

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

CHARLES KALTON VIGNE

CONTRIBUIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE  
CONSIDERANDO A INCERTEZA NA VAZÃO DE PROJETO E A SENSIBILIDADE  
DA SEÇÃO FLUVIAL

PORTO ALEGRE

2023

CHARLES KALTON VIGNE

CONTRIBUIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE  
CONSIDERANDO A INCERTEZA NA VAZÃO DE PROJETO E A SENSIBILIDADE  
DA SEÇÃO FLUVIAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Dornelles

PORTO ALEGRE

2023

CHARLES KALTON VIGNE

CONTRIBUIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE LEVANDO EM  
CONSIDERAÇÃO A INCERTEZA NA VAZÃO DE PROJETO E A SENSIBILIDADE  
DA SEÇÃO FLUVIAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em: Porto Alegre, 28 de setembro de 2023.

---

Prof. Dr.– Fernando Dornelles - UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Juan Martin Bravo – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Jaime Federici Gomes – PUCRS  
Examinador

#### CIP - Catalogação na Publicação

Vigne, Charles Kalton  
CONTRIBUIÇÕES PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE  
CONSIDERANDO A INCERTEZA NA VAZÃO DE PROJETO E A  
SENSIBILIDADE DA SEÇÃO FLUVIAL / Charles Kalton Vigne.  
-- 2023.  
98 f.  
Orientador: Fernando Dornelles.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Borda livre. 2. Incertezas em vazão de projeto.  
3. Pontes. 4. Diques. I. Dornelles, Fernando, orient.  
II. Título.

[...] amo os grandes rios, pois são profundos como a alma do homem. Na superfície são muito vivazes e claros, mas nas profundezas são tranquilos e escuros como os sofrimentos dos homens. Amo ainda mais uma coisa de nossos grandes rios: a eternidade. Sim, rio é uma palavra mágica para conjugar a eternidade.

João Guimarães Rosa

## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo da execução deste trabalho recebi o apoio direto e indireto de pessoas para as quais deixo meu sincero agradecimento:

A minha família, por proporcionar a base de minhas conquistas e pela confiança em minhas escolhas.

Ao meu orientador, prof. Fernando Dornelles, pelo incentivo a pensar, confiança e importantes contribuições neste trabalho.

Aos meus colegas do mestrado e trabalho, com os quais aprendo diariamente a partir de conversas e trocas de ideias.

Aos meus amigos, por proporcionarem momentos de alegria em meio às dificuldades dessa jornada.

A todos aqueles que se dedicam a fornecer um ensino público de qualidade, em especial aos professores e funcionários do Instituto de Pesquisas Hidráulicas, que fazem esta instituição ser referência.

Agradeço ao universo pelas oportunidades.

## RESUMO

A definição da cota de implantação de estruturas como diques ou travessias fluviais necessita da estimativa de níveis d'água máximos do curso d'água na seção de projeto da estrutura. Os níveis máximos são obtidos por estudos hidrológicos e hidráulicos, que tratam, respectivamente, da estimativa da vazão de projeto e o nível d'água associado à respectiva vazão. Estes estudos incorporam incertezas relacionadas à metodologia empregada e dados disponíveis. Para considerar estas incertezas recomenda-se que seja adotado um acréscimo de nível, denominado borda livre (*freeboard*), que também considera outros fatores como o transporte de materiais flutuantes e a incidência de ondas na estrutura. Usualmente são recomendados valores fixos de borda livre, que possuem ampla aceitação, no entanto, esta prática pode resultar em níveis de segurança distintos de acordo com a área de aplicação. Neste contexto, o deste trabalho foi avaliar valores fixos de borda livre frente às incertezas associadas a vazões de projeto, considerando em seções transversais com distintas características geométricas e, conseqüentemente, diferentes sensibilidades (relação cota-vazão). O método de avaliação adotou o conceito de Incerteza Assegurada, que representa o percentual de incerteza na vazão de projeto assegurado por um determinado valor de borda livre. Os resultados evidenciaram que para uma vazão com tempo de retorno de 100 anos, comumente usada no dimensionamento de pontes, verificou-se que 1 m de borda livre resultou em uma incerteza assegurada de 21% até valores superiores a 200% nos casos avaliados. Concluiu-se que a adoção de valores fixos de borda livre resultou em níveis de proteção distintos nos casos avaliados. A partir desta constatação e de consultas bibliográficas foi proposta uma abordagem para dimensionamento de borda livre fundamentada nas principais incertezas da vazão de projeto e sensibilidade da seção hidráulica. O método proposto apresenta maior objetividade no dimensionamento de borda livre e poderá ser adaptado para evoluções futuras, como incorporação de novos resultados ou métodos para quantificação de incertezas em vazões de projeto.

**Palavras-chave:** borda livre; incerteza; vazão de projeto; pontes; diques.

## ABSTRACT

The construction of structures such as fluvial dikes or bridges requires estimating the maximum water levels of the river related to the structure. These maximum levels are obtained by hydrological and hydraulic studies, which deal, respectively, with estimating the design flow and the water level associated with the respective flow. These studies incorporate uncertainties related to the methodology used and available data. To consider these uncertainties, it is recommended that an additional construction height be adopted, called freeboard, which also considers other factors such as the transport of floating materials and the incidence of waves on the structure. Fixed freeboard values are usually recommended, which have wide acceptance, however, this practice can result in different safety levels according to the area of application. In this context, the objective of this study was to evaluate fixed freeboard values in the face of uncertainties associated with design flows, considering cross sections with different geometric characteristics and, consequently, different hydraulic behaviors (stage-discharge relationship). The evaluation method adopted the concept of Assured Uncertainty, which represents the percentage of uncertainty in the design flow assured by a fixed freeboard value. The results showed that for a flow with a return period of 100 years, commonly used in bridges studies, it was found that 1 m of freeboard resulted in an assured uncertainty of 21% up to values greater than 200% in the cases evaluated. It was concluded that the adoption of fixed freeboard values resulted in different levels of protection in the cases evaluated. Finally, an approach for freeboard sizing was proposed based on the main uncertainties of each method used to estimate flow and hydraulic section characteristics.

**Keywords:** freeboard; uncertainty; design flood; bridges; dikes.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Borda livre ( $h_{bl}$ ) em estruturas de proteção fluvial (a) e estruturas de travessia aérea (b) .....	18
Figura 2: Sensibilidade da seção transversal .....	23
Figura 3: Fluxograma geral do método utilizado .....	39
Figura 4: Exemplo de procedimento de ajuste de referencial da seção da estação fluviométrica .....	42
Figura 5: Hidrograma sintético utilizado para simulação dos trechos de interesse .....	44
Figura 6: Obtenção da incerteza assegurada a partir da curva-chave de uma seção hipotética .....	45
Figura 7: Localização das estações fluviométricas situadas nos trechos fluviais analisados .....	48
Figura 8: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 1) .....	49
Figura 9: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 2) .....	50
Figura 10: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 3) .....	51
Figura 11: Síntese do procedimento proposto para dimensionamento de borda livre .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Síntese de recomendações de borda livre ( $h_{bl}$ ) para travessias fluviais	20
Quadro 2: Recomendações de borda livre para estruturas de proteção contra inundações fluviais	21
Quadro 3: Informações dos trechos fluviais selecionados para análise	46
Quadro 4: Informações topográficas e batimétricas dos trechos fluviais selecionados para análise	47
Quadro 5: Síntese dos resultados na seção de referência dos seis cursos d'água avaliados	52
Quadro 6: Resultados para a seção analisada no rio Canoas	54
Quadro 7: Resultados para a seção analisada no rio Leão	55
Quadro 8: Resultados para a seção analisada no rio Itajaí do Sul	56
Quadro 9: Resultados para a seção analisada no rio Itajaí-Açu	57
Quadro 10: Resultados para a seção analisada no rio Amola Faca	58
Quadro 11: Resultados para a seção analisada no rio do Sinos	59
Quadro 12: Valores de referência e procedimentos propostos para quantificação de incerteza na vazão de projeto	64
Quadro 13: Considerações quanto a incertezas da vazão de projeto não consideradas	66
Quadro 14: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Bonito (71300000)	84
Quadro 15: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Barra do Rio Pardo (7287000)	86
Quadro 16: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Jararaca (83120000)	88
Quadro 17: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Warnow (83520000)	90
Quadro 18: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Turvo (84949000)	92
Quadro 19: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica São Leopoldo (87382000)	94

## LISTA DE SIGLAS

AFL	Análise de Frequência Local
AFR	Análise de Frequência Regional
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento
CV	Coeficiente de variação
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNOS	Departamento Nacional de Obras de Saneamento
EA	<i>Environmental Agency</i>
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>
JICA	<i>Japan International Cooperation Agency</i>
NCRS	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h_{bl}$	Altura da borda livre (m)
$n$	Extensão da série histórica (anos)
$NA_{QP}$	Nível d'água associado à vazão de projeto (m)
$NA_{QP+U}$	Nível d'água associado à vazão de projeto acrescida da incerteza (m)
$Q$	Vazão ( $m^3/s$ )
$Q_P$	Vazão de projeto ( $m^3/s$ )
$Q_{10}$	Vazão com tempo de retorno de 10 anos ( $m^3/s$ )
$Q_{50}$	Vazão com tempo de retorno de 50 anos ( $m^3/s$ )
$Q_{100}$	Vazão com tempo de retorno de 100 anos ( $m^3/s$ )
$Q_{500}$	Vazão com tempo de retorno de 500 anos ( $m^3/s$ )
$Q_{P+U}$	Vazão de projeto acrescida da incerteza ( $m^3/s$ )
$U_{QP}$	Incerteza associada à vazão de projeto (%)
TR	Tempo de retorno (anos)
V	Velocidade do escoamento (m/s)
UA	Incerteza assegurada (%)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1	RELEVÂNCIA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>18</b>
2.1	BORDA LIVRE: CONCEITOS E JUSTIFICATIVAS PARA SUA ADOÇÃO.....	18
2.2	PRÁTICAS RECOMENDADAS NA DEFINIÇÃO DA BORDA LIVRE.....	19
2.2.1	Pontes e pontilhões.....	19
2.2.2	Diques de proteção contra inundações fluviais.....	21
2.3	SENSIBILIDADE DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	22
2.4	INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO.....	24
2.4.1	Análise de Frequência Local.....	24
2.4.2	Análise de Frequência Regional.....	30
2.4.3	Métodos hidrológicos.....	34
2.4.4	Considerações gerais quanto ao referencial bibliográfico consultado.....	38
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DE VALORES FIXOS DE BORDA LIVRE</b> .....	<b>39</b>
3.1	SELEÇÃO DE TRECHOS FLUVIAIS PARA AVALIAÇÃO.....	39
3.2	OBTENÇÃO DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS.....	39
3.2.1	Modelo hidrodinâmico.....	40
3.2.2	Representação geométrica.....	41
3.2.3	Condições de contorno de montante e jusante.....	43
3.3	MÉTODO DE AVALIAÇÃO.....	44
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO</b> .....	<b>46</b>
4.1	TRECHOS AVALIADOS.....	46
4.2	AVALIAÇÃO DE RESULTADOS.....	52
<b>5</b>	<b>PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE</b> .....	<b>60</b>
5.1	FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA.....	60
5.2	SÍNTESE DO PROCEDIMENTO.....	61
5.3	VALORES DE REFERÊNCIA E PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZA.....	62
5.4	CONSIDERAÇÕES QUANTO A COMPONENTES DE INCERTEZA NÃO CONSIDERADAS.....	66
5.4.1	Componentes hidrológicas.....	66
5.4.2	Componentes hidráulicas.....	69
5.5	EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	71
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>72</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE A. AJUSTE DAS SÉRIES DE VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS À DISTRIBUIÇÃO LOG-PEARSON TIPO III.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE B. CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS GERADAS PARA AS SEÇÕES ANALISADAS .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A cota de implantação de estruturas como diques ou travessias rodoviárias necessita uma estimativa de níveis d'água máximos do curso d'água relacionado à estrutura. Estes níveis estão associados a uma vazão com determinado tempo de retorno (vazão de projeto), que varia de acordo com as recomendações locais de risco aceitável para cada tipo de estrutura hidráulica (BRANDIMARTE; DI BALDASSARE, 2012).

A abordagem usual para estimativa de níveis máximos em uma seção fluvial geralmente é desenvolvida em duas etapas: (1) estudo hidrológico, que realiza a estimativa de vazão associada ao tempo de retorno estabelecido (vazão de projeto); (2) estudo hidráulico, onde é estimado o nível d'água na seção de interesse para vazão de projeto.

A vazão de projeto, objeto do estudo hidrológico, pode ser obtida pela análise de séries históricas locais, regionalização de vazões ou com o emprego de modelos chuva – vazão (TUCCI, 2001). Já o nível d'água máximo associado à vazão de projeto geralmente é obtido com o uso de modelos hidráulicos (BRANDIMARTE; DI BALDASSARE, 2012). Ambas as etapas incorporam, em maior ou menor grau, incertezas relacionadas à qualidade dos dados disponíveis e a metodologia empregada. Essa incerteza exige a adição de uma margem de segurança em relação ao nível máximo, denominado borda livre (*freeboard*), que também incorpora processos físicos como ondas, recalques estruturais ou passagem de objetos flutuantes, principalmente galhadas e troncos.

Embora a adoção de borda livre em projetos de estruturas associadas a um curso d'água seja uma prática bastante usual, não há consenso na literatura técnica quanto a uma metodologia para seu dimensionamento ou mesmo a sua definição. Observam-se recomendações que variam de acordo com as características construtivas da estrutura (NRCS, 2003), tipo de zona em que a estrutura estará inserida (rural ou urbana) (DAEE, 2017), profundidade d'água na seção (RIO DE JANEIRO, 2019) e recomendação de valores fixos, de uma maneira geral situados entre 0,5 e 2,0 m (DNER, 1996).

Dentre as abordagens mencionadas, os valores fixos ganham destaque e possuem ampla aplicabilidade, sobretudo no contexto nacional. Dado esse contexto, este trabalho buscou atingir dois objetivos principais: (1) avaliar se a adoção de valores fixos de borda livre resulta em níveis de proteção distintos de acordo com o caso em que é aplicado; (2) A partir das conclusões obtidas no primeiro objetivo, propor um

procedimento para dimensionamento de borda livre de estruturas de proteção contra inundações fluviais (diques) e estruturas de travessia de talwegues (pontes rodoviárias e ferroviárias).

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, incluindo esta introdução. No Capítulo 2 é apresentado o conceito de borda livre e exemplos práticos de recomendações. Ainda neste capítulo é apresentada uma síntese de estudos relacionados a incertezas em vazões de projeto. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia adotada para avaliação de valores fixos de borda livre tradicionalmente adotados no contexto de projetos de diques e travessias fluviais. Os resultados desta avaliação são apresentados no Capítulo 4. No Capítulo 5 é proposto um procedimento para dimensionamento de borda livre frente a incertezas na vazão de projeto do estudo associado à estrutura. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e recomendações de trabalhos futuros.

## 1.1 RELEVÂNCIA

A definição da cota inferior de vigas de pontes ou de coroamento de diques de proteção contra inundações é de fundamental importância para a segurança da população e benfeitorias protegidas pela estrutura. A borda livre, sendo um dos componentes da cota final dessas estruturas, é um elemento de segurança, fator que exige um adequado dimensionamento. Em caráter secundário pode ser citado o fator econômico associado ao eventual superdimensionamento deste parâmetro, resultando em uma estrutura maior do que o necessário.

Sobretudo no contexto brasileiro, o conceito de borda livre é pouco relacionado à incerteza na vazão de projeto e geralmente é considerado como uma “folga” para passagem de materiais flutuantes (p. ex. passagem de árvores carregadas pela água sob pontes) ou incidência de ondas provocada por ventos ou embarcações. Ainda, por vezes a adoção de borda livre é erroneamente interpretada como um acréscimo no tempo de retorno do dimensionamento da estrutura.

As recomendações encontradas em manuais e diretrizes institucionais são bastante variadas, no entanto, ganham destaque os valores fixos tradicionalmente recomendados. De uma maneira geral estes critérios têm ampla aceitação e costumam ser aplicados de forma sistemática, sem questionamentos a respeito da sua adequabilidade. Assim, ao não incorporarem de forma objetiva a incerteza associada ao



estudo e sua influência no nível d'água, podem resultar em níveis de segurança distintos de acordo com a área de aplicação.

Nesse contexto, uma avaliação fundamentada em análises explícitas e específicas para cada caso, de certa forma, reduz a arbitrariedade do dimensionamento da borda livre e incorpora mais segurança à estrutura. O trabalho proposto irá ao encontro destes princípios.

Em paralelo, neste trabalho a borda livre será avaliada no contexto das incertezas associadas ao estudo da vazão de projeto. Esta abordagem ainda é pouco difundida em trabalhos do cenário nacional, mas atribui uma função transparente e objetiva a este parâmetro de projeto.

## 1.2 OBJETIVOS

O trabalho buscou atingir dois objetivos principais:

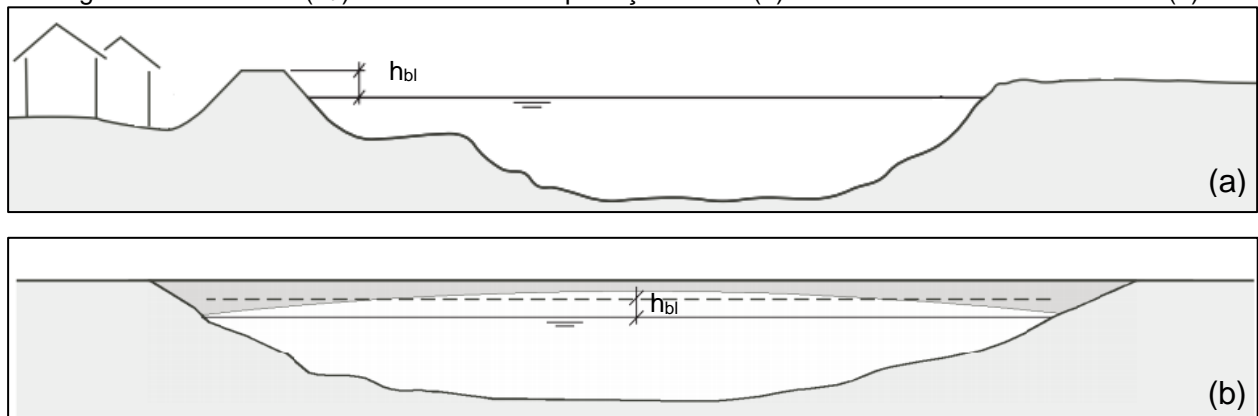
1. Avaliar se a adoção de valores fixos de borda livre resulta em níveis de proteção distintos de acordo com o caso em que são aplicados;
2. Propor um procedimento para dimensionamento de borda livre de estruturas de proteção contra inundações fluviais (diques) e estruturas de travessia de talvegues (pontes rodoviárias e ferroviárias).

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 BORDA LIVRE: CONCEITOS E JUSTIFICATIVAS PARA SUA ADOÇÃO

A borda livre ( $h_{bl}$ ) é definida como a distância vertical entre um nível d'água de referência e a crista de uma estrutura ou cota inferior da longarina de uma ponte (HUNZINGER, 2014), conforme apresentado na Figura 1. O nível d'água de referência geralmente está associado a uma vazão com tempo de retorno específico e é obtido a partir de estudos hidrológicos e hidráulicos do trecho de interesse.

Figura 1: Borda livre ( $h_{bl}$ ) em estruturas de proteção fluvial (a) e estruturas de travessia aérea (b)



Fonte: Adaptado de Huzinger (2014)

Embora a adoção da borda livre seja uma prática consolidada na etapa de planejamento de estruturas como pontes e diques, não há um consenso técnico sobre os métodos para seu dimensionamento ou mesmo o seu propósito. Conforme apresentado no item 2.2, as principais recomendações obtidas na literatura técnica apresentam diferenças expressivas.

As recomendações para adoção de borda livre justificam-se por dois principais fatores: incerteza hidráulica-hidrológica e processos físicos, exemplificados abaixo:

1. Incertezas associadas à qualidade e representatividade espacial e temporal dos dados utilizados; simplificações na representação dos processos de escoamento;
2. Incidência de processos físicos que podem afetar o nível d'água (incidência de ondas pela ação do vento ou embarcações, recalques estruturais, consolidação do material das fundações, remanso e transporte de materiais flutuantes).

Ambos os fatores são considerados em diretrizes de instituições como *Swiss Association for Water Management* (Huzinger, 2014) e *Environmental Agency* (EA, 2000).

Em um guia publicado em 2017 (EA, 2017), a Agência Ambiental do Reino Unido (*Environmental Agency*) apresentou um novo entendimento em relação conceito de borda livre. Argumenta-se que na atualidade os processos são considerados rotineiramente em projetos de engenharia. Nessa condição, a definição da borda livre deve ater-se exclusivamente às incertezas não explicitamente abordadas nos estudos conduzidos para determinação dos níveis máximos, denominadas de “incertezas residuais”.

No contexto brasileiro verifica-se que usualmente a borda livre se encontra associada à “folga” para a ocorrência de processos físicos que afetam o nível d’água, conforme observa-se em recomendações do DNER (1996) e DAEE (2005). Poucas menções são encontradas com relação à avaliação de incertezas nos estudos que estimam o nível d’água de referência. Em ANA (2016) são listados fatores não quantificáveis, ou de difícil quantificação, que influenciam na adoção da borda livre em barramentos, onde está incluído grau do conhecimento das condições hidrológicas. No entanto, cabe a ressalva de que o guia é específico para barramentos. Logo, suas recomendações não necessariamente aplicam-se de forma direta a projetos de diques ou pontes, dada a maior relevância de processos como ondas provocadas pelo espelho d’água do reservatório.

## 2.2 PRÁTICAS RECOMENDADAS NA DEFINIÇÃO DA BORDA LIVRE

Os critérios recomendados para borda livre em projetos de dispositivos de travessia aérea e estruturas de defesa fluvial (diques) são variados. Neste item é apresentada uma visão geral das recomendações encontradas na literatura técnica. Foram compiladas recomendações obtidas em manuais e diretrizes de órgãos institucionais que estabelecem os critérios de projeto dessas estruturas.

### 2.2.1 Pontes e pontilhões

Para estruturas de travessia aérea de cursos d’água (pontes e pontilhões), encontram-se recomendações que consistem na adoção de valores fixos. Também são verificadas proposições de abordagens para um dimensionamento, levando em

consideração a profundidade ou velocidade da água. No Quadro 1 é apresentada uma síntese das recomendações identificadas no contexto nacional e internacional.

Quadro 1: Síntese de recomendações de borda livre ( $h_{bl}$ ) para travessias fluviais

Fonte	Origem	Estrutura	Tempo de retorno (anos)	Recomendação
DNER (1996)	Brasil	Pontes	100	$h_{bl} = 0,50$ m no caso de bacia de represamento, quando houver controle do nível máximo d'água e não existir vegetação flutuante
				$h_{bl} = 1,0$ m para condições normais de escoamento
				$h_{bl} =$ de 2,0 m no caso de rios de regime torrencial e com possibilidade de transporte superficial de vegetação densa
DAER (2023)	Brasil (RS)	Pontes	100	$h_{bl} = 1,0$ m
Mato Grosso (2018)	Brasil (MT)	Pontes	50	$h_{bl} = 1,0$ m
		Pontilhões	100	$h_{bl} = 1,0$ m
DAEE (2017)	Brasil (SP)	Pontes	25 (zona rural); 50 (zona urbana)	$h_{bl} \geq 0,2 h_{tr}$ ; com valor mínimo de 0,4 m
Rio de Janeiro (2019)	Brasil (RJ)	Pontes	100	$h_{bl} = 0,61 + 0,037Vh_{tr}^{1/3}$ ; valor mínimo de 0,6 m
GOV. OF ALBERTA (2010)	Canadá (Alberta)	Pontes	-	$h_{bl} = 1,0$ m; possibilidade de redução até 0,3 m caso haja alto grau de confiança no estudo, baixo potencial de transporte de materiais flutuantes ou gelo.
HIGHWAYS ENGLAND <i>et al.</i> (2020)	Reino Unido	Pontes	200	$h_{bl} \geq 0,6$ m

**Notas:**

$h_{bl}$  – altura da borda livre, em m;

$h_{tr}$  - profundidade da lâmina d'água correspondente à vazão máxima de projeto, associada a um período de retorno (TR), em m;

V – velocidade média na seção, em m/s.

Abaixo são apresentados exemplos de borda livre adotadas em pontes de rodovias nacionais. Os exemplos foram obtidos a partir de uma pesquisa não sistemática em portais institucionais, tendo em vista que não há uma base consolidada unificada para consulta.

- 1,8 m para ponte sobre o córrego Lambari - Rodovia MT-458 (MATO GROSSO, 2021);
- 1,0 m para ponte sobre o rio Chopim - Rodovia PR-912 (PARANÁ, 2017);
- 1,0 m para a ponte sobre o rio Vacacaí – Rodovia ERS-149 (DAER, 2020);
- 1,0 m para a ponte sobre o rio Benedito – Rodovia SC-416/Rua Araponguinhas (TIMBÓ, 2015);

- 0,48 m para a ponte sobre o canal Furado Grande (estuário do lago Guaíba) – Rodovia BR-116 (CGU, 2021).

## 2.2.2 Diques de proteção contra inundações fluviais

No Quadro 2 é apresentada uma síntese das recomendações de borda livre para diques de proteção contra inundações fluviais. Destaca-se que não foram encontradas diretrizes em documentos institucionais nacionais. Logo, as recomendações apresentadas são de instituições internacionais.

Quadro 2: Recomendações de borda livre para estruturas de proteção contra inundações fluviais

Referência	Origem	TR (anos)	Recomendação
FEMA (2020)	Estados Unidos	100	$h_{bl} \geq 3$ pés (0,91 m)
NRCS (2003)	Estados Unidos	10 a 100	$h_{bl} = 1$ a 3 pés; $h_{bl} = H_{dique}/4$ a $H_{dique}/2$ (varia com a classificação da estrutura)
JICA (2010)	Japão	-	$h_{bl} \geq 0,6$ a 2 m (varia com a magnitude da vazão do rio)
GOLDER ASSOCIATES; ASSOCIATED ENGINEERING (2003)	Canadá	200	$h_{bl} = 0,3$ ou 0,6 m, caso considerada a vazão máxima instantânea ou vazão média diária, respectivamente
EA (2017)	Reino Unido	-	$h_{bl} \geq 0,3$ a 0,9 m, depende de uma avaliação qualitativa do estudo de níveis máximos
USACE (1996)	Estados Unidos	100	$h_{bl} \geq 2$ pés (0,61 m) ou intervalo de confiança de 90-95% do nível máximo

Observa-se recomendações de valores fixos para borda livre, como três pés (0,91 m) (FEMA, 2020). Outras diretrizes recomendam que a borda livre seja definida de acordo com classificações da estrutura e seu entorno (área urbana ou rural, material construtivo, etc) (NRCS, 2003) ou vazão do curso d'água (JICA, 2010; GOLDER ASSOCIATES e ASSOCIATED ENGINEERING, 2003).

Dentre as recomendações, ganha destaque a abordagem de USACE (1996). O documento recomenda avaliar o intervalo de confiança do nível d'água com 90-95% de confiança para determinação da borda livre obtido por simulações hidráulicas, porém, mantém a recomendação de um valor mínimo de dois pés (0,61 m) acima do nível máximo. Recomenda-se que seja utilizado o maior desses dois valores.

Instituições como a Agência Ambiental do Reino Unido (EA, 2017) também apresentam abordagens mais robustas. A entidade propõe critérios avaliativos para os estudos hidrológicos e hidráulicos associados ao curso d'água de interesse e atribui pontuações relativas às metodologias e dados empregados nos estudos. Sobre a

pontuação resultante é estabelecido um valor de borda livre a ser adotado, que varia de 0,3 m a 0,9 m.

Abaixo são listados valores de borda livre adotados para diques construídos no Brasil e em outros países:

- 1,0 m para diques projetados pelo Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS) nas cidades ribeirinhas do rio São Francisco (Pirapora, São Francisco, Januária, Bom Jesus da Lapa, Barra e Petrolina) (TERESINA, 2016);
- 1,0 m para diques projetados em Belo Horizonte junto ao ribeirão do Onça (BELO HORIZONTE, 2014)
- 0,9 m para diques nos rios Mississippi e Ironton, nos Estados Unidos (FRAMJI, 1983);
- 2,0 m para o dique no rio Tone, no Japão (FRAMJI, 1983).

### 2.3 SENSIBILIDADE DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A sensibilidade do nível d'água em uma seção transversal pode ser traduzida pela relação entre a variação de cota e variação de vazão na seção (SEFIONE, 2001). Esse conceito é conhecido no campo de hidrometria, onde são priorizadas seções com alta sensibilidade para medições de vazão. Em termos matemáticos, essa relação é refletida na taxa de variação instantânea da equação que determina a curva-chave da seção ( $dH/dQ$ ) (SANCHES, 2000).

Uma seção de menor sensibilidade é caracterizada pela maior relação entre largura e altura, ou ainda, conter uma extensa planície de inundação. Já uma seção considerada sensível geralmente caracteriza-se por ser estreita e profunda. Essas características influenciam na forma da curva-chave dessas seções, sobretudo para vazões máximas.

Ressalta-se que a sensibilidade, no campo da hidrometria, está associada ao efeito no nível d'água causado por uma alteração na vazão. Conseqüentemente, ao se efetuar a análise da curva-chave de forma inversa (efeito na vazão causado por uma alteração de nível), a sensibilidade da seção também inverte. Seções espalhadas apresentam maior sensibilidade na vazão diante de uma alteração de nível, enquanto em seções mais encaixadas este efeito é menor.

Na Figura 2 busca-se representar esta análise visualmente para seções encaixadas (Figura 2a) e seções espriadas (seção 2c). No contexto da definição da borda livre, esta análise ganha relevância. Um acréscimo de nível poderá abranger uma faixa de vazão maior ou menor de acordo com as características da seção, que pode ou não compreender a incerteza estimada para a vazão de projeto.

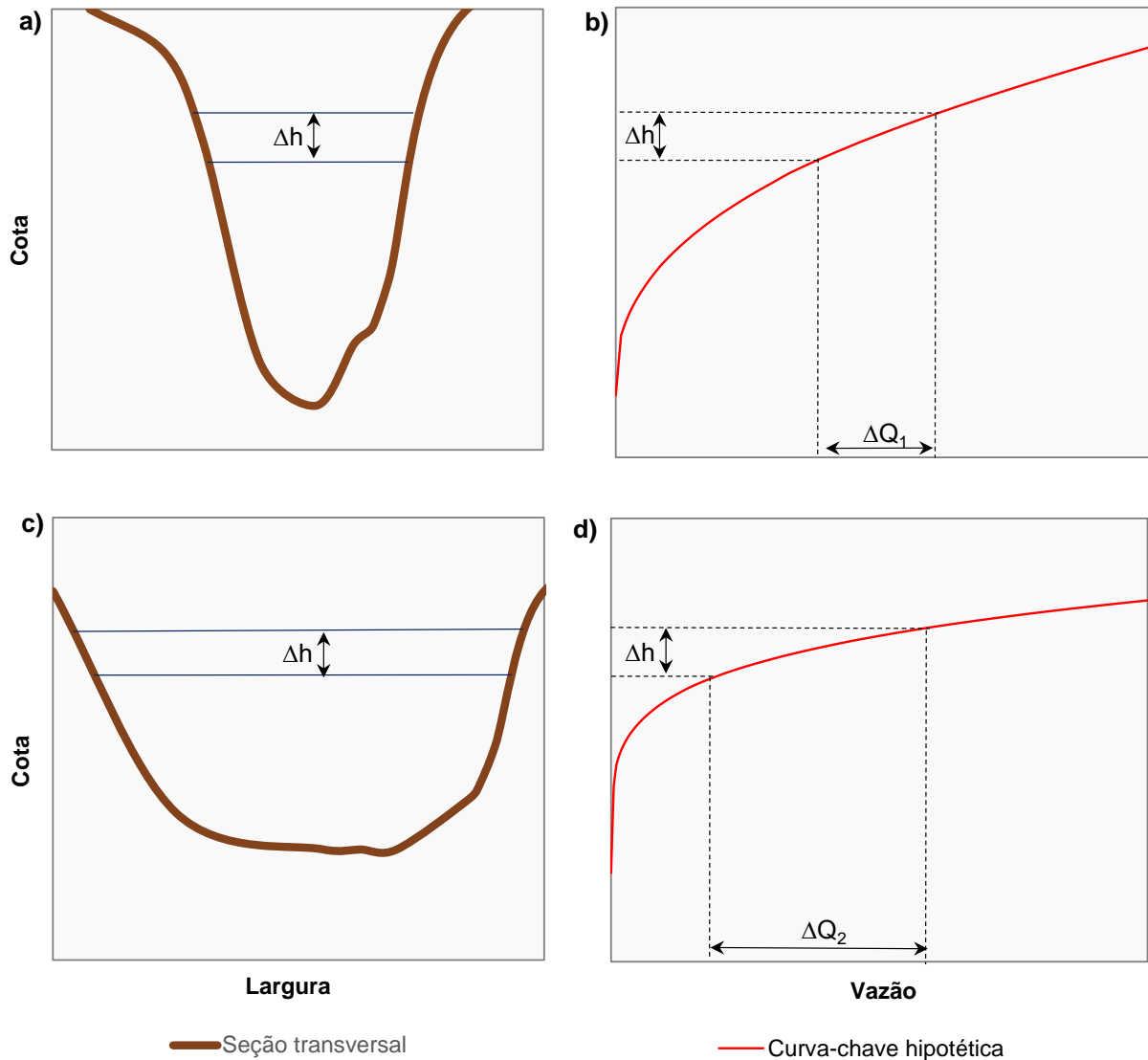


Figura 2: Sensibilidade da seção transversal

(a) seção transversal com baixa sensibilidade na vazão para variações de nível e respectiva curva-chave (b); (c) seção transversal com alta sensibilidade na vazão para variações de nível e respectiva curva-chave (d);  $\Delta Q_1 > \Delta Q_2$ .

## 2.4 INCERTEZAS NA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE PROJETO

A vazão de projeto consiste em uma vazão máxima do curso d'água associada a uma probabilidade de ocorrência. Esta vazão pode ser obtida por métodos estatísticos ou métodos hidrológicos. De acordo com Tucci (2001), vazões máximas podem ser estimadas com base (1) no ajuste de uma distribuição estatística de um posto fluviométrico local (Análise de Frequência Local - AFR); (2) estudos de regionalização de vazões (Análise de Frequência Regional); e (3) precipitação (Métodos Chuva-Vazão).

Nos itens seguintes é apresentada uma breve descrição de cada método, bem como a descrição das principais componentes de incerteza associadas a cada método e resultados de estudos que buscaram quantificar a magnitude destas incertezas.

### 2.4.1 Análise de Frequência Local

A análise de frequência local (AFL) de vazões máximas é utilizada em situações que se dispõe de uma extensa série de dados fluviométricos no local de interesse e as condições da bacia de contribuição não se modificaram ao longo da série temporal (TUCCI, 2001).

O fato de se dispor de séries de vazão observadas no local de interesse pode incorporar certa segurança ao estudo, no entanto, conforme Merz e Thieken (2005), a estimativa de vazões de projeto a partir desta técnica é influenciada por diversos fatores de incerteza:

1. Erros de observação: leitura equivocada de nível d'água; incerteza na curva-chave;
2. Fórmula de posição de plotagem adotada: Weibull, Hazen, Gringorten;
3. Premissas: aleatoriedade, estacionariedade, homogeneidade, independência dos eventos;
4. Seleção amostral: Período de observação representativo; consideração de séries anuais ou séries parciais; incorporação de eventos históricos relevantes;
5. Função de distribuição de probabilidades: Lognormal, Pearson Tipo III, GEV;
6. Método de estimativa dos parâmetros: momentos, máxima verossimilhança;
7. Extensão amostral.



De acordo com Steinbakk *et al.* (2016), usualmente três componentes principais são consideradas na avaliação de incertezas em análises de frequência local: incertezas devido à extensão amostral dos dados utilizados, incerteza nos dados observados – sobretudo com relação à curva-chave - e escolha da função de distribuição de probabilidades. Nos itens seguintes a influência destas componentes na estimativa de vazões máximas é discutida.

#### **2.4.1.1 Extensão amostral dos dados**

Uma série histórica de vazão é apenas uma amostra das possíveis vazões que podem ocorrer naquela seção. Desta forma, quanto maior a sua extensão, maior a sua representatividade. Esta componente de incerteza ganha relevância ainda maior quando busca-se estimar eventos com tempo de retorno de 100 e 200 anos, comumente utilizado no dimensionamento de diques e pontes, considerando que séries com pelo menos 50 anos raramente estão disponíveis.

Usualmente são utilizadas séries de vazões máximas anuais para a análise de frequência local. De acordo com a recomendação de NERC (1975), uma estimativa considerada confiável ocorre apenas para períodos de retorno que não excedam a condição de duas vezes a extensão ( $n$ ) da série disponível ( $2 \cdot n \geq TR$ ). Em um trabalho mais recente desenvolvido com dezenas de estações fluviométricas situadas na Noruega, Yan *et al.* (2021) recomendam a adoção de séries com pelo menos 60 anos para análises de frequência.

Diversos autores têm se dedicado a uma avaliação sistemática e de larga escala referente ao impacto da extensão da série histórica na estimativa de vazões máximas. No trabalho desenvolvido por Hu *et al.* (2019) foi analisada a sensibilidade da estimativa de vazões máximas em 175 estações fluviométricas situadas em seis regiões hidrológicas dos Estados Unidos. Séries de 70 anos de dados foram usadas como referência e seus resultados foram comparados aos resultados obtidos com séries de duração menor (obtidas por reamostragem) com extensões de 10 a 50 anos. De uma maneira geral, observa-se uma redução expressiva das diferenças nas estimativas com séries de extensão superior a 35 anos.

No contexto de tais avaliações, as seguintes referências forneceram resultados de caráter prático para quantificação da incerteza esperada em função da extensão da

série. Na Tabela 1, obtida de UCAR (2023), são apresentadas as extensões mínimas de séries anuais para obtenção de estimativas com um determinado nível de confiança para uma estimativa de vazão com determinado tempo de retorno.

Tabela 1: Extensão de série requerida para obtenção de vazões máximas com determinado valor de incerteza

Tempo de retorno	Extensão de série mínima para obtenção de estimativas com determinado valor de incerteza	
	+/- 10%	+/-25%
10 anos	90 anos	18 anos
25 anos	105 anos	31 anos
50 anos	110 anos	39 anos
100 anos	115 anos	48 anos

Fonte: Adaptado de UCAR (2023).

Já na Tabela 2 são apresentados os resultados de equações de regressão fornecidas no trabalho de Oliveira (2013). As equações relacionam a extensão da série histórica com a incerteza média e foram obtidas da análise de 20 estações fluviométricas situadas no Rio Grande do Sul. Para cada estação, o autor comparou as estimativas de vazões máximas de uma série sintética de 50.000 anos com os resultados obtidos por séries parciais com extensão de 5 a 100 anos. Os resultados foram expressos em termos de largura de intervalos com 95% de confiança. Deve-se destacar que os resultados apresentados no trabalho do referido autor são de cunho preliminar, no entanto, apresentados aqui dada a natureza prática das regressões geradas.

Tabela 2: Larguras do intervalo de confiança (95%) para estimativa de vazões máximas em função da extensão da série e tempo de retorno

Extensão da série (anos)	Incerteza média para vazões máximas com determinado tempo de retorno					
	2 anos	10 anos	50 anos	100 anos	200 anos	500 anos
10	65%	72%	79%	82%	85%	88%
30	39%	43%	47%	49%	51%	54%
100	22%	26%	30%	32%	34%	36%

Uma outra abordagem para obtenção de tais limites para uma determinada série de vazões máximas anuais consiste na aplicação de métodos estatísticos já consolidados, baseados na extensão e parâmetros da amostra. Naghettini e Pinto (2007) apresentam formulações para cálculo de intervalos de confiança para diferentes funções de distribuições de probabilidade. USGS também apresenta uma abordagem para

obtenção de intervalos de confiança, que se encontra implementada no *software* PeakFQ (USGS, 2023), condição que facilita sua aplicação. Estas abordagens consideram, além da extensão da série, as características da amostra de dados.

#### 2.4.1.2 Erros nos dados observados

A maior parte das séries de vazão disponíveis são derivadas de medições de nível d'água e uma relação que relaciona nível com vazão (MCMILAN *et al.*, 2017), conhecida como curva-chave. Desta forma, os dados de vazão resultantes podem conter incertezas relacionadas aos seguintes aspectos: (1) série de níveis observados; (2) medições de vazão e nível usadas para obter a curva-chave; (3) crescimento de vegetação e gelo; (4) remanso e histerese, que causam alteração na curva-chave; (5) interpolação e extrapolação da curva-chave e alterações desconsideradas na seção transversal do rio devido aos efeitos de erosão/deposição (leitos móveis).

No contexto de vazões máximas, ganha destaque a incerteza relacionada à extrapolação superior da curva-chave. A curva normalmente tem um bom ajuste para a faixa de vazões mais frequentes na seção fluvial (próximos à média) e eventos extremos raramente são medidos, devido a dificuldade e perigo para sua realização. Nessas situações a curva-chave é extrapolada com o uso de métodos algébricos que não necessariamente representam de forma satisfatória as vazões altas. De uma maneira geral espera-se que as incertezas sejam maiores para níveis d'água observados acima da máxima medição, onde inicia-se a zona de extrapolação superior da curva. Valores típicos de incerteza total para vazões altas reportados na literatura são de 30% (POTTER e WALKER apud RHAMAN, 2015) e 40% (MCMILLAN *et al.*, 2012). Situação análoga ocorre no tramo inferior, não abordado neste trabalho tendo em vista a ênfase em vazões máximas.

Atualmente diferentes métodos para estimativa de incertezas encontram-se disponíveis, e consideram os desvios da curva-chave em relação às medições, métodos de regressão, técnicas Bayesiana e perturbações em modelos hidráulicos (KIANG *et al.*, 2019). Ao mesmo tempo que há uma variedade considerável de métodos para estimativa de incertezas de vazões obtidas com curvas-chave, deve-se destacar que não há um método único, ou ótimo, para estimativa de incerteza de curva-chave, devido ao fato de cada método considerar diferentes premissas e tipos de incerteza. Ainda há um entendimento limitado de como estas estimativas diferem devido aos critérios e

princípios adotados por cada método. Nesse contexto, o trabalho de Kiang *et. al* (2018) fornece uma contribuição relevante no sentido de consolidar uma comparação de sete métodos de quantificação de incertezas em curvas-chave, onde foram avaliadas suas premissas e resultados. Os métodos foram aplicados em três rios distintos, com diferentes graus de complexidade em relação ao ajuste das curvas-chave. Para as vazões associadas ao trecho de extrapolação superior da curva-chave, a largura dos intervalos com 95% de confiança variou entre 41% a 202%.

Os trabalhos acima apresentados trataram da estimativa das incertezas em uma determinada vazão observada. A influência destas incertezas na análise de frequência de uma série histórica ainda é objeto de discussão no meio técnico e sua avaliação requer abordagens estatísticas complexas. Rhaman *et al.* (2015) forneceram uma contribuição expressiva ao avaliarem o potencial efeito da incerteza na curva-chave na estimativa de vazões máximas de 12 estações fluviométricas situadas na Austrália. A área de drenagem variou de 66 a 900 km<sup>2</sup> e havia diferenças significativas no grau de extrapolação de cada estação. A relação entre vazão máxima observada e vazão máxima medida variou de 1,25 a 47,29. Os autores desenvolveram análises de frequência aplicando uma perturbação artificial nas vazões máximas anuais obtidas no trecho extrapolados. Foram considerados três cenários onde a incerteza da curva-chave foi representada por um fator multiplicativo com distribuição Log-Normal de média unitária e coeficiente de variação (CV) de 10, 20 e 30%. Para vazões de TR 50 anos, a faixa de diferenças entre as estimativas sem perturbação e com perturbação com CVs de 10, 20 e 30% foram, respectivamente, 4 a 22%; 7 a 30%; e 12 a 57%. Os resultados em termos medianos, avaliados em um conjunto maior de bacias (96) foram de 1%, 2%, 3%, 6%, 9% e 12% para estimativas com tempo de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, respectivamente.

Como principais conclusões, Rhaman *et al.* (2015) destacam que ao se considerar uma maior incerteza (representada pelo CV), ocorre um aumento nas vazões máximas estimadas e na faixa dos intervalos de confiança da estimativa. Adicionalmente, esta incerteza é agravada ao serem considerados eventos com TR maiores. Não foram identificadas correlações explícitas entre a influência da incerteza e características como área da bacia, grau de extrapolação da curva-chave, desvio-padrão e coeficiente de assimetria da amostra.

O trabalho de Steinbakk (2016) apresenta uma conclusão importante para o contexto da discussão da influência da incerteza da curva-chave na AFR. Os autores

avaliaram tanto o efeito da incerteza relacionado à curva-chave quando à extensão da série histórica, de forma isolada e combinada, para oito estações fluviométricas situadas na Noruega. O estudo verificou que, de uma maneira geral, a incerteza associada ao tamanho da amostra foi superior àquela incorporada pela curva-chave. Conclusões análogas foram obtidos por Vieira et. al (2022) ao avaliarem o efeito da incerteza da curva-chave na análise de frequência de vazões máximas anuais de uma estação fluviométrica situada no rio Cuiabá.

#### **2.4.1.3 Escolha da função de distribuição de probabilidade**

A análise de frequência local de vazões normalmente utiliza séries de vazões máximas anuais. Na maioria dos casos, a extensão da série anual é consideravelmente menor que o tempo de retorno de interesse para a vazão de projeto. Conseqüentemente, a estimativa necessita de uma Função de Distribuição de Probabilidade (FDP) para extrapolação e obtenção da vazão de interesse (KHAN, RAHMAN e KARIM, 2022).

A escolha de uma FDP inadequada pode levar a um viés substancial nas vazões de interesse e resultar em prejuízos para a estrutura projetada. Por exemplo, uma subestimativa aumenta o risco de falha da estrutura, enquanto uma superestimativa aumenta desnecessariamente o seu custo construtivo (KHAN, RAHMAN e KARIM, 2022). As distribuições mais utilizadas na hidrologia para estimativa de vazões máximas são das de Gumbel, Log-Normal, Pearson Tipo III e a Gama Tipo III (NAGHETTINI E PINTO, 2007).

Frequentemente mais de uma FDP apresenta boa aderência aos dados observados, porém ocorre uma divergência expressiva na extrapolação. Di Baldassare *et al.* (2009) comentam que o processo de seleção da distribuição de probabilidades a ser utilizada muitas vezes não é plenamente objetivo e usual se dá por análises gráficas. Markiewicz *et al.* (2020) destacam ainda que em determinados locais a distribuição de probabilidade já é pré-definida por normativas próprias.

A escolha da FDP pode ser apoiada por testes de aderência aos dados observados. No entanto, ao se tratar de séries curtas, estes testes podem ter representatividade limitada (MERZ e THIEKEN, 2005). Apesar desta ressalva, pode-se argumentar que estes testes, associados a um exame cuidadoso da série avaliada, podem ser utilizados como guias para definição da FDP, minimizando então a incerteza associada a esta componente (BEVEN e HALL, 2014).

## 2.4.2 Análise de Frequência Regional

A disponibilidade de séries históricas de vazão é restrita a seções fluviais específicas, e frequentemente uma seção de interesse não apresenta dados observados ou estes não são suficientes para uma estimativa adequada de AFL. Nessas situações, uma das alternativas consiste na Análise de Frequência Regional (AFR), também chamada de “regionalização de vazões”. A regionalização pode ser definida como transferência de informações hidrológicas de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (TUCCI, 2017).

Existem diversos métodos para transferir informações hidrológicas de uma bacia para a outra. Estes métodos consideram tanto a transferência direta de vazões para um determinado tempo de retorno, quanto a transferência de parâmetros de um modelo estatístico regional. Apesar dessa diversidade, todos partem da análise de frequência de cada estação fluviométrica a ser utilizada (TUCCI, 2017). Desta forma, a AFR consiste em um método baseado na AFL.

Embora a inclusão de mais dados oriundo de áreas vizinhas tende a diminuir a incerteza amostral, incertezas adicionais surgem devido às suposições de homogeneidade e correlação entre dados de áreas vizinhas (BEVEN e HALL, 2011). Hailegeorgis e Alfredsen (2016) elencam as principais fontes de incerteza em análises de frequência regional:

1. Séries de dados em que os eventos extremos foram obtidos: não estacionariedade ou tendências, correlações temporais e espaciais e variabilidade da amostra, incluindo extensão das séries, resolução temporal do dado, etc;
2. Heterogeneidade das bacias incluídas na regionalização;
3. Seleção da função de distribuição de probabilidade;
4. Estimativa dos parâmetros da equação regional.

No âmbito do presente trabalho as componentes de incerteza da análise de frequência regional são apresentadas para dois tipos de abordagem: análise agrupada (*pooled flood frequency analysis*), onde é utilizado um conjunto de dados fluviométricos de bacias consideradas homogêneas; e transferência por relação entre área de drenagem (*drainage area ratio method*), onde apenas uma única estação fluviométrica é

utilizada para obtenção de vazões máximas na seção de interesse. A seguir são apresentados trabalhos relativos à incerteza de cada uma dessas abordagens.

#### **2.4.2.1 Análise agrupada (*Pooled Flood Frequency Analysis*)**

Os métodos para regionalização de vazões máximas por meio de análises agrupadas pode ser feita por três opções (TUCCI, 2017): (1) Método de valores selecionados, onde as vazões de interesse são regionalizadas em função de variáveis explicativas das bacias; (2) Método dos Parâmetros, onde os parâmetros das curvas individuais de probabilidade de cada estação são regionalizados a partir de variáveis explicativas; (3) Método da Curva Adimensional ou *Index Flood* (NERC, 1975), onde as curvas de probabilidade das estações do conjunto são adimensionalizadas por uma variável explicativa.

A extensão das séries históricas do conjunto de estações utilizadas na análise agrupada é uma das principais componentes da incerteza da estimativa regional da vazão de projeto. De forma análoga à AFL, a incerteza aumenta de acordo com o tempo de recorrência de interesse (HAILEGEORGIS E ALFREDSSEN, 2016). Recomendações de ordem prática, como a proposta por Jacob *et al.* (1999) fornecem orientações preliminares para obtenção de estimativas regionais. Os autores recomendam a adoção de um período total de dados ( $n$ ), considerando o grupo de estações para análise regional, de pelo menos cinco vezes o tempo de retorno ( $T$ ) de interesse ( $n \geq 5T$ ).

As dificuldades adicionais da abordagem regional ocorrem quando as séries selecionadas para a regionalização são advindas de regiões não homogêneas. Outro fator consiste no uso de séries de dados relativamente curtas para estimativa de vazões associadas a TR altos. Nesses casos pode ocorrer uma deterioração da significância da equação de regressão (TUCCI, 2001), aumentando a incerteza da estimativa.

Fischer e Schumann (2022) avaliaram o impacto da extensão da série histórica nas estimativas obtidas por AFR em comparação aos resultados da AFL em 57 estações fluviométricas na Alemanha. As estações avaliadas possuíam pelo menos 90 anos de dados. Quando o período de observação utilizado na AFR foi reduzido para 30 anos, a mediana das diferenças aumentou 46% em comparação aos resultados obtidos utilizando os períodos totais de observação. Essa diferença diminuiu para 28% quando considerados 50 anos de observação e para 11% para 80 anos de observação.

Hailegeorgis e Alfredsen (2016) analisaram 26 bacias no território da Noruega, com área de 39 a 3.090 km<sup>2</sup> e quantificaram as incertezas nas curvas regionais para estimativa de vazões máximas. O valor da incerteza foi expresso em termos de intervalos de confiança com nível de significância de 95%. Para o TR de 2 anos, o limite inferior e superior da curva foi de, -6,7 a +5,7%; para o TR de 1000 anos, os valores foram de -13,5 a +24,7%.

Um método prático para análise da exatidão de equações regionais consiste na comparação das vazões estimadas pela AFR com as obtidas pela AFL em um local monitorado, após a retirada deste do modelo regional. Esta abordagem é conhecida como *leave-one-out* (deixar um de fora, em tradução livre) e foi empregada em estudos como os de Rahman *et al.* (2015) e Merz and Blöschl (2005). O “erro” do método é quantificado pela seguinte expressão:

$$ER (\%) = \frac{Q_{AFR} - Q_{AFL}}{Q_{AFL}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Naturalmente que para estas abordagens são priorizadas estações com séries confiáveis para fins comparativos, com o intuito de minimizar a influência das incertezas da própria AFL. Rahman *et al.* (2015) chegaram nos valores medianos de erro relativo, apresentados na

Tabela 3, empregando o referido método para sete regiões distintas da Austrália. Observa-se que os valores médios para as sete regiões variam de 48 a 50%. Smith, Sampson e Bates (2015) chegaram em valores medianos de mesma ordem de grandeza (56%) em uma avaliação global do método *Index Flood*.

Tabela 3: Erro relativo mediano por TR da análise de frequência regional  
Fonte: Adaptado de Rahman *et al.* (2015).

	Erro relativo mediano (%) por tempo de recorrência					
	2 anos	5 anos	10 anos	20 anos	50 anos	100 anos
<b>Região 1</b>	51	49	52	53	57	59
<b>Região 2</b>	53	46	46	46	46	45
<b>Região 3</b>	38	39	33	35	39	41
<b>Região 4</b>	33	36	36	38	39	47
<b>Região 5</b>	61	59	66	68	68	69
<b>Região 6</b>	35	37	35	42	37	43
<b>Região 7</b>	63	67	67	61	57	49
<b>Mínimo</b>	33	36	33	35	37	41
<b>Médio</b>	48	48	48	49	49	50
<b>Máximo</b>	63	67	67	68	68	69



Apesar de tais incertezas, trabalhos como o De Michele e Rosso (2001) concluem que estimativas regionais podem fornecer resultados mais assertivos quando comparado à AFL, sobretudo para eventos de menor frequência. Os autores compararam a incerteza em estimativas de vazões máximas pelo método *Index Flood* em comparação ao valor obtido pela análise local. O estudo foi desenvolvido a partir de dados de estações fluviométricas na bacia do rio Pó (Itália). O método regional apresentou maior assertividade em comparação à AFL na medida em que o TR da estimativa aumentou.

#### 2.4.2.2 Transferência direta por relação entre áreas (*Drainage Area Ratio Method*)

Um procedimento relativamente prático para obtenção de vazões de projeto na seção de interesse consiste na regionalização utilizando uma única estação fluviométrica. A relação de transferência se dá pela relação entre a área de drenagem da seção de interesse e a área da estação fluviométrica. Esta abordagem ganha destaque pela relativa simplicidade quando a seção da estação fluviométrica se encontra no mesmo curso d'água e relativamente próxima da seção de interesse. A fórmula generalizada deste método é dada pela Equação 2.

$$Q_1 = Q_2 \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^\varphi \quad \text{Equação 2}$$

Onde  $Q_1$  e  $Q_2$  são as vazões na seção de interesse e na seção da estação fluviométrica e, respectivamente;  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas de drenagem da seção de interesse e da estação fluviométrica;  $\varphi$  é o expoente adotado para a relação entre áreas de drenagem. No contexto brasileiro, essa abordagem é recomendada por DNIT (2005), que recomenda evitar relações entre áreas de drenagem superior a dois e inferiores a meio.

Além das próprias incertezas associadas à análise de frequência local, desenvolvida inicialmente na estação fluviométrica de referência, esta abordagem incorpora um novo conjunto de incertezas relacionado à função de transferência. Conforme destacado em DNIT (2005), a relação pode ser afetada pela diversidade do contexto de formação de cheias em diversas partes de uma bacia.

Na literatura técnica encontram-se poucas avaliações quantitativas das incertezas incorporadas por esta abordagem, sobretudo no contexto de vazões de projeto. Esta avaliação geralmente se dá em relação à incerteza relacionada ao expoente a ser adotado para a relação entre as áreas de drenagem ( $\varphi$ ).

No trabalho de Asquith *et al.* (2023) foi avaliada a incerteza relacionada ao  $\phi$  para 712 estações fluviométricas no estado norte-americano do Texas. A incerteza da vazão calculada pelo método foi estimada com base na avaliação cruzada com a vazão calculada na própria estação fluviométrica. As avaliações foram desenvolvidas para vazões da curva de permanência. Para vazões com permanência inferior a 5%, o expoente da relação tendeu a valores da ordem de 0,7, no entanto, com um desvio-padrão relativamente alto, superior a 0,5. Com base na Equação 2 verifica-se que o efeito desta incerteza na vazão de projeto será mais ou menos expressivo de acordo com a diferença entre as áreas de drenagem.

### 2.4.3 Métodos hidrológicos

Os métodos hidrológicos para estimativa de vazão de projeto são baseados em modelos matemáticos que representam os processos físicos da bacia de contribuição, especificamente na transformação da precipitação em escoamento. Estes modelos são tradicionalmente denominados de modelos chuva-vazão (TUCCI, 2005).

Os modelos chuva-vazão são utilizados quando não há séries históricas de vazão no local de interesse ou quando estes são insuficientes, isto é, com pouca representatividade temporal ou baixa qualidade. Nesses casos faz-se o uso de abordagens que estimam a vazão máxima de projeto com base em eventos de chuva, tendo em vista que dados pluviométricos normalmente têm maior disponibilidade, tanto espacial quanto temporal.

As vazões de projeto obtidas por modelos chuva-vazão incorporam um conjunto distinto de incertezas das demais abordagens já apresentadas (AFL e AFR), tendo em vista que possuem como principal dado de entrada a precipitação e representam matematicamente o processo de geração de escoamento.

De acordo com Santos *et al.* (2001), as incertezas na resposta de modelos de ocorrem devido à (1) variabilidade da distribuição temporal e espacial das precipitações; (2) os parâmetros do modelo; (3) as condições iniciais das variáveis de estado modelo; (4) a estrutura do modelo hidrológico que representa de forma simplificada os processos hidrológicos reais, introduzindo erros na representação do escoamento. Ainda conforme os autores, as condições iniciais normalmente são adotadas de forma conservadora e incorporam a subjetividade do projetista.

No contexto de tais modelos, deve ser destacada a subdivisão de modelos de evento e modelos de séries contínuas. De uma maneira geral, os modelos de evento são utilizados para obtenção de vazões de projeto para dimensionamento de estruturas hidráulicas como pontes e diques, tendo em vista que buscam representar especificamente condições extremas em uma determinada bacia. As incertezas associadas a este tipo de modelo são apresentadas neste item.

A determinação do hidrograma de projeto na prática tem sido um procedimento onde existe um significativo grau de subjetividade na escolha da distribuição da precipitação, dos parâmetros do modelo e das condições iniciais da simulação. Este conjunto de incertezas inerentes ao processo é geralmente desprezado nesse tipo de análise (SANTOS, 2001). As incertezas geralmente são mais expressivas em bacias não monitoradas, onde não há medições de vazão para, pelo menos, reduzir a incerteza na parametrização hidrológica de processos. Nos itens seguintes são apresentados estudos que avaliaram as incertezas nos parâmetros dos modelos e na chuva de projeto, principal dado de entrada desta abordagem.

#### **2.4.3.1 Parâmetros do modelo**

As incertezas nos parâmetros do modelo são oriundas de fatores como limitações nas estruturas do modelo, procedimentos inadequados na estimativa dos parâmetros e falta de dados históricos ou físicos da bacia (TUCCI, 2005). No caso do método do *Curve Number* associado ao hidrograma unitário do *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), os principais parâmetros do modelo são o *Curve-Number* (CN) e a abstração inicial ( $\lambda$ ). Conforme relatado por Schneider e Mccuen (2005), a sensibilidade da vazão em relação à abstração inicial é consideravelmente menor quando comparada ao *Curve-Number*. Desta forma, neste item optou-se por dar enfoque nas incertezas associadas a este parâmetro.

O CN agrupa as condições de uso e tipo de solo e a condição hidrológica antecedente em um único coeficiente e valores deste parâmetro são encontrados em tabelas, como as apresentadas no *Handbook of Hydrology* (MAIDMENT, 1993), que associam as características da bacia a uma faixa de valores deste parâmetro. Diversos autores questionam a aplicabilidade generalizada de valores tabelados, tendo em vista que estes foram definidos com base na análise de bacias específicas nos Estados Unidos (SARTORI; HAWKINS; GENOVEZ, 2011).

Uma alternativa ao uso de valores tabelados consiste na estimativa do parâmetro CN a partir de dados monitorados de precipitação e vazão na bacia de interesse. Nesse contexto, Tucci (2005) apresenta um exemplo prático em que este parâmetro foi estimado a partir de 14 eventos de cheia registrados em uma bacia. Para os eventos avaliados, o CN apresentou uma variação de até 25%. Em conjunto, o autor avaliou o parâmetro relacionado ao posicionamento do pico de precipitação.

Há uma série de estudos que apontam potenciais superestimativas do parâmetro CN quando estimado pelos valores tradicionais encontrados nas tabelas (LAL *et al.*, 2016). Cunha *et al.* (2015) avaliaram o CN obtido por valores tabelados, considerando o tipo e uso do solo, e valores obtidos a partir de dados monitorados em uma bacia de 113 km<sup>2</sup>. A partir os dados monitorados obteve-se um CN cerca de 50% inferior ao obtido pelas tabelas tradicionalmente usadas. Destaca-se que os valores de CN obtidos pela abordagem empírica apresentaram um decréscimo de acordo com a magnitude do evento de precipitação.

Santos (1998) avaliou a incerteza nas vazões de pico causada pelo parâmetro CN no hidrograma unitário do NRCS para uma bacia urbana em Porto Alegre. O autor estimou um valor médio e desvio-padrão deste parâmetro a partir do registro de eventos ocorridos na bacia. Foram desenvolvidas simulações de Monte Carlo e obtidos intervalos com 90% de confiança associados à vazão de pico. A incerteza na vazão de pico variou de -49 a 52% para o evento com TR de 2 anos e -44 a 40% para o evento de TR 100 anos

Leandro, Leitão e Lima (2013) avaliaram o efeito da incerteza do CN no hidrograma de uma bacia de cerca de 9 km<sup>2</sup> em Portugal. Os autores identificaram um efeito significativo da incerteza deste parâmetro no pico inicial do hidrograma de um evento de precipitação ocorrido em 2013. A incerteza associada a este parâmetro resultou em uma diferença no pico da ordem de 50%.

#### **2.4.3.2 Chuva de projeto**

Conforme a denominação indica, os modelos chuva – vazão têm como principal dado de entrada a precipitação. No contexto de dimensionamento de estruturas comumente são utilizadas “chuvas de projeto”. As chuvas de projeto são uma representação simplificada da distribuição temporal da precipitação e são amplamente empregadas devido à sua simplicidade, à pequena quantidade de informação necessária

para a sua obtenção quando comparadas a chuvas para fins de simulação contínua de escoamento (BEMFICA, GOLDENFUM e SILVEIRA, 2000). A chuva de projeto é associada a um tempo de retorno e é composta pelos seguintes elementos: duração do evento; altura precipitada ou a intensidade média; e a distribuição temporal (VOORHEES & WENZEL, 1984).

De uma maneira geral são escassas as avaliações de incertezas em cada uma das componentes da chuva de projeto e seu efeito na vazão. Há um entendimento geral de que chuvas de projeto derivadas de curvas Intensidade-Duração-Frequência IDF superestimam vazões de pico e volumes escoados (DESBORDES, 1982). Bemfica, Goldenfum e Silveira (2000) ainda destacam que as curvas IDF representam uma combinação de valores obtidos de diferentes tormentas e, dificilmente, representam um único evento crítico

As chuvas de projeto comumente são derivadas de equações de IDF, geralmente geradas a partir de precipitações máximas anuais de estações pluviométricas. A informação de base (séries de precipitação) está sujeita a inconsistências associadas a erros de leitura por parte do observador, crescimento de vegetação no local do posto de observação e danos nos aparelhos registradores (TUCCI, 2001), bem como à extensão temporal da mesma. Adicionalmente, a série diária requer a desagregação para valores intradiários, por vezes baseada em coeficientes de desagregação regionais ou obtidos de áreas consideradas representativas da área de interesse. A ausência de coeficientes de desagregação locais pode incorporar uma incerteza adicional à chuva de projeto.

A duração da chuva de projeto é considerada igual ao tempo de concentração ( $t_c$ ) da bacia. A literatura técnica dispõe de diversas equações empíricas para estimativa do  $t_c$ , recomendadas para diferentes faixas de área e tipos de bacia (rurais e urbanas). Silveira (2005) avaliou 23 fórmulas para a estimativa deste parâmetro e obteve resultados variados, sobretudo em bacias rurais, o que reforça o potencial incorporado de acordo com a fórmula empregada.

Na prática corrente, a precipitação é adotada com uma distribuição temporal que maximiza a vazão resultante, como a de blocos alternados utilizados em associação com o modelo NRSC. Bemfica, Goldenfum e Silveira (2000) avaliaram quatro metodologias para obtenção desses padrões utilizando curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Porto Alegre – RS e obtiveram hidrogramas com volumes similares, porém, com variações mais expressivas nas vazões de pico. Os autores identificaram diferenças nas vazões de pico para eventos de TR 2 e 5 anos de até 24%.

#### **2.4.4 Considerações gerais quanto ao referencial bibliográfico consultado**

Nesta etapa foram levantadas as principais componentes de incerteza de cada método com o intuito de subsidiar o segundo objetivo principal desta dissertação. Conforme apresentado nos itens 2.4.1 a 2.4.3, encontram-se diversos esforços na literatura técnica para quantificação de incertezas associadas a estimativa de vazões máximas em cursos d'água. Devido à variedade de métodos para obtenção de vazões de projeto e dados de entrada utilizados, a quantificação de incerteza desta vazão torna-se complexa e inviabiliza a existência de uma metodologia “ótima” e “universal” aplicável a todos os casos, condição que resulta em uma “incerteza sobre a incerteza” (JUSTON et al. 2013).

Conforme o referencial consultado, cada método para estimativa de vazões de projeto incorpora um conjunto de incertezas que podem implicar, em maior ou menor grau, risco à segurança da estrutura projetada. As recomendações usuais para dimensionamento da borda livre – apresentadas no item 2.1 - não incorporam avaliações relacionadas à incerteza dos estudos hidrológicos associados à estrutura (DNER, 1996; DAEE, 2017; DAER, 2023). Como exceção, destaca-se o procedimento apresentado em EA (2017), baseado em análises qualitativas dos estudos e atribuição de uma pontuação quanto a sua qualidade.

### 3 AVALIAÇÃO DE VALORES FIXOS DE BORDA LIVRE

Neste item é apresentada a metodologia empregada para a avaliação de recomendações usuais de borda livre, com ênfase em valores fixos. O objetivo foi avaliar a incerteza nas vazões de projeto teoricamente assegurada pela borda livre ao se adotar um determinado valor fixo, bem como identificar relações com as características geométricas do trecho avaliado. A Figura 3 sintetiza as etapas desenvolvidas para tal avaliação. A descrição detalhada de cada etapa é apresentada nos itens seguintes.

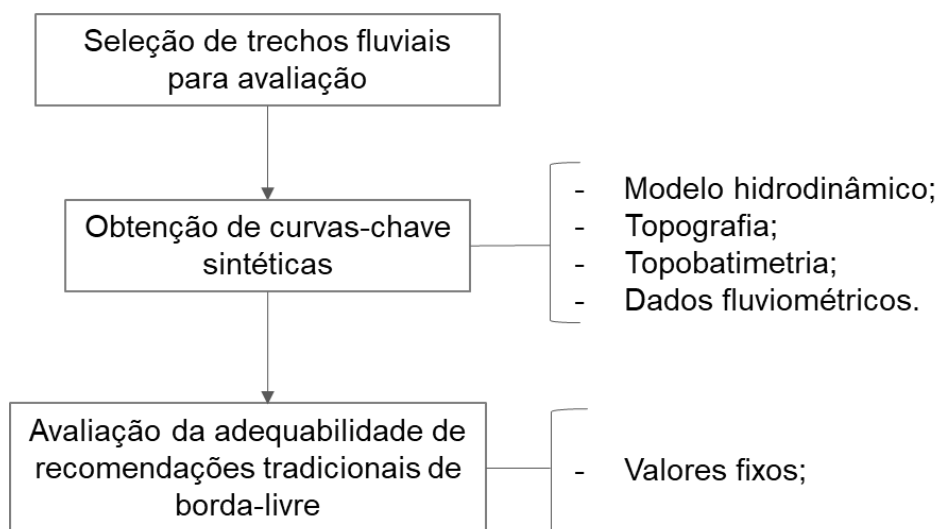


Figura 3: Fluxograma geral do método utilizado

#### 3.1 SELEÇÃO DE TRECHOS FLUVIAIS PARA AVALIAÇÃO

Para condução das análises foram selecionados trechos fluviais baseados na disponibilidade de dados topobatimétricos e série histórica de vazões. Tais requisitos foram estabelecidos tendo em vista a necessidade destas informações para a etapa subsequente (obtenção de curvas-chave sintéticas). Adicionalmente, buscou-se incorporar na análise trechos características variadas de sensibilidade da seção transversal.

Ressalta-se que esta seleção não foi desenvolvida em caráter exaustivo, no entanto, buscou-se englobar um conjunto de trechos com situações variadas, conforme apresentado no item 4.1.

#### 3.2 OBTENÇÃO DE CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS

Considerando que a curva-chave representa implicitamente a sensibilidade de uma seção (item 2.3), ela foi empregada na presente avaliação para fins de avaliação da incerteza teórica assegurada ao adotar-se um determinado valor de borda livre. Destaca-se que os trechos selecionados já dispõem de curvas-chave estabelecidas para uma determinada seção para fins de monitoramento fluviométrico. No entanto, tais curvas são usualmente obtidas por medições de vazão restritas à calha principal e por vezes não abrangem a faixa de cotas de interesse para o presente estudo ou são extrapoladas por métodos simplificados.

Dada esta limitação, optou-se por gerar uma curva-chave sintética para determinada seção de cada trecho analisado com o uso de modelagem hidrodinâmica. O modelo adotado e procedimentos para obtenção das curvas são apresentados na sequência.

### 3.2.1 Modelo hidrodinâmico

Para obtenção de curvas-chave sintéticas foram desenvolvidas simulações hidráulicas com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do Corpo de Engenheiros do Exército Americano, em sua versão 5.0.5 (USACE, 2002). O HEC-RAS é um modelo amplamente empregado no meio técnico e acadêmico e dispõe de vasta documentação. O modelo é utilizado para simulação de escoamentos a superfície livre em regime permanente e não permanente, em ambiente unidimensional e bidimensional. Este modelo já foi empregado em trabalhos como de Wara et. al (2019) para obtenção de curvas-chave sintéticas.

No presente trabalho as simulações foram desenvolvidas em ambiente unidimensional e equacionamento não-permanente. A opção por tal abordagem decorre do fato dos trechos selecionados apresentarem características unidirecionais, com canais e planícies de inundação bem definidos. Adicionalmente, esta abordagem mostra-se compatível com o objetivo das simulações, que é obter curvas-chave sintéticas para fins avaliativos de sua sensibilidade e relação com a borda livre.

Em ambiente unidimensional e regime não-permanente, o HEC-RAS desenvolve a solução das equações de continuidade (3) e quantidade de movimento (4) a partir de métodos numéricos.

$$\frac{\partial A}{\partial T} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$



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

Onde: Q: vazão (m<sup>3</sup>/s); t: tempo (s); A: área da seção (m<sup>2</sup>); x: distância ao longo do trecho de rio no sentido longitudinal (m); y: profundidade do escoamento (m); S<sub>o</sub>: declividade do fundo do rio (m/m); S<sub>f</sub>: declividade da linha de energia (m/m); g: aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Os principais dados de entrada para a representação dos cursos d'água no modelo HEC-RAS são referentes a geometria do trecho de coeficientes de perda de energia (Manning) para a calha principal e planície de inundação e condições de contorno, que são descritos na sequência.

### 3.2.2 Representação geométrica

Para os trechos onde não foram obtidos levantamentos topobatimétricos adotou-se a seção transversal da estação fluviométrica situada no respectivo trecho, obtida a partir do portal Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA, 2023). Para estes casos houve a necessidade de ajuste de referencial da seção, tendo em vista que esta encontra-se associada ao marco local da estação fluviométrica, que por sua vez difere do referencial da informação topográfica. Este ajuste foi efetuado de forma visual, utilizando as margens do curso d'água como pontos de ancoragem, conforme Figura 4..

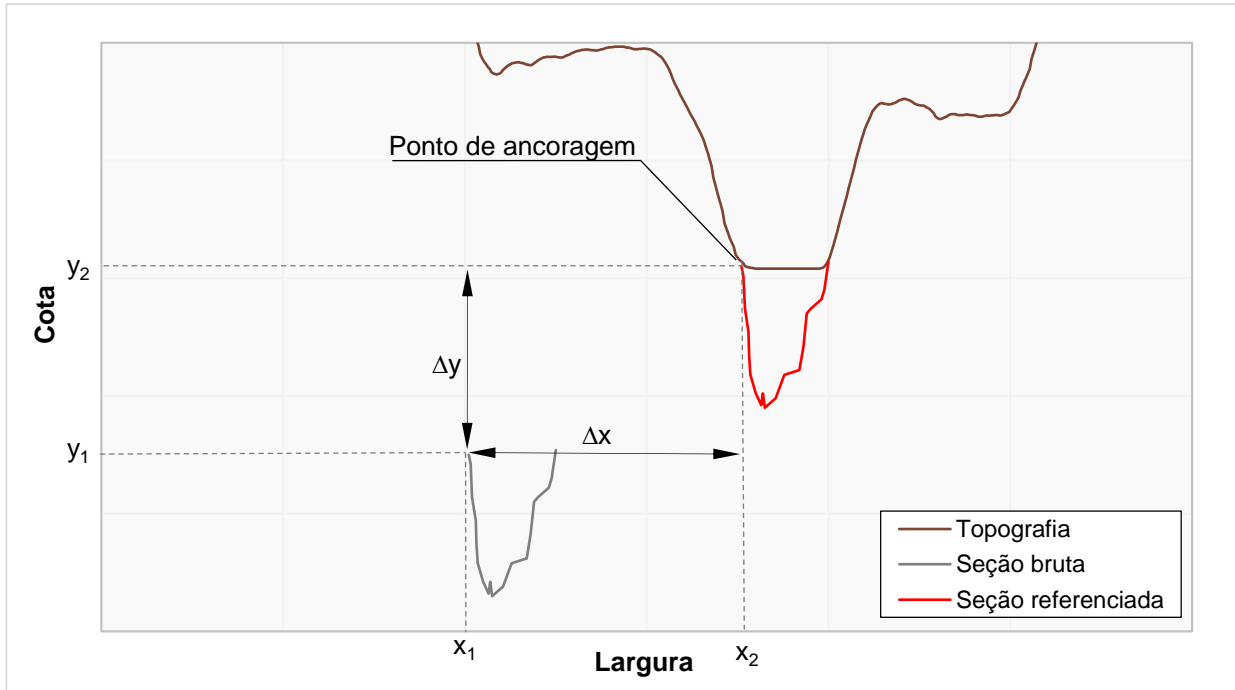


Figura 4: Exemplo de procedimento de ajuste de referencial da seção da estação fluviométrica

Os valores  $\Delta x$  e  $\Delta y$  representam, respectivamente, o deslocamento horizontal e vertical acrescidos aos pares  $x$  e  $y$  originais da seção para referenciá-la ao levantamento topográfico. Uma vez referenciada, esta seção foi interpolada para todo o trecho com base em uma declividade estimada da lâmina d'água, por sua vez obtida a partir da informação topográfica disponível

Deve-se destacar que esta abordagem incorre em certa limitação na representação das características topobatimétricas no trecho. No entanto, ainda se mostra adequada ao presente trabalho pelos seguintes motivos:

- Neste trabalho foram avaliados casos hipotéticos. Logo, as simplificações para representação geométrica dos trechos fluviais não inviabilizaram a análise;
- A faixa de vazões de interesse extrapola a calha menor (vazões de projeto com TR superior a 10 anos). Desta forma, as simplificações da geometria da calha devem apresentar menor relevância na medida em que o nível d'água atinge a planície de inundação.

Com relação ao coeficiente de Manning, foram adotados os valores de 0,033 para a calha principal e 0,060 para a planície de inundação. Estes valores são compatíveis com rios de característica natural e planícies com vegetações rasas e presença de árvores (CHOW, 1964).

### 3.2.3 Condições de contorno de montante e jusante

Os trechos fluviais selecionados dispõem de monitoramento fluviométrico. As vazões de projeto foram estimadas com base nos dados disponíveis nas séries históricas das estações por meio de análise de frequência local.

Foi utilizada a distribuição Log-Pearson Tipo III. Esta distribuição é caracterizada por três parâmetros: média, o desvio padrão e o coeficiente de assimetria. Esses parâmetros são estimados a partir da série de dados hidrológicos observados e são utilizados para descrever a forma da distribuição.

Esta distribuição estatística é recomendada em manuais institucionais como o Manual de Hidrologia Básica do DNIT (2005), o qual apresenta sua expressão (5):

$$\text{Log}(Q_t) = \bar{X} + K\sigma \quad (5)$$

Em que  $Q_t$  é a descarga máxima para um tempo de retorno;  $\bar{X}$  é a média do logaritmo das vazões máximas anuais observadas;  $\sigma$  é o desvio padrão do logaritmo das vazões máximas anuais observadas;  $K$  é um fator de frequência tabelado em função do coeficiente de assimetria e percentual de não excedência.

A partir do ajuste foram obtidas as vazões associadas aos tempos de retorno de 10, 50, 100 e 500 anos. Para o desenvolvimento das simulações foram criados hidrogramas sintéticos de modo a cobrir toda a faixa de vazões de interesse. Como vazão inicial dos hidrogramas adotou-se a vazão com TR de 10 anos ( $Q_{10}$ ). Como máxima vazão, adotou-se a vazão correspondente ao N.A. da vazão de TR 500 anos acrescido de 1 m ( $Q_{500} + 1 \text{ m}$ ), obtida por um processo iterativo. Ou seja, a vazão  $Q_{500}$  foi gradativamente acrescida nas simulações de modo a obter um N.A. na seção 1 m superior ao valor inicial a ela associado.

Estas vazões foram interpoladas linearmente em um intervalo de tempo de 200 dias, resultando em um hidrograma com lenta ascensão que proporcionou boas condições de estabilidade das simulações. Uma representação gráfica de um hidrograma típico simulado é apresentada na Figura 5. Estes hidrogramas foram adotados como condição de montante em cada um dos trechos analisados. Essa condição resulta em uma simulação em condições “quase-permanentes”, dada a lenta variação da vazão.

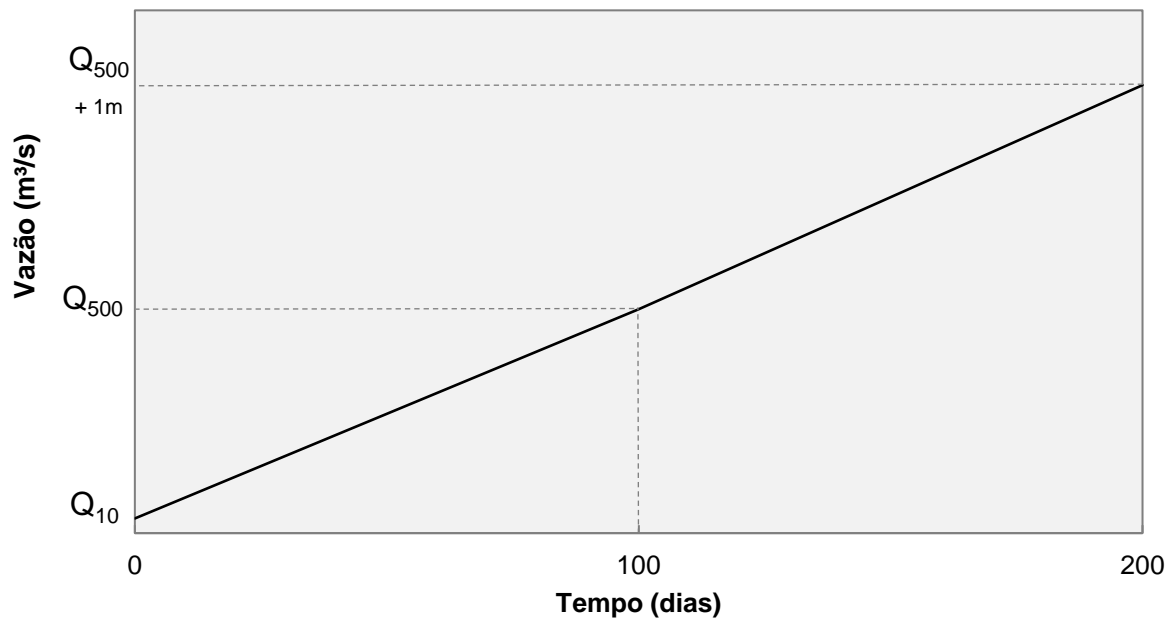


Figura 5: Hidrograma sintético utilizado para simulação dos trechos de interesse

Como condição de jusante foi adotada a profundidade associada a uma declividade da linha de energia (*Normal Depth*), que deve ser informada no modelo. Este valor foi considerado igual à declividade da linha d'água do trecho, estimada a partir da topografia disponível.

### 3.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Para esta análise foi adotado o conceito de incerteza assegurada (UA). Este termo representa, para um determinado TR, a diferença percentual entre a vazão correspondente à cota acrescida da borda livre e a vazão do respectivo TR, conforme (6). Esta avaliação é exemplificada graficamente na Figura 6. Em termos práticos, a incerteza assegurada quantifica a “folga” que 1,0 m de borda livre representa para a incerteza inerente à vazão de um TR.

$$UA = \left( \frac{Q_{TR+h_{bl}} - Q_{TR}}{Q_{TR}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde UA é a incerteza assegurada, em %; QTR é a vazão para um determinado TR;  $Q_{TR}+h_{bl}$  é a vazão correspondente à cota de um determinado TR acrescida da borda livre.

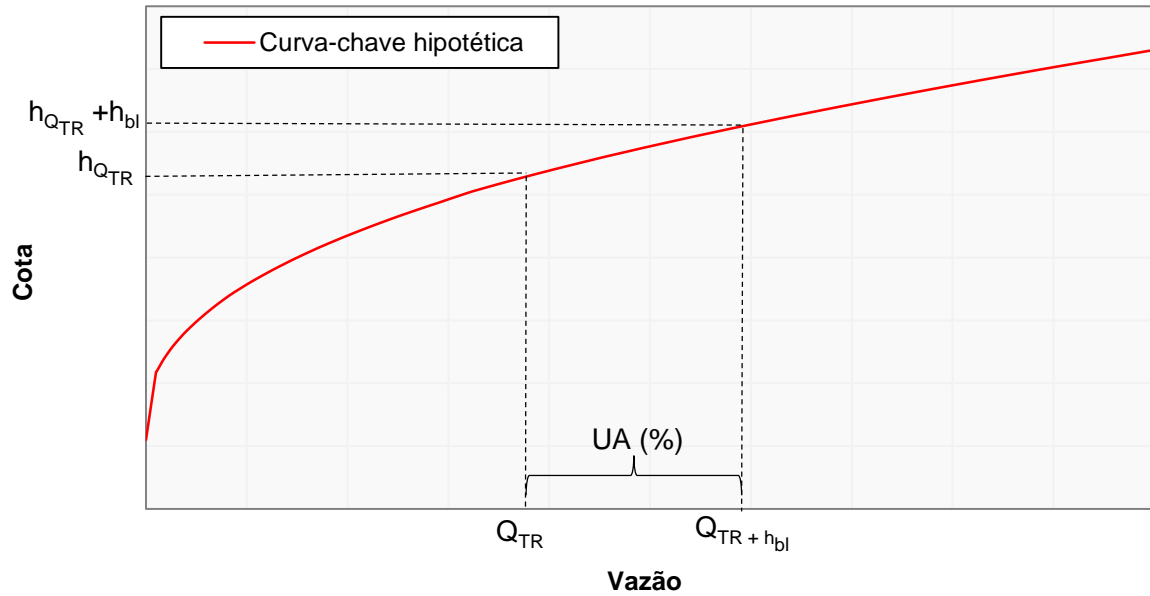


Figura 6: Obtenção da incerteza assegurada a partir da curva-chave de uma seção hipotética

Adicionalmente, também foram discutidas, de forma qualitativa, outras recomendações de borda livre apresentadas no item 2.2, que relacionam o valor de  $h_{bl}$  com as características do escoamento (vazão, velocidades e profundidade).

## 4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a aplicação da metodologia exposta no Capítulo 3 para avaliação da adequabilidade do valor fixo de 1,0 m de borda livre. Os itens seguintes apresentam os trechos avaliados e os resultados obtidos, respectivamente.

### 4.1 TRECHOS AVALIADOS

Foram selecionados seis trechos fluviais para avaliação, cujas principais informações são resumidas no Quadro 3. Sua localização é apresentada na Figura 7. O detalhe de cada trecho e a seção transversal de interesse é apresentado na Figura 8 a Figura 10. Além da disporem de dados prontamente disponíveis para as análises, estes trechos foram selecionados por incorporarem diferentes características, como planícies de inundação com confinamentos topográficos naturais (rios Canoas, Leão, Itajaí do Sul e Itajaí-Açu); confinamentos artificiais da planície de inundação (rio do Sinos); e rios com extensas zonas de amortecimento, onde não há um limite explícito da planície de inundação.

A partir da análise visual das seções, atribuiu-se a classificação “encaixada” para cinco das seis seções analisadas. Esta classificação considerou principalmente o fato da seção apresentar um limite explícito da planície de inundação. Para a seção do rio Amola Faca foi atribuída a característica “espraiada”, tendo em vista tratar-se de uma ampla planície de inundação sem existência de um confinamento topográfico evidente.

Quadro 3: Informações dos trechos fluviais selecionados para análise

Nome	Código	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Extensão da série (anos)	Nome do rio	Extensão do trecho simulado (m)	Largura da calha principal (m)	Largura da planície de inundação (m)	Característica atribuída à seção
Rio Bonito	71300000	2000	78	Canoas	2376,9	45	150	Encaixada
Barra do rio Pardo	72870000	420	40	Leão	1830,3	30	100	Encaixada
Jararaca	83120000	653	25	Itajaí do Sul	1525,3	50	300	Encaixada
Warnow	83520000	9790	38	Itajaí-Açu	7288,0	150	700	Encaixada
Turvo	84949000	336	39	Amola Faca	2116,3	100	>1.000	Espraiada
São Leopoldo	87382000	3130	44	Do Sinos	4212,0	120	240	Encaixada

Ressalta-se que a conformação da seção de todos os trechos é dada pela própria topografia, exceto no caso do trecho do rio dos Sinos, em que a seção foi modificada pela existência de diques laterais que confinam parte da planície de inundação.

As informações topográficas e topobatimétricas utilizadas para representação geométrica dos trechos analisados são resumidas no Quadro 4.

Quadro 4: Informações topográficas e batimétricas dos trechos fluviais selecionados para análise

Curso d'água	Dados topográficos	Características	Dados batimétricos
Rio dos Sinos	Levantamento topográfico e topobatimétrico de METROPLAN (2018)	Arquivo vetorial com curvas de nível equidistantes em 1,0 m. Vetores foram interpolados de modo a gerar um arquivo matricial com resolução espacial de 2,0 m	Seções transversais oriundas de levantamento topobatimétrico de METROPLAN (2018). Espaçamento médio da ordem de 200 m no trecho avaliado
Rio Leão	Modelo Digital do Terreno (SDE, 2006)	Arquivo matricial com resolução espacial de 2,0 m	Seção transversal da estação fluviométrica disponível no Hidroweb, interpolada com base na declividade longitudinal do trecho
Rio Canoas			
Rio Itajaí do Sul			
Rio Amola Faca			
Rio Itajaí-Açu			Seções transversais oriundas de levantamento topobatimétrico (FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, 2019). Espaçamento médio da ordem de 150 m no trecho avaliado

Para o trecho avaliado do rio dos Sinos e rio Itajaí-Açu estavam disponíveis levantamentos topobatimétricos de seções transversais no trecho de interesse, oriundos de estudos anteriores para fins de estudos prevenção contra cheias (METROPLAN, 2018; FLEISCHMANN, A.; PAIVA, R.; COLLISCHONN, 2019). Esta informação foi utilizada para representação da calha principal e combinada com o Modelo Digital do Terreno, obtido a partir da informação topográfica apresentada no Quadro 4.

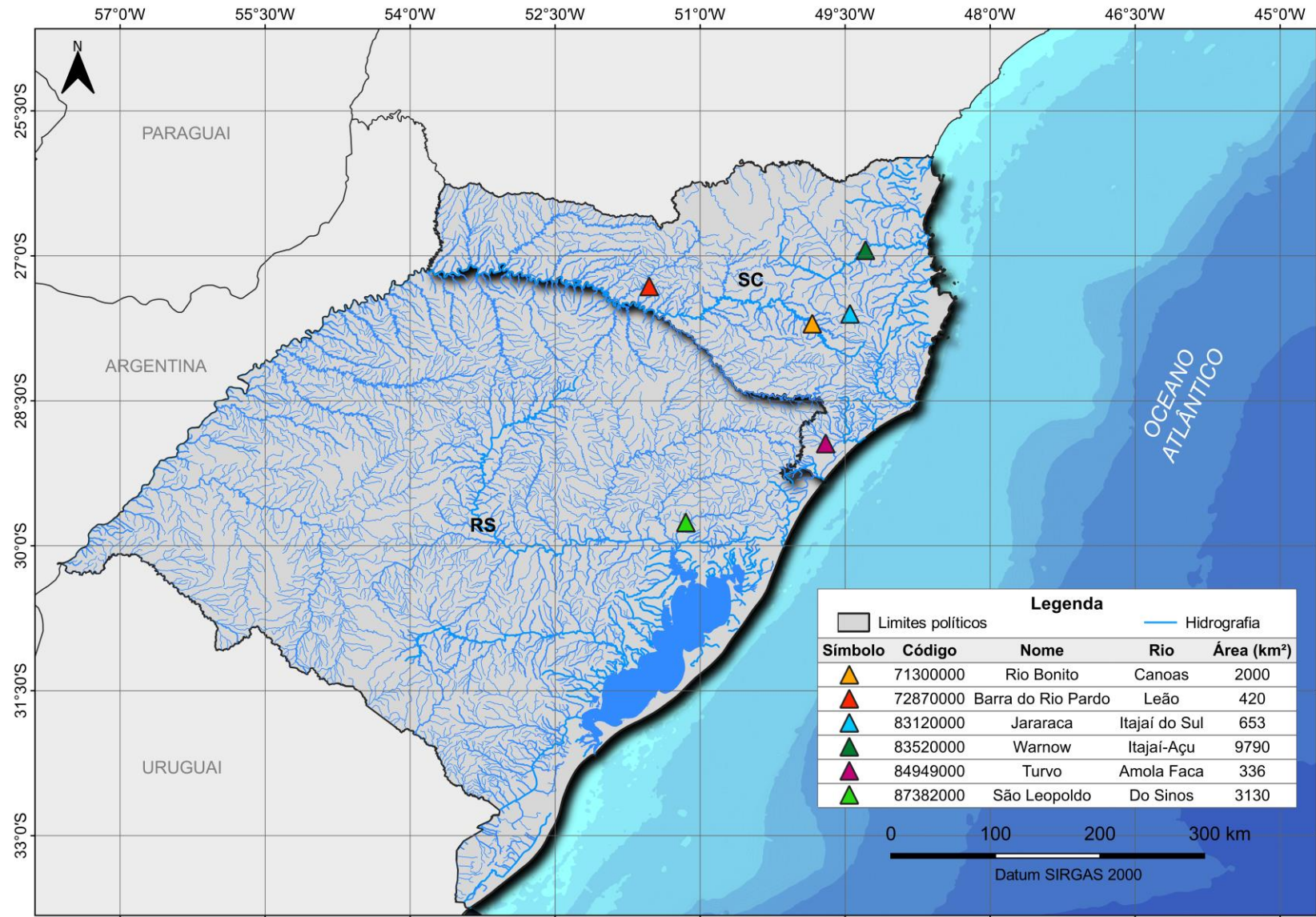


Figura 7: Localização das estações fluviométricas situadas nos trechos fluviais analisados



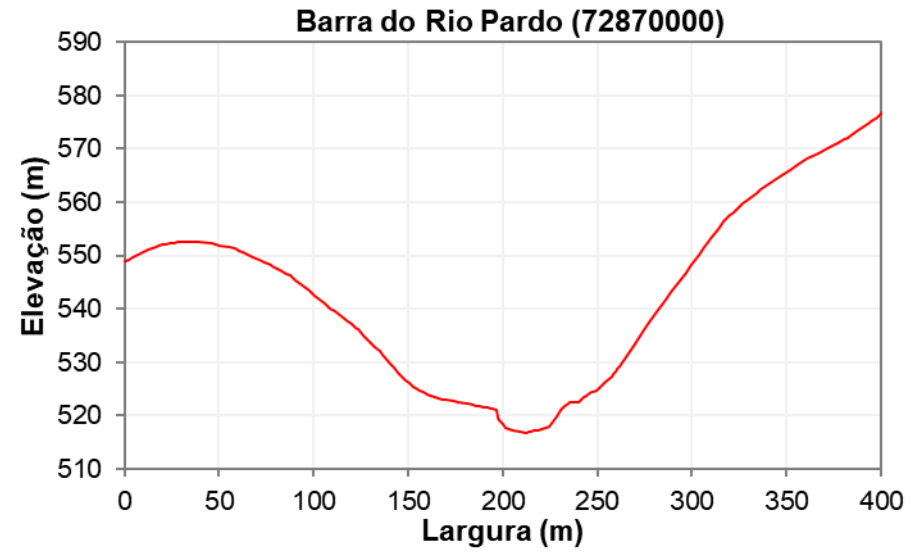
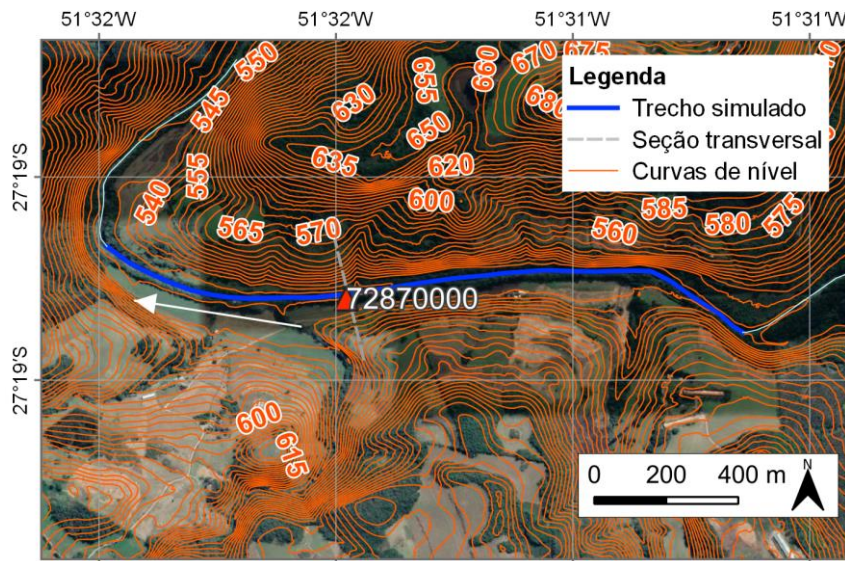
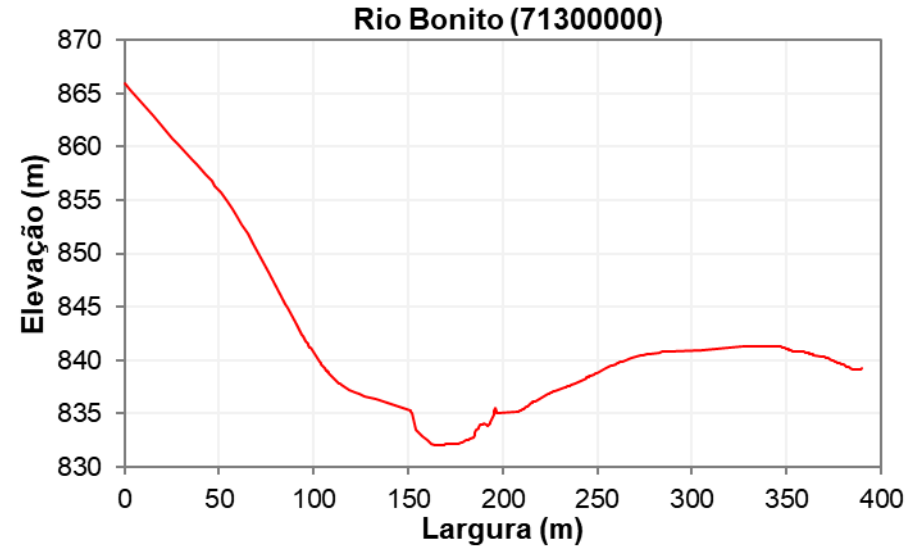
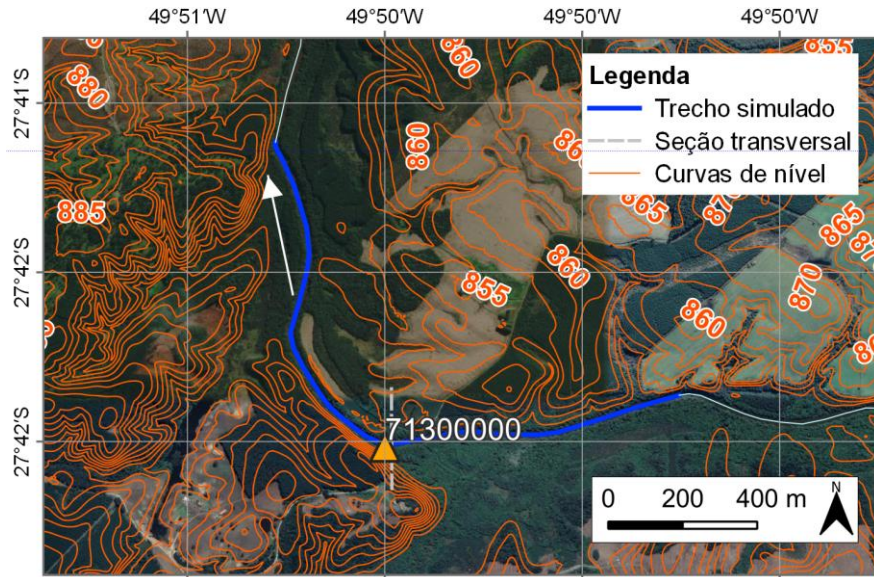


Figura 8: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 1)

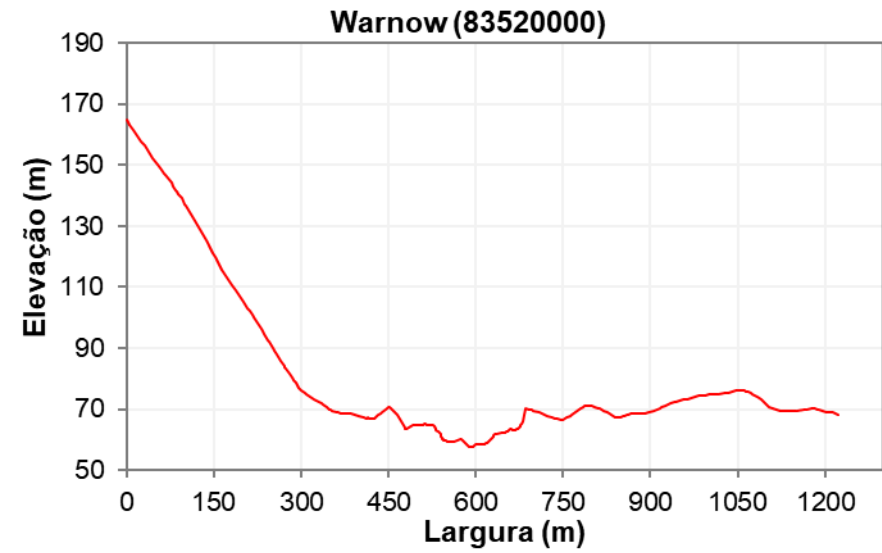
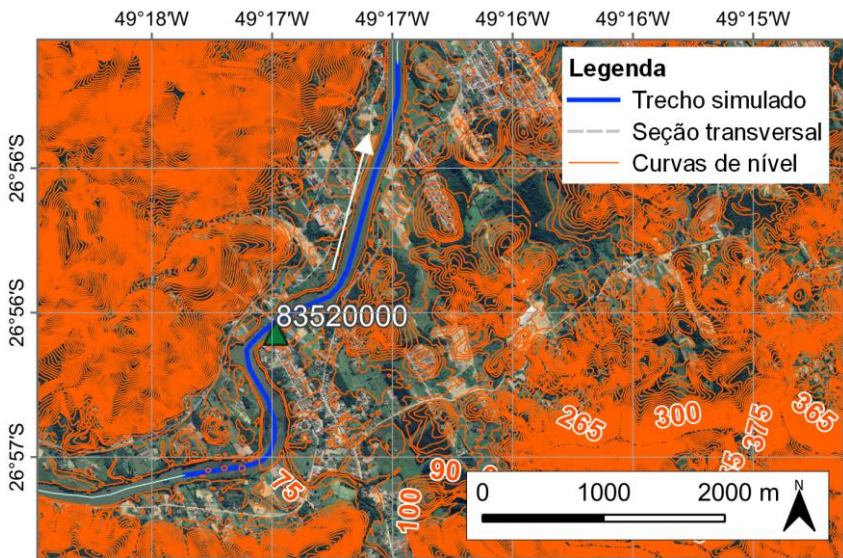
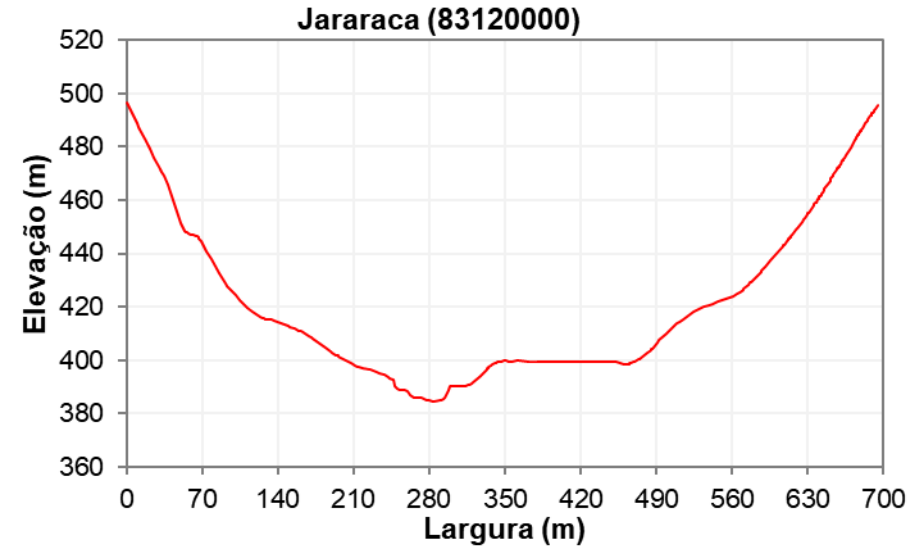
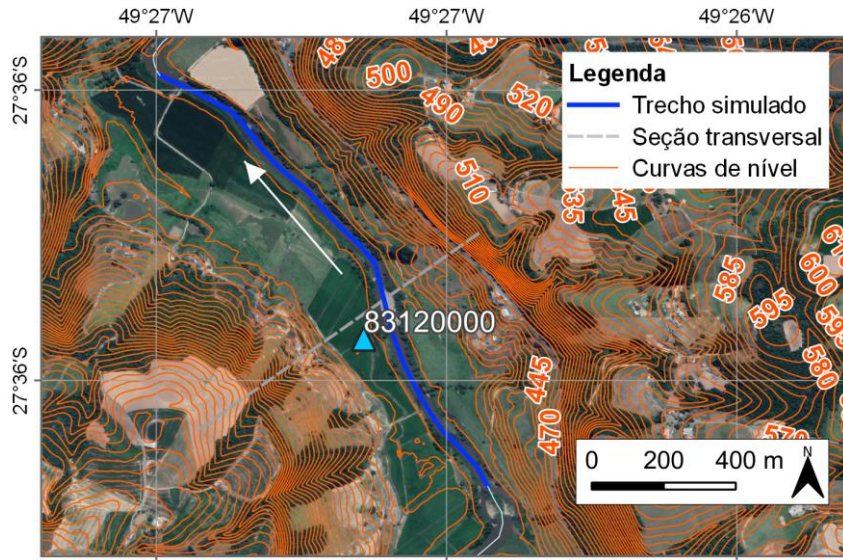


Figura 9: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 2)



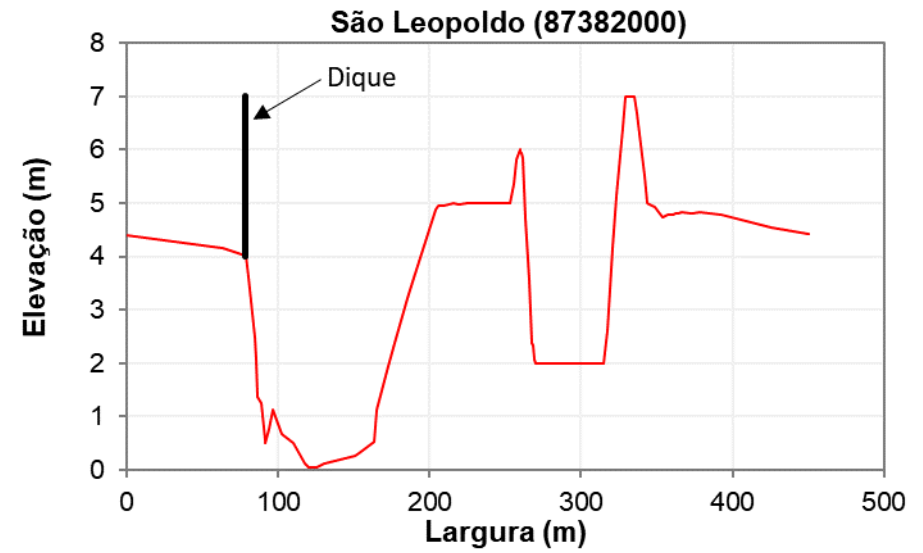
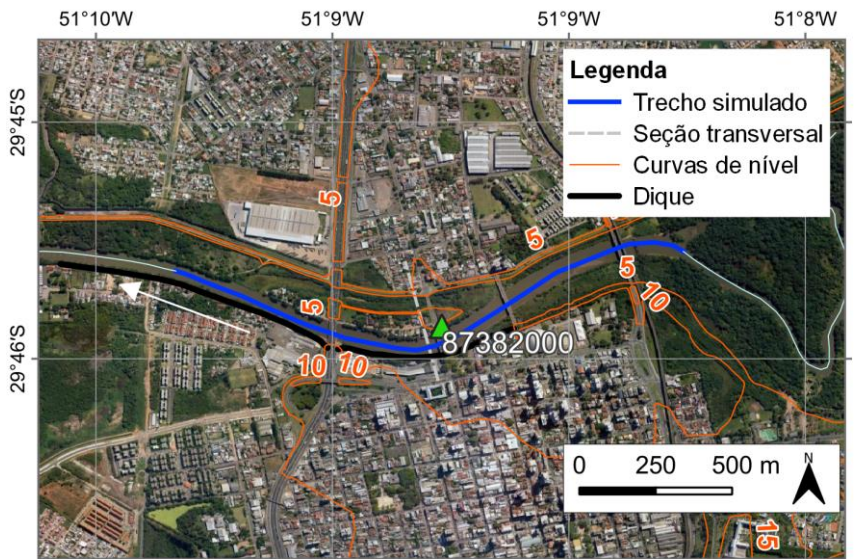
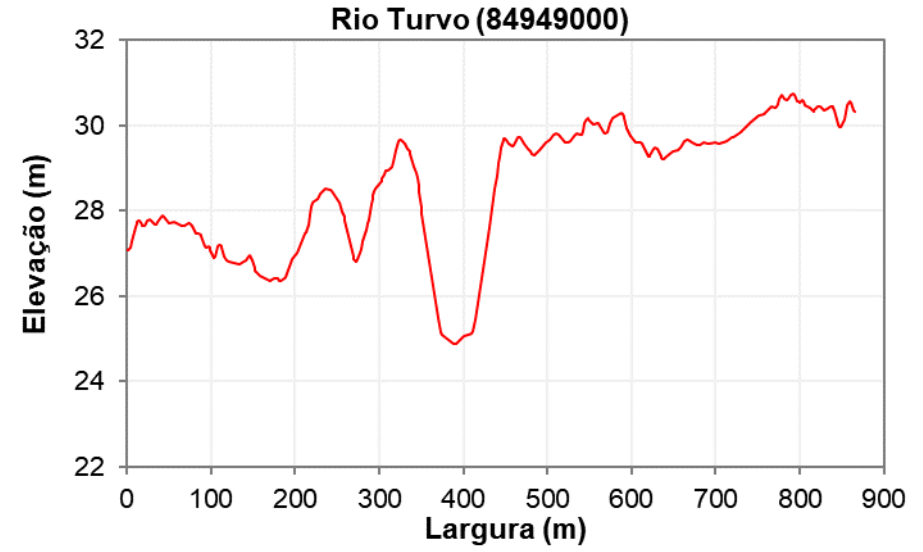
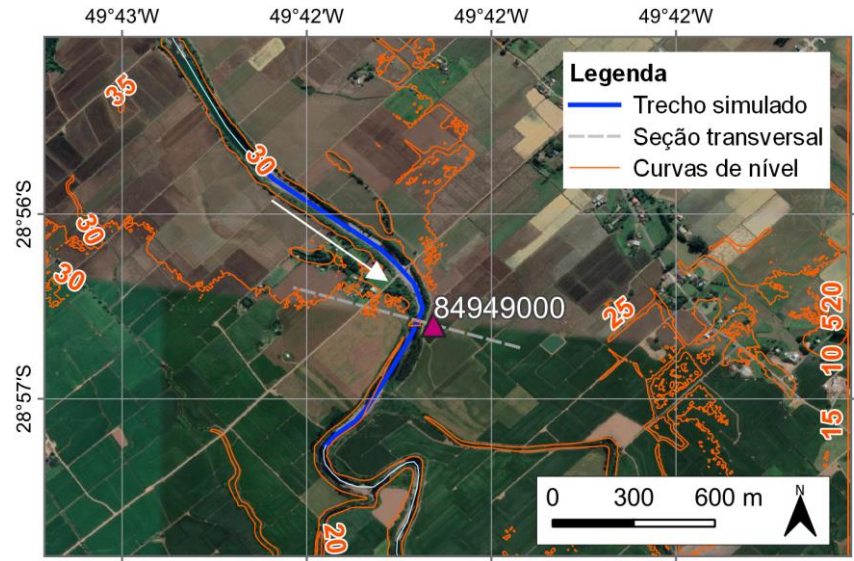


Figura 10: Trechos simulados e seções transversais de interesse (Parte 3)

## 4.2 AVALIAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados para as seis seções fluviais analisadas são resumidos no Quadro 5. No Quadro 7 ao Quadro 9 cada seção é avaliada em detalhe, apresentando de forma gráfica e tabular os níveis correspondentes para cada TR. De uma maneira geral, os valores de UA situaram-se em faixas da ordem de 20 a 60% em cinco das seis seções avaliadas. Valores destoantes foram obtidos para as seções do rio Amola Faca, para a qual são apresentados comentários à parte ao longo deste item.

Quadro 5: Síntese dos resultados na seção de referência dos seis cursos d'água avaliados

Nome da estação	Código	Nome do rio	Característica atribuída à seção	UA de acordo com o TR (anos)			
				10	50	100	500
Rio Bonito	71300000	Canoas	Encaixada	42%	51%	53%	49%
Barra do rio Pardo	72870000	Leão	Encaixada	52%	68%	61%	41%
Jararaca	83120000	Itajaí do Sul	Encaixada	22%	26%	32%	34%
Warnow	83520000	Itajaí-Açu	Encaixada	31%	26%	24%	20%
Turvo	84949000	Amola Faca	Espraiada	267%	243%	235%	215%
São Leopoldo	87382000	Do Sinos	Encaixada	41%	34%	33%	29%

Verificou-se diferenças bastante significativas no comportamento da incerteza assegurada para seis seções avaliadas. As seções nos rios Itajaí-Açu, Amola Faca e dos Sinos apresentaram um comportamento padrão de decréscimo da UA na medida em que o TR aumentou. Já para as seções no rio Canoas, Leão e Itajaí do Sul tal padrão não foi verificado e o comportamento da UA apresentou variação entre a vazão de cada TR.

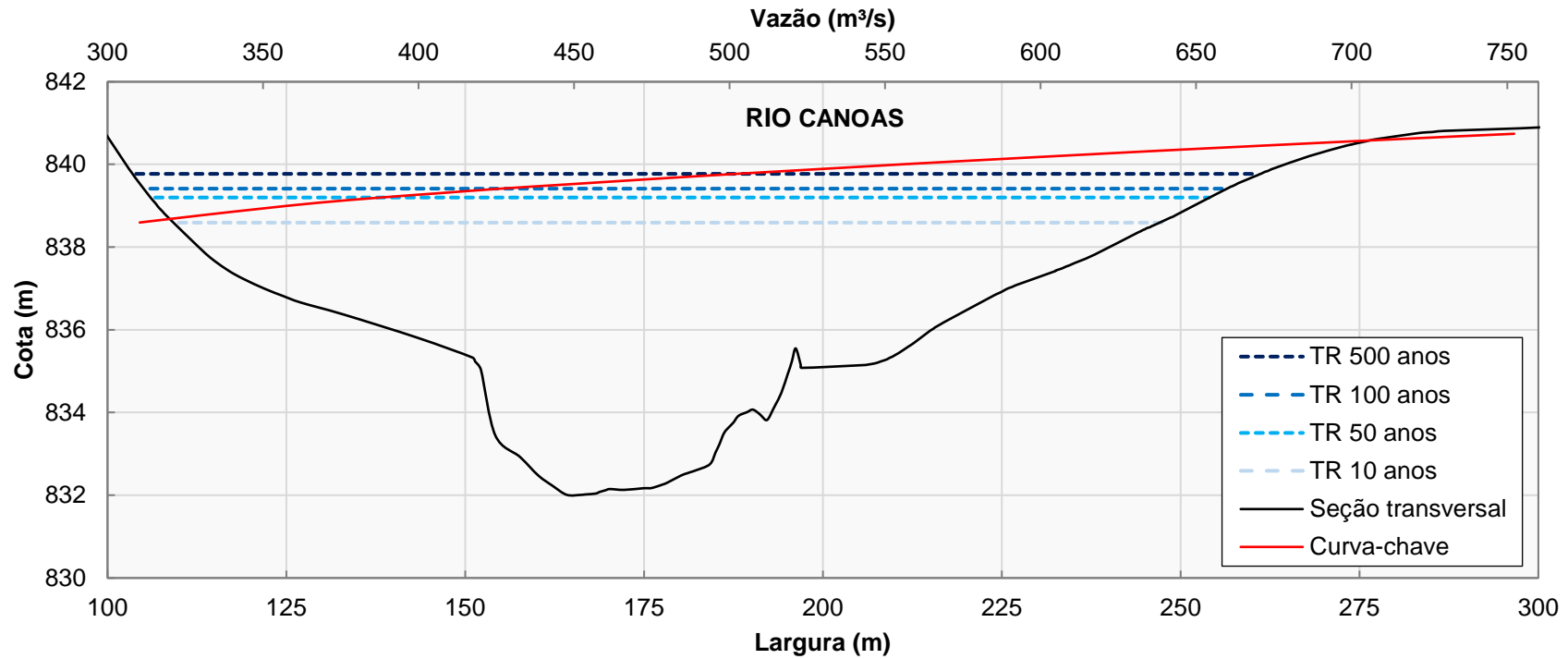
Tomando como referência a vazão de TR 100 anos, usualmente adotada no dimensionamento de travessias e diques, a variação da UA situou-se entre 24 a 61% em cinco das seis seções avaliadas. A seção que apresentou o comportamento mais destoante do conjunto foi a do rio Amola Faca. Esta seção apresenta característica peculiar de possuir a maior planície de inundação dentre às seções avaliadas, o que ressalta a complexidade de adoção de borda livre em estruturas projetadas em rios com tal característica. Nesta condição, a planície de inundação configura como uma ampla zona de armazenamento, havendo a necessidade de vazões expressivamente altas para incrementos de nível d'água.

A partir dos resultados constata-se que a adoção de um valor fixo resulta em níveis diferentes de incerteza assegurada, e conseqüentemente, diferentes níveis de proteção

para cada trecho de rio avaliado. Adicionalmente, verifica-se que há variação na mesma seção quando avaliadas vazões com diferentes TRs.

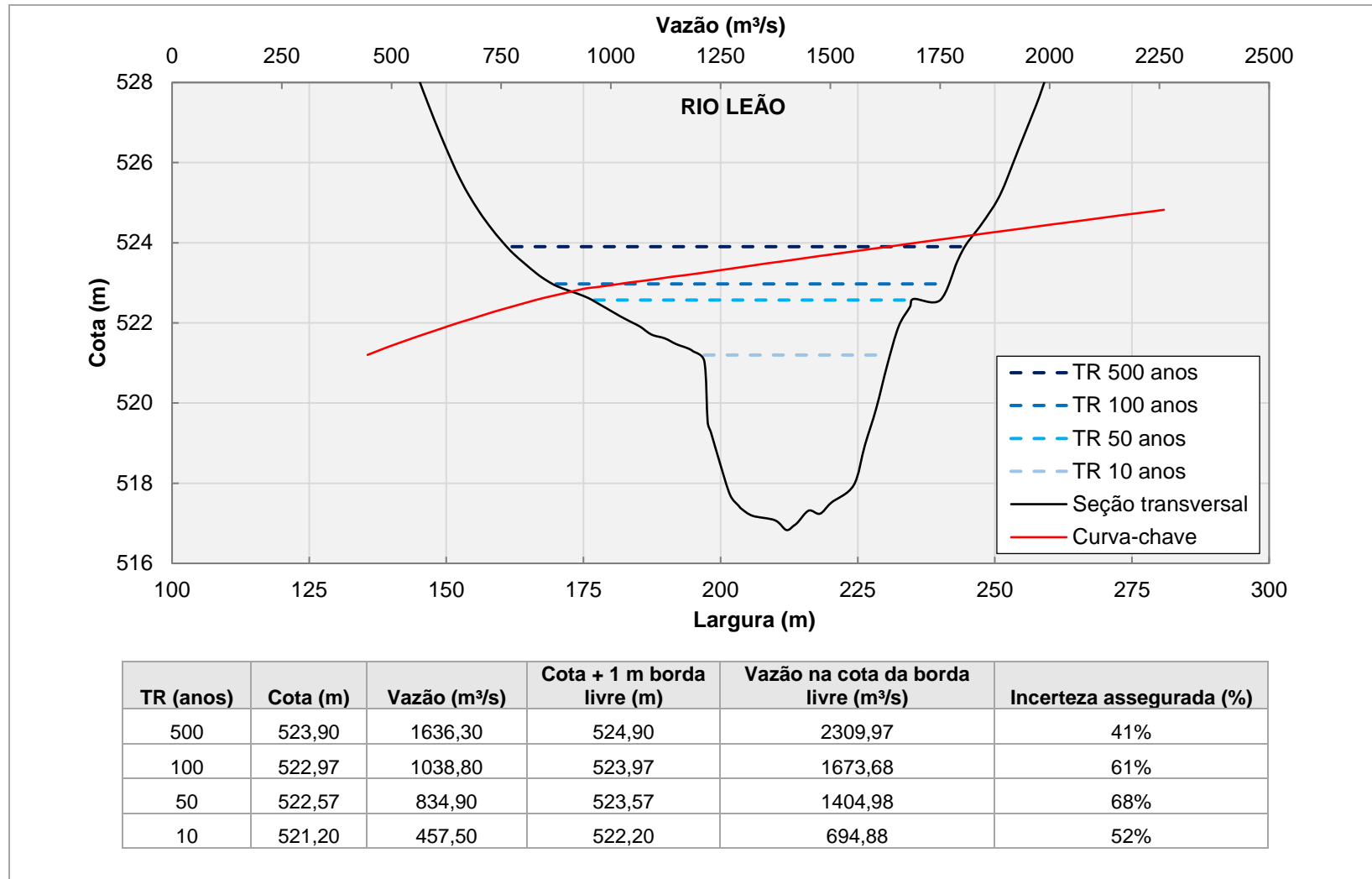
Em termos conceituais, pode-se inferir que a variação da UA em uma determinada seção está relacionada com a sensibilidade da seção (variação da vazão em relação à cota -  $dQ/dH$ ), bem como do comportamento da curva de frequência de cheias. A primeira incorpora de forma conjunta as características do trecho avaliado (geometria da seção, rugosidade e declividade); já a segunda expressiva variação de acordo com as condições climáticas (FARQUHARSON et al., 1992) e características físicas da bacia (área de drenagem, tipo e cobertura do solo) (BLÖSCHL et al., 2013). É importante destacar que ambos os comportamentos são influenciados por condições locais, o que reforça o entendimento de que a adoção de valores fixos de borda livre, em caráter universal, resultará em níveis de proteção distintos em cada local aplicado.

Conforme apresentado no item 2.2, na literatura técnica também se encontram métodos que quantificam a borda livre a partir das características do escoamento (vazão, velocidade e profundidade). Deve-se destacar que a incerteza associada à vazão de projeto não necessariamente possui relação com estes fatores. Em termos gerais, abordagens desta natureza mostram-se relevantes quando pretende-se atribuir maior segurança à uma estrutura em um curso d'água com maior potencial destrutivo e/ou maiores custos construtivos. No entanto, por não considerar a incerteza da na vazão de projeto, a adoção destas recomendações poderá não resultar no nível de proteção esperado.

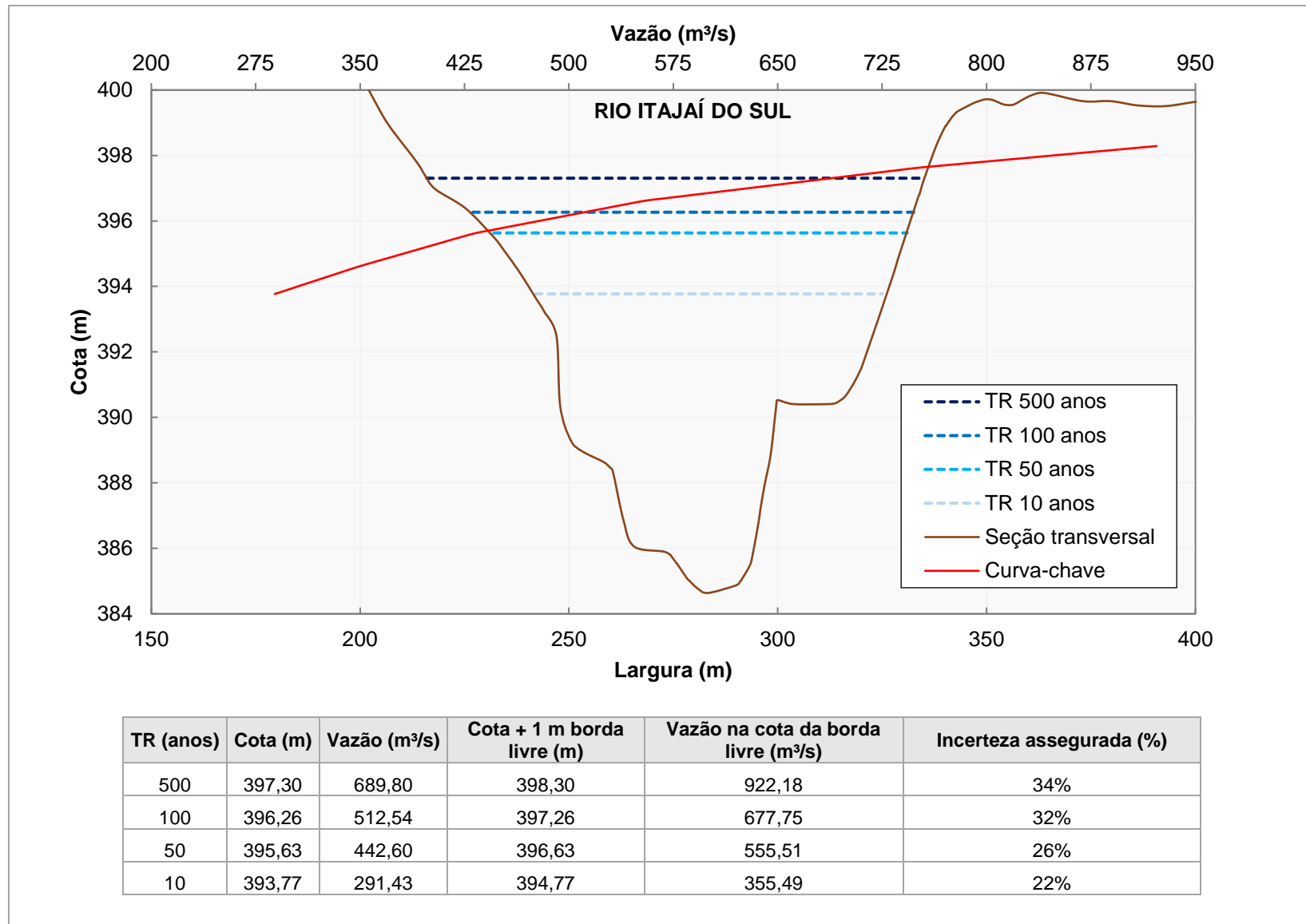


TR (anos)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota + 1 m borda livre (m)	Vazão na cota da borda livre (m³/s)	Incerteza assegurada (%)
500	839,77	504,80	840,77	752,19	49%
100	839,41	429,60	840,41	656,21	53%
50	839,19	396,20	840,19	598,60	51%
10	838,59	313,70	839,59	445,00	42%

Quadro 6: Resultados para a seção analisada no rio Canoas

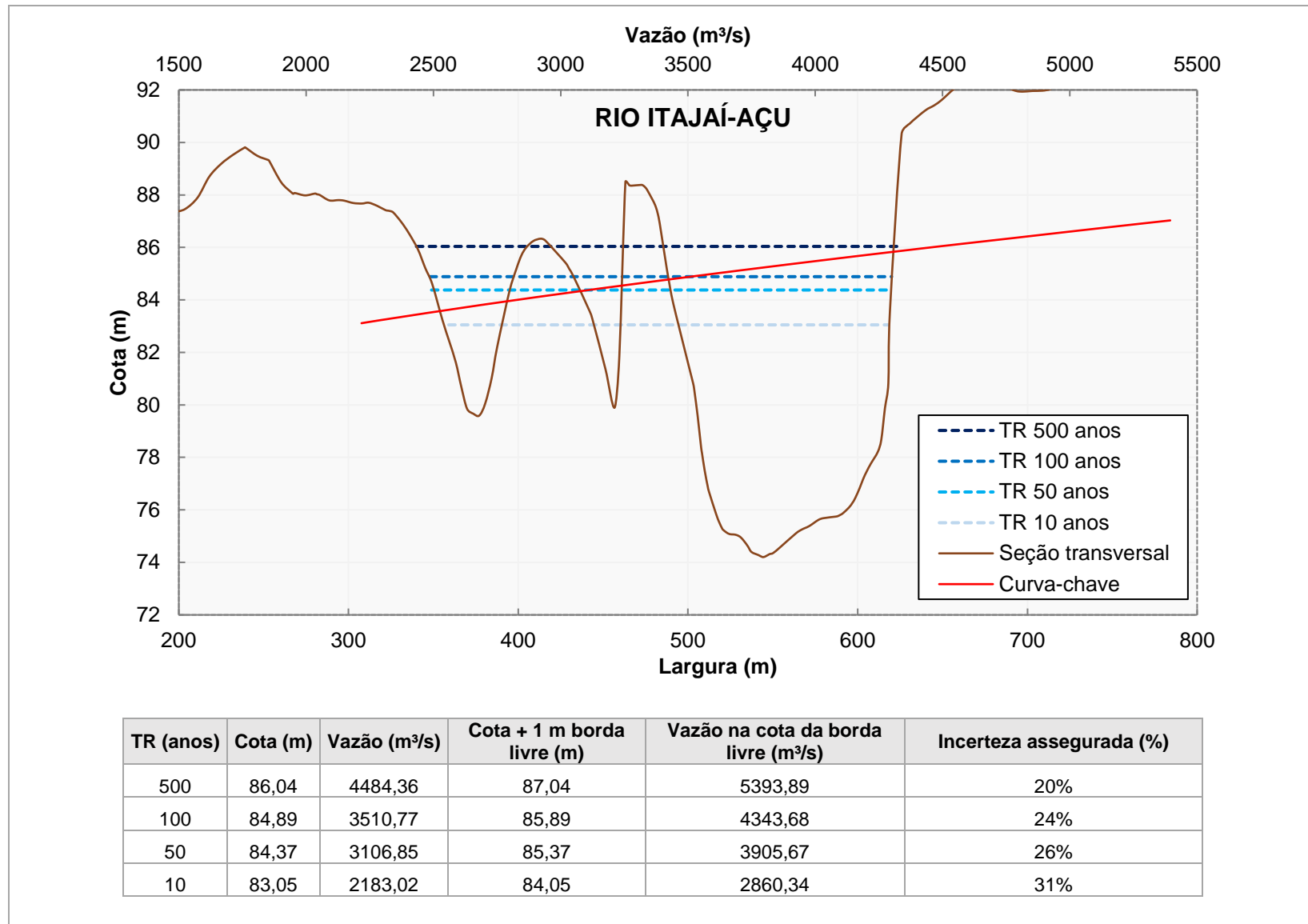


Quadro 7: Resultados para a seção analisada no rio Leão

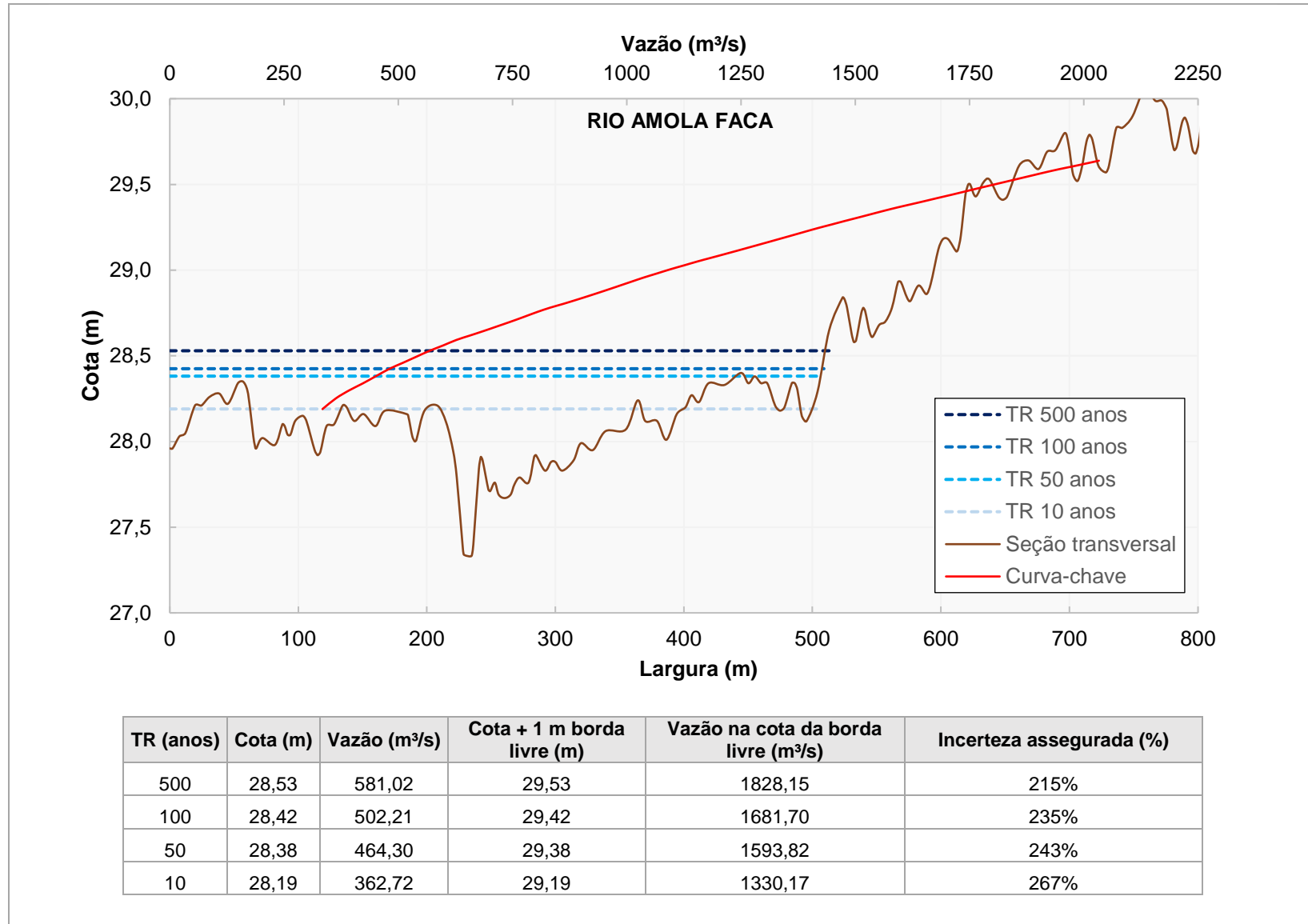


Quadro 8: Resultados para a seção analisada no rio Itajaí do Sul

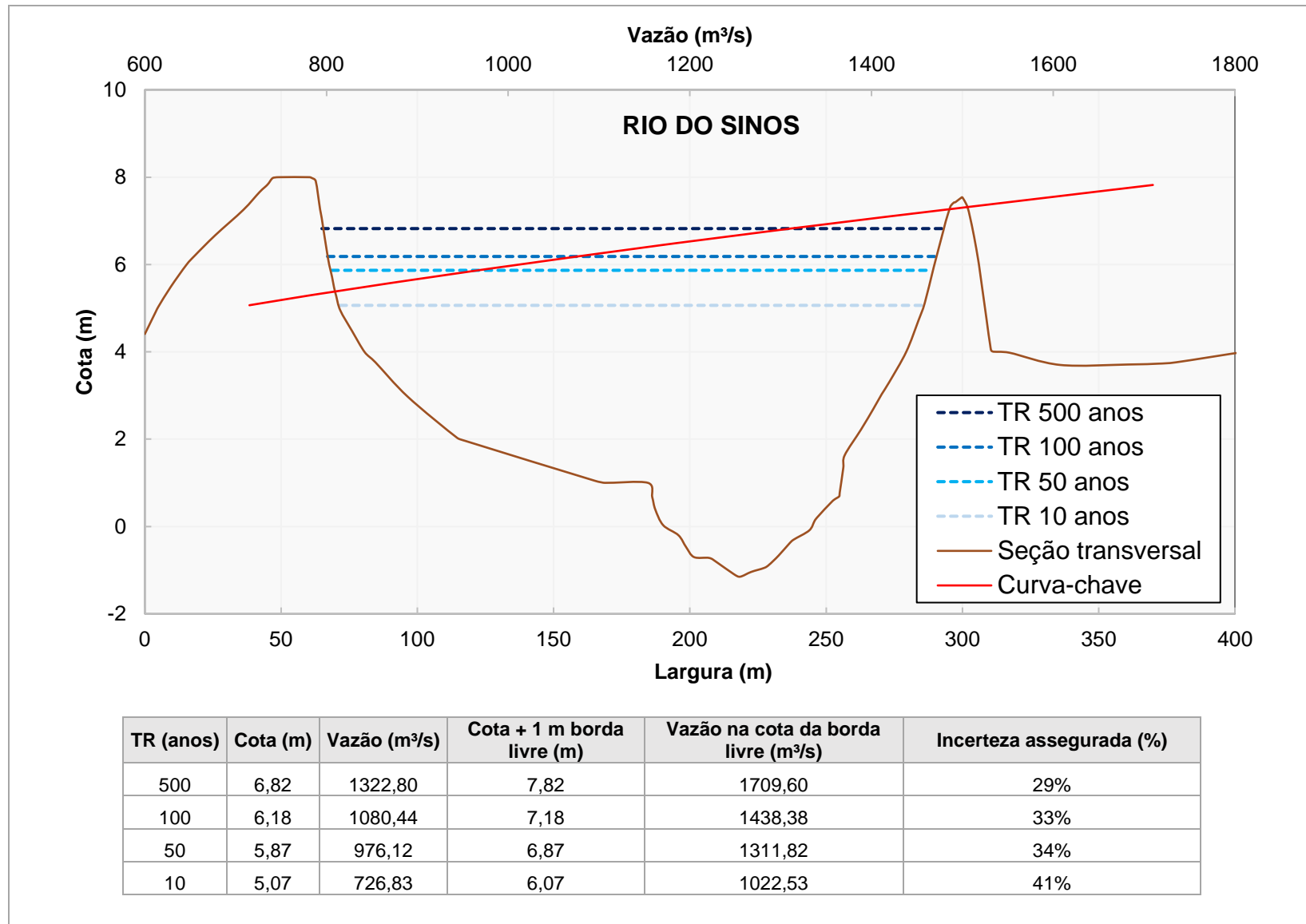




Quadro 9: Resultados para a seção analisada no rio Itajaí-Açu



Quadro 10: Resultados para a seção analisada no rio Amola Faca



Quadro 11: Resultados para a seção analisada no rio do Sinos

## 5 PROPOSIÇÃO DE PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO DE BORDA LIVRE

A partir da consulta bibliográfica e análises efetuadas no âmbito do presente trabalho foi proposta uma abordagem para dimensionamento de borda livre. A proposição é restrita a estruturas de travessias de cursos d'água e diques de proteção contra inundações fluviais e visa incorporar objetividade na definição deste parâmetro. A abordagem definida não é aplicável a estruturas como reservatórios ou diques de proteção em áreas costeiras, tendo em vista que tais estruturas abrangem um conjunto distinto de processos a serem considerados.

Ao definir a borda livre o projetista pode optar pela adoção de valores diferentes daqueles apresentados em recomendações já consolidadas em manuais institucionais, desde que tecnicamente justificado. O procedimento proposto neste trabalho não visa substituir tais recomendações e deve ser interpretado como uma análise complementar. Seu objetivo é fornecer diretrizes orientativas quando verificada a necessidade de adoção de valores diferentes das recomendações institucionais.

### 5.1 FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA

A borda livre é um parâmetro de projeto que se divide em duas componentes: (1) incertezas associadas aos estudos de níveis máximos de cheia; (2) processos físicos como passagem de galhadas, recalques estruturais e incidência de ondas. O procedimento apresentado refere-se à primeira componente. A segunda componente deverá ser tratada à parte pelo projetista e não está incorporada na presente abordagem.

O princípio associar a borda livre à qualidade dos estudos hidrológicos e hidráulicos já é adotado por recomendações como a de Environmental Agency (2017), desenvolvido para o contexto de estudos de inundações urbanas. As recomendações são baseadas em uma avaliação qualitativa dos estudos associados. A incorporação do aspecto quantitativo da incerteza mostra-se relevante no sentido de incorporar maior objetividade na definição deste parâmetro.

A abordagem é fundamentada no pressuposto de que a vazão de projeto é a componente dos estudos que incorpora a maior incerteza na definição da cota de implantação de uma estrutura. No entanto, deve-se destacar que a validade de tal

pressuposto está condicionada a uma avaliação da possibilidade de descarte das demais componentes de incerteza, conforme discutido no item 5.4.

A magnitude desta incerteza varia de acordo com a metodologia empregada e qualidade dos dados de base. Desta forma, valores fixos de borda livre (usualmente empregados) podem resultar em uma incerteza assegurada diferente de acordo com as características do trecho de interesse.

As características do trecho de interesse em que a estrutura hidráulica estará situada são implicitamente representadas na curva-chave de uma seção considerada representativa da estrutura. A incerteza assegurada para um determinado valor de borda livre pode ser obtida a partir da análise da curva-chave da seção de interesse. A curva-chave consiste em uma forma prática e visual para apresentação dos resultados da análise.

A maior complexidade deste procedimento consiste em atribuir à vazão de projeto um percentual de incerteza. Conforme apresentado ao longo do referencial, são inúmeros fatores que influenciam o grau de confiança da vazão e o efeito combinado das incertezas é de difícil avaliação. Ainda assim, sabe-se que as componentes de incerteza não são cumulativas (COLLET et al., 2017).

## 5.2 SÍNTESE DO PROCEDIMENTO

Na Figura 11 são apresentadas as etapas definidas para o procedimento proposto. Assume-se que os estudos hidrológicos e hidráulicos da estrutura já encontram finalizados, restando a etapa de definição da borda livre.

Propõe-se que a borda livre adotada seja igual ao acréscimo de nível d'água promovido pela incerteza na vazão de projeto, mantendo um valor mínimo de 1,0 m. A manutenção deste valor mínimo decorre de sua ampla adoção no meio técnico, além de garantir uma segurança mínima, dada as limitações atuais desta proposição.

A etapa principal consiste na atribuição de um fator de incerteza ( $U_{Qp}$ ) em relação à vazão de projeto ( $Q_p$ ). Os valores de referência e procedimentos propostos, bem como suas respectivas considerações, são tratados no item 5.3.

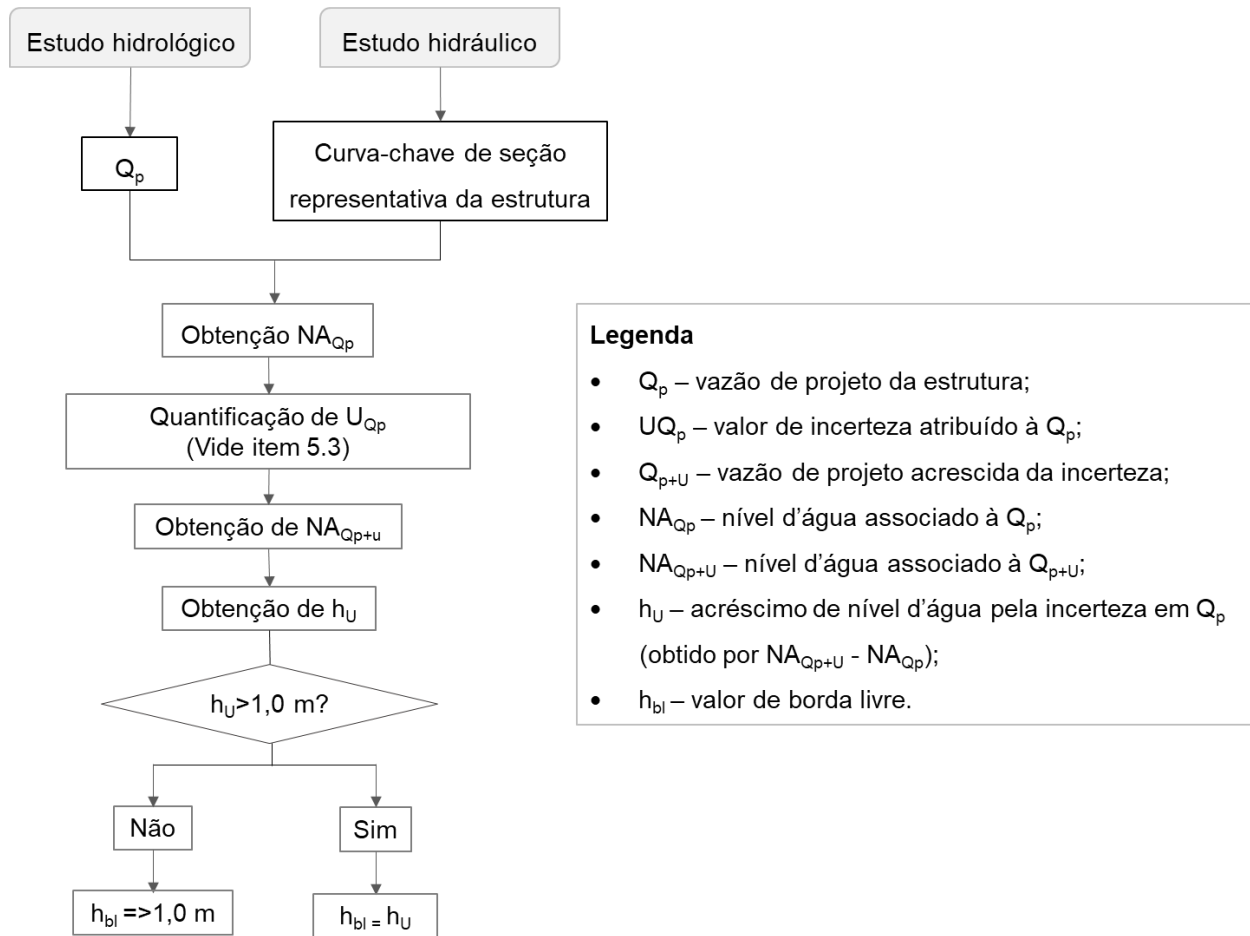


Figura 11: Síntese do procedimento proposto para dimensionamento de borda livre

### 5.3 VALORES DE REFERÊNCIA E PROCEDIMENTOS PROPOSTOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE INCERTEZA

O valor da incerteza na vazão do projeto é uma condição específica de cada caso e encontra-se associado à metodologia empregada e dados utilizados como base no estudo hidrológico. Conforme apresentado ao longo da revisão bibliográfica, verificam-se avanços expressivos em trabalhos recentes referentes a abordagens para tal quantificação. No entanto, as metodologias utilizadas geralmente são complexas e por vezes desenvolvidas para aplicações específicas e de contexto acadêmico. Esta condição até então dificulta a ampliação de aplicações práticas no âmbito de projetos de engenharia.

Dado o contexto acima descrito, a consolidação de valores de referência e proposição de procedimentos práticos para quantificação da incerteza em vazões de projeto apresenta grande relevância para fins práticos de dimensionamento de borda livre. Os valores de referência e procedimentos recomendados no âmbito da presente

abordagem são sintetizados no Quadro 12, separados por método de estimativa da vazão de projeto.

Conforme observa-se, as proposições são restritas a um conjunto limitado de fatores de incerteza ou valores médios de um determinado método, tendo como principal característica sua finalidade prática. No item 5.4 são apresentadas as considerações quanto às componentes de incerteza não contempladas no Quadro 10. Deve-se destacar que tais proposições não exigem o projetista de uma avaliação técnica das componentes de incerteza associadas ao seu projeto, bem como a avaliação da adequabilidade das recomendações aqui apresentadas. Adicionalmente, caso haja possibilidade, este poderá desenvolver uma análise de incertezas mais robusta sobre a vazão de projeto calculada.

Quadro 12: Valores de referência e procedimentos propostos para quantificação de incerteza na vazão de projeto

Método de cálculo		Componente de incerteza considerada	Procedimento/valor de referência proposto para estimativa da incerteza na vazão de projeto ( $U_{Qp}$ )	Observações																																																		
AFL		Intervalos de confiança estatísticos	Obtenção de intervalos de confiança obtidos por métodos estatísticos, que consideram os parâmetros e extensão da série. Para tanto, consultar as formulações apresentadas por Nathettini e Pinto (2009) ou USGS (1982). Esta última tem como vantagem possuir formulação implementada no programa PeakFQ, publicamente disponível.	Para uma avaliação preliminar poderão ser considerados os valores medianos obtidos por séries sintéticas de Oliveira (2013):																																																		
				<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Extensão da série (anos)</th> <th colspan="3">UQp (%) para cada TR</th> </tr> <tr> <th>50 anos</th> <th>100 anos</th> <th>200 anos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>10</td><td>79%</td><td>82%</td><td>84%</td></tr> <tr><td>20</td><td>57%</td><td>59%</td><td>61%</td></tr> <tr><td>30</td><td>47%</td><td>49%</td><td>51%</td></tr> <tr><td>40</td><td>41%</td><td>43%</td><td>44%</td></tr> <tr><td>50</td><td>37%</td><td>38%</td><td>40%</td></tr> <tr><td>60</td><td>34%</td><td>35%</td><td>37%</td></tr> <tr><td>70</td><td>31%</td><td>33%</td><td>34%</td></tr> <tr><td>80</td><td>29%</td><td>31%</td><td>32%</td></tr> <tr><td>90</td><td>28%</td><td>29%</td><td>30%</td></tr> <tr><td>100</td><td>26%</td><td>27%</td><td>29%</td></tr> </tbody> </table>				Extensão da série (anos)	UQp (%) para cada TR			50 anos	100 anos	200 anos	10	79%	82%	84%	20	57%	59%	61%	30	47%	49%	51%	40	41%	43%	44%	50	37%	38%	40%	60	34%	35%	37%	70	31%	33%	34%	80	29%	31%	32%	90	28%	29%	30%	100	26%	27%	29%
				Extensão da série (anos)	UQp (%) para cada TR																																																	
					50 anos	100 anos	200 anos																																															
				10	79%	82%	84%																																															
				20	57%	59%	61%																																															
				30	47%	49%	51%																																															
				40	41%	43%	44%																																															
				50	37%	38%	40%																																															
				60	34%	35%	37%																																															
70	31%	33%	34%																																																			
80	29%	31%	32%																																																			
90	28%	29%	30%																																																			
100	26%	27%	29%																																																			
Análise agrupada		Incerteza média global do método	$U_{Qp} = 50\%$	Ordem de grandeza média obtida por Rahman et. al 2015).																																																		
AFR	Transferência direta por relação entre áreas	Intervalos de confiança estatísticos	$\left\{ \begin{array}{l} -0,5 \leq \frac{A_1}{A_2} \leq 2; \text{ adotar } U_{Qp} \text{ da AFL} \\ \text{Para demais condições, o método não é recomendado} \end{array} \right.$	<p>Considera-se que na faixa de áreas apresentada por DNIT (2005) a incerteza na função de transferência pode ser desprezada. Assume-se a incerteza associada à série adotada na estação de base.</p> <p>Ressalta-se que a relação é referente a áreas incrementais, ou seja, a estrutura projetada e a estação fluviométrica situam-se no mesmo curso d'água.</p>																																																		



Método de cálculo	Componente de incerteza considerada	Procedimento/valor de referência proposto para estimativa da incerteza na vazão de projeto ( $U_{Qp}$ )	Observações
Chuva-vazão (simulação de eventos com hidrogramas unitários)	Incerteza média global do método	Obtenção de $Q_{p+U}$ a partir da condição mais conservadora de CN, caso tal condição não esteja sendo considerada. Caso já considerada, recomenda-se então a adoção do valor de borda livre mínimo de 1,0 m ( $h_{bl} = 1,0$ m)	Observa-se certo consenso técnico na superestimativa promovida por tais métodos quando aplicados com equações IDF. Propõe-se que a incerteza seja avaliada a partir da obtenção da vazão de projeto com a condição mais conservadora do parâmetro CN e comparada à vazão de projeto original.

## 5.4 CONSIDERAÇÕES QUANTO A COMPONENTES DE INCERTEZA NÃO CONSIDERADAS

### 5.4.1 Componentes hidrológicas

Conforme listado ao longo deste trabalho, cada método de estimativa de vazão de projeto apresenta diversas componentes de incerteza. A avaliação combinada de todas estas componentes é complexa e requer métodos estatísticos complexos, condição que dificulta sua aplicação na prática. O procedimento proposto limitou-se a recomendações quanto às componentes de incerteza consideradas de maior influência no resultado (vazão de projeto) de cada método.

Listam-se três principais fatores que culminaram na desconsideração de outras componentes de incerteza no procedimento proposto:

1. Influência pouco significativa quando comparada às demais componentes de incerteza associadas ao método;
2. Possibilidade de minimização da componente de incerteza;
3. Ausência de conclusões claras quanto ao efeito de tal componente na vazão de projeto.

No Quadro 13 são sintetizadas considerações gerais quanto a componentes de incerteza de cada método não incorporadas no procedimento proposto. São apresentadas as justificativas para tal, bem como discutidos procedimentos recomendáveis para minimização de sua influência na vazão de projeto.

Quadro 13: Considerações quanto a incertezas da vazão de projeto não consideradas

Método de cálculo da vazão de projeto	Componente de incerteza	Considerações
AFL	Incerteza nas leituras de régua	Esta componente geralmente é negligenciada, tendo em vista que valores esperados são de pequena magnitude. Erros grosseiros podem ser corrigidos a partir da análise de processos tradicionais de consistência fluviométrica. Em ANA (2012) são apresentadas orientações para consistência de séries fluviométricas.
	Curva-chave (interpolação e extrapolação)	O efeito da incerteza da curva-chave nas análises de frequência é de avaliação complexa e a influência desta componente na vazão de projeto está diretamente relacionada à característica da seção em que a estação fluviométrica está situada. Tratando-se de vazões máximas, sabe-se que esta componente deve apresentar relevância, considerando que vazões

Método de cálculo da vazão de projeto	Componente de incerteza	Considerações
		<p>máximas anuais comumente situam-se no trecho extrapolado da curva-chave.</p> <p>A maior parte dos estudos desenvolvidos para esta avaliação abrange uma única estação fluviométrica. No estudo de larga escala desenvolvido por Rahman <i>et al.</i> (2015) não foram obtidas relações claras do efeito desta componente com as características das séries avaliadas. Considerando o exposto, bem como o fato da componente amostral apresentar influência maior em relação à componente da curva-chave (STEINBAKK <i>et al.</i>, 2016; VIEIRA <i>et al.</i>, 2022), esta componente não foi considerada na abordagem proposta no presente trabalho.</p> <p>Esta limitação não exige o projetista de uma avaliação cautelosa das curvas-chave utilizadas em seu respectivo estudo. As análises tradicionais de consistência fluviométrica podem contribuir para redução do efeito da incerteza desta componente, comparando as vazões observadas com estações fluviométricas de apoio, bem como avaliando o trecho extrapolado com resultados de diferentes métodos de extrapolação (ANA, 2012).</p>
	Escolha da função de distribuição de probabilidade	A incerteza associada a esta componente geralmente não é considerada. Um exame cauteloso dos dados associado quanto à aderência a uma determinada função de distribuição de probabilidade minimizará o efeito desta componente de incerteza (BEVEN & HALL, 2014)
	Método de estimativa dos parâmetros da função de distribuição de probabilidade	Os procedimentos de estimativa de parâmetros comumente usados incluem métodos de momentos, máxima verossimilhança, momentos L e métodos Bayesianos. Não foram obtidas conclusões específicas quanto à recomendação do uso de um ou outro método. Naghettini e Pinto (2007) apresentam considerações gerais quanto ao uso dos métodos de Máxima Verossimilhança, Momentos e Momentos L.
	Conversão de vazão média diária para vazão máxima instantânea	Esta componente ganha relevância sobretudo no contexto nacional, considerando que a maior parte da rede fluviométrica nacional dispõe de leituras médias diárias de vazão. Espera-se que a vazão máxima instantânea se aproxime da vazão média diária na medida em que a área da bacia aumenta. Não foram encontrados estudos técnicos avaliando a incerteza desta componente. Steiner e Fill (2003) apresentam fórmulas para estimativa da vazão máxima instantânea, cabendo ao projetista optar pelo uso da mais adequada com base nas características da sua bacia de contribuição.
AFR (análise agrupada)	Homogeneidade das estações	Entende-se que esta componente pode ser minimizada ao efetuar-se uma avaliação preliminar das características fisiográficas bacia de contribuição de cada estação inserida no agrupamento (p. ex.: uso do solo, tipo de solo, característica de precipitações máximas, etc).

Método de cálculo da vazão de projeto	Componente de incerteza	Considerações																				
	Incerteza associada à AFL de cada estação	<p>Avaliações desta natureza requerem abordagens complexas, como simulações de Monte Carlo, que inviabilizam uma aplicação para fins práticos.</p> <p>Recomendações como priorização de estações com séries longas (&gt;30 anos), bem como a realização de consistência das séries fluviométricas são fundamentais para obtenção de estimativas por AFR com boa qualidade.</p> <p>O conjunto de estações fluviométricas utilizados na regionalização também pode ser avaliado, de forma qualitativa, a partir da verificação do grau de extrapolação superior da curva-chave. Tucci (2017) apresenta os seguintes critérios para atribuição de notas às estações fluviométricas:</p> <table border="1" data-bbox="874 808 1190 1106"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Nota</th> <th colspan="2">Extrapolação</th> </tr> <tr> <th>H</th> <th>Q</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>≤1,15</td> <td>≤1,15</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>≤1,25</td> <td>≤1,50</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>≤1,75</td> <td>≤2,50</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>≤2,00</td> <td>&lt;3,00</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>&gt;2,00</td> <td>≥3,00</td> </tr> </tbody> </table> <p><math>H = \frac{C_o}{C_m}</math>; <math>Q = \frac{Q_o}{Q_m}</math>; em que <math>C_o</math> é a maior cota observada e <math>Q_o</math> a respectiva vazão associada a <math>Q_o</math>; <math>C_m</math> é a maior cota medida e <math>Q_m</math> a respectiva vazão associada a <math>Q_m</math>.</p> <p>O projetista, ao deparar-se com um conjunto de estações com qualidade ruim poderá optar pela adoção de valores mais conservadores de borda-livre.</p>	Nota	Extrapolação		H	Q	A	≤1,15	≤1,15	B	≤1,25	≤1,50	C	≤1,75	≤2,50	D	≤2,00	<3,00	E	>2,00	≥3,00
Nota	Extrapolação																					
	H	Q																				
A	≤1,15	≤1,15																				
B	≤1,25	≤1,50																				
C	≤1,75	≤2,50																				
D	≤2,00	<3,00																				
E	>2,00	≥3,00																				
AFR (transferência direta por relação entre áreas)	Magnitude da relação entre áreas de drenagem	O efeito desta componente cresce na medida em que a relação entre a área de drenagem da seção da estação de base e da seção de interesse difere da unidade (considerando que ambas as seções se situam em um mesmo curso d'água). No procedimento proposto esta componente foi desconsiderada quando aplicada a restrição de relação de áreas proposta em DNIT (2005). No entanto, caberá ao projetista a avaliação da área incremental entre ambas as seções e a identificação da existência ou não de contribuições relevantes que justifiquem uma reavaliação.																				
Chuva-vazão	Estrutura do modelo	A incerteza estrutural é inerente ao modelo hidrológico, tendo em vista que este incorpora uma série de simplificações (SANTOS et. al., 2001). A influência desta componente é de difícil quantificação e ainda pouco abordada no contexto de vazões de projeto.																				
	Chuva de projeto	Conforme destacado no item 2.4.3.2, há um entendimento de que no caso do processo tradicional, onde as chuvas de projeto são derivadas de equações IDF, há uma superestimativa do evento e consequentemente, superestimativa nas vazões de projeto (DESBORDES, 1982).																				

Método de cálculo da vazão de projeto	Componente de incerteza	Considerações
	Chuva de projeto	Considerando isto, entende-se que tal superestimativa incorpora, de forma implícita, conservadorismo em vazões de projeto obtidas por esta abordagem.

Por fim, listam-se ainda as incertezas referentes aos impactos provocados por alterações climáticas. Estudos como os de Adam et al. (2015) e Dela Costa (2022) avaliaram estes impactos em bacias brasileiras utilizando projeções climáticas de modelos globais e regionais integradas a um modelo hidrológico. Brêda et al. (2020) desenvolveram análises similares, no entanto, em nível continental para rios de grande porte na América do Sul. Nestas condições, recomenda-se a consulta de estudos locais, caso disponíveis, para avaliação de conclusões quanto ao impacto deste fator nas vazões de pico na bacia de interesse.

#### 5.4.2 Componentes hidráulicas

Usualmente são empregados modelos hidráulicos para obtenção de níveis máximos associados a uma vazão de projeto. Uma enorme quantidade de dados é necessária para a representação do trecho analisado, dentre os quais: topografia e batimetria do rio, cadastro de estruturas hidráulicas, dados de uso do solo para mapear coeficientes de rugosidade, bem como a definição de condições de contorno (JUNG e MERWADE, 2015). Estes dados possuem erros relacionados que podem ser difíceis de quantificar.

Esta aplicação incorporará um conjunto distinto de incertezas, as quais podem estar relacionadas à estrutura do modelo, parâmetros do modelo, dados topobatimétricos e condições de contorno (BRANDIMARTE e BALDASSARE, 2012). Na sequência são listadas as principais considerações acerca destas componentes.

- **Parâmetros do modelo:** A incerteza na vazão de entrada – discutida ao longo da dissertação - e os parâmetros do modelo são considerados os principais fatores que influenciam na incerteza global dos perfis de inundação obtidos por modelagem hidráulica (BRANDIMARTE e BALDASSARE, 2012). O parâmetro comumente adotado para calibração de modelos hidráulicos é o coeficiente de

Manning (BESSAR et al., 2020). O ajuste deste parâmetro tipicamente compensa outras fontes de erro, como a estrutura do modelo, dimensões de malha e dados topobatimétricos deficientes (BESSAR et al., 2020). Trabalhos como os de Brandimarte e Baldassare (2012) e Jung e Merwade (2015) constaram a menor relevância da incerteza do coeficiente de rugosidade em comparação à incerteza na vazão de entrada e dados topobatimétricos do modelo.

No contexto do presente procedimento, a incerteza associada aos parâmetros do modelo não foi considerada. A incerteza associada ao coeficiente de rugosidade pode ser reduzida quando da disponibilidade de dados de nível para calibração do parâmetro ou a partir da adequada caracterização do trecho de análise. Na ausência destas condições, pode ser desenvolvida a análise de sensibilidade deste parâmetro e, caso necessário, a adoção de valores conservadores.

- **Dados topográficos e batimétricos:** As incertezas associadas a estes dados podem ser atribuídas à resolução espacial e precisão vertical das informações e aos diferentes métodos disponíveis para interpolação espacial dos dados brutos para gerar modelos digitais de terreno (MDTs) (PINHEIRO et al., 2019). A incerteza destes dados foi avaliada no contexto da elaboração de mapas de inundação em trabalhos como os de Cookd e Merwade (2015), Pinheiro et al. (2019) e Zambrano et al. (2020).

Avaliações específicas no contexto de modelagem de estruturas hidráulicas como pontes e diques ainda são escassas. Para fins de projeto de estruturas como pontes e diques, recomenda-se que sejam utilizados levantamentos locais dos trechos de interesse e com adequada resolução. Esta condição minimizará a incerteza associada a esta componente.

- **Condições de contorno:** A vazão de projeto geralmente é adotada como condição de montante e as componentes de incerteza a ela associadas já foram apresentadas ao longo desta dissertação. Com relação à condição de jusante, as avaliações disponíveis são escassas. Conforme destacam Domeneghetti et al. (2013), o efeito da condição de jusante na área de interesse é reduzido, se não completamente removido, estendendo o modelo hidráulico até uma distância considerável a jusante da área de interesse.

## 5.5 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O procedimento proposto foi aplicado nos seis trechos avaliados para fins exemplificativos. Considerando que os trechos dispõem de estações fluviométricas, adotou-se como componente de incerteza a extensão da série histórica de cada estação e a curva-chave sintética gerada. Deve-se destacar que, em casos reais, a implantação da estrutura, seja um dique ou uma ponte, modificará a curva-chave natural da seção, e esta modificação deverá ser considerada.

Adotando como referência a vazão com TR de 100 anos, foram calculados intervalos com 95% de confiança para as vazões, obtidas conforme o item 3.2.3, a partir da metodologia apresentada por Tucci (2017). Os limites superior e inferior do intervalo de confiança para cada estação são apresentados junto ao ajuste da função de distribuição de probabilidades no Apêndice A. Para o cálculo de  $U_{Qp}$  foi adotado o valor resultante do limite superior do intervalo de confiança.

Os resultados para as seis seções avaliadas são sintetizados na Tabela 4. O valor de  $U_{Qp}$  variou de 9 a 23%. O resultado obtido para a seção situada no rio Turvo ganha destaque, para qual foi atribuída a característica espaiada. O acréscimo de nível decorrente da incerteza foi de 7 cm em decorrência da menor sensibilidade desta seção para alterações de nível em decorrência da vazão de projeto. O máximo valor verificado foi de 0,53 m na seção do rio Bonito.

Tabela 4: Exemplo de aplicação do procedimento proposto para dimensionamento de borda-livre

Nome	Código	$Q_p$ (m <sup>3</sup> /s)	$NA_{Qp}$ (m)	$U_{Qp}$ (%)	$Q_{p+U}$ (m <sup>3</sup> /s)	$NA_{Qp+U}$ (m)	$h_u$ (m)	$h_{bl}$ adotado (m)
Rio Bonito	71300000	429,6	839,41	9%	467,2	839,59	0,18	1,00
Barra do rio Pardo	72870000	1038,8	522,97	23%	1280,8	523,35	0,38	1,00
Jararaca	83120000	512,5	396,26	16%	594,7	396,79	0,53	1,00
Warnow	83520000	3510,77	84,89	9%	3830,6	85,27	0,38	1,00
Turvo	84949000	502,2	28,42	10%	552,8	28,49	0,07	1,00
São Leopoldo	87382000	1080,4	6,18	11%	1201,8	6,49	0,31	1,00

**Legenda:**

$Q_p$  – vazão de projeto da estrutura;  $U_{Qp}$  – valor de incerteza atribuído à  $Q_p$ ;  $Q_{p+U}$  – vazão de projeto acrescida da incerteza;  $NA_{Qp}$  – nível d'água associado à  $Q_p$ ;  $NA_{Qp+U}$  – nível d'água associado à  $Q_{p+U}$ ;  $h_u$  – acréscimo de nível d'água pela incerteza em  $Q_p$ ;  $h_{bl}$  – borda livre adotada.

Para todas as seções avaliadas o incremento de nível decorrente da incerteza na vazão de projeto ( $h_u$ ) foi inferior a 1,0 m. Desta forma, de acordo com o procedimento proposto, nestes casos recomenda-se a adoção do valor mínimo de 1,0 m.

## 6 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliada a segurança promovida por valores fixos de borda livre frente às incertezas associadas à vazão de projeto. Em um segundo momento foi proposto um procedimento para dimensionamento deste parâmetro.

A revisão bibliográfica desenvolvida teve por objetivo consolidar as principais componentes de incerteza associadas a cada método, bem como obter valores de referência de tais componentes. Os estudos consultados, em sua maioria, são restritos a uma única metodologia de estimativa de vazão máxima (AFL, AFR ou chuva-vazão) e por vezes restringem-se à avaliação de componentes específicas da incerteza. Adicionalmente, as técnicas de avaliação disponíveis na literatura apresentam grande complexidade. Apesar de tais complexidades, a revisão resultou no levantamento de magnitudes de incerteza norteadoras e conclusões relevantes quanto a determinadas componentes.

Para os casos analisados nesta dissertação, a adoção valores fixos de borda livre resultou em uma variação expressiva da incerteza assegurada em relação à vazão de projeto (21% a >200%). A partir destas análises e do referencial bibliográfico consultado, foi proposto um procedimento para dimensionamento da borda livre. Este procedimento apresenta avanços em relação a abordagem tradicional (valores fixos) pelo seguinte aspecto:

- Fundamenta-se em análises técnicas explícitas que podem ser avaliadas pelo projetista e futuramente aprimoradas na medida em que se aprimoram os métodos de quantificação de incertezas;
- Fornece subsídios ao projetista para identificar aspectos frágeis do estudo hidrológico associado à estrutura;
- Incorpora maior objetividade na quantificação do parâmetro.

A principal limitação consiste no fato deste não avaliar incertezas combinadas do estudo hidrológico e hidráulico da estrutura. Avaliações desta natureza requerem abordagens complexas, que pode inviabilizar sua aplicação para fins práticos. Ademais, parte das componentes de incerteza levantadas podem ser minimizadas ao efetuarem-se avaliações detalhadas dos dados de base do estudo. Neste contexto, as proposições do procedimento apresentado no presente trabalho foram limitadas à avaliação de



componentes específicas, consideradas de maior relevância ao estudo hidrológico da estrutura.

Os seguintes avanços podem ser explorados em trabalhos futuros para aprimoramento do procedimento proposto:

- Consolidação de abordagens práticas para quantificação de incerteza para os três métodos de estimativa de vazão de projeto, sobretudo em estimativas obtidas por AFR, que ainda apresenta poucas avaliações amplas na literatura;
- Ampliação do método para dimensionamento de borda livre em reservatórios;
- Ampliação do método para incorporação da componente da borda livre relacionada a processos físicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, K.; FAN, F.; PONTES, P.; BRAVO, J.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 2015. 999. 10.21168/rbrh.v20n4.p999-1007. 2015.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Orientações para Consistência de Dados Fluviométricos. Brasília: ANA, 2012. 19 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Manual do empreendedor sobre segurança de barragens. Diretrizes para a elaboração de projetos de barragens. Brasília: ANA, 2016. 156 p.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO. Portal Hidroweb. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ASQUITH, W. H.; ROUSSEL, M. C.; VRABEL, J. Statewide analysis of the drainage-area ratio method for 34 streamflow percentile ranges in Texas. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/publication/sir20065286>>. Acesso em: 11 set. 2023.

BELO HORIZONTE (PREFEITURA MUNICIPAL). Parque do Onça. Parte I – Diagnóstico Técnico. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: [https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politica-urbana/2018/planejamento-urbano/parquedoonca\\_diagnostico.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/politica-urbana/2018/planejamento-urbano/parquedoonca_diagnostico.pdf). Acesso em: 28 jun. 2022.

BEMFICA, D. C., GOLDENFUM, J.A., SILVEIRA, A.L.L., 2000. Verificação da Aplicabilidade de Padrões de Chuva de Projeto a Porto Alegre, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 5, N.4, out/dez, pp 5-16.

BEVEN, K.; HALL, J. W. Applied Uncertainty Analysis for Flood Risk Management. 20 nov. 2014.

BLÖSCHL, G. et al. (Ed.). Runoff prediction in ungauged basins: synthesis across processes, places and scales. Cambridge University Press, 2013.

BRANDIMARTE, L, DI BALDASSARRE, G. Uncertainty in design flood profiles derived by hydraulic modelling. *Hydrology Research*, [S. l.], v. 46, p. 753-761, dez. 2012. DOI 10.2166/nh.2011.086. Disponível em: <https://iwaponline.com/hr/article/43/6/753/31505/Uncertainty-in-design-flood-profiles-derived-by>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BRÊDA, J. P. L. F., DIAS, R. C. P., COLLISCHON, W., BRAVO, J. M., SIQUEIRA, V. A., & STEINKE, E. B. Climate change impacts on South American water balance from a

continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, 159(4), 503- 522. 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>.

CGU – CONTROLADORIA GERAL DA UNIÃO. Relatório de Avaliação. Execução e supervisão das obras da segunda ponte sobre o lago Guaíba na BR 116/RS e ba VR 290/RS (Exercício 2020). 2021.

CHOW, V. T. Handbook of applied hidrology. Nova Iorque: McGraw Hill Book Co, 1964.

COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, v. 377, n. 1, p. 131-142, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>.

COLLET, L.; BEEVERS, L.; PRUDHOMME, C. Assessing the Impact of Climate Change and Extreme Value Uncertainty to Extreme Flows across Great Britain. *Water*, v. 9, n. 2, p. 103, 9 fev. 2017.

COSTA, F. DE P. D. et al.. Impact of climate change on the flow of the Doce River basin. *RBRH*, v. 27, p. e34, 2022.

CUNHA, S.; SILVA, F.; MOTA, T.; PINHEIRO, M. Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo de precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 837-848, 2015.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Instrução Técnica. DPO nº 11, de 30/05/2017. São Paulo, 2017. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/site/instrucoestecnicas/>. Acesso em: 11 abr. 2022.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas. São Paulo, DAEE, 2005. 116 p. il.

DAER – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Termo de Referência para Elaboração de Projeto Final de Engenharia de Obra de Arte Especial Sobre o Rio Vacacaí. Porto Alegre, 2020. Disponível em: [http://www.celic.rs.gov.br/uploads/1609853299documentacao\\_tecnica.pdf](http://www.celic.rs.gov.br/uploads/1609853299documentacao_tecnica.pdf). Acesso em 10 set. 2023.

DAER – DEPARTAMENTO AUTÔNOMO DE ESTRADAS DE RODAGEM. Instruções de Serviço para Projetos Finais de Engenharia. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/instrucoes-de-servico-projeto>. Acesso em: 10 set. 2023.

DE MICHELE, C.; ROSSO, R. Uncertainty Assessment of Regionalized Flood Frequency Estimates. *Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG*. 6. 10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:6(453). 2001.

DESBORDES, M. Modelisation en Hydrologie Urbaine: Rechèrches et Applications. Laboratoire d'Hydrologie Mathématique - Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 1982.

DI BALDASSARRE, G., LAIO, F. & MONTANARI, A. Design flood estimation using model selection criteria. Physics and Chemistry of the Earth, Special Issue on Recent developments of statistical tools for hydrological application, v. 34, p. 606–611. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706508003112>. Acesso em: 05 jun. 2022.

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual de projeto de obras-de-arte especiais.1996.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005. 133 p. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/715\\_manual\\_de\\_hidrologia\\_basica.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/715_manual_de_hidrologia_basica.pdf). Acesso em: 11 abr. 2022.

DOMENEGHETTI, A. et al. Probabilistic flood hazard mapping: effects of uncertain boundary conditions. Hydrology and Earth System Sciences, v. 17, n. 8, p. 3127–3140, 5 ago. 2013.

EA – ENVIRONMENTAL AGENCY. Accounting for residual uncertainty: updating the freeboard guide. Bristol, 2017. Disponível em: [https://assets.publishing.service.gov.uk/media/60363e4fd3bf7f0aa86120aa/Accounting\\_for\\_residual\\_uncertainty\\_\\_\\_an\\_update\\_to\\_the\\_fluvial\\_freeboard\\_guide\\_-\\_report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/media/60363e4fd3bf7f0aa86120aa/Accounting_for_residual_uncertainty___an_update_to_the_fluvial_freeboard_guide_-_report.pdf). Acesso em: 11 abr. 2022.

FARQUHARSON, F. A. K.; MEIGH, J. R.; SUTCLIFFE, J. V. Regional flood frequency analysis in arid and semi-arid areas. Journal of Hydrology, v. 138, n. 3-4, p. 487–501, out. 1992.

FEMA – FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. Guidance for flood risk analysis and mapping. Levees. 2020.

FLEISCHMANN, AYAN S.; PAIVA, R. ; COLLISCHONN, W. . Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. JOURNAL OF HYDROLOGY, 2019.

FISCHER, S.; SCHUMANN, A. Handling the stochastic uncertainty of flood statistics in regionalization approaches. Hydrological Sciences Journal-journal Des Sciences Hydrologiques, v. 67, n. 10, p. 1449–1465, 11 jul. 2022.

FRAMJI, K. K. Manual of Flood Control Methods and Practices. International Commission on Irrigation and Drainage. Índia, Delhi, 1983.

GOLDER ASSOCIATES; ASSOCIATED ENGINEERING. Dike design and construction Guide best management practices for British Columbia. 2003, 110 p. Disponível em: [https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/dike\\_des\\_cons\\_guide\\_july-2011.pdf](https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/environment/air-land-water/water/integrated-flood-hazard-mgmt/dike_des_cons_guide_july-2011.pdf). Acesso em: 20 jun. 2022.

GOVERNMENT OF ALBERTA. Transportation. Best Practice Guideline. Freeboard at Bridges. Alberta/Canadá, 2010. Disponível em: <https://open.alberta.ca/dataset/5e101a67-7312-430b-892b-b049f5a6381c/resource/a16fdbaa-1efc-45ac-8932-af16ce21a51c/download/bpg13.pdf>. Acesso em 06 jul. 2022.

HAILEGEORGIS, T.T. AND ALFREDSEN, K. Regional Flood Frequency Analysis and Prediction in Ungauged Basins Including Estimation of Major Uncertainties for Mid-Norway. (2017) Journal of Hydrology: Regional Studies, 9, 104-126. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.11.004>

HIGHWAYS ENGLAND; TRANSPORT SCOTLAND; LLYWODRAETH CYMRU WELSH GOVERNMENT; DEPARTAMENT OF INFRASTRUCTURE. Design of highway structures for hydraulic action. 2020. Disponível em: <https://www.standardsforhighways.co.uk/prod/attachments/559b43dc-82db-46c9-be1a-f2b718e8db62>. Acesso em: 06 jul. 2022.

HU, L. et al. Sensitivity of flood frequency analysis to data record, statistical model, and parameter estimation methods: An evaluation over the contiguous United States. Journal of Flood Risk Management, v. 13, n. 1, 28 nov. 2019.

HUZINGER, L. Freeboard analysis in river engineering and flood mapping – new recommendations. In: SCHLEISS, A. J., SPEERLI, J., PFMMATTER, R. Swiss Competence in River Engineering and Restoration. 1. ed. London: 2014. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/b17134-8/freeboard-analysis-river-engineering-flood-mapping%E2%80%94new-recommendations-hunzinger?context=ubx&refId=f9878c81-cebd-404a-8f07-5527a8ea6719>. Acesso em: 15 abr. 2022.

JACOB, D., REED, D.W., ROBSON, A.J. Choosing a Pooling Group Flood Estimation Handbook. Institute of Hydrology, Wallingford, Rein Unido, 1999.

JICA – JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY. Technical Standards and guidelines for design flood control structures. 2010. Disponível em: [http://whrm-kamoto.com/assets/files/FinalDesignFC\[1\].pdf](http://whrm-kamoto.com/assets/files/FinalDesignFC[1].pdf). Acesso em: 23 mai. 2022.

JUSTON, J.; JANSSON, P.-E.; GUSTAFSSON, D. Rating curve uncertainty and change detection in discharge time series: case study with 44-year historic data from the Nyangores River, Kenya. *Hydrological Processes*, v. 28, n. 4, p. 2509–2523, 18 abr. 2013.

KIANG, J. E. et al. A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. *Water Resources Research*, v. 54, n. 10, p. 7149–7176, out. 2018.

LAL, M.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A.; PANDEY, R. P.; MEENA, P. K.; CHAUDHARY, A.; JHA, R. K.; SHREEVASTAVA, A. K.; KUMAR, Y. Evaluation of the Soil Conservation Service curve number methodology using data from agricultural plots. *Hydrogeology Journal*, v. 25, n. 1, p. 151-167, 2016.

LEANDRO, J.; LEITÃO, J. P.; DE LIMA, J. L. M. P. Quantifying the uncertainty in the Soil Conservation Service flood hydrographs: a case study in the Azores Islands. *Journal of Flood Risk Management*, v. 6, n. 3, p. 279–288, 27 nov. 2012.

MARKIEWICZ, I., BOGDANOWICZ, E., KOCHANEK, K. On the Uncertainty and Changeability of the Estimates of Seasonal Maximum Flows. *Water*, v. 12, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/704>. Acesso em: 23 mai. 2022.

MATO GROSSO - PREFEITURA MUNICIPAL DE POXORÉU. Detalhamento do projeto executivo de obra de arte especial – Revisão 08. VOLUME 01- Relatório do Projeto e Documentos para Concorrências. Poxoréu, 2021. Disponível em: [http://www.sinfra.mt.gov.br/documents/363190/18950210/Memorial+volume+01+-+Poxore%C2%B4u\\_R08.pdf/cea9d6a4-d7f9-cc2f-f2e4-00f0b244d273](http://www.sinfra.mt.gov.br/documents/363190/18950210/Memorial+volume+01+-+Poxore%C2%B4u_R08.pdf/cea9d6a4-d7f9-cc2f-f2e4-00f0b244d273). Acesso em 01 jul. 2022.

MAIDMENT, D. R. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993.

MATO GROSSO. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística - SINFRA. Manual de Diretrizes Básicas para Elaboração, Apresentação, Análise e Aceitação de Anteprojetos de Engenharia para Implantação, Pavimentação e Restauração de Rodovias e Obras de Arte Especiais do Estado do Mato Grosso. 2018. Disponível em: <http://www.sinfra.mt.gov.br/documents/363190/12364049/Manual+de+Anteprojeto.+25.09.pdf/bc2a57be-14d5-f989-c47e-58dd53e56214>. Acesso em: 20 mai. 2022.

MCMILLAN, H.; KRUEGER, T.; FREER, J. Benchmarking observational uncertainties for hydrology: rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, v. 26, n. 26, p. 4078–4111, 11 jun. 2012.

MCMILLAN, H.; SEIBERT, J.; OVERLEIR-PETERSEN, A.; LANG, M.; WHITE, P.; SNELDER, T.; RUTHERFORD, K.; KRUEGER, T.; MASON, R.; KANG, J. How

uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications. *Water resources research*, vol. 53, p. 5220-5228. 2017. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016WR020328>. Acesso em: 15 abr. 2022

MERZ, B.; THIEKEN, A. H. Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, v. 309, n. 1-4, p. 114–132, jul. 2005.

METROPLAN – Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional. Estudo de Alternativas e Projetos para Minimização do Efeito das Cheias na Bacia do Rio dos Sinos. 2018.

NAGHETTINI, M. e PINTO, E.J.A. Hidrologia estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NRCS – NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Conservation and Practice Standard: Dike. Code 356. 2003. Disponível em: [https://www.landscapepartnership.org/networks/working-lands-for-wildlife/target-species/black-duck/information-materials/nrcs-conservation-practices-materials/conservation-practices/delaware-356-dike/index\\_html](https://www.landscapepartnership.org/networks/working-lands-for-wildlife/target-species/black-duck/information-materials/nrcs-conservation-practices-materials/conservation-practices/delaware-356-dike/index_html). Acesso em: 23 mai. 2022.

NERC - Natural Environment Research Council. Flood Studies Report, 5 vols. Londres, 1975.

OLIVEIRA, G. C. Incertezas da Estimativa da Vazão Máxima Diária em Função da Extensão da Série Hidrológica: Resultados Preliminares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. Anais eletrônicos. Disponível em:

[https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=1574&Name=incertezas\\_da\\_estimativa\\_da\\_maxima\\_vazao\\_diaria\\_em\\_funcao\\_da\\_extensao\\_da\\_serie\\_hidrologica\\_resultados\\_preliminares](https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=1574&Name=incertezas_da_estimativa_da_maxima_vazao_diaria_em_funcao_da_extensao_da_serie_hidrologica_resultados_preliminares). Acesso em: 01 mar. 2023.

PARANÁ (GOVERNO DO ESTADO). Síntese do projeto executivo. PR-912 Acesso à Coronel Domingos Soares. Curitiba, 2017. Disponível em: [https://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-02/sinteseedeceldomingossoares.pdf](https://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos_restritos/files/documento/2020-02/sinteseedeceldomingossoares.pdf). Acesso em: 25 jun. 2022.

PINHEIRO, V. B.; NAGHETTINI, M.; PALMIER, L. R.. Uncertainty estimation in hydrodynamic modeling using Bayesian techniques. *RBRH*, v. 24, p. e38, 2019.

RAHMAN, A.; HADDAD, K.; KUCZERA, G.; WEINMANN, P.E. Regional Flood Methods. In *Australian Rainfall & Runoff*; Ball, J., Kuczera, G., Lambert, M., Nathan, R., Bill, W., Sharma, A., Bates, B., Finlay, S., Eds.; Institution of Engineers: Barton, Australia, 2019.

RIO DE JANEIRO. Prefeitura Municipal. Instruções técnicas para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana. 2ª versão. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [ww.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVISAO1.pdf](http://ww.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/8940582/4244719/InstrucaoTecnicaREVISAO1.pdf). Acesso em: 23 mai. 2022.

SANCHES, J. E. O. Fundamentos de hidrologia. 2. ed. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. 2000.

SANTOS, R.S. Hidrogramas de Projeto e Estimativa de Sua Incerteza. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1998. 217p.

SANTOS, R. S.; TUCCI, C.; SILVEIRA, A. L. L.; MENESES FILHO, A. S. Estimativa do hidrograma de projeto com base na incerteza dos parâmetros do modelo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.6, n.1, p.29-41, 2001. Disponível em: [https://abrh.s3.saeast1.amazonaws.com/Sumarios/42/b85ac991a99fc969438ccca564fd7c58\\_12e5c5172106458b6f12f2240096d971.pdf](https://abrh.s3.saeast1.amazonaws.com/Sumarios/42/b85ac991a99fc969438ccca564fd7c58_12e5c5172106458b6f12f2240096d971.pdf). Acesso em: 23 mai. 2022.

SARTORI, A.; HAWKINS, R. H.; GENOVEZ, A. M. Reference curve numbers and behavior for sugarcane on highly weathered tropical soils. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce , v. 137, n. 11, p. 705-711, 2011.

SCHNEIDER, L. E.; MCCUEN, R. H. Statistical Guidelines for Curve Number Generation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 131, n. 3, p. 282–290, jun. 2005.

SDE - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Estudos dos Instrumentos de Gestão de e Recursos Hídricos para o Estado de Santa e Catarina e Apoio para sua Implementação. Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do estado de santa catarina. 2006. Disponível em: [https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib\\_top/DHRI/Legislacao/estudo\\_de\\_regionalizacao\\_hidrologica.pdf](https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/DHRI/Legislacao/estudo_de_regionalizacao_hidrologica.pdf). Acesso em 18 jan. 2023.

SEFIONE, A. L. Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curvas-chave. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. 96p.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. Revista Brasileira de Recursos hídricos, v.10, n.1, p.5-23, 2005.

STEINBAKK, G. H. et al. Propagation of rating curve uncertainty in design flood estimation. Water Resources Research, v. 52, n. 9, p. 6897–6915, set. 2016.



STEINER, A.; FILL, H. Estimativa do Hidrograma Instantâneo e da Vazão Máxima de Enchentes a Partir de Vazões Médias Diárias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 3, p. 17–26, 2003.

TERESINA (PREFEITURA MUNICIPAL). Avaliação das condições de estabilidade e segurança dos diques dos rios Poti e Parnaíba. Relatório Técnico Final. Teresina, 2016. Disponível em: <https://semplan.pmt.pi.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2019/09/Painel-de-Seguranca-2016.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

TIMBÓ. Projeto de Implantação do Anel Viário – Rua Araponguinhas. Timbó, 2015. Disponível em: <https://www.timbo.sc.gov.br/upload/licitacoes/Projeto%20da%20Ponte%20sobre%20o%20Rio%20Benedito.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Editora da Universidade. UFRGS. 2ª edição. Porto Alegre. 2005.

TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Editora da Universidade. UFRGS. 2ª edição. Porto Alegre. 2001.

TUCCI, C.E.M. Regionalização de vazões. Editora da Universidade. UFRGS. 1ª edição. Porto Alegre. 2017.

UCAR – UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH. Flood Frequency Analysis. Disponível em: [https://download.comet.ucar.edu/memory-stick/hydro/basic\\_int/flood\\_frequency/print.htm](https://download.comet.ucar.edu/memory-stick/hydro/basic_int/flood_frequency/print.htm). Acesso em: 05 ago. 2023.

USACE - UNITED STATES ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERS. Engineering and Design – Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies. Technical Report. 1996.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). HEC-RAS: river analysis system, user's manual. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2002.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. PeakFQ. Disponível em: <https://water.usgs.gov/software/PeakFQ/>. Acesso em 15 ago. 2023.

VIEIRA, L. M. DA S. et al. Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis. *RBRH*, v. 27, 2022.

VOORHEES, M. L.; WENZEL, H. G. Urban design-storm sensitivity and reliability. *Journal of Hydrology*, v. 68, n. 1-4, p. 39–60, fev. 1984.

YAN, L. et al. Design flood estimation with varying record lengths in Norway under stationarity and nonstationarity scenarios. *Hydrology Research*, v. 52, n. 6, p. 1596–1614, 14 jul. 2021.

JUNG, Y.; MERWADE, V. Estimation of uncertainty propagation in flood inundation mapping using a 1-D hydraulic model. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 4, p. 624-640, 2015. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10185>.

WARA, C. et al. Development of River Rating Curves for Simple to Complex Hydraulic Structure Based on Calibrated HEC-RAS Hydraulic Model, in Kwale, Coastal Kenya. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 11, n. 04, p. 468–490, 2019.

ZAMBRANO, F. C., KOBAYAMA, M., PEREIRA, M. A. F., MICHEL, G. P., & FAN, F. M.. (2020). Influence of different sources of topographic data on flood mapping: urban area São Vendelino municipality, southern Brazil. *RBRH*, 25, e40. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190108>.

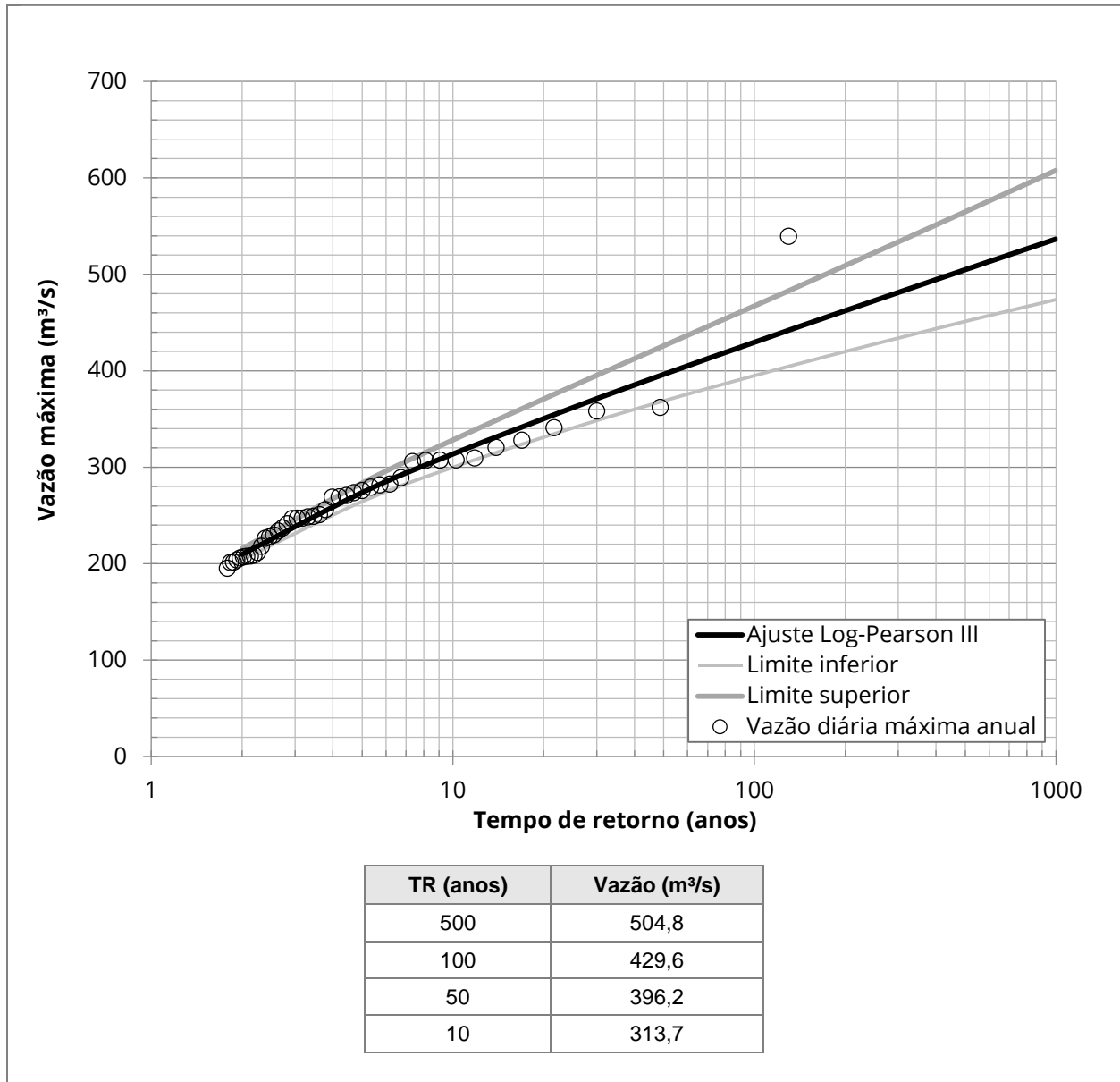
## APÊNDICE A. AJUSTE DAS SÉRIES DE VAZÕES MÁXIMAS ANUAIS À DISTRIBUIÇÃO LOG-PEARSON TIPO III

### Estação fluviométrica Rio Bonito (71300000)

Tabela 5: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Bonito (71300000)

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1942	144,76	1981	226,49
1943	247,22	1982	204,00
1944	88,17	1983	362,27
1945	82,28	1984	341,08
1946	183,68	1985	147,56
1947	153,49	1986	188,95
1948	207,27	1987	269,18
1949	152,07	1988	185,43
1950	201,33	1989	250,90
1951	137,50	1990	539,65
1952	155,76	1991	182,22
1953	140,84	1992	307,31
1954	281,69	1993	307,63
1955	228,00	1994	246,91
1956	195,42	1995	207,87
1957	279,49	1996	174,67
1958	208,17	1997	256,15
1959	155,76	1998	234,07
1960	158,03	1999	173,22
1961	249,37	2000	241,39
1962	177,28	2001	306,99
1963	247,22	2002	164,59
1964	119,04	2003	358,34
1965	309,75	2004	201,63
1966	273,63	2005	306,04
1967	193,85	2006	167,18
1968	179,77	2007	157,46
1969	136,11	2008	211,75
1970	153,67	2009	237,12
1971	167,44	2010	206,08
1972	218,20	2011	320,74
1973	208,86	2012	141,40
1974	229,88	2013	282,63
1975	194,46	2014	269,49
1976	248,53	2015	275,94
1977	289,24	2016	171,92
1978	139,17	2017	328,12
1979	174,67	2018	185,99

Ano	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)	Ano	Vazão máxima (m <sup>3</sup> /s)
1980	270,74	2019	186,43

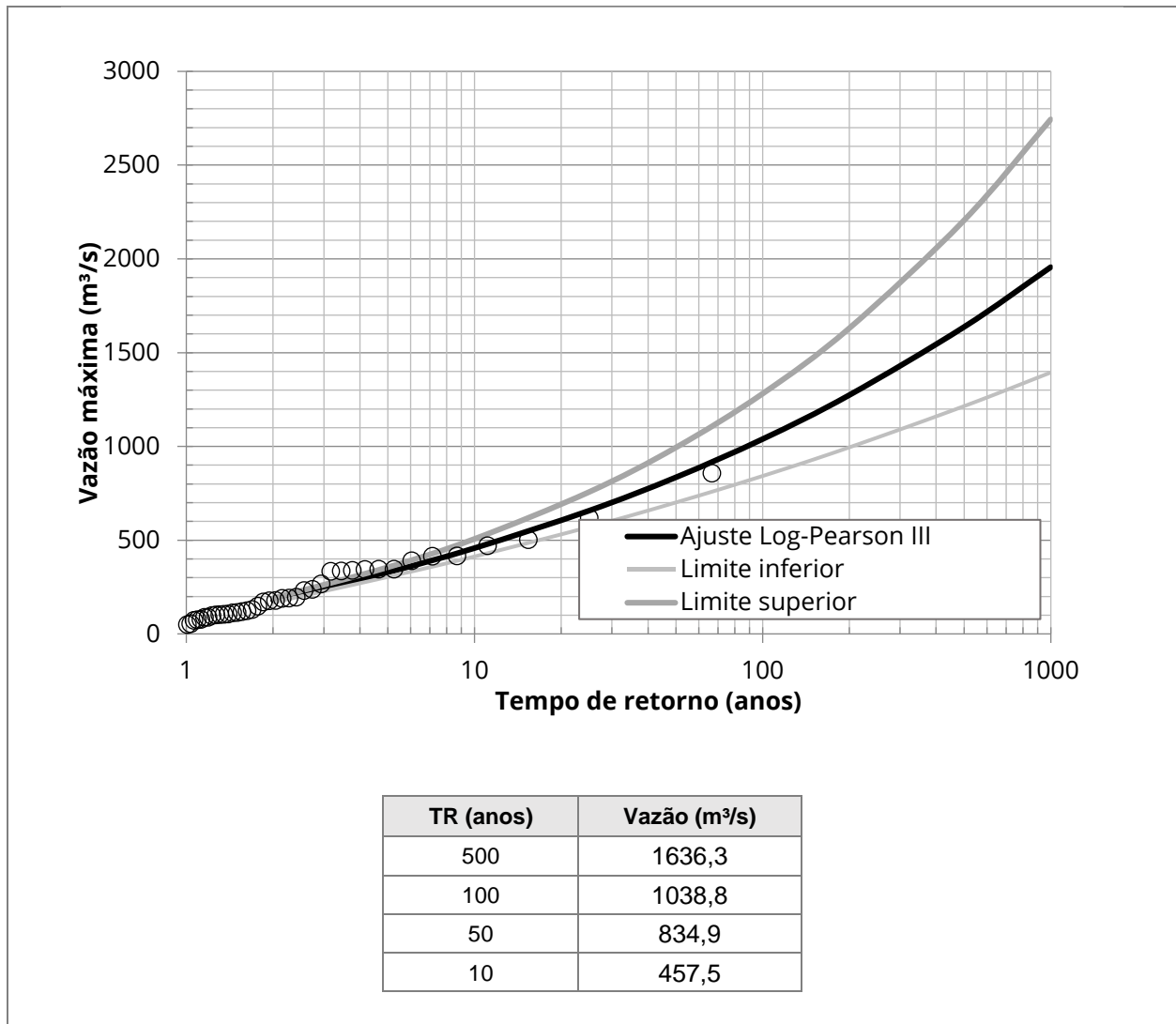


Quadro 14: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Bonito (71300000)

### Estação fluviométrica Barra do Rio Pardo (72870000)

Tabela 6: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica Barra do Rio Pardo (72870000)

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1977	176,83	1997	856,66
1978	50,77	1998	339,66
1979	123,82	1999	391,15
1980	130,48	2000	170,92
1981	55,48	2001	98,72
1982	190,54	2002	103,39
1983	617,91	2003	104,33
1984	502,41	2004	72,85
1985	77,33	2005	238,58
1986	119,70	2008	114,02
1987	266,32	2009	334,70
1988	76,51	2010	191,86
1989	179,29	2011	336,35
1990	470,94	2012	88,80
1991	112,69	2013	231,61
1992	343,94	2014	346,33
1993	106,84	2015	414,53
1994	345,62	2016	196,96
1995	88,42	2017	416,36
1996	102,08	2018	147,75

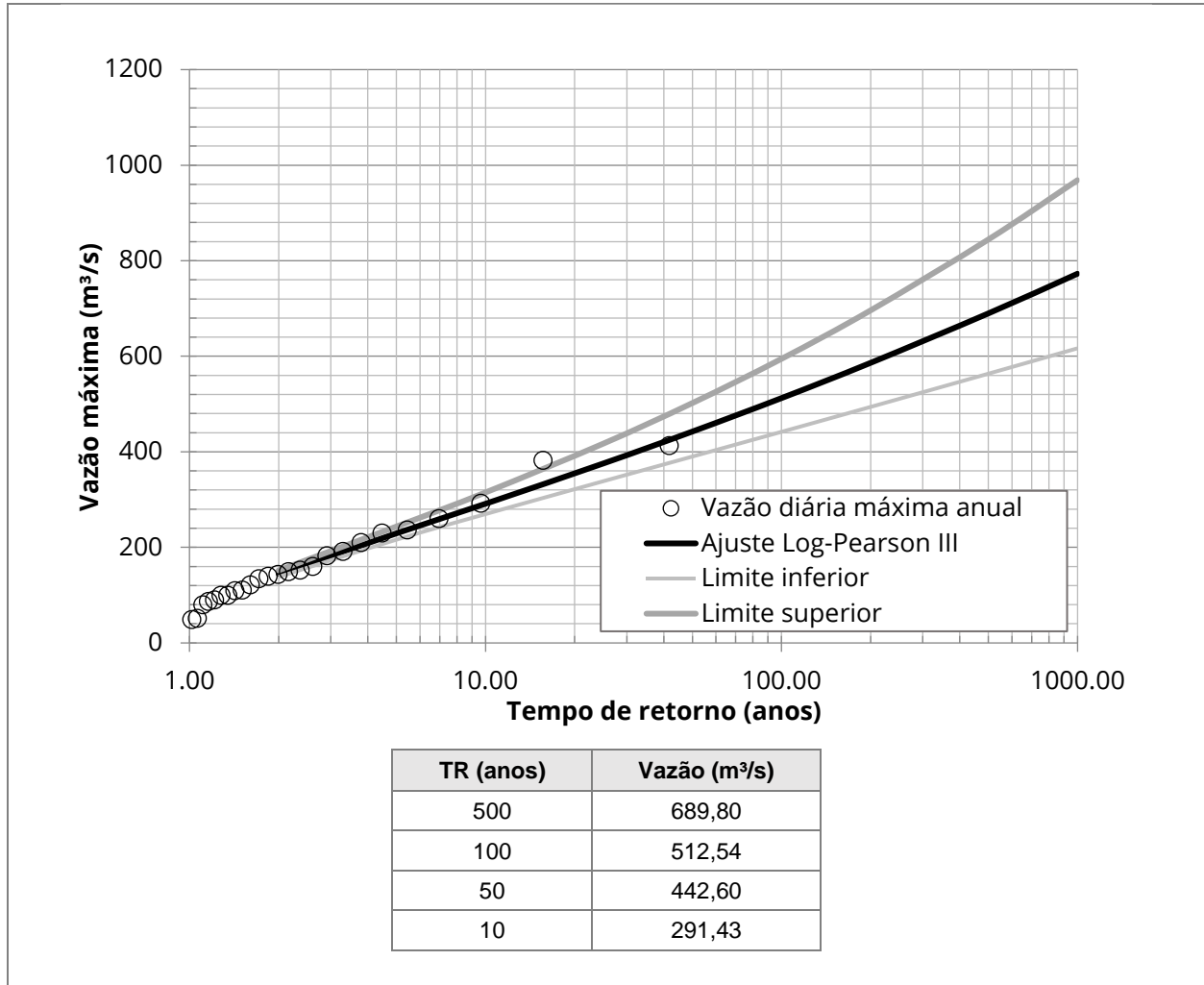


Quadro 15: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Barra do Rio Pardo (7287000)

**Estação fluviométrica Jararaca (83120000)**

Tabela 7: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica Jararaca (83120000)

<b>Ano</b>	<b>Vazão máxima (m³/s)</b>
1930	110,00
1931	413,00
1932	230,00
1933	210,00
1934	86,60
1935	89,80
1936	292,00
1937	121,00
1938	79,40
1939	191,00
1940	152,00
1941	99,40
1942	99,40
1943	236,00
1944	48,90
1945	51,50
1946	160,00
1947	143,00
1948	260,00
1949	134,00
1950	182,00
1951	139,00
1952	109,00
1953	149,00
1954	382,00



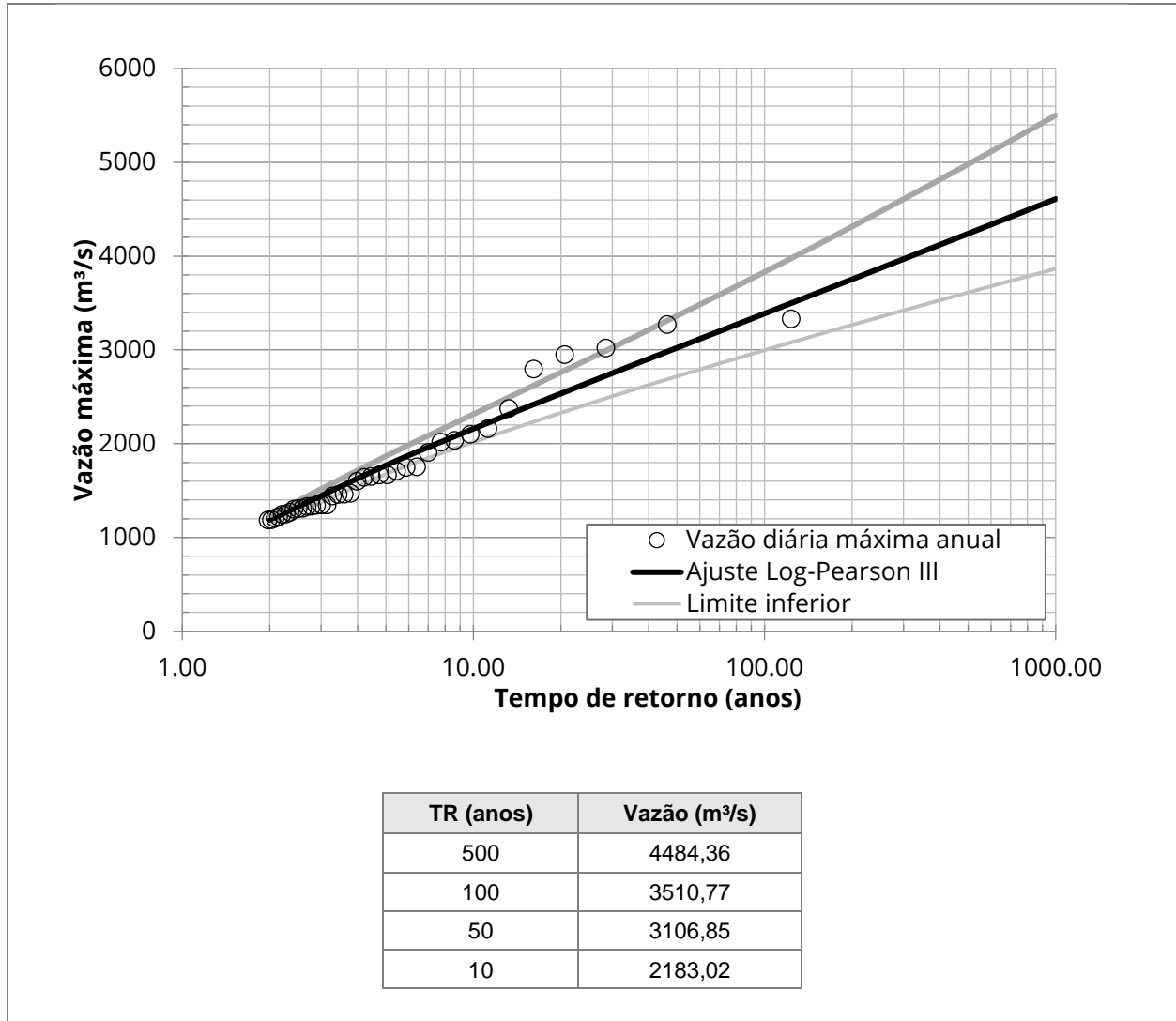
Quadro 16: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Jararaca (83120000)



### Estação fluviométrica Warnow (83520000)

Tabela 8: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica Warnow (83520000)

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1928	1908,75	1965	1074,66
1929	1169,37	1966	1347,47
1930	653,95	1982	1457,84
1931	1666,70	1983	3020,44
1932	1342,93	1984	3331,21
1933	1599,35	1985	986,51
1934	860,44	1986	961,73
1935	1471,81	1987	1306,75
1936	1169,37	1988	1270,87
1937	732,89	1989	1443,90
1938	860,44	1990	2098,92
1939	1347,47	1991	1113,12
1940	797,82	1992	3271,89
1941	559,58	1993	1204,39
1942	658,01	1994	1066,17
1943	1462,49	1995	1182,47
1944	326,20	1996	869,55
1945	525,77	1997	1710,42
1946	1186,84	1998	1666,70
1947	758,59	1999	1302,25
1948	1652,20	2000	1104,54
1949	571,05	2001	2161,17
1950	1311,25	2002	920,328
1951	929,69	2003	771,575
1952	674,36	2004	969,343
1953	1156,32	2005	1329,3
1954	2015,41	2006	467,818
1955	1476,48	2007	1149,32
1956	686,74	2008	1189,11
1957	2795,54	2009	1251,82
1958	887,88	2010	2430,09
1959	641,82	2011	2964,5
1960	732,89	2012	1058,14
1961	1642,55	2013	2376,56
1962	1113,12	2014	2034,85
1963	1333,85	2015	1752,57
1964	405,99	2018	1247,31

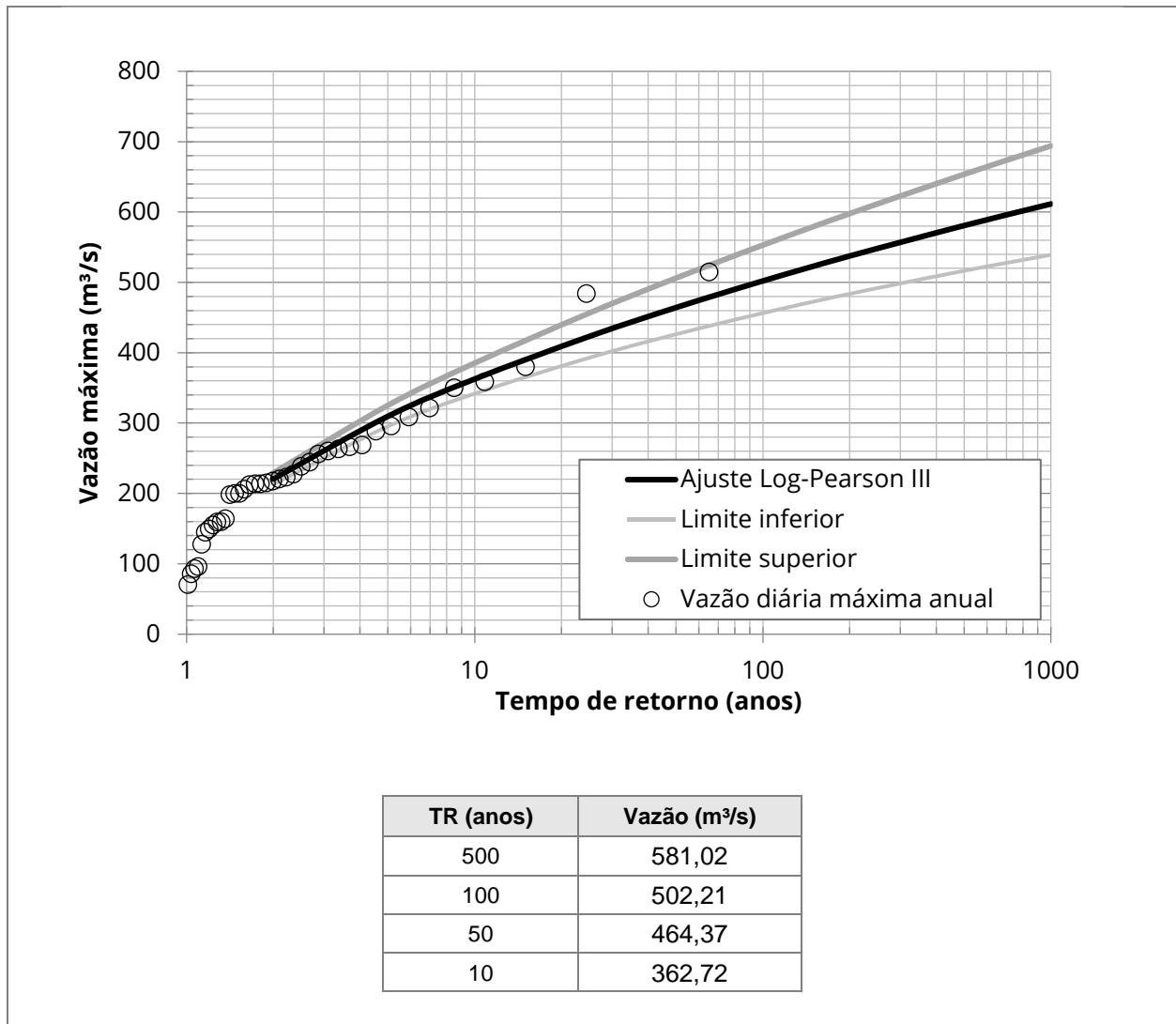


Quadro 17: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Warnow (83520000)

### Estação fluviométrica Rio Turvo (84949000)

Tabela 9: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Turvo (84949000)

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1977	358,69	1997	178,77
1978	144,99	1998	116,35
1979	255,93	1999	172,51
1980	213,64	2000	602,21
1981	321,42	2001	181,22
1982	200,18	2002	137,71
1983	269,17	2003	92,88
1984	159,38	2004	233,93
1985	238,67	2005	135,15
1986	308,81	2006	178,20
1987	70,32	2007	90,86
1988	227,42	2008	351,05
1989	223,25	2014	175,20
1990	213,64	2015	484,16
1992	200,18	2016	244,73
1993	217,74	2017	155,08
1994	220,49	2018	263,39
1995	393,37	2019	149,60
1996	267,31	2020	296,02

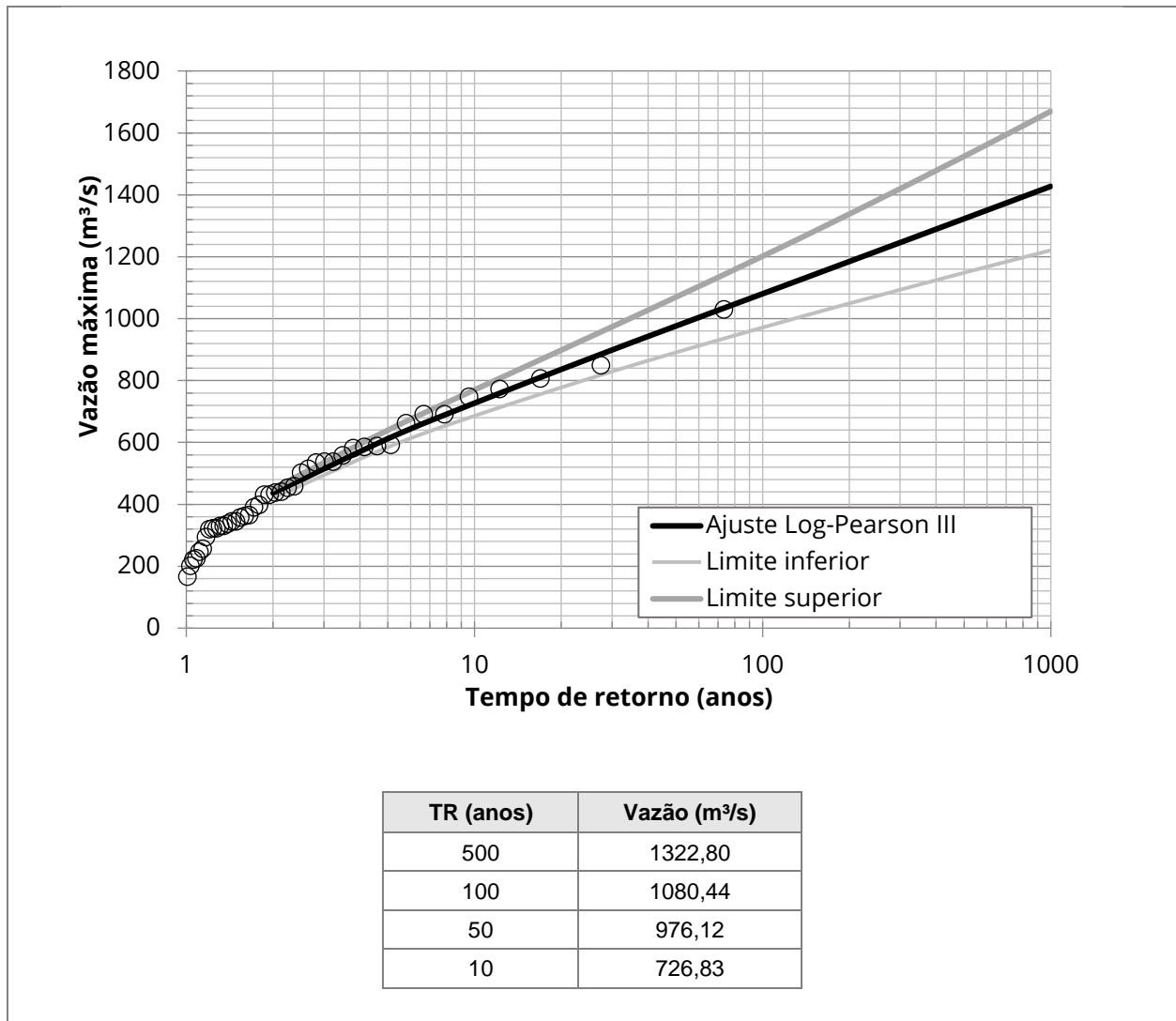


Quadro 18: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica Rio Turvo (84949000)

### Estação fluviométrica São Leopoldo (87382000)

Tabela 10: Vazões máximas anuais da estação fluviométrica São Leopoldo (87382000)

Ano	Vazão máxima (m³/s)	Ano	Vazão máxima (m³/s)
1974	201,52	1996	319,76
1975	337,87	1997	502,06
1976	323,32	1998	345,34
1977	323,32	1999	257,47
1978	247,65	2000	432,07
1979	226,24	2001	582,30
1980	390,69	2002	589,16
1981	345,24	2003	362,75
1982	585,73	2004	294,86
1983	691,65	2005	592,61
1984	772,97	2006	167,21
1985	807,10	2008	849,47
1986	440,91	2009	662,83
1987	438,29	2010	398,41
1988	538,34	2011	691,65
1989	331,05	2012	432,07
1990	538,34	2013	1030,15
1991	221,82	2014	453,96
1992	331,05	2015	747,72
1993	558,49	2017	458,42
1994	365,68	2018	514,78
1995	535,01	2019	358,33



Quadro 19: Ajuste da distribuição Log-Pearson III à série de vazões máximas anuais da estação fluviométrica São Leopoldo (87382000)

## APÊNDICE B. CURVAS-CHAVE SINTÉTICAS GERADAS PARA AS SEÇÕES ANALISADAS

Tabela 11: Curvas-chave sintéticas geradas para as seções analisadas

Rio Bonito		Barra do rio Pardo		Jararaca		Warnow		Turvo		São Leopoldo	
71300000		72870000		83120000		83520000		849490000		87382000	
Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)
836,08	100,00	518,98	100,00	390,71	111,11	76,40	52,09	27,42	100,00	1,19	10,00
836,41	118,91	519,15	119,12	390,93	122,15	76,50	59,26	27,57	129,09	1,33	28,08
836,71	138,05	519,33	138,32	391,15	133,25	76,60	69,24	27,69	158,40	1,50	46,16
836,99	157,16	519,48	157,52	391,38	144,36	76,70	79,23	27,82	187,65	1,65	64,24
837,24	176,10	519,63	176,71	391,60	155,48	76,80	89,41	27,90	216,96	1,81	82,32
837,47	195,22	519,77	195,90	391,80	166,60	76,90	100,34	27,99	246,25	1,96	100,40
837,68	214,40	519,91	215,10	392,00	177,71	77,00	110,36	28,06	275,50	2,09	118,48
837,88	233,62	520,04	234,29	392,19	188,82	77,10	120,32	28,12	304,85	2,20	136,57
838,07	252,80	520,16	253,48	392,39	199,93	77,20	135,43	28,19	334,14	2,31	154,65
838,25	272,01	520,29	272,68	392,58	211,03	77,30	145,41	28,25	363,43	2,42	172,73
838,42	291,20	520,40	291,87	392,76	222,15	77,40	160,49	28,30	392,72	2,53	190,81
838,59	310,38	520,52	311,06	392,93	233,26	77,50	175,57	28,34	422,06	2,64	208,89
838,76	329,56	520,63	330,25	393,10	244,37	77,60	190,64	28,38	451,36	2,76	226,97
838,92	348,77	520,73	349,44	393,27	255,49	77,70	205,60	28,42	480,65	2,88	245,05
839,07	368,00	520,84	368,63	393,45	266,60	77,80	220,51	28,46	509,94	3,00	263,13
839,19	387,30	520,93	387,83	393,62	277,71	77,90	235,64	28,49	539,23	3,12	281,21
839,30	406,56	521,03	407,01	393,77	288,83	78,00	255,55	28,53	568,53	3,24	299,29
839,41	425,75	521,12	426,20	393,93	299,94	78,10	270,51	28,56	597,84	3,37	317,37
839,50	445,00	521,20	445,39	394,08	311,04	78,20	290,52	28,59	627,13	3,49	335,45
839,59	464,20	521,28	464,59	394,24	322,15	78,30	310,82	28,62	656,44	3,59	353,54
839,68	483,40	521,36	483,78	394,39	333,26	78,40	330,75	28,64	685,73	3,68	371,62
839,77	502,60	521,44	502,97	394,54	344,37	78,50	350,66	28,67	715,02	3,77	389,70
839,85	521,81	521,52	522,16	394,69	355,49	78,60	370,63	28,70	744,31	3,86	407,78
839,94	541,00	521,59	541,35	394,82	366,61	78,70	390,56	28,73	773,60	3,94	425,86
840,02	560,20	521,66	560,54	394,96	377,72	78,80	410,54	28,76	802,89	4,02	443,94
840,10	579,41	521,73	579,73	395,10	388,83	78,90	435,60	28,78	832,18	4,10	462,02
840,17	598,60	521,80	598,92	395,23	399,94	79,00	460,49	28,80	861,49	4,18	480,10
840,25	617,80	521,88	618,11	395,37	411,05	79,10	485,40	28,83	890,78	4,25	498,18
840,33	636,99	521,95	637,30	395,50	422,16	79,20	510,28	28,85	920,07	4,33	516,26
840,40	656,21	522,01	656,50	395,63	433,27	79,30	540,21	28,88	949,35	4,40	534,34
840,47	675,39	522,08	675,69	395,72	444,39	79,40	565,15	28,90	978,65	4,47	552,42
840,54	694,59	522,14	694,88	395,81	455,51	79,50	595,05	28,93	1007,94	4,54	570,51
840,61	713,78	522,21	714,07	395,90	466,62	79,60	624,87	28,96	1037,23	4,61	588,59
840,67	732,98	522,28	733,26	395,99	477,73	79,70	654,74	28,98	1066,54	4,68	606,67
840,74	752,19	522,34	752,46	396,08	488,84	79,80	684,66	29,01	1095,82	4,74	624,75
		522,40	771,65	396,17	499,95	79,90	714,52	29,03	1125,13	4,81	642,83

Rio Bonito		Barra do rio Pardo		Jararaca		Warnow		Turvo		São Leopoldo	
71300000		72870000		83120000		83520000		849490000		87382000	
Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)
		522,45	790,84	396,26	511,06	80,00	749,43	29,05	1154,42	4,87	660,91
		522,51	810,03	396,35	522,17	80,10	779,21	29,07	1183,71	4,94	678,99
		522,57	829,22	396,45	533,28	80,20	814,06	29,09	1213,01	5,00	697,07
		522,63	848,41	396,54	544,39	80,30	848,91	29,11	1242,29	5,07	715,15
		522,67	867,61	396,62	555,51	80,40	883,76	29,14	1271,59	5,13	733,23
		522,72	886,80	396,68	566,64	80,50	923,58	29,16	1300,88	5,19	751,31
		522,77	906,00	396,74	577,75	80,60	958,45	29,18	1330,17	5,25	769,39
		522,82	925,19	396,79	588,86	80,70	998,30	29,20	1359,47	5,31	787,47
		522,86	944,38	396,85	599,97	80,80	1038,12	29,22	1388,76	5,37	805,56
		522,89	963,58	396,91	611,08	80,90	1077,98	29,25	1418,05	5,43	823,64
		522,91	982,77	396,96	622,19	81,00	1117,84	29,27	1447,36	5,48	841,72
		522,94	1001,96	397,02	633,30	81,10	1157,65	29,29	1476,65	5,54	859,80
		522,97	1021,15	397,08	644,41	81,20	1202,46	29,31	1505,94	5,60	877,88
		523,00	1040,34	397,13	655,53	81,30	1242,33	29,33	1535,23	5,65	895,96
		523,03	1059,53	397,19	666,64	81,40	1287,15	29,35	1564,52	5,71	914,04
		523,06	1078,72	397,25	677,75	81,50	1331,95	29,37	1593,82	5,76	932,12
		523,08	1097,91	397,30	688,86	81,60	1381,75	29,39	1623,11	5,82	950,20
		523,11	1117,11	397,36	699,97	81,70	1426,58	29,40	1652,41	5,87	968,28
		523,14	1136,29	397,42	711,08	81,80	1471,31	29,42	1681,70	5,92	986,36
		523,17	1155,49	397,48	722,19	81,90	1521,12	29,44	1710,99	5,97	1004,44
		523,20	1174,68	397,53	733,29	82,00	1565,91	29,46	1740,28	6,03	1022,53
		523,23	1193,88	397,59	744,39	82,10	1615,72	29,48	1769,57	6,08	1040,61
		523,25	1213,07	397,64	755,52	82,20	1665,59	29,50	1798,86	6,13	1058,69
		523,29	1232,25	397,68	766,63	82,30	1725,35	29,52	1828,15	6,18	1076,77
		523,32	1251,45	397,73	777,74	82,40	1780,13	29,53	1857,45	6,24	1094,85
		523,35	1270,64	397,77	788,85	82,50	1839,82	29,55	1886,74	6,29	1112,93
		523,38	1289,83	397,81	799,96	82,60	1894,55	29,57	1916,03	6,34	1131,01
		523,41	1309,03	397,85	811,07	82,70	1954,31	29,59	1945,33	6,39	1149,09
		523,44	1328,21	397,90	822,18	82,80	2019,01	29,60	1974,62	6,44	1167,17
		523,47	1347,41	397,94	833,29	82,90	2078,74	29,62	2003,91	6,49	1185,25
		523,50	1366,60	397,98	844,40	83,00	2143,45	29,64	2033,20	6,54	1203,33
		523,53	1385,80	398,03	855,52	83,10	2203,19	29,66	2062,50	6,58	1221,41
		523,56	1404,98	398,07	866,63	83,20	2267,92	29,67	2091,79	6,63	1239,50
		523,59	1424,18	398,11	877,74	83,30	2337,62	29,69	2121,08	6,68	1257,58
		523,62	1443,37	398,15	888,85	83,40	2402,34	29,71	2150,38	6,73	1275,66
		523,65	1462,57	398,20	899,96	83,50	2472,03	29,73	2179,66	6,78	1293,74
		523,68	1481,76	398,24	911,07	83,60	2536,75	29,74	2208,95	6,82	1311,82
		523,70	1500,95	398,28	922,18	83,70	2606,45	29,75	2238,25	6,87	1329,90
		523,73	1520,14	398,33	933,29	83,80	2676,13	29,77	2267,55	6,92	1347,98
		523,76	1539,33	398,37	944,40	83,90	2750,83	29,78	2296,84	6,96	1366,06
		523,79	1558,53	398,41	955,52	84,00	2820,51	29,80	2326,13	7,01	1384,14



Rio Bonito		Barra do rio Pardo		Jararaca		Warnow		Turvo		São Leopoldo	
71300000		72870000		83120000		83520000		849490000		87382000	
Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)	Cota (m)	Vazão (m³/s)
		523,82	1577,72	398,45	966,63	84,10	2895,18	29,81	2355,43	7,06	1402,22
		523,85	1596,91	398,50	977,74	84,20	2969,88	29,82	2384,72	7,10	1420,30
		523,88	1616,10	398,54	988,85	84,30	3044,54	29,84	2414,01	7,15	1438,38
		523,90	1635,29	398,58	999,96	84,40	3124,18	29,85	2443,30	7,19	1456,47
		523,93	1654,49	398,62	1011,07	84,50	3198,85	29,86	2472,60	7,24	1474,55
		523,96	1673,68	398,66	1022,18	84,60	3278,50	29,88	2501,89	7,28	1492,63
		523,99	1692,87	398,69	1033,29	84,70	3358,13	29,89	2531,18	7,33	1510,71
		524,02	1712,06	398,73	1044,40	84,80	3437,78	29,91	2560,48	7,37	1528,79
		524,05	1731,25	398,76	1055,52	84,90	3517,44	29,92	2589,77	7,42	1546,87
		524,08	1750,45	398,79	1066,63	85,00	3597,06	29,93	2619,06	7,46	1564,95
		524,10	1769,64	398,83	1077,74	85,10	3676,72	29,95	2648,36	7,51	1583,03
		524,13	1788,83	398,86	1088,85	85,20	3761,34	29,96	2677,65	7,55	1601,11
		524,16	1808,02	398,90	1099,96	85,30	3845,93	29,97	2706,95	7,60	1619,19
		524,19	1827,21	398,93	1111,07	85,40	3930,56	29,99	2736,24	7,64	1637,27
		524,22	1846,41	398,96	1122,18	85,50	4015,18	30,00	2765,54	7,69	1655,35
		524,25	1865,60	399,00	1133,29	85,60	4099,81	30,01	2794,83	7,73	1673,43
		524,28	1884,79	399,03	1144,40	85,70	4184,42	30,02	2824,12	7,78	1691,52
		524,30	1903,98	399,07	1155,52	85,80	4269,04	30,04	2853,41	7,82	1709,60
		524,33	1923,17	399,10	1166,63	85,90	4358,62	30,05	2882,71	7,87	1727,68
		524,36	1942,36	399,13	1177,74	86,00	4448,22	30,06	2912,01	7,91	1745,76
		524,39	1961,56	399,17	1188,85	86,10	4537,82	30,07	2941,29	7,95	1763,84
		524,42	1980,75	399,17	1188,85	86,20	4627,40	30,08	2970,59	8,00	1781,92
		524,45	1999,94			86,30	4717,01	30,08	2970,59	8,00	1781,92
		524,46	2009,97			86,40	4811,58				
		524,47	2019,97			86,50	4901,18				
		524,49	2029,97			86,60	4990,79				
		524,50	2039,97			86,70	5080,37				
		524,52	2049,97			86,80	5174,92				
		524,53	2059,97			86,90	5264,52				
		524,55	2069,96			87,00	5359,05				
		524,56	2079,97			87,10	5453,59				
		524,58	2089,97			87,20	5548,17				
		524,59	2099,97			87,30	5642,78				
		524,60	2109,97			87,40	5742,31				
		524,62	2119,97			87,50	5841,81				
		524,63	2129,97			87,60	5941,32				
		524,65	2139,97			87,70	6040,86				
		524,66	2149,97			87,80	6145,38				
		524,68	2159,97			87,90	6244,81				
		524,69	2169,97			88,00	6334,35				
		524,71	2179,97			88,10	6428,92				

