, sem fendas.

A calibração cessou quando o nível de água obtido pelo modelo para a seção XS0 para as vazões de pico dos hidrogramas não se diferenciaram do nível de água real medido na mesma seção pela estação fluviométrica para seis eventos de chuva distintos, sendo o valor que melhor se ajustou foi $n=0,036$.

Obtenção de coeficientes e expoentes e análise da Geometria Hidráulica

Em relação à AHG as principais funções são as seguintes:

$$w = a \cdot Q^b \quad (2)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (3)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (4)$$

onde w , d , v são, respectivamente, largura, profundidade média e velocidade média, a , c , k são os coeficientes e b , f e m os expoentes. Quando as equações 2, 3 e 4 são plotadas em *log-log* escala, as relações tornam-se linhas retas, facilitando a interpretação. Dessa forma, os expoentes das equações representam a inclinação dessas retas (LEOPOLD e MADDOCK, 1953; GRISON, 2013)).

Pela equação da continuidade as equações 2, 3 e 4 podem ser interpretadas:

$$Q = a \cdot c \cdot k \cdot Q^{b+f+m} \quad (5)$$

ou seja,

$$b + f + m = 1 \quad (6)$$

$$a \cdot c \cdot k = 1 \quad (7)$$

Assim, largura, profundidade média e velocidade foram relacionadas à vazão por meio de funções potenciais em dois cenários:

Cenário 1 (C1): os coeficientes e expoentes de geometria hidráulica para cada seção foram obtidos por meio de parâmetros simulados pelo HEC-RAS em regime não estacionário.

Cenário 2 (C2): os coeficientes e expoentes de geometria hidráulica para cada seção foram obtidos por meio de parâmetros simulados pelo HEC-RAS em regime estacionário.

A análise da geometria hidráulica nas seções foi feita com o auxílio do diagrama triaxial de Rhodes (RHODES, 1977). Como a soma dos expoentes é igual a 1 (Equação 6) o diagrama permite expressar os três expoentes em um único ponto, facilitando a comparação entre as seções.

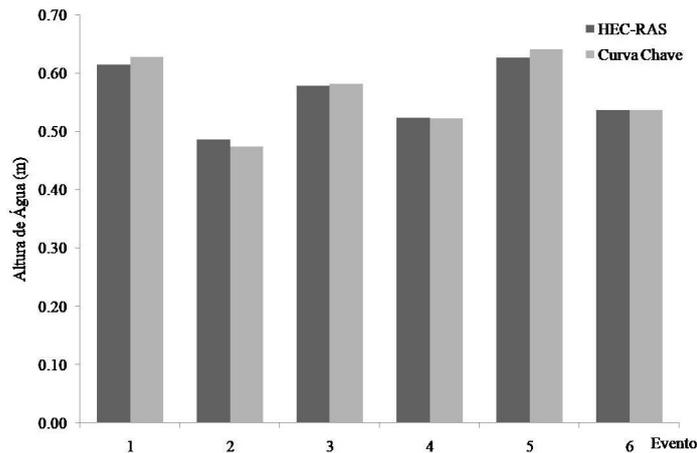


Figura 6—Alturas de água da calibração para XS0.

Cenário 1

A Tabela 2 apresenta os coeficientes e expoentes médios de AGH entre as seções transversais (XS). Percebe-se que, tanto para coeficientes como expoentes, as equações 6 e 7 foram satisfeitas. Além disso, observa-se um padrão de maior variação de velocidade com o aumento da vazão para as seções mais a montante, enquanto que para seções mais jusante o que tende a variar mais rapidamente é a largura. Ao mesmo tempo, as seções que variam mais a largura, são as mesmas que possuem uma geometria mais irregular. O formato do canal, por possuir menos irregularidades para seções a montante do sistema *step-pool* (próximo da seção XS8), tende a facilitar a passagem do fluxo principal, facilitando o aumento da velocidade para essas seções.

Cenário 2

A Tabela 3 contém os valores de expoentes e coeficientes obtidos por meio de simulações com o modelo

Resultados e Discussão

Calibração

A Figura 6 apresenta os níveis de água obtidos das simulações e dos dados reais (via curva-chave) para as vazões de pico de seis eventos distintos, sendo que o coeficiente de rugosidade (n) de 0,036 foi o que melhor calibrou o modelo para o canal, com uma diferença de nível de água máximo de 1 cm. O valor de 1 cm corresponde a uma diferença de 2 % entre a simulação e a altura de água relacionada à curva-chave.

em estado estacionário. Vale notar que as equações 10 e 11 novamente foram satisfeitas, bem como o padrão de C1 mantém-se para C2. No Apêndice são apresentados os gráficos de geometria hidráulica para as 17 seções transversais estudadas, dentre os quais, para as seções XS0, XS3 e XS4 percebe-se uma mudança brusca na tendência de variação de largura e velocidade. Isso pode ser explicado, pois, devido ao formato irregular dessas seções (Figura 4), há uma mudança drástica no perímetro molhado entre algumas vazões.

Comparação entre os cenários

Os expoentes obtidos para os dois cenários diferem significativamente dos obtidos por Cauvilla (2016). Apesar de serem seções muito semelhantes e próximas, os limites de vazão da curva-chave e a variação de nível de água se diferem entre os dois trabalhos, sendo que este trabalho ainda utilizou modelagem computacional.

Tabela 2: Coeficientes e expoentes de geometria hidráulica para o cenário C1.

XS	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>m</i>	<i>b+f+m</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>K</i>	<i>a·c·k</i>
16	0,09	0,44	0,47	1,00	6,07	0,62	0,27	1,00
15	0,08	0,26	0,66	1,00	4,65	0,78	0,28	1,00
14	0,11	0,24	0,65	1,00	3,98	0,74	0,34	1,00
13	0,17	0,30	0,53	1,00	4,26	0,59	0,40	1,00
12	0,10	0,29	0,62	1,00	3,67	0,70	0,39	1,00
11	0,14	0,35	0,51	1,00	3,27	0,58	0,53	1,00
10	0,12	0,26	0,62	1,00	4,14	0,67	0,36	1,00
9	0,17	0,44	0,39	1,00	3,79	0,51	0,52	1,00
8	0,42	0,38	0,20	1,00	1,90	0,30	1,74	0,99
7	0,48	0,24	0,28	1,00	5,70	0,33	0,53	1,00
6	0,12	0,38	0,50	1,00	3,81	0,56	0,47	1,00
5	0,25	0,37	0,39	1,00	2,94	0,42	0,80	1,00
4	0,44	0,37	0,19	1,00	3,88	0,33	0,79	1,00
3	0,73	0,11	0,17	1,00	4,53	0,22	0,99	1,00
2	0,45	0,33	0,23	1,01	3,21	0,27	1,16	1,00
1	0,32	0,35	0,33	1,00	4,56	0,35	0,63	1,00
0	0,61	0,20	0,19	1,00	5,85	0,23	0,73	1,00

Tabela 3: Coeficientes e expoentes de geometria hidráulica para o cenário C2.

XS	<i>b</i>	<i>f</i>	<i>m</i>	<i>b+f+m</i>	<i>a</i>	<i>c</i>	<i>K</i>	<i>a·c·k</i>
16	0,10	0,43	0,47	1,00	6,18	0,64	0,25	1,00
15	0,09	0,28	0,64	1,00	4,72	0,82	0,26	1,00
14	0,12	0,26	0,62	1,00	4,09	0,77	0,32	1,00
13	0,14	0,35	0,51	1,00	4,19	0,65	0,36	0,97
12	0,11	0,30	0,59	1,00	3,78	0,73	0,36	1,00
11	0,15	0,36	0,49	1,00	3,36	0,61	0,49	1,00
10	0,12	0,28	0,59	1,00	4,21	0,71	0,33	1,00
9	0,13	0,47	0,40	1,00	3,68	0,56	0,49	1,00
8	0,41	0,39	0,20	1,00	1,89	0,30	1,75	1,00
7	0,46	0,28	0,26	1,00	5,75	0,35	0,50	1,00
6	0,11	0,38	0,51	1,00	3,80	0,56	0,47	1,00
5	0,25	0,35	0,40	1,00	2,99	0,42	0,80	1,00
4	0,50	0,31	0,19	1,00	4,29	0,31	0,76	1,00
3	0,81	0,12	0,07	1,00	5,06	0,23	0,85	1,00
2	0,49	0,30	0,21	1,00	3,50	0,26	1,08	1,00
1	0,24	0,40	0,36	1,00	4,18	0,37	0,65	1,00
0	0,47	0,36	0,17	1,00	4,86	0,29	0,72	1,00

De maneira geral, não houve diferenças significativas entre os cenários C1 e C2 (Figura 7), mostrando que o modelo pode ser utilizado tanto em regime estacionário quanto não-estacionário. Os resultados ainda reforçam que as relações de geometria hidráulica são significativamente influenciadas pelo formato das seções transversais. Algumas pequenas diferenças entre os cenários em algumas seções fizeram com que elas se posicionassem em diferentes tipos de canais no diagrama de Rhodes. Entretanto, a mudança entre tipos de canais ocorreu em regiões do diagrama no qual as

subdivisões encontram-se muito perto uma das outras, como é o caso das seções XS0, 3, 7 e 11 (Figura 7).

Percebe-se que, para os dois cenários, há destaque de magnitude para expoentes da velocidade para as seções a montante do *step-pool*, ou seja, seções XS9-16, com um formato mais regular. Para as seções à jusante de XS8, seções mais irregulares, b menor é maior que f . Também, observa-se que os expoentes b e f variam consideravelmente entre as seções, relacionando-se com o formato da seção transversal.

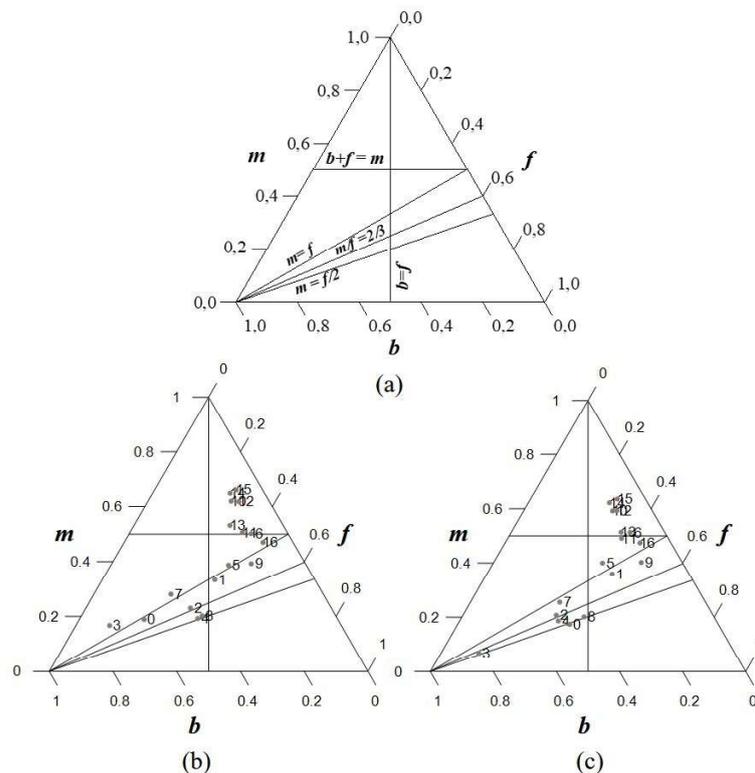


Figura 7 - Diagrama triaxial de Rhodes. (a) Diagrama padrão com as subdivisões; (b) e (c) Diagramas para os cenários C1 e C2.

Análise da Geometria Hidráulica

Pela Figura 7 percebe-se que há variações de posições mais significativas nas seções XS0-XS9 entre os cenários C1 e C2, porém as mesmas se encontram em locais próximos das subdivisões do diagrama, mudando as características para as seções XS0, 3, 7 e 11 (Tabela 4).

Para os dois cenários pode-se perceber que as seções XS10-15 encontram-se no tipo de canal 2 (Figura 7), ou seja, a direita da subdivisão $b=f$, acima da subdivisão $b+f=m$, e acima das subdivisões $m=f$, $m/f=2/3$ e $m=f/2$. Enquanto isso, as seções XS0-XS9 e XS16 estão todas abaixo da subdivisão $b+f=m$.

Para as seções XS1, 5, 6, 9-16, em que $b < f$, a razão w/d diminui conforme a vazão, ou seja, a tendência é aumentar mais a profundidade em relação à largura com o aumento da vazão. Dessa forma, o canal tende a ser mais estreito e profundo. A relação w/d está relacionada ao formato da seção e é importante para relacionar a vazão líquida e sólida (SCHUMM, 1977). Além disso, ela fornece informação sobre a estabilidade da seção, em que seções com baixos valores de w/d têm maior tendência das margens serem mais estáveis. Outra explicação para $b < f$ é que a taxa de transporte de sedimentos do leito é baixa (Rhodes, 1977).

Tabela 4: Variações dos tipos de canal e suas características entre os cenários C1 e C2. ↑: aumenta; ↓: diminui; S: competência para transporte de sedimentos.

Seção	C1	C2	C1	C2
XS0	5	9	<i>Fr</i> ↑ e <i>n</i> ↓	<i>Fr</i> ↓ e <i>n</i> ↑
XS3	3	7	<i>S</i> , <i>n</i> ↓	- <i>n</i> ↑
XS7	3	5	<i>S</i>	-

Enquanto isso, as demais seções encontram-se onde $b > f$, em que um comportamento contrário é observado e as margens tendem a ser mais erodidas, formando canais mais irregulares, largos e rasos. A seção XS8 do ressalto hidráulico, todavia, encontra-se muito próximo à linha $b = f$, onde a razão w/d tende a permanecer constante com o aumento da vazão, sendo essa uma seção caracterizada por rochas, que são mais resistentes ao intemperismo em comparação a leitos de solo exposto. Apesar da subdivisão $b = f$ dar indicações

do formato do canal, a subdivisão $m = f$ oferece melhores indicações sobre interpretar o transporte de sedimentos.

As seções XS5-XS15 possuem a relação w/d mais baixa que as demais seções, tendo margens mais estáveis (Figura 8). A seção XS3 possui maior variação de w/d devido ao formato irregular da seção, a qual conta com um depósito de sedimentos próximo a margem direita. De acordo com a vazão Q , consequentemente o nível de água, o depósito de sedimentos pode ficar submerso ou não, podendo até dividir o fluxo na seção (Figura 9).

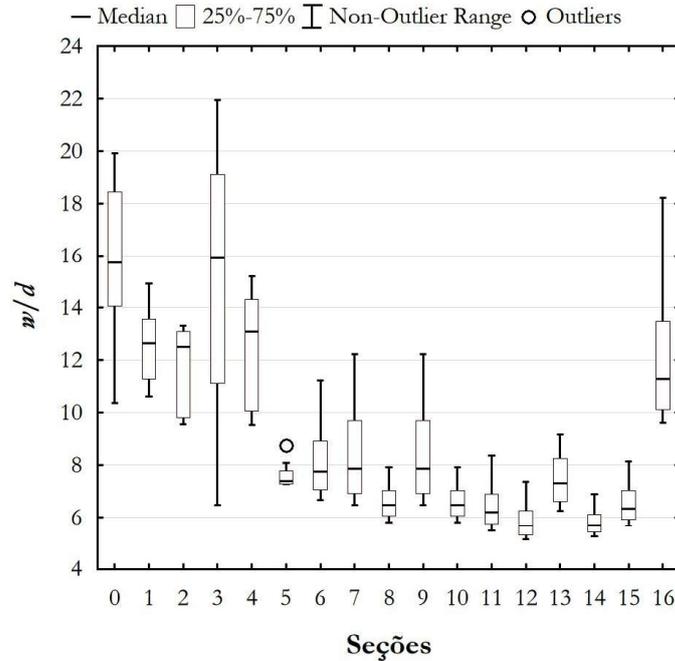


Figura 8 - Variação da relação largura (w) e profundidade (d) w/d nas seções transversais.

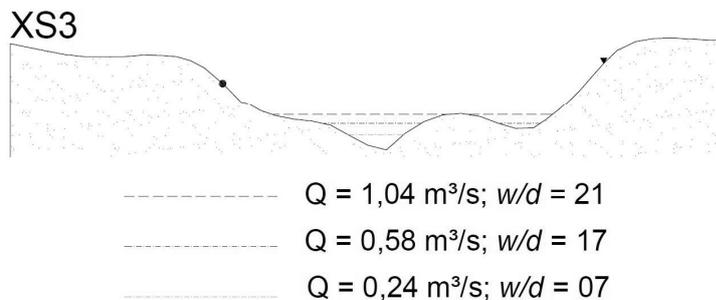


Figura 9 - Níveis de água e relação largura (w) e profundidade (d) w/d para XS3.

A Figura 10 relaciona a relação w/d com a vazão, na qual percebe-se uma grande variação de w/d em uma mesma faixa, entre 6 e 12, aproximadamente. Apesar

disso, a média d e w/d tem uma tendência inversa com a vazão, ou seja, conforme aumenta a vazão mais retangular tende a ser a seção e mais cheio fica o canal.

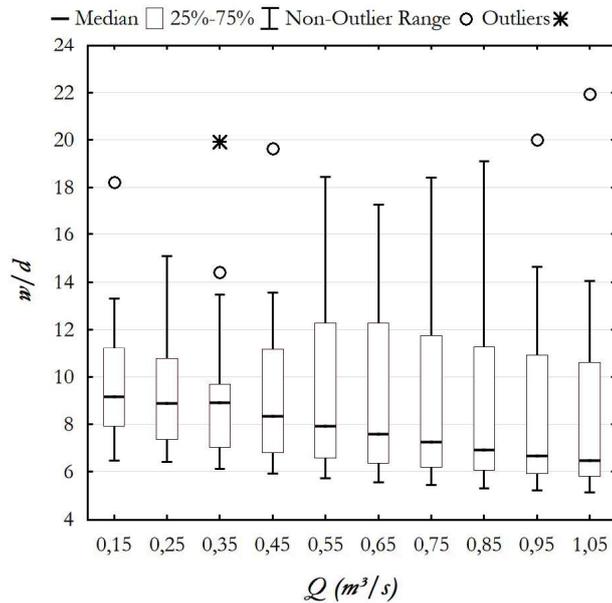


Figure 10 - Variações da relação largura (w) e profundidade (d) w/d com a vazão.

Em relação à subdivisão $m=f$, percebe-se que XS6, XS10 a XS15 estão acima da linha divisória, onde $m>f$, ou seja, a velocidade aumenta mais rapidamente que a profundidade conforme o aumento da vazão. Dessa forma essas seções possuem um aumento da competência de transporte de sedimentos com o acréscimo da vazão (WILCOCK, 1971). Com esse resultado, mostrou-se que o método é eficaz para avaliar modificações nas proximidades do canal, pois, durante o período de estudo houve obras de terra nas proximidades do rio estudado, sendo que os sedimentos carregados foram observados principalmente nas seções à montante. As seções XS0, 1, 3, 5, 7, 9 e 16 estão próximas a linha divisória, onde a taxa v/d tende a permanecer constante com o aumento da vazão, enquanto as demais seções v/d tem uma relação inversa com o aumento da vazão. A seção XS0 se distancia da linha divisória no cenário 2, não demonstrando competência para transporte de sedimentos.

A velocidade tende a aumentar mais rapidamente que a área conforme aumenta a vazão para as seções XS6, XS10 a XS15, indicando diminuição da resistência do fluxo. Juntando $m>0,5$ e w/d diminuindo conforme a vazão, essas seções são as mais estáveis do trecho de estudo.

Sobre a subdivisão $m=f/2$, relacionada ao número de Froude (Fr), todas as seções apresentam aumento

de Fr com o aumento da vazão. Entretanto, a seção XS8 apresenta pouca variação, ficando em torno de 1 para todas as vazões, típico de um ressalto hidráulico. A tendência de XS8 chegar a escoamento crítico e supercrítico faz com que essa seção não seja uma seção adequada para a análise da geometria hidráulica, pois as equações de geometria hidráulica baseiam na ideia da equação da continuidade, que é relacionada à conservação da massa. Ou seja, estão ligadas a regimes estáveis primordialmente, enquanto na seção XS8 há tendência de escoamento turbulento, relacionados à Fr maiores ou iguais a 1. Essa seção também marca uma perda de energia equivalente a pelo menos 10 cm.

Sobre a subdivisão $m/f=2/3$, as únicas seções que tem a tendência de aumentar a rugosidade com o aumento da vazão são as seções XS4 e XS8 no cenário 1 e XS0 e XS3 para Cenário 2. As demais possuem um comportamento da razão $S^{0.5}/n$ aumentar com o aumento da vazão, onde S é a declividade e n o coeficiente de rugosidade.

A Tabela 4 resume as diferenças entre os cenários em relação às características e o diagrama de Rhodes. A Tabela 5 por sua vez resume os resultados e as características das seções para o Cenário 1, destacando inclusive as seções que possuem competência para o transporte de sedimentos.

Tabela 5: Resumo dos resultados para as seções em C1 e competência para transporte de sedimentos. ↑: aumenta; ↓: diminui; - Sem relação bem definida; * indica proximidade com a linha divisória da subdivisão. *w*: largura; *d*: profundidade média; *v*: velocidade; *Fr*: número de Froude; *A*: área transversal; *S*: declividade; *n*: coeficiente de rugosidade.

Seção	Tipo de canal	<i>w/d</i>	Competência	<i>Fr</i>	<i>v/A</i>	<i>S</i> ^{1/2} / <i>n</i>	Tendência da seção
XS0	3	↑	↑*-	↑	↓	↑	Larga e rasa
XS1	6	↓*	-	↑	↓	↑	Estreita e Profunda
XS2	5	↑	-	↑	↓	↑*	Larga e Rasa
XS3	3	↑	↑*	↑	↓	↑	Larga e Rasa
XS4	3	↑	↑	↑*	↓	↑	Larga e Rasa
XS5	4	↓	↑*	↑	↓	↑	Estreita e Profunda
XS6	2	↓	↑	↑	↑*	↑	Estreita e Profunda
XS7	5	↑	-	↑	↓	↑	Larga e Rasa
XS8	7	↑*	-	↑*	↓	↑	-
XS9	6	↓	-	↑	↓	↑	Estreita e Profunda
XS10	2	↓	↑	↑	↑	↑	Estreita e Profunda, estável
XS11	2	↓	↑	↑	↑*	↑	Estreita e Profunda, estável
XS12	2	↓	↑	↑	↑	↑	Estreita e Profunda, estável
XS13	2	↓	↑	↑	↑	↑	Estreita e Profunda, estável
XS14	2	↓	↑	↑	↑	↑	Estreita e Profunda, estável
XS15	2	↓	↑	↑	↑	↑	Estreita e Profunda, estável
XS16	4	↓	↑*	↑	↓	↑	Estreita e Profunda

Conclusões

A teoria da geometria hidráulica em determinada seção transversal foi aplicada para 17 seções transversais de um pequeno trecho do Rio da Divisa utilizando o modelo HEC-RAS por meio de simulações em estado estacionário e não estacionário.

O uso do modelo em regime não estacionário ou estacionário produziu pequenas diferenças, sendo que elas não se mostraram significativas na análise dos expoentes e coeficientes da geometria hidráulica com o diagrama de Rhodes, confirmando que o formato da seção transversal é responsável pela geometria hidráulica.

Observou-se que a principal característica relacionada ao formato da seção, a relação *w/d*, tende a diminuir com o aumento da vazão para grande parte das seções, o que indica estabilidade de margens. Além disso, foi observada a competência no transporte de sedimentos para 12 das 17 seções, indicando que o trecho de estudo tem uma tendência de carregamento de sedimentos, já que a velocidade tende a responder mais rapidamente que a profundidade com o aumento da vazão. Todas as seções estudadas mostraram um comportamento em que número de Froude aumenta com a vazão e a rugosidade diminui.

Apesar da variação não significativa entre os dois cenários, o cenário C2 mostrou ser mais prático, pois, utiliza dados em regime estacionário no HEC-RAS, sendo recomendado desde que se tenha cuidado com as condições de contorno.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma análise variação do coeficiente de rugosidade entre as seções e/ou relacionado com a altura de água na seção. Outra recomendação relevante seria validar esses resultados em mais seções, bem como analisar trechos maiores.

No geral, o HEC-RAS mostrou-se uma ferramenta prática para aplicação da geometria hidráulica, facilitando a obtenção das variáveis hidráulicas para várias seções transversais. Com o HEC-RAS pode-se estimar os parâmetros hidráulicos a partir de um evento que gere amplas variações de vazões. A partir disso, recomenda-se aplicar o método utilizado em outros trabalhos que utilizam o HEC-RAS para outros propósitos, onde alturas de água já são obtidas.

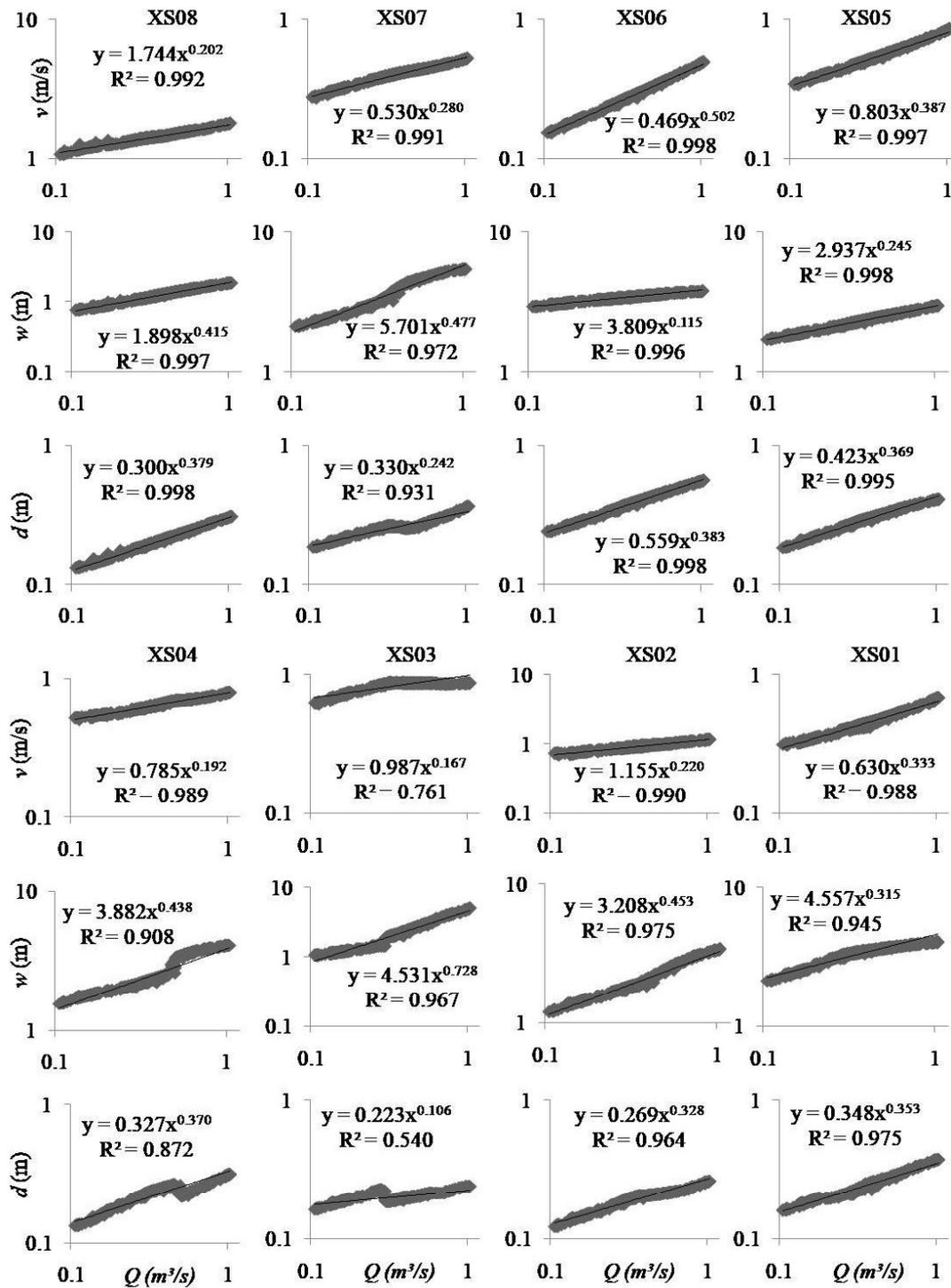
Por fim, o conhecimento da geometria hidráulica em certos locais de rios é uma ótima ferramenta para análise e tomada de decisão no manejo de rios e recursos hídricos. A partir de sua aplicação é possível, por exemplo, saber quais os locais com maior probabilidade

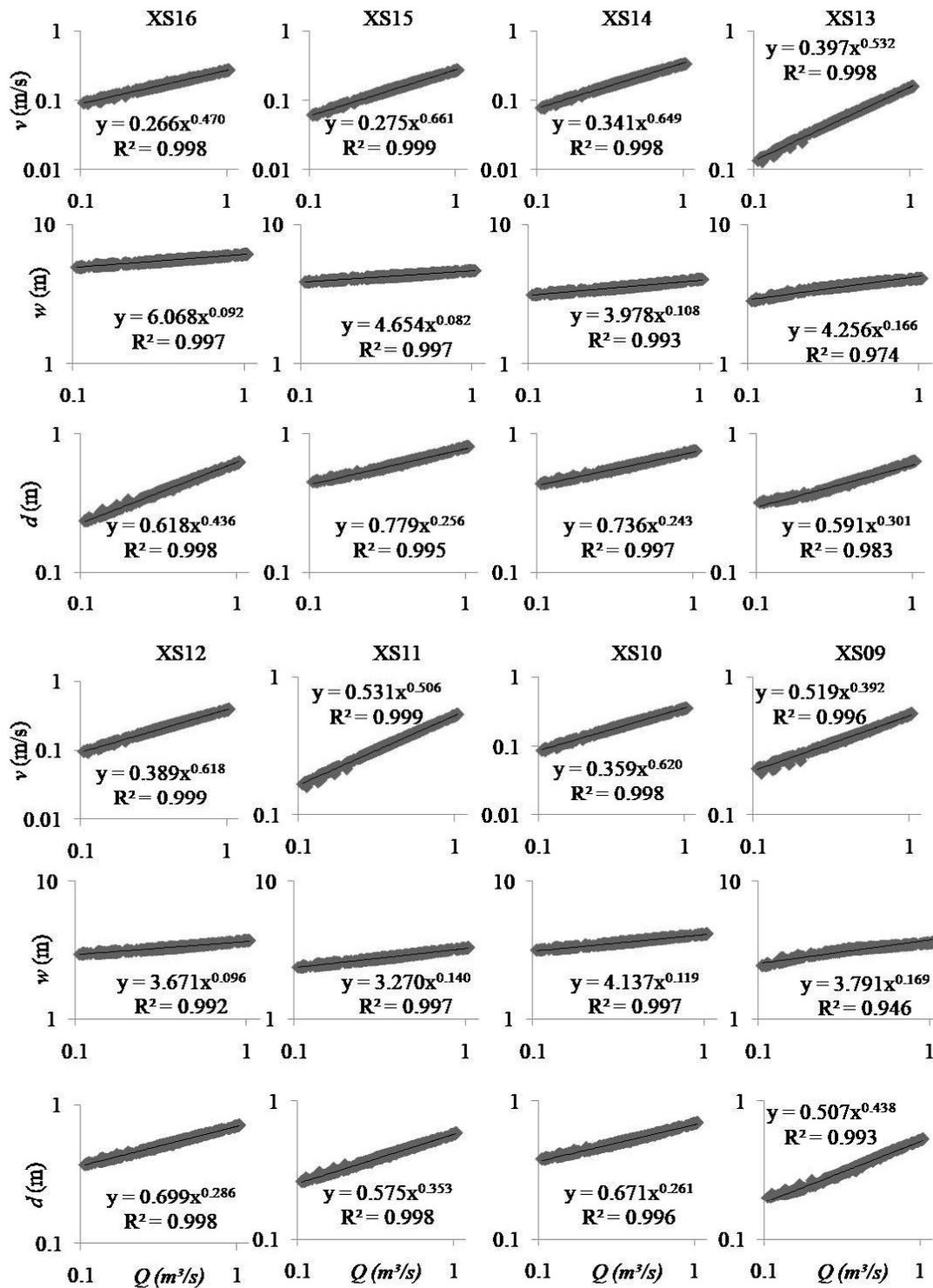
de transporte de sedimentos, auxiliando em ações de controle de processos na bacia; entender o funcionamento de ecossistemas aquáticos para propor projetos de recuperação e conservação; e ainda auxilia a entender a dinâmica da vazão em um trecho de interesse, auxiliando em projetos de obras de infraestrutura.

Agradecimentos

À Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Chapecó, pelo apoio e por proporcionar os recursos para a realização do trabalho.

APÊNDICE - Gráficos relacionando velocidade média (v), largura(w) e profundidade (d) com vazão (escala log).





Referências Bibliográficas

CAUVILLA, V.B. Caracterização Geomorfológica do Rio da Divisa, entre Chapecó e Guatambú, SC. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó. 2016.

CHOW, V.T. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-

Hill, 1959. 680p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 313p.

COUTINHO, M. A. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. Dissertação (Mestrado).

- Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2015. 260p.
- COPELAND, R. R., MCCOMAS, D. N., THORNE, C. R., SOAR, P. J., JONAS, M. M. **Hydraulic Design of Stream Restoration Projects**. U.S. Army Corps of Engineers, Baltimore, MD. 2001
- DRAKE, J.; BRADFORD, A.; JOY, D. Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 389, p.390-398, 2010.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in Environmental Planning**. W. H. Freeman and Company, New York. 1978. 818p.
- GLEASON, C. J. Hydraulic geometry of rivers: a review and future directions. **Progress in Physical Geography**, v. 15, p. 337-359, 2015.
- GLEASON, C. J., SMITH, L. C. Towards global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. **Proceedings of the National Academy of Science**. 111, v. 111, n. 3 p. 4788–4791, 2014.
- GOERL, R. F. **Estudo de inundações em Rio Negrinho - SC sob a ótica dos desastres naturais**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010. 121p.
- GRISON, F. **Estudo da geometria hidráulica do Rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho - SC**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013. 242p.
- GRISON, F. **Geometria hidráulica de bacias hidrográficas paranaenses**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2010. 160p.
- GRISON, F; KOBAYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011.
- HEEDE, B. H. Influences of a forest on the hydraulic geometry of two mountain streams. **Journal of the American Water Resources Association**, v.8, n.3, p.523-530, 1972.
- HOGAN, D. L.; CHURCH, M. Hydraulic geometry in small, coastal streams: progress towards quantification of salmonid habitat. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v.46, p.844-852, 1989.
- HORRITT, M S; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, v. 268, n. 1-4, p.87-99, 2002.
- JOWETT, I. G. Hydraulic geometry of New Zealand rivers and its use as a preliminary method of habitat assessment. **Regulate. Rivers: Research and Management**, v.14, p.451–466, 1998.
- KNIGHTON, A. D. Variation in at-a-station hydraulic geometry. **American Journal of Science**. 275, p.186–218, 1975.
- KUHLKAMP, J. F. **Análise do efeito em cascata da propagação da onda de cheia gerada pelo rompimento hipotético de uma das barragens existentes no rio Irani - SC**. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016. 76p.
- LAURIANO, A. W. **Estudo de ruptura da Barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2008. 251p.
- LEE, K T; HO, Y; CHYAN, Y. Bridge blockage and overbank flow simulations using HEC-RAS in the Keelung River during the 2001 Nari Typhoon. **Journal of the Hydraulic Engineering**, p.319-323, 2006.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. **The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications**. United States Geological Survey, Prof. Paper, n.252, 56p.1953.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G. **River Channel Patterns: Braided, Meandering, and Straight**. US Government Printing Office, Washington D.C. 1957.
- LUZ, L. M. R. **Modelagem de áreas suscetíveis à inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul**. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2017. 71p.
- MENDES, D. E. **Estudo da variação da onda de cheia na bacia do rio Cubatão do Sul por meio do modelo numérico HEC-RAS**. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013. 119p.
- LOITZENBAUER, E; MENDES, C. A. B. Integração da gestão de recursos hídricos e da zona costeira em Santa Catarina: a zona de influência costeira nas bacias dos rios Mampituba, Araranguá, Tubarão e Tijucas, SC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p.466-477, 2016.

- MERIGLIANO, M.F. Hydraulic geometry and stream channel behavior: an uncertain link. **Journal of the American Water Resources Association**, 33, p. 1327–1336, 1997.
- MOECKE, G. C. **Análise do rompimento hipotético da barragem Oeste do Vale do Rio Itajaí**. TCC (Graduação). Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014. 81p.
- MOHAMMAD, M. E.; AL-ANSARI, N.; ISSA E. I.; SNUTSSON, S. Sediment in Mosul Dam reservoir using the HEC-RAS model. **Lakes and Reservoirs: Research and Management**, v. 21, p.235-244, 2016.
- MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Hydrological and hydraulic modeling applied to the mapping of flood-prone areas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p.152-167, 2016.
- MONTE-MOR, R. C. A. **Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens – Estudo de Caso: Barragem de Ninho de Águia – MG**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2004. 153p.
- MOORE, C. E.; LOHEIDE, S. P.; LOWRY, C. S.; LUNDQUIST, J. D.. Instream Restoration to improve the ecohydrologic functions of a subalpine meadow: pre-implementation modeling using HEC-RAS. **Journal of American Water Resources Association**, v. 50, p.1033-1050, 2013.
- NAGHSHINE, M. H.; RAO, F. F.; KHOSHRFTAR, A. The study of flood hydraulics before the building of Maroon Dam by HEC-RAS, Maskingum and Muskingum - Cunge method. **Advances In Environmental Biology**, v. 7, p.890-893, 2013
- NETO, A. R.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p.377-390, 2016.
- PASTERNAK, G. B. **2D Modeling and Ecohydraulic Analysis**. Seattle, WA: Createspace, 2011. 168p.
- PENDER, D.; PATIDAR, S.; HASSAN, K.; HAYNES, H. Method for Incorporating morphological sensitivity into flood inundation modeling. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, 2016.
- QASIM, J. M. Laboratory and HEC-RAS simulations of a single-step weir. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 8, n. 12, p.1005-1011, 2013.
- RIGGS, H. C. Streamflow characteristics from channel size. **Journal of the Hydraulics Division**, n.104, p.87-96, 1978.
- RHODES, D.D. The *b-f-m* diagram graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. **American Journal of Science**, v.277, p.73–42, 1977.
- ROSENFELD, J. S.; POST, J.; ROBINS, G.; HATFIELD, T. Hydraulic Geometry as a physical template for the River Continuum: application to optimal flows and longitudinal trends in salmonid habitat. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 64, n. 5, p. 755-767, 2007.
- RAY, T; STEPINSKI, E; SEBASTIAN, A; BEDIENTE, F. B. Dynamic modeling of storm surge and inland flooding in a Texas coastal floodplain. **Journal of Hydraulic Engineering**, American Society of Civil Engineers, p.1103-1110, 2011.
- ROSGEN, D. L. A classification of natural rivers. **Catena**, 22, p. 169–199, 1994.
- SCHUMM, S.A. **The fluvial system**. New York: John Wiley & Sons, 1977. 338p.
- SHIELDS, F., COPELAND, R., KLINGEMAN, P., DOYLE, M., SIMON, A. Design for stream restoration. **Journal of Hydraulic Engineering**, 129, p 575–584, 2003.
- SURIYA, S; MUDGAL, B.V. Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam sub watershed – A case study. **Journal of Hydrology**, p.210-219, 2011.
- USACE (US Army Corps of Engineers). **HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual**. 4.1. ed. Davis, Ca: 2010a.
- USACE (US Army Corps of Engineers). HEC-RAS. **Hydrologic Engineering Center – River Analysis System - User’s Manual**. Davis- CA, US. 2010b.
- XIONG, Y. A dam break analysis using HEC-RAS. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 3, p.370-379, 2011.
- WANG, C. Application of HEC-RAS Model in simulation of water surface profile of a river. **Applied Mechanics and Materials**, v. 641, p. 232-235, 2014.
- WILCOCK, D. N. Investigation into the relations between bedload transport and channel shape. **Geological Society of America Bulletin**, v.82, n. 8, p.2159- 2176, 1971.
- WYRICK, J. R., PASTERNAK, G. B. Modeling energy dissipation and hydraulic jump regime responses to channel non uniformity at river steps. **Journal of Geophysical Research Earth Surface**, 113, 2008.