

• WALTER COLLISCHONN • MINO VIANA SORRIBAS •
• RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA • ALEXANDRE ABDALLA ARAUJO •
• SAULO AIRES DE SOUZA • TERESA LUISA LIMA DE CARVALHO •

MÉTODOS SIMPLES PARA ESTIMAR VAZÕES DE REFERÊNCIA E SUA INCERTEZA

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente da República

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

Waldez Góes
Ministro

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO

Diretoria Colegiada

Veronica Sánchez da Cruz Rios (Diretora-Presidente)
Maurício Abijaodi
Filipe de Mello Sampaio Cunha
Ana Carolina Argolo
Nazareno Araújo (interino)

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
E SANEAMENTO BÁSICO

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO
E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

ABRHIDRO

**MÉTODOS SIMPLES
PARA ESTIMAR
VAZÕES DE
REFERÊNCIA
E SUA INCERTEZA**

• WALTER COLLISCHONN • MINO VIANA SORRIBAS •
• RODRIGO CAUDURO DIAS DE PAIVA • ALEXANDRE ABDALLA ARAUJO •
• SAULO AIRES DE SOUZA • TERESA LUISA LIMA DE CARVALHO •

PORTO ALEGRE – RS

ABRHidro

2023

© 2023, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)
Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Bloco M
CEP: 70610-200, Brasília-DF
PABX: (61) 2109-5400 / 5252
Endereço eletrônico: www.gov.br/ana/pt-br

© 2023, ABRHidro
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia
CEP: 91501-970, Porto Alegre - RS
PABX: (51) 3493-2233
Endereço eletrônico: www.abrhidro.org.br

COMITÊ DE EDITORAÇÃO

Joaquim Gondim (Coordenador)
Humberto Cardoso Gonçalves
Felipe de Sá Tavares
Nazareno Araújo (Secretário-Executivo)

EQUIPE TÉCNICA DE ACOMPANHAMENTO

SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS
HÍDRICOS E ECONÔMICOS - SHE
Coordenação Geral
Ana Paula Fioreze
Luciano Meneses Cardoso da Silva
Coordenação Executiva
Alexandre Abdalla Araújo
Saulo Aires de Souza
Teresa Luisa Lima de Carvalho

DIRETORIA GESTÃO 2022-2023

Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes
(Pre-sidente)
Suzana Maria Gico Lima Montenegro
(Vice-Presidente)
Alexandre Kepler Soares
(Diretoria de Publicações)
Andrea Sousa Fontes
(Diretoria de Comissões Técnicas e Científica)
Diogo Costa Buarque
(Diretoria de Eventos)
Talita Fernanda Das Graças Silva
(Diretoria de Representações Regionais)

SUPERVISÃO EDITORIAL

Walter Collischonn
Teresa Luisa Lima de Carvalho

PROJETO GRÁFICO E CAPA

Vanessa da Silva Cardoso - DATA AO CUBO

As ilustrações, tabelas e gráficos sem indicação de fonte foram elaborados pelos autores
Todos os direitos reservados
É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza
[livro eletrônico] / Walter Collischonn...[et al.]. -- Porto Alegre, RS
ABRHidro, 2023. PDF

Outros autores: Mino Sorribas, Rodrigo Paiva, Alexandre Abdalla
Araújo, Saulo Aires de Souza, Teresa Luisa Lima de Carvalho.
Bibliografia. ISBN 978-85-88686-49-6

1. Bacias hidrográficas - Administração - Planejamento 2. Engenharia ambiental
3. Gestão ambiental 4. Hidrologia 5. Recursos hídricos 6. Recursos hídricos
(Gerenciamento) - Brasil 7. Rios - Proteção I. Collischonn, Walter. II. Sorribas,
Mino. III. Paiva, Rodrigo. IV. Araújo, Alexandre Abdalla. V. Souza, Saulo Aires de.
VI. Carvalho, Teresa Luisa Lima de.
23-173607 CDD-628

Índices para catálogo sistemático:

1. Engenharia ambiental 628

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129

APRESENTAÇÃO 7

1

VAZÕES DE REFERÊNCIA EM RIOS 11

1.1 Métodos para estimativa das vazões de referência 14

1.1.1 Estimativa de vazões de referência em locais com dados 14

1.1.2 Estimativa de vazões de referência em locais sem dados 14

1.2 Incertezas na estimativa de vazões de referência 19

2

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA EM LOCAL COM DADOS 23

2.1 Incerteza da estimativa de vazões de referência com séries longas de dados 26

2.2 Exemplo da estimativa de incerteza em local com série longa de dados 28

3

ESTIMATIVA DE VAZÃO DE REFERÊNCIA EM LOCAL COM POUCOS DADOS 31

3.1 O método do ajuste climático 34

3.2 Incerteza da estimativa de vazões de referência com séries curtas de dados 35

3.2.1 Incerteza da vazão média em locais com séries de observação curtas 35

3.2.2 Incerteza da Q_{95} em locais com séries de observação curtas 36

3.3 Incerteza da estimativa de vazões de referência em locais com séries curtas e ajuste climático 38

3.3.1 Incerteza da vazão média 38

3.3.2 Incerteza da Q_{95} 40

3.4 Exemplo de Aplicação do método de ajuste climático 42

4

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA 45

4.1 Incerteza da estimativa da vazão de referência com o método da vazão específica 47

4.1.1 Incerteza da estimativa da vazão média pelo método da vazão específica em locais não-encadeados 48

4.1.2 Incerteza da Q_{95} em locais não-encadeados 49

4.1.3 Incerteza da vazão média em locais encadeados 50

4.1.4 Incerteza da Q_{95} em locais encadeados 52

4.2 Exemplo de aplicação do método da vazão específica 54

5

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL 57

5.1 Incerteza da estimativa pela vazão específica incremental 62

5.1.1 Incerteza do método da vazão incremental no caso 1 62

5.1.2 Incerteza do método da vazão incremental no caso 2 62

5.1.3 Incerteza da vazão média pelo método da vazão incremental nos casos 3 e 4 66

5.1.4 Incerteza da Q_{95} pelo método da vazão incremental nos casos 3 e 4 67

5.2 Exemplo de aplicação do método da vazão específica incremental 69

5.3 Exemplo de aplicação do método da vazão específica incremental com vários postos fluviométricos 71

6

ESTIMATIVA DE VAZÃO DE REFERÊNCIA COM MEDIÇÕES ESPORÁDICAS 75

6.1 Incerteza da estimativa de vazões de referência com medições esporádicas 77

6.2 Exemplo de aplicação do método da medição pontual ou esporádica 81

6.3 Comparação do método da medição esporádica com o método da vazão específica 82

7

RESUMO DA INCERTEZA DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DAS VAZÕES DE REFERÊNCIA 85

7.1 Incerteza da estimativa da vazão média pelos diferentes métodos 87

7.2 Incerteza da estimativa da Q_{95} pelos diferentes métodos 88

8

RECOMENDAÇÕES GERAIS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE REFERÊNCIA COM MÉTODOS SIMPLES EM LOCAIS COM CARÊNCIA DE DADOS 93

REFERÊNCIAS 97



APRESENTAÇÃO

Vazões de referência sintetizam valiosas informações sobre o comportamento hidrológico de uma bacia, como o potencial hídrico e a quantidade de água associada a diferentes garantias. É a partir delas e sobre suas bases que é realizado o planejamento, regulação e controle de uso dos recursos hídricos no país.

Contudo, a vazão de referência não é um valor determinado e certo como costuma ser tratada. Sua obtenção está sujeita a incertezas, tanto inerentes ao processo de medição e construção da série de dados, quanto de natureza estatística, relacionadas à variabilidade temporal. Há ainda aquelas decorrentes da transferência de informação do ponto de monitoramento para o local de interesse.

A proposta deste livro é apresentar uma estimativa dessas incertezas, com foco em identificar o quanto vazões de referência obtidas com poucos dados ou com métodos simples de regionalização estão distantes da melhor informação prática disponível, que seria uma série longa de dados no local de interesse.

Consciente da relevância do tema e comprometida com a construção e difusão do conhecimento, a ANA teve a satisfação de desenvolver em cooperação com IPH/UFRGS a pesquisa que produziu parte dos resultados aqui apresentados, entre outras contribuições. É pelo mesmo motivo que a ANA apoia a iniciativa da ABRHidro em lançar essa publicação, fomentando a capacitação da comunidade para uma melhor gestão dos recursos hídricos.

Espera-se que este livro auxilie estudantes, técnicos, gestores e usuários de recursos hídricos na compreensão e consideração das incertezas relacionadas às vazões de referência e que também estimule o avanço das pesquisas, a fim de que tais incertezas possam ser efetivamente incorporadas nos processos de tomada de decisão e na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos.

BOA LEITURA

Diretoria Colegiada da ANA

Este livro nasceu de uma iniciativa dos autores de apresentar um conjunto de novas ideias, decorrentes das estimulantes discussões envolvendo as equipes técnicas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), no âmbito do Termo de Execução Descentralizada “Cooperação em tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional”. Este projeto tinha, entre seus objetivos, a avaliação de métodos de estimativa de vazões de referência em escala nacional. Apesar dos desafios impostos pelo surgimento da pandemia de COVID-19, que inviabilizou a colaboração presencial, os resultados das atividades foram significativos, tendo sido publicados diversos relatórios técnicos e artigos científicos.

Mas, ao longo do tempo, sentimos a necessidade de trazer para a área de recursos hídricos um arcabouço de conceitos e métodos que pudessem ser de grande utilidade para técnicos, estudantes e profissionais de órgãos gestores estaduais e nacionais. Para atender a este público, optamos por elaborar um texto com características de manual técnico e com uma abordagem didática.

O livro “Métodos simples para estimar vazões de referência e sua incerteza” oferece uma visão detalhada e acessível de métodos tradicionais para a estimativa das vazões de referência em rios não monitorados, ao mesmo tempo em que coloca em evidência as incertezas associadas a estes métodos. Ao longo do livro vários exemplos do mundo real são utilizados para facilitar a compreensão e a aplicação prática de cada método.

Esperamos que este livro contribua para que estudantes e técnicos, nas diversas áreas relacionadas à hidrologia, possam aprofundar seus conhecimentos sobre vazões de referência e incertezas, compreendendo a relevância desses elementos para a tomada de decisão nos diferentes níveis gerenciais.

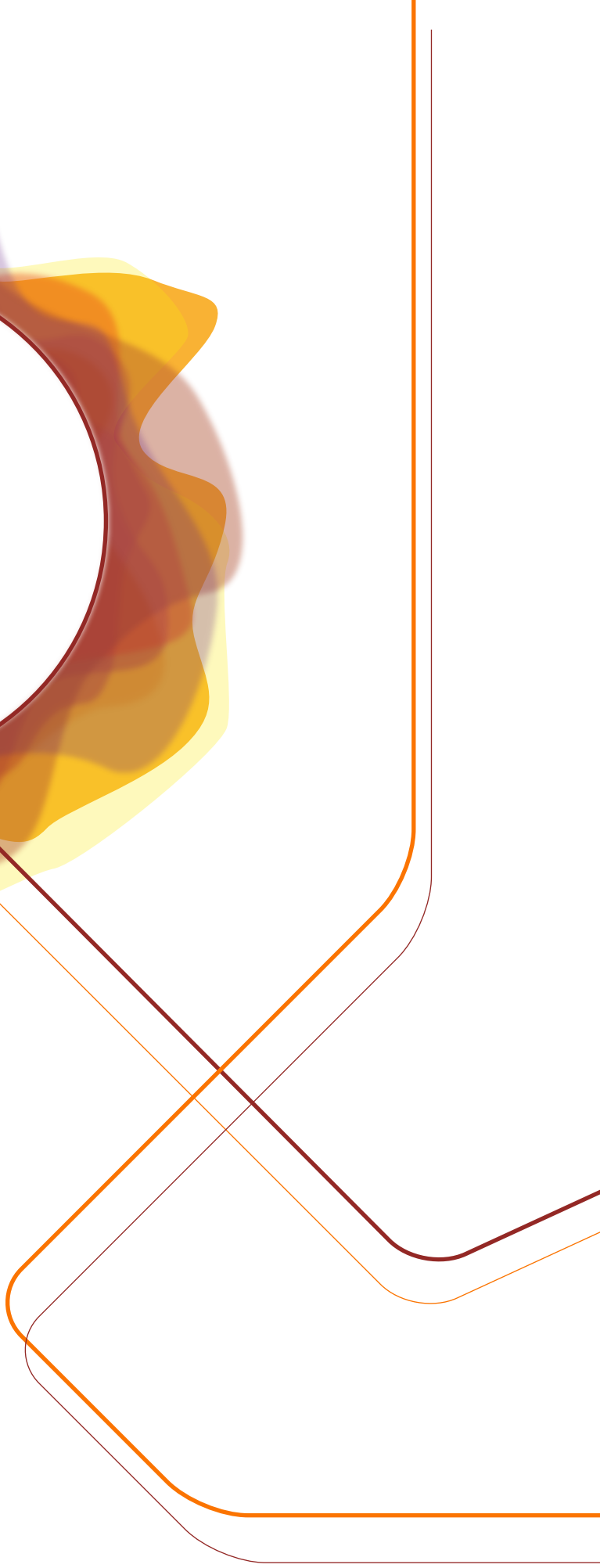
Para que este livro se tornasse realidade tivemos importantes apoios. Por isso, agradecemos ao Diretor de publicações da ABRHidro, Dr. Alexandre Kepler e ao presidente da ABRHidro, Dr. Cristóvão Fernandes, pela confiança no trabalho e pelo apoio entusiasmado para a finalização do livro.

Agradecemos, igualmente, à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) pelo fomento às atividades de pesquisa, que muito contribuíram para este livro, e pela parceria nesta publicação.

Agradecemos, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto de pesquisa, o Instituto de Pesquisas Hidráulica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), por parte do seu diretor, Dr. Joel Goldenfum.

Agradecemos também aos pesquisadores e especialistas que contribuíram durante diversas etapas do projeto: Cleber Gama; Rafael “Veredas” Barbedo Fontana, Larissa Ribeiro, Fernando Mainardi Fan, Anderson Ruhoff (por parte do IPH) e Marcos I. Pufal, Marco Vinícius C. Gonçalves (por parte da ANA).

Finalmente, agradecemos, de forma calorosa, a importante contribuição dos revisores das versões iniciais do livro, especialmente o Dr. Bruno Collischonn, da ANA, e o Dr. Cristóvão Fernandes, da ABRHidro.



VAZÕES DE REFERÊNCIA EM RIOS



Um dos desafios mais importantes na hidrologia é estimar, de forma razoavelmente acurada, a vazão dos rios. As dificuldades ocorrem porque, em função da aleatoriedade do clima, a vazão de um rio varia ao longo do tempo. Da mesma forma, em função da heterogeneidade das características relevantes das bacias hidrográficas (solos, litologia, relevo), a vazão varia também no espaço, em diferentes pontos ao longo de um mesmo rio, e em diferentes rios de uma mesma bacia hidrográfica.

Para lidar com a variabilidade da vazão no tempo, frequentemente são utilizadas as vazões de referência. Uma vazão de referência pode ser definida como um valor de vazão que permite resumir uma grande quantidade de dados da série completa de vazões em um determinado local (Cruz e Tucci, 2008). Este “resumo” faz referência a uma característica estatística da série de dados.

Uma vazão de referência frequentemente utilizada, por exemplo, é a Vazão Média de Longo Termo (QMLT). A Vazão Média de Longo Termo, ou simplesmente Vazão Média, permite estimar o volume total do escoamento em um determinado local, mas não traz muita informação sobre as situações extremas que podem ocorrer neste mesmo local.

Para situações mais extremas, em secas ou cheias, outras vazões de referência podem ser utilizadas. Há vazões de referência que procuram representar a vazão ou disponibilidade de água em situações críticas de falta de água, como a $Q_{7,10}$ e a Q_{95} , por exemplo (Cruz, 2001). Também existem vazões de referência adequadas para resumir as condições de um rio em situação de cheia. A Tabela 1 apresenta uma lista de vazões de referência frequentemente utilizadas.

Tabela 1 Exemplos de vazões de referência

VAZÃO DE REFERÊNCIA	APLICAÇÃO
QMLT – Vazão média de longo termo	Vazões médias
Q_{90} – Vazão com 90% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões mínimas
Q_{95} – Vazão com 95% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões mínimas
$Q_{7,10}$ – Vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno	Vazões mínimas
Q_{50} – Vazão com 50% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer (Vazão mediana)	Vazões médias
Q_{10} – Vazão com 10% de probabilidade de ser igualada ou superada em um dia qualquer	Vazões máximas
Q_{max} (Tr = 2, 5, 10, 25, 50, 100 anos) - Vazão máxima para determinado Tempo de Retorno TR	Vazões Máximas

1.1 Métodos para estimativa das vazões de referência

Os métodos para a estimativa de vazões de referência podem ser classificados em dois grupos principais, de acordo com a disponibilidade de dados medidos no local de interesse:

- métodos para locais com dados de vazão medidos;
- métodos para locais sem dados de vazão medidos.

1.1.1 Estimativa de vazões de referência em locais com dados

Séries temporais de vazão medida estão disponíveis apenas em locais em que existem postos de monitoramento fluviométrico. Nestes locais, a estimativa de vazões de referência é realizada diretamente, bastando calcular as estatísticas.

Embora realizada de forma direta, a estimativa da vazão de referência em um local com dados possui incertezas que estão relacionadas tanto ao próprio dado de vazão (capítulo 2), quanto à variabilidade amostral (capítulo 3).

Apesar de não ser isenta de erros, a estimativa de vazões de referência em locais com uma série longa de dados pode ser considerada a melhor informação disponível em hidrologia. Porém essa informação é espacialmente muito restrita, de forma que é rotineiramente necessário transferir total ou parcialmente as informações do posto fluviométrico para o local de real interesse.

1.1.2 Estimativa de vazões de referência em locais sem dados ou com poucos dados

Em quase todas as situações práticas reais, a estimativa de vazão de referência é requerida em locais sem dados, ou com poucos dados disponíveis. Para lidar com este tipo de situação já foram propostos diversos métodos na literatura técnica. Entre estes métodos podemos destacar os seguintes:

1. Método de séries curtas;
2. Método de medições esporádicas ou pontuais;
3. Método da vazão específica;
4. Método da vazão específica incremental;
5. Regionalização por regressão;
6. Interpolação geoestatística;
7. Modelagem hidrológica;
8. Modelagem hidrológica apoiada por séries curtas;
9. Reanálise hidrológica com assimilação de dados.

Além de apresentar estimativas de incertezas relacionadas ao próprio dado de vazão (capítulo 2), o objetivo deste livro é tentar identificar a que incertezas se pode estar sujeito quando não se dispõe de uma série longa de dados e se necessita de uma estimativa de vazão de referência.

Nesse sentido, os quatro primeiros métodos da lista acima foram explorados através de simulação matemática para estimativa de sua incerteza, tomando como “verda-

de” a melhor informação que na prática estaria disponível, ou seja, uma série longa de dados no local de interesse.

Esses quatro métodos foram selecionados considerando que seriam os de aplicação mais fácil quando se deseja uma estimativa para um ponto em particular, ou numa bacia com poucos dados disponíveis. Os demais métodos são citados para conhecimento dos leitores, mas a incerteza a eles associada não é explorada nesse livro.

Na sequência, os métodos listados acima são brevemente descritos e os quatro primeiros são detalhados mais profundamente nos capítulos posteriores.

1.1.2.1 Séries curtas

Os métodos de séries curtas podem ser entendidos como ferramentas para corrigir estimativas de vazões de referência baseadas em séries curtas de dados observados, que sofrem pela falta de representatividade da amostra, e, por isso, costumam ser enviesadas, como mostrado no capítulo 3.

A falta de representatividade de uma série curta de dados deriva, muitas vezes, da variabilidade amostral que está relacionada à variabilidade climática. É comum, por exemplo, a ocorrência de períodos de múltiplos anos mais secos ou mais úmidos do que a média de longo prazo. Por isso, se a série de dados disponível num local com pouca disponibilidade coincide com um período de anos mais úmidos (secos) do que a média, a vazão de referência possivelmente será ligeiramente maior (menor) do que seria caso houvesse uma série de dados mais longa e mais representativa.

As séries curtas observadas podem não ser representativas de um longo período, mas é possível utilizar métodos que relacionam as estimativas de vazão de referência obtidas a partir de séries curtas com estimativas regionais baseadas em séries mais longas, buscando obter, ao mesmo tempo, os benefícios da representatividade local e da representatividade do período amostral (Laaha e Blöschl, 2005).

Diversos trabalhos recentes mostraram que é possível aproveitar séries curtas de dados observados, desde que as estimativas de vazões de referência sejam corrigidas com base em dados de um posto fluviométrico de apoio, onde existe uma série mais longa (Laaha e Blöschl, 2005; Zhang, 2017; Eng et al., 2011).

No capítulo 3 apresentamos o método Climate Adjustment Method, ou método de ajuste climático (Laaha e Blöschl, 2005), para redução do viés da estimativa de vazões de referência estimadas com séries curtas. A incerteza associada com a estimativa de vazão com séries curtas corrigidas pelo método de ajuste climático também é discutida no capítulo 3.

1.1.2.1 Método de medições esporádicas ou pontuais

O método de medições pontuais, únicas ou esporádicas pode ser aplicado quando no local de interesse não há nem mesmo uma série curta de medições sistemáticas, mas apenas algumas medições esporádicas. Neste caso deve ser realizada ao menos uma medição de vazão no próprio local de interesse, e esta medição é combinada com dados de um posto fluviométrico próximo, para permitir a estimativa da vazão de referência, conforme detalhado no capítulo 6. Assim, o método de medições esporádicas pode ser entendido como um caso extremo do método de séries curtas, em que a série curta tem, pelo menos, um dado observado.

Na literatura internacional, o método das medições esporádicas e suas variações são conhecidos pelo termo *spot gauging methods* (Chopart e Sauquet, 2008; Laaha e Blöschl, 2005), que pode ser traduzido por método de medição pontual. No Brasil, o método de séries curtas com apenas uma única medição chegou a ser proposto, no estado da Bahia, para estimativa da Q_{90} em locais sem dados (Santana et al., 2000).

O método de estimativa de vazões de referência com medições esporádicas está apresentado no capítulo 6.

1.1.2.3 Método da vazão específica

O método da vazão específica é, provavelmente, o método mais simples para estimar uma vazão de referência em um local sem dados. Neste método a região é considerada hidrológicamente homogênea, e a vazão específica, definida como a razão entre a vazão e a área de drenagem do local sem dados, é considerada igual à vazão específica de um local com dados.

Este método é descrito mais detalhadamente no capítulo 4, juntamente com algumas estimativas da sua incerteza.

De forma resumida, pode se dizer que o método da vazão específica tende a ter melhores resultados quando as bacias com e sem dados estão mais próximas, especialmente quando são embutidas, ou encadeadas, isto é, quando o local sem dados está a montante ou a jusante do local com dados.

1.1.2.4 Método da vazão específica incremental

Em alguns casos, o método da vazão específica pode ser aplicado considerando a vazão específica da bacia incremental, tipicamente estimada pela diferença de vazões entre dois postos fluviométricos localizados um a jusante do outro na mesma rede de drenagem. Desta forma é possível caracterizar melhor a heterogeneidade hidrológica de uma grande região, em que existem vários postos fluviométricos (Laaha e Blöschl, 2007). Por outro lado, há o risco de amplificação do erro, já que a vazão incremental é obtida pela diferença de dois valores que são estimados com erros.

O método da vazão específica incremental está apresentado em maiores detalhes no capítulo 5.

1.1.2.5 Regionalização por regressão

Nos métodos de regionalização por regressão busca-se uma relação estatística entre a vazão e características físicas da bacia como a área de drenagem, a declividade, a precipitação média, entre outras (Naghettini e Pinto, 2007; Tucci, 2002).

Há diversos métodos de regionalização por regressão. Tucci (2002), por exemplo, fez distinção entre três tipos de métodos: 1) Métodos que regionalizam os parâmetros da distribuição estatística; 2) Métodos que regionalizam o evento com um determinado risco e 3) Métodos que regionalizam uma curva adimensional de probabilidades e seu fator de escala, denominado método *index-flood*.

Para a estimativa de vazões de referência mínimas, como a Q_{90} ou a $Q_{7,10}$, pode ser aplicado o segundo tipo de método identificado por Tucci (2002). Assim, este método inicia pela estimativa dos valores da vazão de referência em cada um dos postos fluviométricos com dados. A seguir, são obtidas as características fisiográficas e climáticas

da bacia contribuinte a cada um dos postos fluviométricos. Finalmente, são geradas equações de regressão, relacionando a vazão às características fisiográficas e climáticas. Desta forma, torna-se possível obter a vazão de um local não monitorado a partir de suas características aplicadas à equação de regressão.

A equação de regressão pode ser Global ou Regional (Salinas et al., 2013). Na regionalização global é buscada uma única equação de regressão com todos os dados conhecidos. Na abordagem regional a área de estudo é dividida em sub-regiões, de acordo com algum critério de semelhança hidrológica (Castellarin et al., 2004; Naghettini e Pinto, 2007; Beskow et al., 2016), e uma equação de regressão diferente é obtida para cada sub-região.

A regionalização com equações de regressão é muito utilizada no Brasil, seguindo metodologias descritas por ELETROBRÁS (1985), Tucci (2002), Naghettini e Pinto (2007), e CPRM (Melo e Villas Boas, 2017; Santos, 2015 e Pinto e Alves, 2001).

A CPRM – Serviço Geológico do Brasil realizou estudos de regionalização de vazões mínimas (Q_{95} ou $Q_{7,10}$) em diversas bacias hidrográficas do Brasil, como a bacia do Alto São Francisco (Pinto e Alves, 2001), rio Paraíba do Sul (Melo e Villas Boas, 2017), as bacias litorâneas de Pernambuco e Alagoas (Santos, 2015) e Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japaratinga, Subaúma e Jacuípe (Virões, 2013). Esta regionalização se deu estabelecendo as equações regionais de regressão, com base nas variáveis explicativas de área de drenagem e precipitação total anual média, definindo-se regiões homogêneas (Nathan e McMahon, 1990). De acordo com estes autores, a maioria das equações regionais destes estudos apresentou um desempenho de resultados com desvio padrão dentro de um limite de erro pré-estabelecido de 25%.

Apesar de muito utilizado, a maior parte das avaliações de sua aplicação se restringem ao erro do ajuste das equações, dificilmente avaliando-se a incerteza a partir de métodos de validação cruzada. Uma das vantagens do método de regionalização utilizando equações de regressão em relação ao método da vazão específica, por exemplo, é que a equação de regressão pode representar a heterogeneidade da bacia hidrográfica, desde que esta heterogeneidade seja adequadamente representada pelas variáveis utilizadas na regionalização. Além disso, a equação de regressão normalmente está apoiada em dados de vários postos fluviométricos, fazendo com que eventuais erros em um ou outro posto tenham menor impacto na estimativa da vazão no local sem dados.

Entre as desvantagens cita-se que o método requer um número mínimo de estações com dados para viabilizar o ajuste, e esse número cresce com a quantidade de variáveis explicativas utilizadas. Outro ponto é que a definição de regiões homogêneas pode ampliar a complexidade do método. Além disso, é relativamente comum que ajustes baseados em área de drenagem resultem em valores fisicamente improváveis quando extrapolados para pequenas bacias ou que a continuidade entre as vazões não seja preservada, requerendo uso de soluções paliativas.

1.1.2.6 Interpolação geoestatística

A interpolação de dados de vazão sobre a rede de drenagem é uma metodologia para estimativa de vazões em locais sem dados que pode ser utilizada para vazões de referência, e que também tem sido proposta como forma de estimar séries de vazões.

Entre os métodos de interpolação, a metodologia que se destaca na literatura ao longo dos últimos 15 anos é denominada Top-Kriging (Skoien et al., 2006; Archfield et al., 2013). Esta metodologia é inspirada no método de Kriging para interpolação de dados, mas adaptada para a estrutura topológica dos dados de vazão em rios (Gottschalk et al., 2011).

Laaha et al. (2014) compararam o método Top-kriging com a regionalização baseada em equações de regressão para estimar vazões mínimas em 300 bacias na Austria e concluíram que os erros do método Top-Kriging são menores ou iguais aos erros da metodologia alternativa.

Uma versão simplificada da interpolação, não relacionada ao método Top-Kriging, e utilizada em algumas aplicações no Brasil foi apresentada por Chaves (2002).

1.1.2.7 Modelagem hidrológica chuva-vazão

Modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são ferramentas que buscam representar a transformação da chuva em vazão em uma bacia hidrográfica. O principal objetivo destes modelos é utilizar os dados de chuva para gerar uma série completa de dados de vazão, e não apenas uma vazão de referência. No entanto, uma vez que a série de vazões calculadas pelo modelo está disponível, é fácil obter as vazões de referência.

A aplicação de um modelo do tipo chuva vazão em uma bacia sem dados normalmente é precedida pela calibração anterior em uma ou mais bacias com dados. Depois de estabelecidos os valores dos parâmetros na ou nas bacias com dados, os parâmetros do modelo são transferidos para a bacia sem dados. Há diversas metodologias para esta transferência, conforme mostra uma revisão recente de Guo et al. (2020).

Alguns exemplos da aplicação de modelos hidrológicos do tipo chuva vazão para a estimativa de vazões em locais sem dados no Brasil são apresentados por Alexandre et al. (2005), Diniz e Clarke (2001), Saraiva et al. (2011), Otsuki e Reis (2011), Pereira et al. (2013) e Virões e Cirilo (2019).

A modelagem hidrológica chuva-vazão pode ser combinada com técnicas de assimilação de dados, o que permitiria, ao menos teoricamente, aprimorar as estimativas de vazões de referência em locais sem dados (Pereira, 2017; Gama et al., 2021).

1.1.2.8 Modelagem hidrológica apoiada por séries curtas;

A modelagem hidrológica chuva-vazão apoiada por séries curtas está baseada na ideia de utilizar séries de vazões observadas relativamente curtas para calibrar os parâmetros mais importantes de um modelo hidrológico, e o posterior uso deste modelo com séries relativamente longas de chuva. Dessa forma seria possível obter séries relativamente longas de dados calculados de vazão, e, a partir destes, as vazões de referência.

Essa combinação permitiria explorar a representatividade das séries de dados de postos pluviométricos, que normalmente são mais longas e normalmente mais disponíveis a distâncias relativamente curtas do local de interesse.

No Brasil, a combinação dos métodos de modelagem hidrológica chuva-vazão com o método de séries curtas, ou medições esporádicas, está presente de forma razoavelmente consolidada na forma do chamado Método Silveira, descrito por Silveira et al. (1998).

Diversos trabalhos têm explorado uso de dados esporádicos, ou de séries incom-

pletas, para aprimorar o desempenho de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão (Rojas-Serna et al., 2016; Sun et al., 2017; Pool et al., 2017; Drogue e Khediri, 2016; Pool et al., 2019; Etter et al., 2020; Obregon et al., 1999).

Por exemplo, Rojas-Serna et al. (2016) e Etter et al. (2020) mostraram que poucas medições de vazão em locais não monitorados sistematicamente podem contribuir significativamente para a redução dos erros de modelos hidrológicos chuva-vazão.

1.1.2.9 Reanálise hidrológica com assimilação de dados;

A reanálise é uma forma de combinar dados observados com modelos do comportamento do sistema físico, procurando fornecer o quadro mais completo possível das variáveis relevantes do sistema no tempo e no espaço. As técnicas de reanálise têm sido utilizadas de forma sistemática na área da meteorologia nas últimas décadas e são extremamente úteis para obter estimativas do valor de variáveis meteorológicas em locais não monitorados, ou em instantes do tempo em que não há medição.

Na área de hidrologia, o conceito de reanálise ainda é relativamente pouco difundido, apesar de algumas iniciativas recentes (Wongchuig et al., 2019; Alfieri et al., 2020; Gama et al., 2021).

A combinação de modelos com dados está baseada na técnica de assimilação de dados, em que valores observados de uma ou mais variáveis são utilizados para a correção de variáveis de estado do modelo hidrológico, buscando aproximar as condições simuladas das observações disponíveis (Meller et al., 2012; Jiménez et al. 2019; Gama et al., 2019).

Os métodos de assimilação, quando aplicados em modelos hidrológicos distribuídos, podem ser utilizados para aprimorar a estimativa de vazões em locais não monitorados (Clark et al., 2008).

Um exemplo do uso da assimilação de dados para estimativa de vazões de referência em locais sem dados foi apresentado por Pessoa (2017), que utilizou o Modelo de Grandes Bacias (MGB) com uma técnica de assimilação de dados empírica para obtenção de vazões em locais sem dados do Rio Grande do Sul.

O método da reanálise hidrológica com assimilação de dados, parece ser bastante promissor. Uma discussão mais profunda sobre ele é apresentada em Gama et al. (2021).

1.2 Incertezas na estimativa de vazões de referência

Os dados de vazão de rios, especialmente as vazões de referência utilizadas na tomada de decisão relacionada ao uso dos recursos hídricos, são, frequentemente, apresentados como se fossem isentos de erros. Entretanto, estas vazões são obtidas a partir de medições que podem conter erros ou de modelos matemáticos (como a curva-chave de um posto fluviométrico) que podem ser imperfeitos (McMillan et al., 2017). Por este motivo, as vazões de referência também podem ter erros, mas a provável magnitude desses erros dificilmente é comunicada adequadamente.

Esta falta de comunicação sobre a provável magnitude dos erros dos dados de vazão pode levar a tomadas de decisão ruins. Decisões sobre a gestão da água, que são tomadas ignorando a incerteza dos valores das vazões de referência normalmente

utilizadas para esta tomada de decisão, são, normalmente, piores do que as decisões tomadas por profissionais ou procedimentos que reconhecem a incerteza (McMillan et al., 2017).

Idealmente, deveríamos saber estimar não só as próprias vazões de referência, como também a sua incerteza, considerada aqui como uma estimativa da provável faixa de valores da diferença entre o valor estimado e o valor real, que é desconhecido (McMahon e Peel, 2018).

Neste texto apresentamos algumas estimativas de incerteza de duas vazões de referência frequentemente utilizadas no Brasil (a vazão média e a Q_{95}) em locais com dados e sem dados. Em locais com dados (capítulo 2), as estimativas de incerteza no foram baseadas em trabalhos de outros autores (Westerberg et al., 2016).

Em locais com pouca ou nenhuma informação de vazão, estimativas de incerteza utilizando os quatro primeiros métodos elencados no item 1.1.2, e apresentadas nos capítulos 3 a 6, foram obtidas ao longo de uma pesquisa realizada em conjunto por pesquisadores do IPH-UFRGS e da Agência Nacional de Águas (ANA).

Nesse caso, a pesquisa tomou como “verdade” a melhor informação que na prática estaria disponível, ou seja, uma série longa de dados no local de interesse.

Para tanto, foi utilizada uma metodologia da validação cruzada envolvendo simulação, no qual a vazão de referência foi estimada para diferentes locais com dados (postos fluviométricos) como se o local fosse um ponto de interesse não monitorado, utilizando para isso uma das metodologias de estimativa para locais sem dados.

A seguir, a estimativa obtida era comparada à vazão de referência “real”, considerando que a vazão de referência obtida com a série de dados observados é uma boa aproximação da vazão de referência verdadeira.

Este procedimento foi repetido em centenas de postos fluviométricos de diversas regiões do país, o que permitiu uma análise estatística da distribuição de frequência acumulada dos erros. Considerando um intervalo de confiança (por exemplo, 75%) é possível utilizar esta distribuição estatística dos erros como uma aproximação da incerteza em locais em que realmente não há dados.

Os limites dos intervalos de confiança sumarizados nas tabelas ao longo do livro, para cada caso simulado, foram obtidos a partir da distribuição dos resíduos relativos ao valor estimado, conforme equação 1.1, de forma que podem ser aplicados diretamente às estimativas de cada caso para obtenção dos correspondentes valores observados.

$$RR(\%) = 100 \times (Q_{obs} - Q_{est}) / Q_{est} \quad (1.1)$$

onde: RR é o resíduo relativo (%), Q_{est} é a vazão de referência estimada por algum dos métodos e Q_{obs} é a vazão de referência observada na estação em análise.

A forma de obtenção destas estimativas de incerteza é descrita de forma mais aprofundada e detalhada em um conjunto de relatórios (Sorribas et al., 2021) disponíveis em formato digital.



2

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA EM LOCAL COM DADOS



Em um local com dados medidos, as vazões de referência são obtidas a partir de análises estatísticas da série de dados observados.

As análises apresentadas neste livro são direcionadas à vazão média e à Q_{95} por serem vazões de referência de relevante interesse na área de recursos hídricos.

Considerando que há uma série de dados de vazão medida em um rio, em um determinado local, em um intervalo de tempo regular (diariamente, por exemplo), então a vazão média é calculada por:

$$Q_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N Q_i}{N} \quad (2.1)$$

A vazão média representa o potencial hídrico da bacia, ou o quanto de água estaria disponível se fosse superada a variabilidade temporal.

Já a vazão Q_{95} é uma referência das condições de estiagem de uma bacia e é obtida a partir da chamada curva de permanência de vazões. Essa curva relaciona um valor de vazão com o percentual de tempo em que ele foi observado ou superado. Ela pode ser construída com valores médios de diferentes durações (dados diários, mensais, anuais...) sendo tradicional o uso de vazões diárias (Collischonn e Dornelles, 2013; Naghettini e Pinto, 2007; Tucci, 1993).

De forma prática, a Q_{95} é obtida ordenando os N valores Q_i em ordem decrescente e escolhendo o valor Q_i correspondente a posição $i = N \times 95/100$, ou seja, onde 95% dos valores são maiores ou iguais a Q_i . Utilizando uma planilha de cálculo eletrônica, o valor pode ser obtido utilizando diretamente a função percentil aplicada a série de vazões. Nesse caso, a função utiliza a ordem crescente e, portanto, o valor a ser buscado seria o correspondente a 5%.

Embora haja uma elevada dependência entre os valores que compõem a curva de permanência de vazões diárias, ela é tratada como uma estimativa de probabilidade de excedência, sendo também recorrente sua associação ao conceito de garantia e segurança. Nesse sentido, considera-se que a vazão Q_{95} diária corresponde à vazão com 95% de probabilidade ocorrer em um dia qualquer, ou com 95% de garantia de que será mantida no rio.

Para uma boa estimativa da vazão média e da Q_{95} deveriam ser utilizadas, idealmente, séries relativamente longas de dados observados. Existem recomendações, por exemplo, que indicam utilizar pelo menos 20 anos de dados diários para estimativa de vazões de estiagem (Tallaksen and van Lanen, 2004).

Devido à variabilidade climática e outras possíveis alterações, as estimativas de vazão obtidas a partir de poucos anos de dados apresentam desvios em relação ao valor de longo termo. Isso ocorre pois o período de dados registrados numa série curta pode referir-se a anos mais úmidos (ou secos) do que o normal, acarretando um viés na estimativa. No capítulo 3 discutimos a incerteza na estimativa da vazão de referência em função da disponibilidade de dados observados.

Entretanto, mesmo em locais com séries de dados observados relativamente longas, é necessário considerar que existe uma incerteza na vazão de referência estimada. Neste caso, a incerteza deriva, principalmente, dos erros associados às medições de vazão, e à curva-chave, que frequentemente é utilizada para estimar a vazão de forma indireta. A incerteza das vazões de referência relacionadas estas fontes de erro é discutida no item 2.1.

2.1 Incerteza da estimativa de vazões de referência com séries longas de dados

A incerteza na estimativa das vazões de referência em locais com dados está associada, principalmente, às incertezas da medição da vazão e à falta de representatividade da série observada. Em locais com séries suficientemente longas, pode-se considerar que a incerteza maior está relacionada com as incertezas da medição da vazão.

A maior parte das séries de dados de vazão em locais com dados é obtida de forma indireta, a partir de uma série de dados de cota do nível da água e de uma função que relaciona a cota à vazão, que é conhecida como curva-chave ou curva de descarga (Collischonn e Dornelles, 2013; Jaccon e Cudo, 1989; Santos et al., 2001; Boiten, 2008).

A curva-chave, por sua vez, é obtida de forma empírica, a partir de múltiplas medições de vazão, que podem conter erros, e de medições simultâneas de cota que também podem contê-los.

A série de dados de vazão resultante é, portanto, uma série de estimativas de vazão que contêm incertezas relacionadas às seguintes fontes:

- 1. Incertezas na medição da série temporal de cotas (Horner et al., 2018);**
- 2. Incertezas na medição de cotas e vazões utilizadas para obter a curva-chave;**
- 3. Incertezas na própria curva-chave;**

As incertezas na curva-chave incluem alterações temporais das características do rio no local das medições (erosão e assoreamento) e eventuais extrapolações da curva em relação aos dados efetivamente medidos (Santos et al., 2001; Grison e Kobiyama, 2009).

Medições de vazão individuais, utilizando alguma variação do método velocidade x área, têm uma incerteza que depende do método de medição e das características do rio. Alguns autores sugerem que medições de vazão de boa qualidade têm incerteza que pode ser representada por desvio padrão da ordem de 2 a 3%, ou por intervalo de confiança (de 95%) da ordem de 5 a 7% (Boiten, 2008; Le Coz et al., 2014). Entretanto, em condições de vazão mais baixa, a incerteza tende a crescer. Além disso, nem todas as medições de vazão são, necessariamente, de boa qualidade.

A definição de uma curva-chave é dificultada pela incerteza das medições individuais de vazão, pelas alterações que ocorrem na seção transversal ao longo do tempo, pela extrapolação, e pela possível inadequação do tipo de equação pré-selecionado para representar o processo hidráulico no trecho de rio em que se encontra o posto fluviométrico (Clarke, 1999; Clarke et al. 2000; Kiang et al., 2018; Maldonado et al., 2018; Garcia et al., 2020; Le Coz et al., 2014; Mansanarez et al. 2019; McMahon e Peel, 2018; McMillan e Westerberg, 2015)

Assim, vazões de referência estimadas a partir de séries de dados de vazões medidas indiretamente, utilizando a curva-chave, podem ter uma incerteza considerável. De acordo com um trabalho de Westerberg et al. (2016), a incerteza (considerando o intervalo de confiança de 90%) da vazão média é menor do que 12% em 50% dos postos, e maior do que 12% em 50% dos postos. Já a incerteza (90%) da Q_{95} é menor do que 34% em 50% dos postos, e maior do que 34% em 50% dos postos.

Isto significa que, tipicamente, a vazão média real está no intervalo entre +/- 12% da vazão média estimada, e que a Q_{95} real está no intervalo entre +/- 34% da Q_{95} estimada, mesmo em locais em que há séries de dados relativamente longas.

Outros autores (McMillan et al., 2012) apresentam valores semelhantes, sugerindo que a incerteza (intervalo de confiança de 95%) de vazões baixas é da ordem de +/- 50% a +/- 100%, de vazões médias é da ordem de +/- 10% a +/- 20%, e de vazões altas é da ordem de +/- 40%.

Obviamente, a incerteza da vazão de referência em um posto fluviométrico particular depende da qualidade da curva-chave deste posto. A tabela 2.1 apresenta um resumo dos resultados do trabalho de Westerberg et al. (2016) que avaliou o impacto da incerteza da curva-chave na estimativa de vazões de referência, considerando postos fluviométricos com curvas-chave de diferentes níveis de qualidade.

Tabela 2.1: Incerteza na estimativa das vazões de referência (vazão média e Q_{95}) em função da incerteza na curva-chave, com base nos resultados de Westerberg et al. (2016), considerando o intervalo de confiança de 90%.

Locais	Incerteza Q média	Incerteza Q_{95}
5% Melhores postos fluviométricos	< 9%	< 17%
Local mediano	12%	34%
5% Piores postos fluviométricos	> 29%	> 78%

Observa-se, na tabela 2.1, que em um posto fluviométrico com curva-chave de qualidade mediana, a incerteza da estimativa da vazão média é de 12%, considerando o intervalo de confiança de 90%. Isto significa que, em 90% dos casos deste tipo de posto fluviométrico, se espera que a vazão média real esteja no intervalo entre 12% a menos e 12% a mais do que a vazão média estimada.

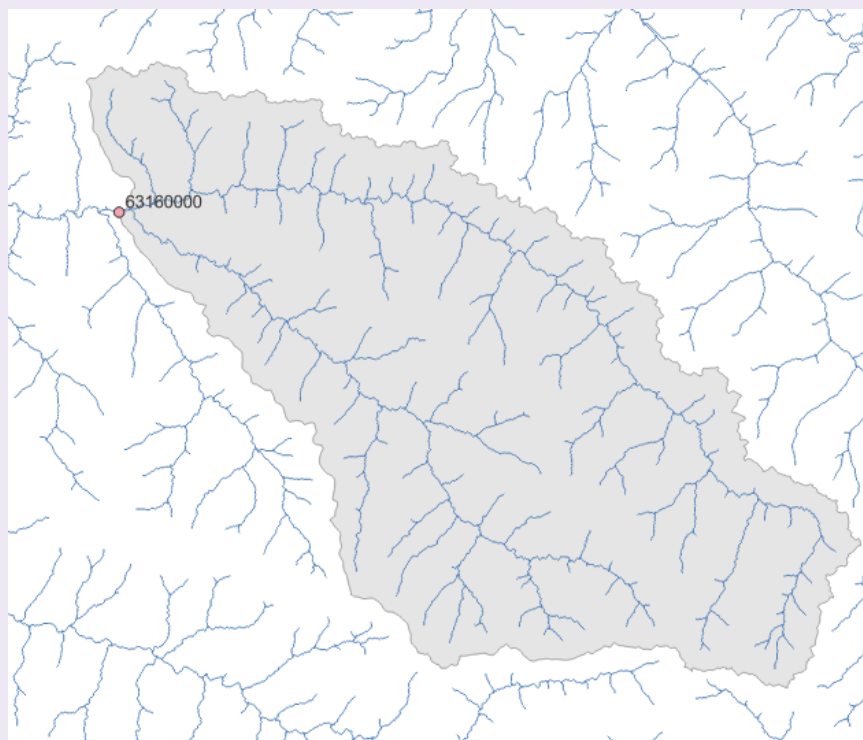
A incerteza da vazão Q_{95} é ainda maior, conforme a tabela 2.1. De acordo com Westerberg et al. (2016), a incerteza da Q_{95} em locais com curva-chave de qualidade mediana é de 34%. Isto significa que, em 90% dos casos deste tipo de posto fluviométrico, se espera que a Q_{95} real esteja no intervalo entre 34% a menos e 34% a mais do que a Q_{95} estimada.

Estimativas semelhantes às da tabela 2.1 poderiam ser obtidas individualmente, para cada posto fluviométrico, utilizando metodologias como as descritas por Westerberg et al. (2016), Le Coz et al. (2014) e Garcia et al. (2020).

2.2 Exemplo da estimativa de incerteza em local com série longa de dados



Neste exemplo vamos estimar a Q_{95} do rio Aguapeí, no Estado de São Paulo, num local onde existem dados observados, com uma série relativamente longa, do posto fluviométrico Fazenda Bom Retiro (código 63160000) ilustrado na figura que segue.



A Q_{95} no posto fluviométrico 63160000, no período de 1971 a 2000, é igual a $16,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Considerando que a curva-chave do posto fluviométrico é normal, nem extraordinariamente boa ou ruim, a tabela 2.1 sugere um valor de 34% como referência da incerteza da estimativa da Q_{95} em função da incerteza da curva-chave (considerando o intervalo de confiança de 90%).

Assim, espera-se que o valor de Q_{95} esteja no intervalo definido por:

$$16,9 - 16,9 \cdot 34\% < Q_{95} < 16,9 + 16,9 \cdot 34\%$$

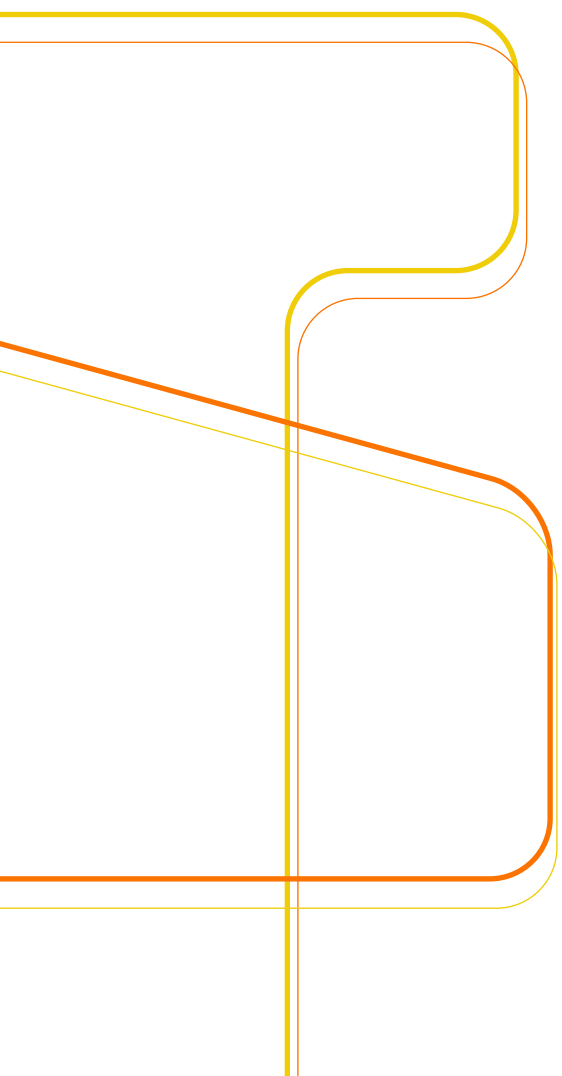
ou seja:

$$11,2 < Q_{95} < 22,6$$

Portanto, espera-se que a Q_{95} do rio Aguapeí, no posto fluviométrico 63160000, esteja no intervalo entre 11,2 e 22,6 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Esta estimativa é válida para o período de observação (1971 a 2000), e considera apenas uma estimativa genérica da incerteza da curva-chave, sem informações detalhadas do local.



ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA EM LOCAL COM POUCOS DADOS



A dinâmica das redes de monitoramento hidrológico, com a instalação de novos postos fluviométricos e a extinção de outros mais antigos, configura um cenário em que muitos postos fluviométricos dispõe de séries mais curtas do que seria desejável. Zhang (2017), por exemplo, afirma que 43% dos 394 postos fluviométricos do estado de Illinois, nos Estados Unidos, tem séries de menos de 20 anos de dados. Além disso, a maioria destes postos com séries relativamente curtas está localizada em pequenas bacias, nas cabeceiras dos rios principais, e, portanto, contém informação valiosa para os pequenos rios e córregos.

Vazões de referência obtidas a partir de séries curtas sofrem com a incerteza decorrente da variabilidade amostral. A variabilidade climática natural resulta em períodos de anos, ou sequencias de anos, mais secos ou mais úmidos do que a média de longo prazo. Assim, se a série de dados disponível num local é curta e coincide com um período de anos mais úmidos (secos) do que a média, a vazão de referência possivelmente será ligeiramente maior (menor) do que seria caso houvesse uma série de dados mais longa e mais representativa. Por este motivo, em alguns estudos as séries observadas não são consideradas nas análises hidrológicas regionais quando o período de observação é menor do que um determinado limite, por exemplo 10 anos.

Em locais com séries curtas de dados, as incertezas na estimativa da vazão de referência devido à falta de representatividade temporal podem ser maiores que as incertezas ligadas à curva-chave.

Por outro lado, em muitos casos, essas séries curtas constituem a única base de dados disponível. Isto ocorre porque postos fluviométricos com série curta podem estar localizados em regiões com rede esparsa, ou quase ausente, e, portanto, contém valiosas informações sobre o comportamento hidrológico da região. Nesse sentido, compreender e avaliar como utilizar séries de dados curtas parece ser mais razoável do que simplesmente ignorá-las.

As séries curtas observadas podem não ser representativas de um longo período, mas é possível utilizar métodos que relacionam as estimativas de vazão de referência obtidas com séries curtas com estimativas regionais baseadas em séries mais longas, buscando obter, ao mesmo tempo, os benefícios da representatividade local e da representatividade do período amostral.

Neste capítulo apresentamos estimativas da incerteza das vazões de referência (Vazão média e Q_{95}) obtida a partir de séries curtas de dados, e como esta incerteza pode ser atenuada através de uma técnica denominada ajuste climático, ou redução do viés climático.

3.1 O método do ajuste climático

O método de ajuste climático adotado no presente trabalho está baseado no trabalho de Laaha e Blöschl (2005), e tem como fundamento a utilização de dados de um ou mais postos fluviométricos que possuem série longa, denominado(s) posto(s) doador(es), para efetuar a correção no local de interesse que possui série curta. Enquanto o posto fluviométrico de série curta fornece informações locais, o posto doador fornece um suporte a respeito de como o local de interesse se comporta, na perspectiva de longo termo. Assim, o método de ajuste climático considera uma etapa de seleção de ao menos um posto doador seguido do cálculo e aplicação de um fator de correção.

No método de ajuste climático de Laaha e Blöschl (2005), considera-se que a proporção entre as vazões de referência obtidas a partir da série longa e da série curta tem o mesmo valor tanto no posto doador como no ponto de interesse. Esta hipótese está expressa na equação 3.1.

$$\frac{QD_L}{QD_C} = \frac{QR_L}{QR_C} \quad (3.1)$$

onde: QD_L é a vazão de referência de série longa no posto doador; QD_C é a vazão de referência de série curta no posto doador; QR_L é a vazão de referência de série longa ajustada no ponto de interesse (obtida com os dados do mesmo período utilizado para estimar QD_L); e QR_C é a vazão de referência de série curta no ponto de interesse (obtida com os dados do mesmo período utilizado para estimar QD_C).

No ponto de interesse não há uma série longa de dados, então a vazão QR_L da equação 3.1 não é conhecida. Mas a proporção entre vazões de referência de série curta e de série longa pode ser estimada a partir, exclusivamente, dos dados do posto doador, pela equação 3.2:

$$K_{CL} = \frac{QD_L}{QD_C} \quad (3.2)$$

onde: QD_L é a vazão de referência de série longa no posto doador; QD_C é a vazão de referência de série curta no posto doador; e K_{CL} é o fator de proporção entre as vazões de referência obtidas com a série longa e com a série curta.

Uma vez conhecido o valor de K_{CL} , pode ser obtida uma estimativa (QR_A) da vazão de referência QR_L , pela equação 3.3:

$$QR_A = QR_C \cdot K_{CL} \quad (3.3)$$

onde QR_C é a vazão de referência de série curta no ponto de interesse; QR_A é uma estimativa da vazão de referência de série longa baseada no ajuste climático; e K_{CL} é o fator de ajuste obtido pela equação 3.2.

Assim, a estimativa de vazão de referência com ajuste climático é realizada pelo cálculo do fator K_{CL} (Equação 3.2) e pela aplicação do fator K_{CL} ao valor de vazão estimado pela série curta (Equação 3.3).

3.2 Incerteza da estimativa de vazões de referência com séries curtas de dados

A incerteza da estimativa da vazão de referência associada à variabilidade climática pode ser melhor compreendida comparando valores de vazões de referência obtidos utilizando apenas fragmentos curtos de séries de dados longas, com os valores obtidos utilizando as séries longas. Isto foi realizado utilizando dados de 663 postos fluviométricos em todo o Brasil (Collischonn et al. 2021a), e os resultados são apresentados resumidamente aqui, considerando a vazão média (item 3.2.1) e a Q_{95} (item 3.2.2).

3.2.1 Incerteza da vazão média em locais com séries de observação curtas

A forma como a incerteza da estimativa da vazão média, em um local com dados observados, varia com o tamanho da série (em anos) é apresentada na figura 3.1. Esta figura foi obtida comparando as estimativas de vazão média obtidas com fragmentos, de diversos tamanhos, da série de dados observados de 663 postos fluviométricos de todo o Brasil, com a vazão média obtida com séries longas (de 30 a 35 anos). O número de anos da série encurtada de dados observados corresponde ao eixo horizontal do gráfico da figura 3.1. O eixo vertical é o erro relativo. As linhas correspondem aos limites mínimo e máximo que contém 50%, 75% e 90% dos casos.

Uma ressalva importante é que no gráfico da figura 3.1 não está sendo considerada a incerteza da curva-chave, já que a vazão média obtida com a série longa é considerada o valor “real”. Na tabela 2.1 mostramos que, mesmo em locais com série longa, a incerteza relacionada com a curva-chave é de 12% em postos fluviométricos típicos (considerando o intervalo de confiança de 90%).

Observa-se, na figura 3.1, que, utilizando 1 ano de dados para estimar a vazão média, os limites inferior e superior de um intervalo de confiança que contém 90% dos casos são, respectivamente, -42% e +73%. Isto significa que, em 90% dos casos analisados por simulação com postos fluviométricos de todo o país, a vazão média obtida com uma série longa de dados ficou dentro de um intervalo definido por 42% a menos até 73% a mais do que a vazão média estimada com apenas 1 ano de dados.

Com 5 anos de dados observados estes limites do intervalo de confiança de 90% são -24% e +32%. Estes valores ainda são bastante superiores à incerteza da curva-chave.

Com 15 anos de dados observados os limites do intervalo de confiança de 90% são -12% e +14%, que já são semelhantes aos valores mencionados para a incerteza da curva-chave.

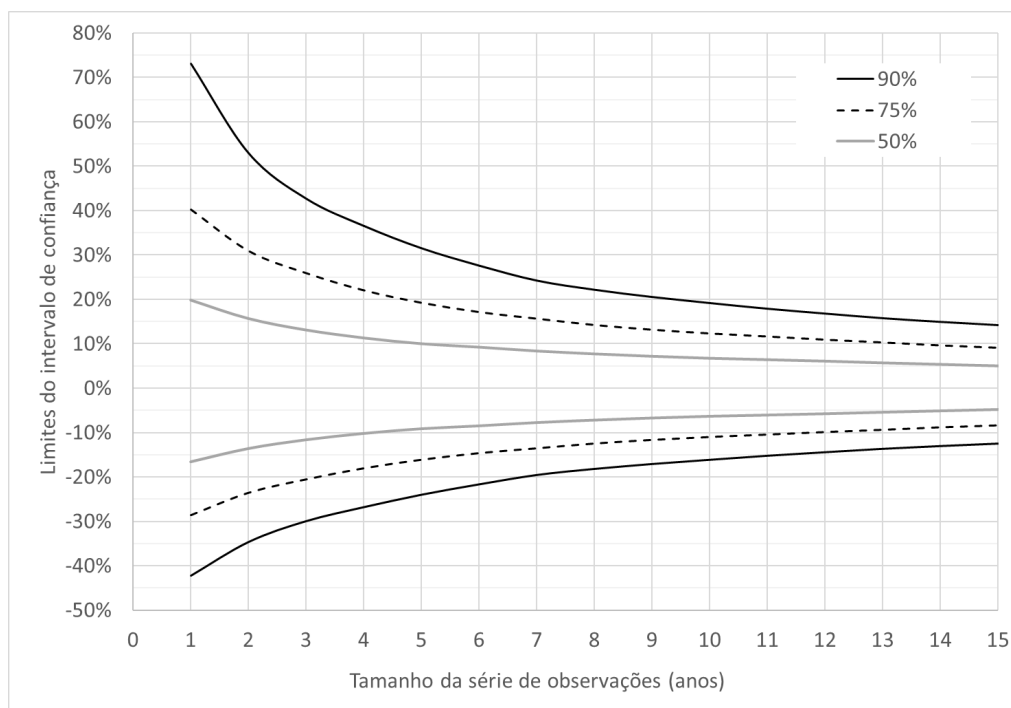


Figura 3.1: Limites do intervalo de confiança da estimativa da vazão média com séries curtas de dados observados (os intervalos de confiança são: 90% linha contínua preta; 75% linha tracejada; 50% linha contínua cinza).

Os resultados resumidos na figura 3.1 foram obtidos sintetizando os resultados de todos os postos fluviométricos analisados. Uma análise mais detalhada mostra que a incerteza tende a ser maior em pequenos rios e menor em grandes rios (Collischonn et al. 2021a).

3.2.2 Incerteza da Q_{95} em locais com séries de observação curtas

A forma como a incerteza da estimativa da Q_{95} em um local com dados observados, varia com o tamanho da série de dados observados (em anos) é apresentada na figura 3.2. Esta figura foi obtida comparando as estimativas de Q_{95} obtidas com fragmentos, de diversos tamanhos, da série de dados observados de 663 postos fluviométricos de todo o Brasil, com a vazão média obtida com séries longas (de 30 a 35 anos) nestes mesmos postos. O número de anos da série de dados observados corresponde ao eixo horizontal do gráfico da figura 3.2. O eixo vertical é o erro relativo. As linhas correspondem aos limites mínimo e máximo que contém 50%, e 75% e 90% dos casos.

Uma ressalva importante é que no gráfico da figura 3.2 não está sendo considerada a incerteza da curva-chave, já que a vazão média obtida com a série longa é considerada o valor “real”. Na tabela 2.1 mostramos que, mesmo em locais com série longa, a incerteza da estimativa da Q_{95} relacionada com a incerteza da curva-chave é de 34% em postos fluviométricos típicos (considerando o intervalo de confiança de 90%).

Observa-se, na figura 3.2, que, utilizando 1 ano de dados para estimar a Q_{95} , os limites inferior e superior de um intervalo de confiança que contém 90% dos casos são,

respectivamente, -55% e +122%. Isto significa que, em 90% dos casos analisados por simulação com postos fluviométricos de todo o país, a Q_{95} obtida com uma série longa de dados ficou dentro de um intervalo definido por 55% a menos até 122% a mais do que a Q_{95} estimada com apenas 1 ano de dados.

À medida que a série de dados observados aumenta, os limites do intervalo de confiança tendem a se aproximar de zero. Com 10 anos de dados observados, os limites do intervalo de confiança de 90% são -27% e +36%, que já são semelhantes aos valores mencionados para a incerteza da curva-chave (34%, conforme tabela 2.1). Entretanto, deve se levar em conta que a incerteza apontada no gráfico da figura 3.2 é exclusivamente relacionado à variabilidade amostral. A incerteza total da estimativa da Q_{95} deve incluir a incerteza da curva-chave e é será maior, portanto, do que a incerteza mostrada na figura.

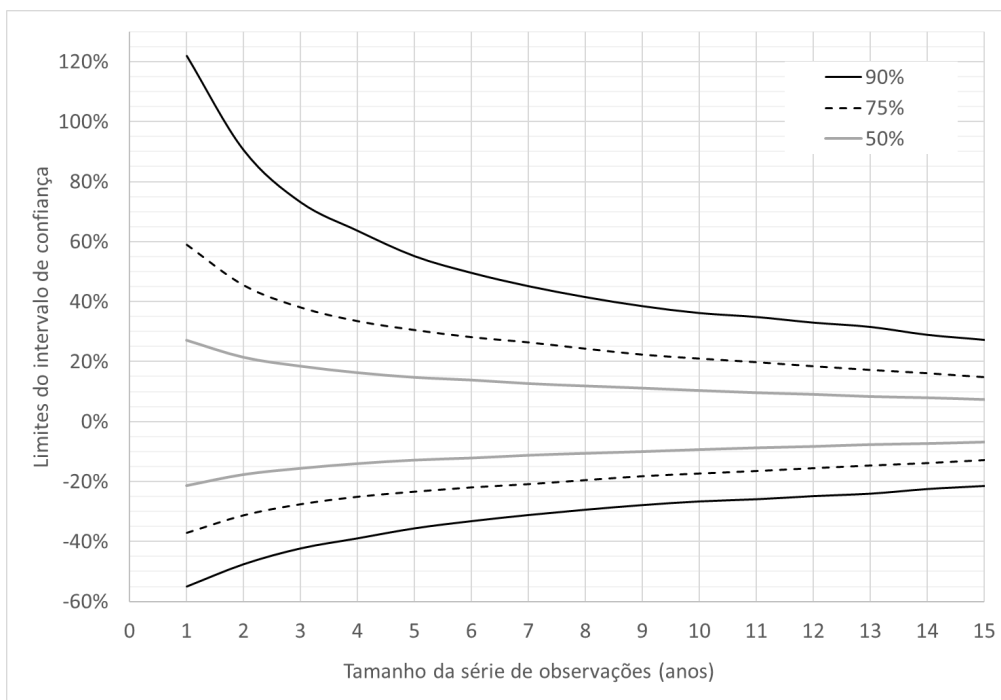


Figura 3.2: Limites do intervalo de confiança da estimativa da Q_{95} com séries curtas de dados observados (os intervalos de confiança são: 90% linha contínua preta; 75% linha tracejada; 50% linha contínua cinza).

Os resultados da figura 3.2 foram obtidos sintetizando todos os 663 postos fluviométricos. Uma análise mais detalhada (Sorribas et al., 2021d) mostra que a incerteza associada ao pequeno tamanho da série de dados observados tende a ser maior em pequenos rios e menor em grandes rios. Por exemplo, considerando o caso de ter apenas 1 ano de dados observados, em um rio cuja Q_{95} é inferior a $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a incerteza da Q_{95} é cerca de 2 vezes maior do que em um rio cuja Q_{95} é superior a $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aproximadamente.

Também é interessante observar que os erros da estimativa da Q_{95} apresentados aqui tem a mesma ordem de grandeza do que os erros encontrados na Áustria por Laaha e Blöschl (2005), embora na análise realizada no Brasil, apresentada aqui, predominem dados de postos fluviométricos com área de drenagem muito maior do que os analisados na Áustria.

3.3 Incerteza da estimativa de vazões de referência em locais com séries curtas e ajuste climático

Conforme apresentado no item 3.2, as vazões de referência estimadas a partir de séries curtas de dados observados sofrem com a incerteza decorrente da variabilidade amostral. Porém, em muitos casos, essas séries curtas constituem a única base de dados disponível. Por isso, existem métodos que procuram utilizar estas séries curtas de dados, combinadas com procedimentos de redução do viés devido à variabilidade do clima.

Um destes métodos é o método de ajuste climático (Laaha e Blöschl, 2005), descrito no início do capítulo 3. No método de ajuste climático são usados dados de um ou mais postos fluviométricos que possuem série longa, denominado(s) posto(s) doador(es), para efetuar a correção da estimativa da vazão de referência no local de interesse, que possui série curta (ver equações 3.1 a 3.3 no início do capítulo).

Para demonstrar como o método de ajuste climático pode reduzir a incerteza da estimativa de vazões de referência utilizando séries curtas de dados observados, foram realizadas simulações de aplicação do método em 663 postos fluviométricos em todo o Brasil (Sorribas et al., 2021d). O método do ajuste climático foi aplicado utilizando fragmentos curtos das séries longas (30 a 35 anos) de observações. Como postos doadores foram utilizados postos fluviométricos localizados na vizinhança do local de interesse, considerando ainda a semelhança de outras características, especialmente a área de drenagem. Os resultados desta análise são apresentados nos itens 3.3.1 (vazão média) e 3.3.2 (Q_{95}).

3.3.1 Incerteza da vazão média

A figura 3.3 mostra os limites do intervalo de confiança da estimativa da vazão média com séries curtas de dados observados, após a correção com o ajuste climático. Os intervalos de confiança são: 90% (linha contínua preta); 75% (linha tracejada); 50% (linha contínua cinza).

Observa-se, na figura 3.3, que, utilizando 1 ano de dados para estimar a vazão média, os limites inferior e superior de um intervalo de confiança que contém 90% dos casos são, respectivamente, -22% e +28%. Isto significa que, em 90% dos casos analisados por simulação com postos fluviométricos de todo o país, a vazão média obtida com uma série longa de dados ficou dentro de um intervalo definido por 22% a menos até 28% a mais do que a vazão média estimada com apenas 1 ano de dados, quando a estimativa desta vazão média foi corrigida pelo método de ajuste climático das equações 3.1 a 3.3.

O efeito do ajuste climático é tal que, com apenas 6 anos de dados observados os limites do intervalo de confiança de 90% já são -12% e +14%, que são semelhantes aos valores mencionados para a incerteza da curva-chave. Este mesmo nível de incerteza só ocorre com 15 anos de observações, quando não há o ajuste climático, conforme mostra a figura 3.1. Entretanto, novamente uma ressalva importante é que no gráfico da figura 3.3 não está sendo considerada a incerteza da curva-chave, já que a vazão média obtida com a série longa é considerada o valor "real". Na tabela 2.1 mostramos que, mesmo em locais com série longa, a incerteza relacionada com a curva-chave é de 12% em postos fluviométricos típicos (considerando o intervalo de confiança de 90%).

A tabela 3.1 apresenta alguns valores dos limites mínimo e máximo do intervalo de confiança das estimativas da vazão média com séries curtas de dados, com e sem ajuste climático. Estes valores correspondem aos dos gráficos das figuras 3.1 e 3.3. Observa-se que, com uma série de 10 anos de dados observados, os limites do intervalo de confiança da estimativa sem ajuste climático são -16% e +19%. Isto significa que, em 90% dos casos, a vazão média que seria estimada com uma série longa de dados (30 anos ou mais), está num intervalo entre a vazão média estimada com apenas 10 anos de dados menos 16% e a vazão média estimada com apenas 10 anos mais 19%. A tabela 3.1 também mostra que esta incerteza é semelhante à incerteza da estimativa da vazão média com ajuste climático, e com apenas 3 anos de dados observados.

Tabela 3.1: Limites do intervalo de confiança de 90% nas estimativas da vazão média com séries curtas de dados sem e com ajuste climático.

Número de anos da série observada	Sem ajuste climático		Com ajuste climático	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
1	-42%	+73%	-22%	+28%
2	-35%	+53%	-18%	+22%
3	-30%	+43%	-16%	+19%
4	-27%	+37%	-14%	+17%
5	-24%	+32%	-13%	+15%
6	-22%	+28%	-12%	+14%
7	-20%	+24%	-12%	+13%
8	-18%	+22%	-11%	+12%
9	-17%	+21%	-10%	+12%
10	-16%	+19%	-10%	+11%
15	-12%	+14%	-8%	+9%

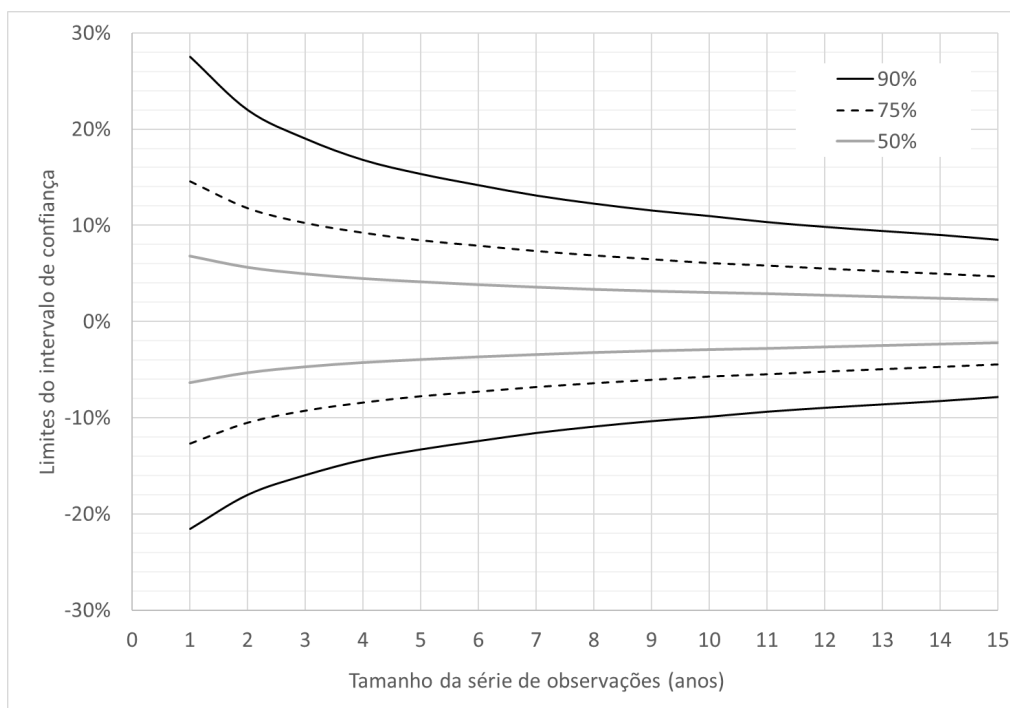


Figura 3.3: Limites do intervalo de confiança da estimativa da vazão média com séries curtas de dados observados, após a correção com o ajuste climático (os intervalos de confiança são: 90% linha contínua preta; 75% linha tracejada; 50% linha contínua cinza).

3.3.2 Incerteza da Q_{95}

A figura 3.4 mostra os limites do intervalo de confiança da estimativa da Q_{95} com séries curtas de dados observados, após a correção com o ajuste climático. Os intervalos de confiança são: 90% (linha contínua preta); 75% (linha tracejada); 50% (linha contínua cinza).

Observa-se, na figura 3.4, que, utilizando 1 ano de dados para estimar a Q_{95} , os limites inferior e superior de um intervalo de confiança que contém 90% dos casos são, respectivamente, -36% e +57%. Isto significa que, em 90% dos casos analisados por simulação com postos fluviométricos de todo o país, a Q_{95} obtida com uma série longa de dados ficou dentro de um intervalo definido por 36% a menos até 57% a mais do que a Q_{95} estimada com apenas 1 ano de dados, quando a estimativa desta Q_{95} foi corrigida pelo método de ajuste climático das equações 3.1 a 3.3.

O efeito do ajuste climático é tal que, com apenas 6 anos de dados observados os limites do intervalo de confiança de 90% para a Q_{95} já são -26% e +35%, que são semelhantes aos valores mencionados para a incerteza da curva-chave, cujo valor de referência é 34%, conforme a tabela 2.1. Este mesmo grau de incerteza só ocorre com 11 anos de observações, quando não há o ajuste climático, conforme mostra a figura 3.2. Entretanto, novamente uma ressalva importante é que no gráfico da figura 3.4 não está sendo considerada a incerteza da curva-chave, já que a Q_{95} obtida com a série longa é considerada o valor "real". Na tabela 2.1 mostramos que, mesmo em locais com série longa, a incerteza da estimativa da Q_{95} relacionada com a incerteza da curva-chave é de 34% em postos fluviométricos típicos (considerando o intervalo de confiança de 90%).

A tabela 3.2 apresenta alguns valores dos limites mínimo e máximo do intervalo de confiança das estimativas da Q_{95} com séries curtas de dados, com e sem ajuste climático. Estes valores correspondem aos dos gráficos das figuras 3.1 e 3.3. Observa-se que, com uma série de 10 anos de dados observados, os limites do intervalo de confiança da estimativa sem ajuste climático são -27% e +36%. Isto significa que, em 90% dos casos, a Q_{95} que seria estimada com uma série longa de dados (30 anos ou mais), está num intervalo entre a Q_{95} estimada com apenas 10 anos de dados menos 27% e a Q_{95} estimada com apenas 10 anos mais 36%. A tabela 3.1 também mostra que esta incerteza é semelhante à incerteza da estimativa da Q_{95} com ajuste climático, e com apenas 5 anos de dados observados.

Tabela 3.2: Limites do intervalo de confiança de 90% nas estimativas da Q_{95} com séries curtas de dados sem e com ajuste climático.

Número de anos da série observada	Sem ajuste climático		Com ajuste climático	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
1	-55%	+122%	-36%	+57%
2	-48%	+90%	-34%	+51%
3	-42%	+73%	-31%	+45%
4	-39%	+64%	-29%	+40%
5	-36%	+55%	-27%	+37%
6	-33%	+50%	-26%	+35%
7	-31%	+45%	-25%	+33%
8	-29%	+42%	-24%	+31%
9	-28%	+39%	-23%	+29%
10	-27%	+36%	-21%	+27%
15	-21%	+27%	-17%	+21%

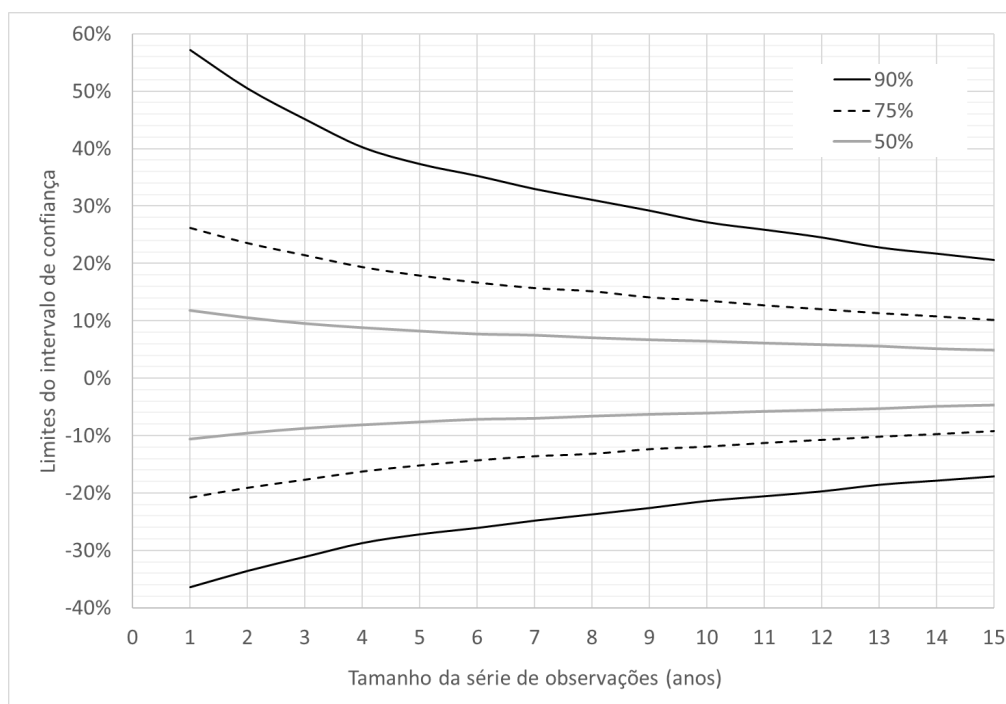


Figura 3.4: Limites do intervalo de confiança da estimativa da Q_{95} com séries curtas de dados observados, após a correção com o ajuste climático (os intervalos de confiança são: 90% linha contínua preta; 75% linha tracejada; 50% linha contínua cinza).

Os resultados apresentados sugerem que é possível, utilizando o método do ajuste climático, obter estimativas da Q_{95} com apenas 1 ano de dados, com incerteza semelhante àquela que seria obtida com 5 anos de dados, porém sem o ajuste climático. Esse resultado é semelhante ao encontrado por Zhang (2017), com dados do estado de Illinois, nos Estados Unidos. Zhang (2017) mostrou que vazões mínimas estimadas com apenas 1 ano de dados, com remoção de viés baseada em um posto fluviométrico de apoio, tem erros equivalentes às estimativas de vazão mínima obtidas com séries de até 5 anos de dados, porém sem esta remoção de viés.

3.4 Exemplo de Aplicação do método de ajuste climático

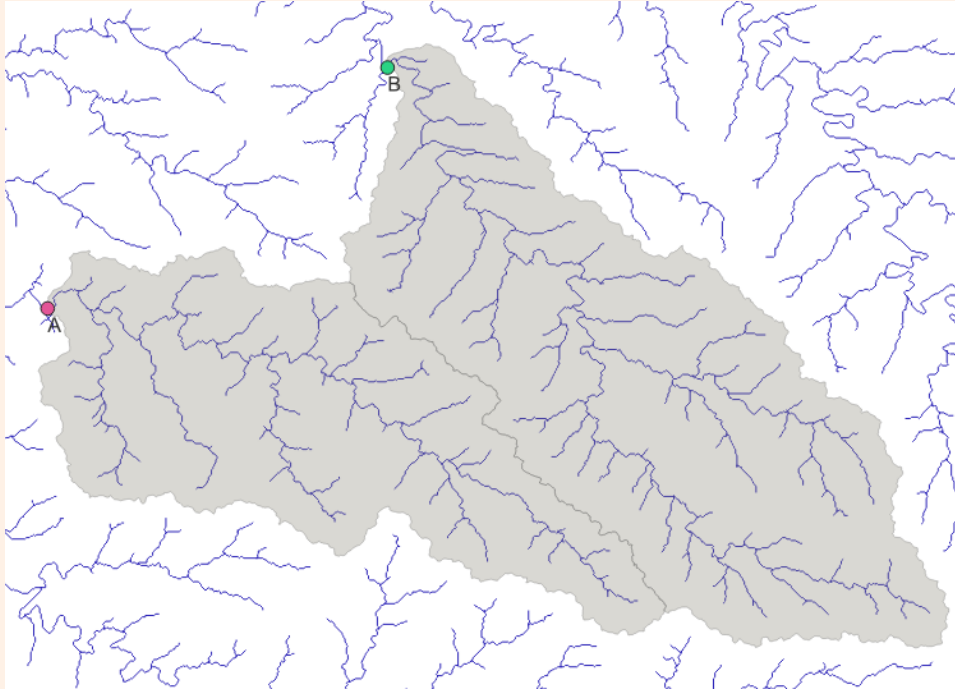
A vazão de referência Q_{95} deve ser estimada em um local A (ver figura) que conta com uma série de apenas 3 anos de dados. Em um posto fluviométrico B, localizado na bacia vizinha, há uma série observada longa, com mais de 30 anos de dados.

No local A há dados observados de 2005 a 2007. Neste período de 3 anos, a Q_{95} neste local é igual a $2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No posto fluviométrico B os dados observados estendem-se de 1968 a 2018 (51 anos), e a Q_{95} é igual a $3,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ considerando os dados observados de todo este período. Já no período em que há dados nos dois locais (2005 a 2007) a Q_{95} no posto fluviométrico B é de $4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Com base nestes valores é possível calcular o fator de correção K_{CL} (equação 3.2):

$$K_{CL} = \frac{QD_L}{QD_C} = \frac{3,2}{4,0} = 0,8$$

O valor do fator de correção mostra que, no período total (1968 a 2018), a Q_{95} é igual a 80% do valor da Q_{95} do período de apenas 3 anos, em que há dados simultâneos nos dois locais (2005 a 2007). Isso sugere que o período de 3 anos entre 2005 e 2007 foi um pouco mais úmido do que o período mais longo.



As bacias hidrográficas dos dois postos fluviométricos são muito próximas. Por isso pode-se admitir que a mesma variabilidade climática aconteceu nas duas bacias. Aplicando o fator de correção, obtido com os dados do local B, ao valor da Q_{95} do local A, obtido com dados de 2005 a 2007, obtém-se, pela equação 3.3:

$$QR_A = QR_C \cdot K_{CL} = 2,5 \cdot 0,8 = 2,0$$

Assim, o valor da Q_{95} corrigida no local A é $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A tabela 3.2 apresenta os seguintes valores dos limites inferior e superior do intervalo de confiança que contém 90% dos casos analisados:

Sem ajuste climático – limite inferior -42% e limite superior +73%

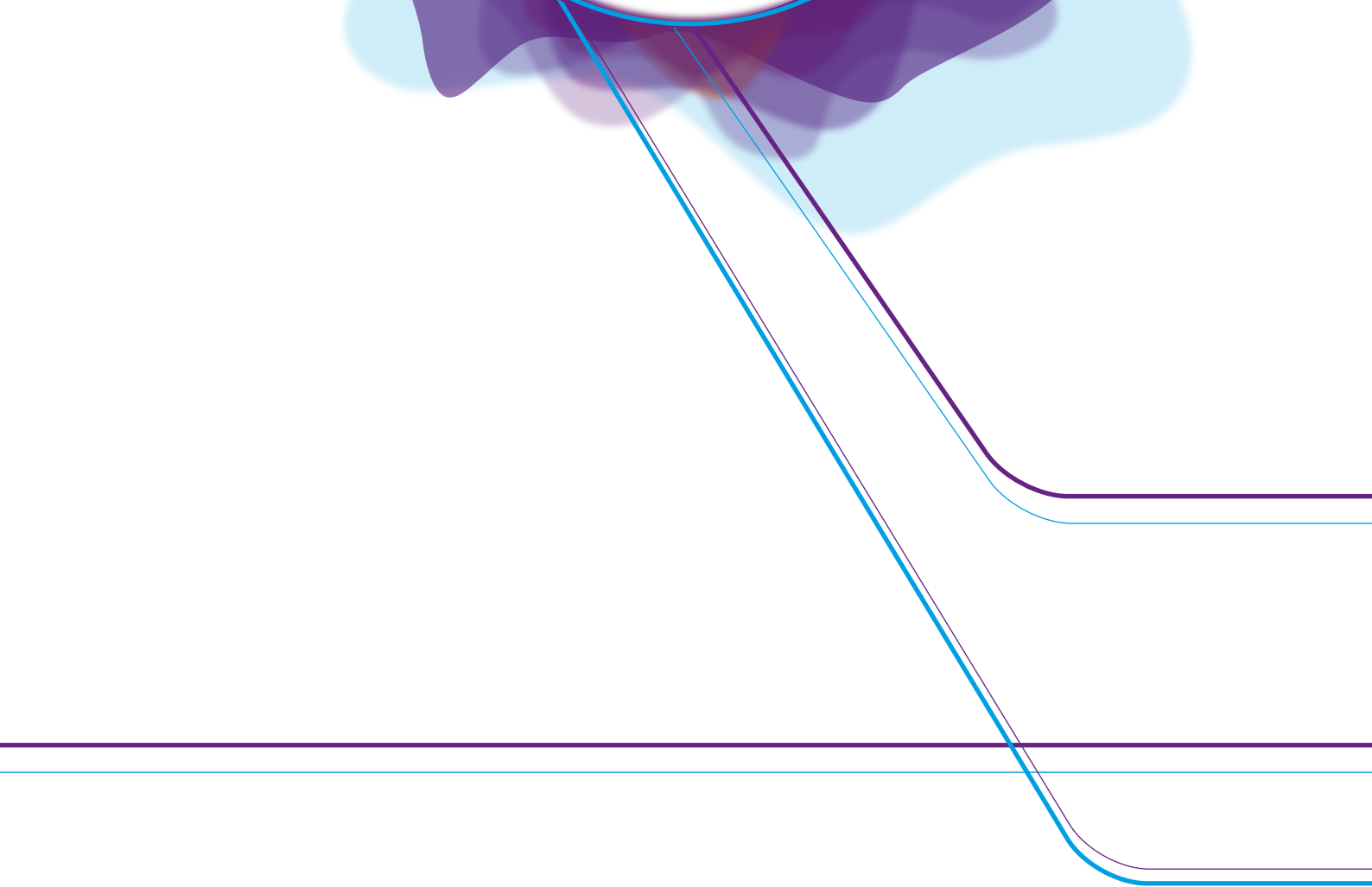
Com ajuste climático – limite inferior -31% e limite superior +45%

Isto significa que a Q_{95} encontrada ($2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), após o ajuste climático da estimativa baseada em apenas 3 anos de dados ($2,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), está, provavelmente, em um intervalo definido por

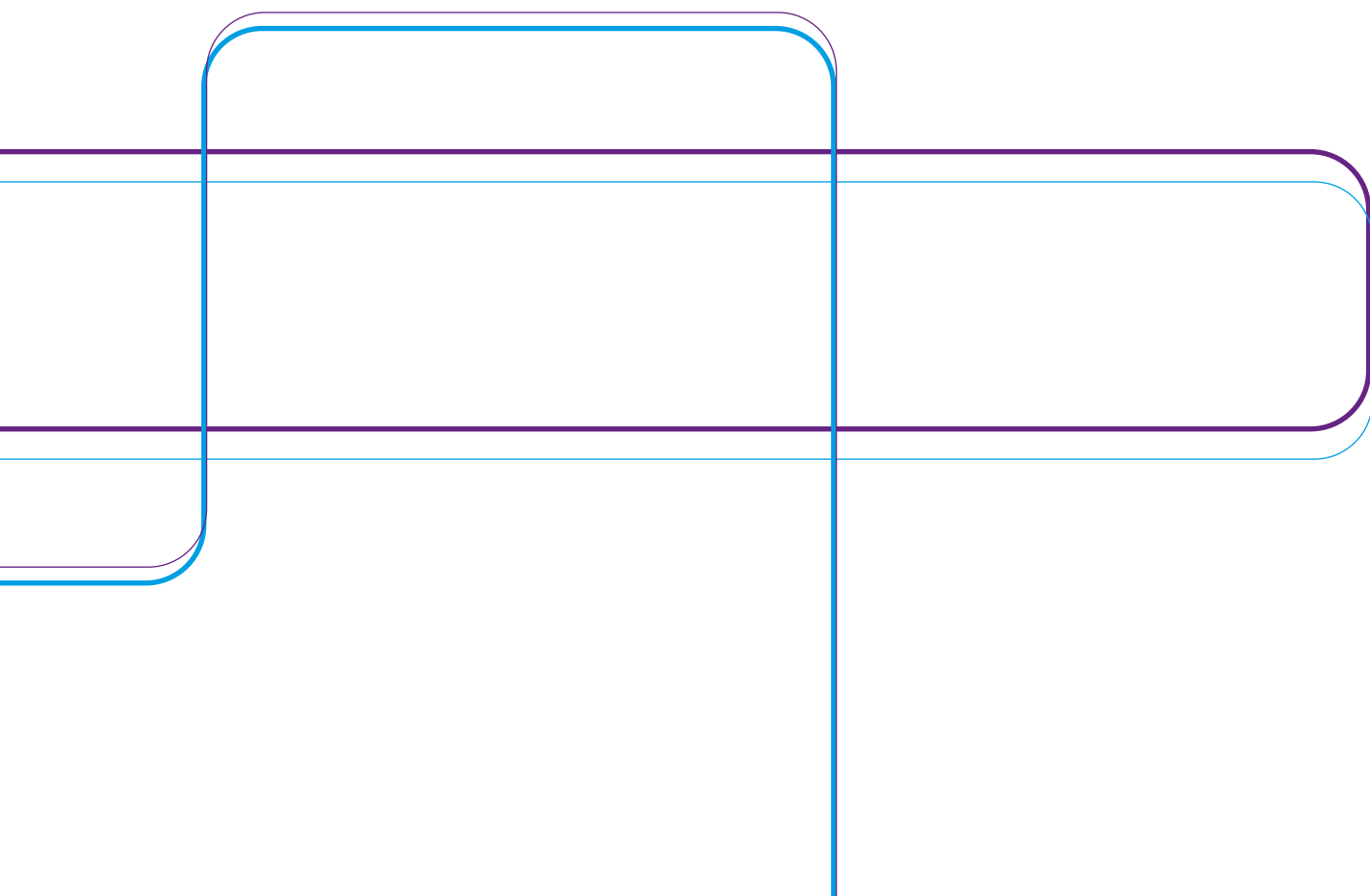
$$2,0 - 2,0 \cdot 31\% < Q_{95A} < 2,0 + 2,0 \cdot 45\%$$

Ou seja, espera-se (com 90% de confiança) que a Q_{95} no local A esteja num intervalo entre $1,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $2,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4



ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA



O método da vazão específica é, provavelmente, a forma mais simples para estimar valores de vazão num local sem dados. Neste método, considera-se que a vazão específica, que é a vazão por unidade de área ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$), obtida com base na série de dados observados em um posto fluviométrico “doador” é a mesma do local sem dados.

A estimativa é realizada utilizando a área de drenagem no local de interesse multiplicada pela vazão específica obtida do posto doador. Em outras palavras, a vazão calculada no local sem dados é estimada a partir da vazão no local com dados multiplicada pela relação entre áreas de drenagem. A equação 4.1 descreve o método:

$$Q_u = Q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} \quad (4.1)$$

onde Q_g é a vazão no local com dados (posto fluviométrico); A_g é a área de drenagem no local com dados; A_u é a área de drenagem no local sem dados; e Q_u é a vazão no local sem dados.

O método pode ser muito útil para casos isoladas ou estimativas regionais em que o número de estações com dados é reduzido. Para uso sistemático, estimativas para toda uma rede hidrográfica, bacias maiores e dispondo de várias estações, passa a ser necessário identificar que posto (montante, jusante ou desencadeado) será o doador em cada situação, inserindo complexidade em sua aplicação. Nesse sentido, as estimativas de incerteza das diferentes possibilidades de aplicação podem orientar a decisão.

4.1 Incerteza da estimativa da vazão de referência com o método da vazão específica

O método da vazão específica, utilizando um único posto doador, descrito no capítulo 4, é, possivelmente, o método mais utilizado na prática para a estimativa de vazões de referência em locais sem dados em estudos hidrológicos de pequeno porte. Apesar disso, são poucos os trabalhos que procuraram estimar suas incertezas, e a informação parece estar fragmentada na literatura técnica (Sorribas et al., 2021a).

De acordo com um estudo realizado por Ries e Friez (2000), o método da vazão específica é igual ou melhor do que métodos mais complexos de regressão quando a área de drenagem do local sem dados está entre 0,3 e 1,5 vezes a área de drenagem do local com dados.

Em um estudo na bacia do rio Itabapoana, localizada entre as bacias do rio Paraíba do Sul e do rio Doce, erros de -6% a +34% na estimativa da vazão média foram encontrados ao utilizar a vazão específica (Reis et al. 2008).

Os erros do método dependem, entre outros fatores, da distância e da posição relativa dos locais sobre a rede de drenagem. A figura 4.1 ilustra alguns casos possíveis, em termos de localização do posto doador em relação ao local de interesse, para a aplicação do método. No caso em que o local de interesse está localizado a jusante (ou a montante) do posto doador, pode-se dizer que as bacias estão embutidas, ou que estão encadeadas. Caso contrário, pode-se dizer que posto doador é não-encadeado em relação ao local de interesse e vice-versa, conforme ilustrado na figura 4.1.

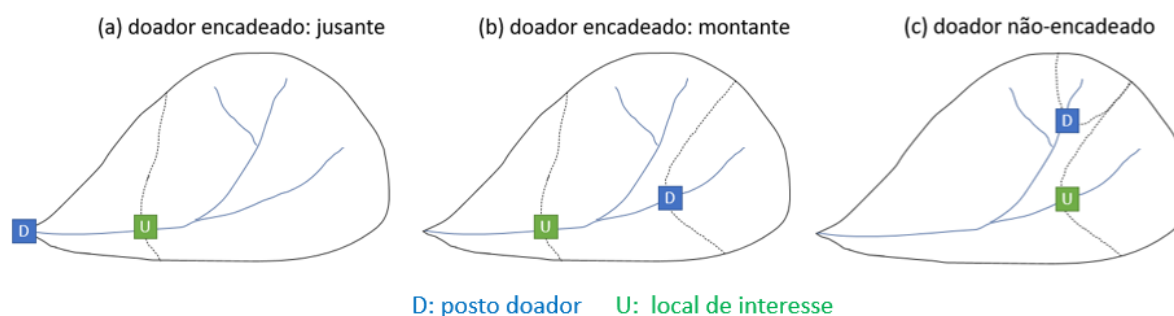


Figura 4.1: Exemplos de posicionamento entre posto doador e local de interesse (Sorribas et al. 2021b)

O trabalho de Sorribas et al (2021b) mostrou que o método de vazão específica tende a ter resultados melhores quando os locais com dados e sem dados são encadeados (tem bacias embutidas). Esta comparação está apresentada nos itens 4.1.1, no caso da vazão média, e 4.1.2, no caso da Q_{95} . Além disso, a incerteza tende a diminuir à medida que aumenta o grau de encadeamento. Este grau de encadeamento pode ser medido pela semelhança do valor da área de drenagem dos dois locais. Quando os postos são encadeados, e a área de drenagem do posto fluviométrico doador (A_g) é aproximadamente igual à área de drenagem do local sem dados (A_u), a estimativa de vazão de referência pelo método da vazão específica tende a apresentar erros menores. Por outro lado, quando o posto doador está localizado muito distante a montante (a razão A_g/A_u se aproxima de zero), ou quando o posto doador está localizado muito distante a jusante (a razão A_g/A_u é muito maior do que 1), os erros tendem a aumentar. A influência do grau de encadeamento (razão A_g/A_u) com a incerteza da estimativa está apresentada nos itens 4.1.3 (vazão média) e 4.1.4 (Q_{95}).

De acordo com a literatura existente, postos fluviométricos tendem a apresentar correlações mais altas em bacias encadeadas (Guse et al. 2009) e o enfraquecimento das relações costuma revelar a heterogeneidade espacial de características da rede de drenagem (Betterle & Botter, 2021).

Aqui apresentamos estimativas da incerteza do método de vazão específica que foram obtidas por simulação, utilizando dados de 1336 postos fluviométricos em todo o Brasil. Maiores detalhes dos procedimentos utilizados nas simulações do método da vazão específica são apresentados por Sorribas et al. (2021b).

4.1.1 Incerteza da estimativa da vazão média pelo método da vazão específica em locais não-encadeados

A incerteza da estimativa da vazão média pelo método da vazão específica em locais não-encadeados foi testada com base em resultados de simulação de aplicação do método em 307 postos fluviométricos no Brasil.

VOLTAR 

A tabela 4.1 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 50%, 75% e 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico doador não estão encadeados, isto é, quando o local de interesse não está localizado nem a montante nem a jusante do posto fluviométrico utilizado como apoio (doador).

Tabela 4.1: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico não estão encadeados (obtidos com base em simulações em 307 postos fluviométricos no Brasil).

Vazão de referência	Confiança	Limite inferior	Limite superior
Vazão média	50%	-20%	+24%
Vazão média	75%	-36%	+50%
Vazão média	90%	-58%	+110%

4.1.2 Incerteza da Q_{95} em locais não-encadeados

A incerteza da estimativa da Q_{95} pelo método da vazão específica em locais não-encadeados foi testada com base em resultados de simulação de aplicação do método em 307 postos fluviométricos no Brasil.

A tabela 4.2 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 50%, 75% e 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico doador não estão encadeados, isto é, quando o local de interesse não está localizado nem a montante nem a jusante do posto fluviométrico utilizado como apoio (doador).

Tabela 4.2: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da Q_{95} que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico não estão encadeados (obtidos com base em simulações em 307 postos fluviométricos no Brasil).

Vazão de referência	Confiança	Limite inferior	Limite superior
Q_{95}	50%	-38%	+41%
Q_{95}	75%	-67%	+108%
Q_{95}	90%	-91%	+315%

4.1.3 Incerteza da vazão média em locais encadeados

A incerteza da estimativa da vazão média pelo método da vazão específica em locais encadeados foi testada com base em resultados de simulação de aplicação do método em 1029 postos fluviométricos no Brasil.

Sorribas et al. (2021a) indicaram que, em situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico de apoio estão encadeados (ver figura 4.1), a incerteza tende a diminuir à medida que aumenta o grau de encadeamento. Para avaliar este efeito, os resultados das simulações do método da vazão específica foram analisados em categorias, de acordo com o valor da razão entre áreas de drenagem.

A tabela 4.3 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 50% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento. A razão Au/Ag é a relação entre área de drenagem do local de interesse (Au) e área de drenagem do posto fluviométrico doador (Ag). Quando Au/Ag é maior do que 2 (como na primeira linha da tabela), isto significa que o local de interesse está localizado a jusante do posto fluviométrico doador, e que a área de drenagem do local de interesse é maior do que o dobro da área de drenagem do posto fluviométrico.

Observa-se, na tabela 4.3, que a banda de incerteza é mais estreita quando a razão entre áreas é mais próxima de 1.

Tabela 4.3: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da vazão média que contém 50% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Vazão média	-14%	7%
$1 < Au/Ag < 2$	Vazão média	-8%	5%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Vazão média	-5%	9%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Vazão média	-11%	16%
$Au/Ag < 0,2$	Vazão média	-10%	30%

A tabela 4.4 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 75% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento.

Tabela 4.4: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da vazão média que contém 75% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Vazão média	-20%	16%
$1 < Au/Ag < 2$	Vazão média	-13%	12%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Vazão média	-13%	15%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Vazão média	-23%	27%
$Au/Ag < 0,2$	Vazão média	-25%	49%

A tabela 4.5 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento.

Tabela 4.5: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da vazão média que contém 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Vazão média	-31%	70%
$1 < Au/Ag < 2$	Vazão média	-18%	25%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Vazão média	-31%	27%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Vazão média	-41%	53%
$Au/Ag < 0,2$	Vazão média	-43%	88%

4.1.4 Incerteza da Q_{95} em locais encadeados

A incerteza da estimativa da Q_{95} pelo método da vazão específica em locais encadeados também foi testada com base em resultados de simulação de aplicação do método em 1029 postos fluviométricos no Brasil, e considerando que a incerteza tende a diminuir à medida que aumenta o grau de encadeamento. Para avaliar este efeito, os resultados das simulações do método da vazão específica foram analisados em categorias, de acordo com o valor da razão entre áreas de drenagem.

A tabela 4.6 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da Q_{95} que contém 50% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento. A razão Au/Ag é a relação entre área de drenagem do local de interesse (Au) e área de drenagem do posto fluviométrico doador (Ag). Quando Au/Ag é maior do que 2 (como na primeira linha da tabela), isto significa que o local de interesse está localizado a jusante do posto fluviométrico doador, e que a área de drenagem do local de interesse é maior do que o dobro da área de drenagem do posto fluviométrico.

Observa-se, na tabela 4.6, que a banda de incerteza é mais estreita quando a razão entre áreas é mais próxima de 1.

Tabela 4.6: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da Q_{95} que contém 50% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Q_{95}	-21%	19%
$1 < Au/Ag < 2$	Q_{95}	-14%	13%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Q_{95}	-9%	17%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Q_{95}	-23%	26%
$Au/Ag < 0,2$	Q_{95}	-36%	40%

A tabela 4.7 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da Q_{95} que contém 75% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento.

Tabela 4.7: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da Q_{95} que contém 75% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Q_{95}	-31%	49%
$1 < Au/Ag < 2$	Q_{95}	-20%	34%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Q_{95}	-26%	28%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Q_{95}	-44%	47%
$Au/Ag < 0,2$	Q_{95}	-66%	83%

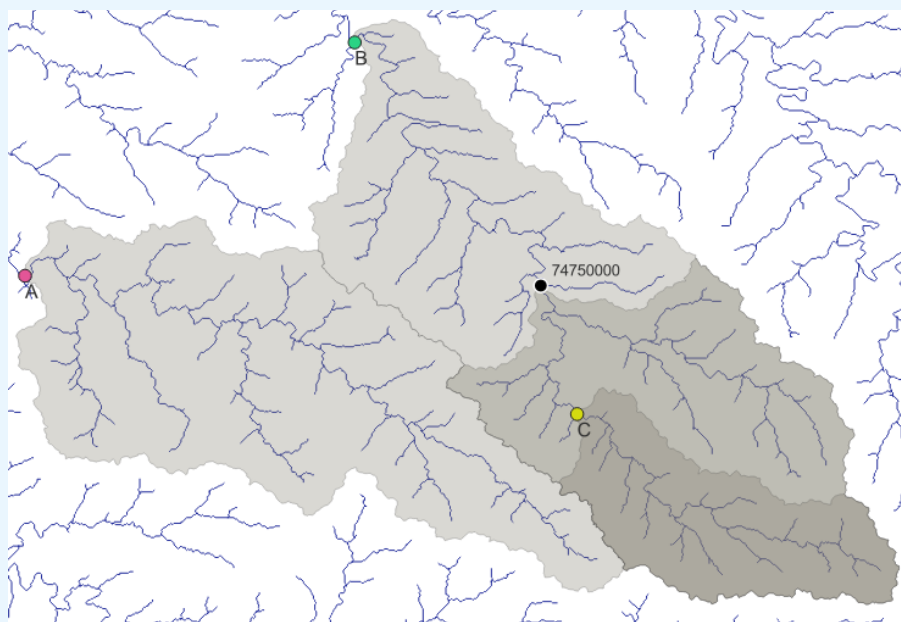
A tabela 4.8 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da Q_{95} que contém 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão específica, nas situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando ainda o grau de encadeamento.

Tabela 4.8: Limites inferior e superior da banda de incerteza da estimativa da Q_{95} que contém 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão específica, quando o local de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados, considerando diferentes graus de encadeamento, ou sobreposição, medida pela razão entre áreas de drenagem entre o local de interesse (Au) e o posto fluviométrico doador (Ag).

Grau de encadeamento	Vazão de referência	Limite inferior	Limite superior
$Au/Ag > 2$	Q_{95}	-46%	131%
$1 < Au/Ag < 2$	Q_{95}	-28%	68%
$0,5 < Au/Ag < 1$	Q_{95}	-50%	46%
$0,2 < Au/Ag < 0,5$	Q_{95}	-61%	80%
$Au/Ag < 0,2$	Q_{95}	-89%	161%

4.2 Exemplo de aplicação do método da vazão específica

Neste exemplo vamos calcular a vazão Q_{95} em três locais diferentes com base na vazão do posto fluviométrico Linha Cascata (código 74750000) localizado no rio Santo Cristo, um tributário do Rio Uruguai, no RS. A região está ilustrada no mapa, com a localização do posto fluviométrico, e de três locais sem dados, em que se deseja conhecer a vazão Q_{95} .



O local A, ilustrado pelo ponto rosa, está localizado sobre o rio Amandaú, e sua bacia é vizinha à bacia do rio Santo Cristo. Já os pontos B (ponto verde) e C (ponto amarelo) estão localizados, respectivamente, a jusante e a montante do posto fluviométrico.

A área de drenagem no local do posto fluviométrico 74750000 é de 329 km², e a Q_{95} , no período de 1964 a 2003 é igual a 1,3 m³.s⁻¹. A vazão Q_{95} específica (q_g) no local do posto fluviométrico pode ser calculada por:

$$q_g = \frac{Q_g}{A_g} = \frac{1,3}{329} = 0,00395 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$$

A área de drenagem no local A, no rio Amandaú, é de 405 km². Admitindo que a vazão Q_{95} específica é constante em toda a região, a vazão Q_{95} no local A pode ser estimada pela equação 4.1:

$$Q_u = q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} = 1,3 \cdot \frac{405}{329} = 1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para estimar a incerteza da estimativa da Q_{95} no local A podemos utilizar a tabela 4.2, pois o ponto A não está localizado a montante nem a jusante do posto fluviométrico, isto é, o ponto A e o posto fluviométrico não estão encadeados. De acordo com a tabela 4.2, os limites inferior e superior para um intervalo de confiança de 75% correspondem a -67% e +108%. Isto significa que é esperado que em 75% dos casos, a Q_{95} real estaria num intervalo definido por 67% a menos e 108% a mais do que a vazão estimada.

Em outras palavras, nossa estimativa de Q_{95} no local A, com intervalo de confiança de 75%, é:

$$1,6 - 1,6 \cdot 67\% < Q_{95A} < 1,6 + 1,6 \cdot 108\%$$

Ou seja, espera-se (com 75% de confiança) que a Q_{95} no local A esteja num intervalo entre $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $3,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

De forma semelhante, a estimativa de Q_{95} no local A, com intervalo de confiança de 90%, é:

$$1,6 - 1,6 \cdot 91\% < Q_{95A} < 1,6 + 1,6 \cdot 315\%$$

Ou seja, espera-se (com 90% de confiança) que a Q_{95} no local A esteja num intervalo entre $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

No local B a área de drenagem é de 567 km^2 . Assim, a Q_{95} é obtida por:

$$Q_u = Q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} = 1,3 \cdot \frac{567}{329} = 2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

No caso do local B, o ponto de interesse e o posto fluviométrico estão encadeados. A razão entre as áreas de drenagem do posto fluviométrico e do local B é:

$$\frac{A_u}{A_g} = \frac{567}{329} = 1,72$$

Este valor da razão entre áreas de drenagem (1,72) está no intervalo entre 1 e 2. Considerando o intervalo de confiança de 90%, podemos usar a tabela 4.8 para obter os limites mínimo e máximo da banda. Os valores na segunda linha da tabela correspondem ao intervalo $1 < A_u/A_g < 2$, e trazem o limite mínimo de -28% e o máximo de +68%. Assim, os limites mínimo e máximo no caso do ponto B são:

$$2,2 - 2,2 \cdot 28\% < Q_{95B} < 2,2 + 2,2 \cdot 68\%$$

Ou seja, espera-se (com 90% de confiança) que a Q_{95} no local B esteja num intervalo entre $1,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $3,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

No local C a área de drenagem é de 139 km^2 , e a Q_{95} é obtida por:

$$Q_u = Q_g \cdot \frac{A_u}{A_g} = 1,3 \cdot \frac{139}{329} = 0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A razão entre as áreas de drenagem do posto fluviométrico e do local C é:

$$\frac{A_u}{A_g} = \frac{139}{329} = 0,42$$

Com base neste valor da razão entre áreas, e considerando a confiança de 90%, é possível identificar, na tabela 4.8, o intervalo entre -61% e +80% para o erro esperado da Q_{95} .

Isto significa que se espera que a Q_{95} no ponto C esteja num intervalo dado por:

$$0,5 - 0,5 \cdot 61\% < Q_{95C} < 0,5 + 0,5 \cdot 80\%$$

Ou seja, espera-se (com 90% de confiança) que a Q_{95} no local C esteja num intervalo entre $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $0,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



5

ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL

De acordo com ANA (2021), o método parte do princípio de que o todo é a soma das partes. Ou seja, em uma bacia, cada parcela do território (cada incremento de área) produz uma vazão que é função de sua área e de sua própria taxa de produção de vazão (que é sua vazão específica). Assim, a vazão no exutório é resultado da soma de cada parte. Se a região é considerada homogênea, pode-se admitir que a taxa de cada parcela (sua vazão específica incremental) é mesma em toda a região. Caso contrário, é mais provável que ela seja diferente.

Em consequência disso, se as vazões específicas de postos encadeados se alteram ao longo de uma rede de drenagem, o método sugere que a vazão específica dos territórios compreendidos entre esses postos de monitoramento também é diferente, sendo, em média, igual à diferença das vazões dividida pela diferença das áreas. Não havendo melhor informação, admite-se que essa área incremental é uma região homogênea e a vazão específica incremental calculada é válida para toda área incremental (ANA 2020, ANA 2021, Collischonn et al., 2021b)

Uma das vantagens do método é o controle de incrementos negativos, já que esses valores são explicitados durante a aplicação do método e podem ser censurados, o mesmo valendo para vazões específicas muito elevadas, que não se justifiquem fisicamente. Outras vantagens seriam que ele tenta incorporar, em alguma medida, a heterogeneidade da bacia; não necessita de uma definição a priori de regiões homogêneas e, não havendo a possibilidade de cálculo do incremento, o método pode recair no método clássico de vazão específica, tratado no capítulo anterior.

Por outro lado, também existem limitações. De acordo com ANA (2021), como as características de clima e superfície não são explicitamente incorporadas, a premissa de homogeneidade na área incremental pode ser falsa. Além disso, o método não responde bem quando a área entre os postos é relativamente pequena em relação ao posto de jusante, recomendando-se que seja superior a 20% dele. Na mesma linha, cita ainda que ele é muito sensível a inconsistências nos dados observados e ambas as situações acabam culminando na exclusão de alguma estação.

Em consonância, há o risco de amplificação do erro em comparação com o método da vazão específica, já que a vazão incremental é obtida pela diferença de dois valores que tem incerteza, conforme descrito no item 5.1.

Embora tenha uma concepção relativamente simples, sua aplicação para além de estimativas pontuais ou de pequeno porte pode ganhar muita complexidade. Isso porque as localizações relativas de montante e jusante, tanto dos postos doadores como do ponto de interesse, precisam ser necessariamente conhecidas e sistematizadas. Em outras abordagens, como no método por regressão, isso não é necessário. Além disso, numa aplicação automática e sem supervisão, o método pode resultar em estimativas irreais como vazões negativas ou valores fisicamente improváveis.

O método pode ser descrito matematicamente por duas equações, que podem ser interpretadas com o auxílio do exemplo ilustrado na figura 5.1:

$$Q_{e_k} = (\sum_{i=1}^N Q_{m_{k,i}}) + q_k \cdot (A_k - (\sum_{i=1}^N A_{m_{k,i}})) \quad (5.1)$$

$$q_k = \frac{Q_j - \sum_{i=1}^M Q_{m_{j,i}}}{A_j - \sum_{i=1}^M A_{m_{j,i}}} \quad (5.2)$$

onde K é um local sem dados; J é um posto fluviométrico com dados localizado a jusante de K; A, B, e C são locais com dados (postos fluviométricos) a montante de J; Q_{e_k} é a vazão estimada no local sem dados; $Q_{m_{k,i}}$ é a vazão observada em cada um dos N postos fluviométricos localizados a montante de K; $Q_{m_{j,i}}$ é a vazão observada em cada um dos M postos fluviométricos localizados a montante de J; A_k é a área de drenagem no ponto K; $A_{m_{k,i}}$ é a área de drenagem a montante de cada um dos N postos fluviométricos a montante de K; A_j é a área de drenagem no ponto J; $A_{m_{j,i}}$ é a área de drenagem a montante de cada um dos M postos fluviométricos a montante de J; e q_k é a vazão específica estimada na região incremental entre o ponto J e os postos fluviométricos localizados a montante.

O método da vazão específica incremental pode ser aplicado independentemente da presença de postos fluviométricos a montante do local sem dados K, e com da presença ou não de postos fluviométricos a montante de J que não estão localizados a montante de K. A figura 5.2 ilustra quatro casos diferentes de combinações da localização de postos fluviométricos em relação ao local sem dados K, onde se deseja estimar a vazão.

No caso 1, o método da vazão específica incremental é exatamente igual ao método da vazão específica. Ou seja, admite-se que a vazão específica no ponto K é igual à vazão específica no ponto J.

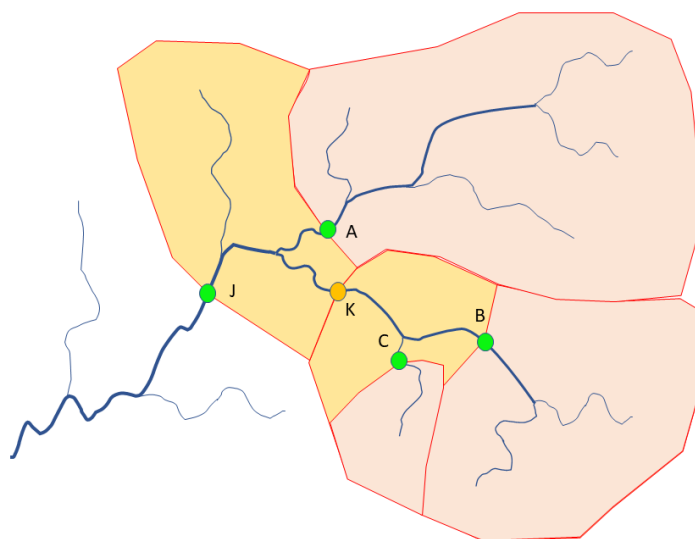


Figura 5.1: Exemplo ilustrativo do método da vazão específica incremental.

No caso 2, a vazão específica no ponto K é estimada pela vazão específica incremental entre os pontos A, B e J. Nesse caso, não há postos a montante de K.

Nos casos 3 e 4, a vazão no ponto K é estimada pela soma das vazões dos postos localizados a montante de K com a vazão incremental entre estes postos e o ponto K. Esta vazão incremental é estimada pela vazão incremental específica, entre os postos A, B, C, D e o posto fluviométrico J.

Para facilitar a compreensão, a figura 5.2 apresenta (além do posto a jusante J) somente dois postos de apoio na caso 2 (A,B) e no caso 3 (B,C), e até quatro postos no caso 4 (A,B,C,D), no entanto, a aplicação prática desses casos pode incluir situações com mais postos fluviométricos.

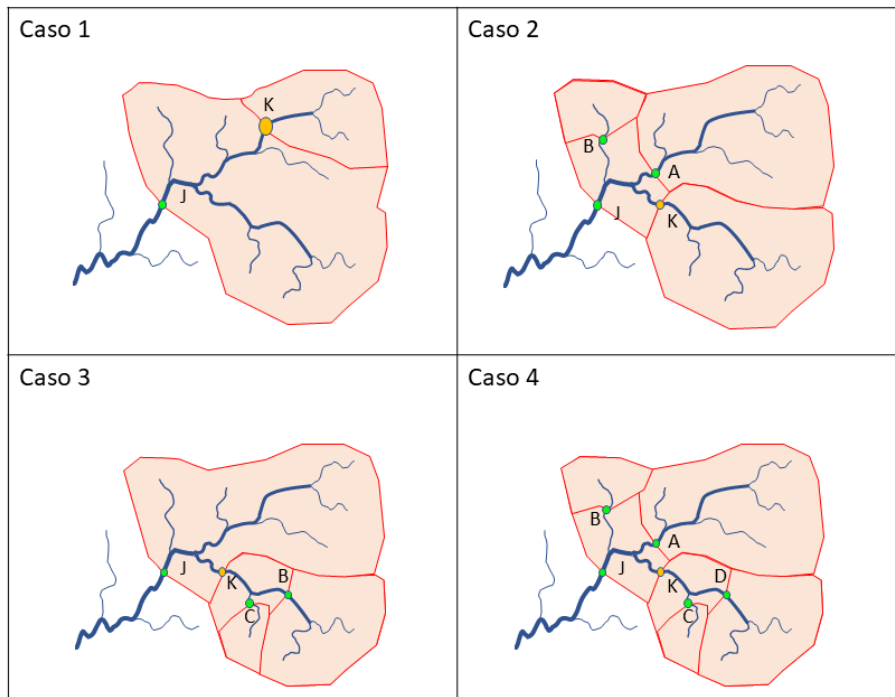


Figura 5.2: Casos típicos de combinações da localização de postos fluviométricos em relação ao local sem dados K, onde se deseja estimar a vazão, utilizando o método da vazão específica incremental.

A figura 5.2 mostra que, em qualquer um dos 4 casos, a aplicação do método da vazão incremental requer que exista pelo menos um posto fluviométrico a jusante do local de interesse. A área incremental é definida entre esse posto fluviométrico de jusante e os postos fluviométricos localizados logo a montante. Em termos de posicionamento de postos fluviométricos, os quatro casos mencionados podem ser identificados pela tabela de contingência definida no Quadro 1.

ANA (2021) apresenta soluções para a ausência de um posto fluviométrico a jusante, entre elas adotar uma média ponderada das vazões específicas dos postos localizados a montante ou aplicar diretamente o método da vazão específica. Estes casos não serão abordados nesse capítulo.

Quadro 1. Contingência para identificação de casos 1 a 4

Caso	Há algum um posto a montante do local de interesse?	Há algum posto afluente à área incremental que não esteja à montante do local de interesse?
1	NÃO	NÃO
2	NÃO	SIM
3	SIM	NÃO
4	SIM	SIM

No item 5.2 é apresentado um exemplo da aplicação do método da vazão específica incremental.

5.1 Incerteza da estimativa pelo método da vazão específica incremental

O trabalho de Collischonn et al. (2021b) mostrou que a incerteza do método da vazão incremental está relacionada à situação de disponibilidade de dados no entorno do local de interesse, conforme ilustrado na figura 5.2. Os resultados obtidos para cada um dos casos serão discutidos a seguir.

5.1.1 Incerteza do método da vazão específica incremental no caso 1

Na situação 1, ilustrada na figura 5.2, o método da vazão específica incremental reduz-se ao método de vazão específica. Assim, a incerteza do método de vazão incremental, nesta situação, pode ser estimada conforme descrito no item 4.1 (incerteza do método da vazão específica em locais encadeados).

5.1.2 Incerteza do método da vazão específica incremental no caso 2

A estimativa da vazão específica incremental na situação 2 está baseada na equação 5.2, em que há uma operação de subtração entre ao menos dois valores de vazão que possuem incerteza. Assim, é possível fazer uma estimativa teórica da incerteza, levando em consideração os erros típicos das estimativas de vazão em um posto fluviométrico, apresentados no capítulo 2.

Genericamente, podemos dizer que este caso 2 seria uma aplicação do método da vazão específica onde a informação de um único posto fluviométrico é substituída pela diferença entre pelo menos 2 postos. Nesse caso, se espera que devido ao aumento da incerteza na origem, o método incremental gere maior incerteza que o método clássico de vazão específica.

Desta forma, além da estimativa empírica aos moldes da apresentada no capítulo 3, também será apresentada uma estimativa teórica das incertezas associadas ao caso 2.

Estimativa da incerteza da vazão incremental

Uma variável z (vazão incremental) que é obtida pela subtração de duas outras variáveis (x : vazão a jusante e y : vazão a montante) tem um erro esperado Δz que depende tanto da incerteza da variável x , dada por Δx , como da incerteza da variável y , dada por Δy . Quando os erros Δx e Δy podem ser considerados independentes, o erro da variável z pode ser estimado por:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (5.3)$$

Então, considerando que y é a vazão do posto fluviométrico localizado a montante da área incremental, e que x é a vazão do posto fluviométrico localizado a jusante da área incremental, e considerando o caso em que $x=100$ e $y=50$, e que o erro em cada posto fluviométrico equivale a 10% da própria vazão, ou seja, $\Delta x=10$ e $\Delta y=5$, então o erro esperado da vazão incremental z , dada por $z=x-y$, é estimado por:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{(10)^2 + (5)^2} = \sqrt{125} = 11,2$$

Ou seja, a vazão incremental é dada por:

$$z \pm \Delta z = 50 \pm 11,2$$

Em que se percebe que o erro de 10% do valor da vazão em cada posto fluviométrico, se transforma em um erro superior a 20% na vazão incremental.

Supondo dois postos fluviométricos localizados ainda mais próximos, em que a vazão aumenta de 90 para 100, e considerando a mesma incerteza inicial de 10%, o erro na vazão incremental é dado por:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = \sqrt{(10)^2 + (9)^2} = \sqrt{181} = 13,5$$

$$z \pm \Delta z = 10 \pm 13,5$$

Neste caso a incerteza é maior do que a própria vazão incremental que se deseja estimar, mostrando que a propagação de erros no método da vazão específica incremental não deveria ser desprezada.

No capítulo 2 vimos que, devido às incertezas da curva-chave, a incerteza da estimativa da vazão média e da Q_{95} é de 12% e de 34% (considerando o intervalo de confiança de 90%), respectivamente, na mediana dos postos fluviométricos.

Considerando estes valores, a equação 5.3 pode ser reescrita para estimar o erro relativo da estimativa da vazão média pelo método da vazão incremental, resultando na equação 5.4:

$$ERQM = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{12 \cdot Q_J}{100}\right)^2 + \left(\frac{12 \cdot Q_M}{100}\right)^2}}{Q_J - Q_M} \quad (5.4)$$

onde Q_J é a vazão média no posto fluviométrico localizado a jusante do local de interesse; Q_M é a vazão média no posto fluviométrico localizado a montante da bacia incremental; e ERQM é o erro relativo (em %) da vazão média estimada no local de interesse.

Da mesma forma, a equação 5.3 pode ser reescrita para o caso da Q_{95} , considerando a incerteza de 34%, devido à curva-chave, citada na tabela 2.1:

$$ERQ95 = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{34 \cdot Q_{95J}}{100}\right)^2 + \left(\frac{34 \cdot Q_{95M}}{100}\right)^2}}{Q_{95J} - Q_{95M}} \quad (5.5)$$

onde Q_{95J} é a vazão no posto fluviométrico localizado a jusante do local de interesse; Q_{95M} é a vazão no posto fluviométrico localizado a montante da bacia incremental; e ERQ95 é o erro relativo (em %) da vazão Q_{95} estimada no local de interesse.

É importante lembrar que as equações 5.4 e 5.5 referem-se a uma estimativa de incerteza considerando apenas à incerteza da curva-chave, e no caso especial em que os erros devidos às curvas-chave são independentes nos dois postos fluviométricos. Ou seja, não representam a incerteza do método da vazão incremental em função de outras fontes de incerteza, como a própria heterogeneidade da bacia, por exemplo.

Incerteza empírica do método da vazão específica incremental no caso 2

De forma semelhante ao que foi apresentado no capítulo 3, uma avaliação empírica do método da vazão incremental foi realizada utilizando dados de 272 postos fluviométricos no Brasil em que a situação de disponibilidade de dados se enquadrava na situação do caso 2, ilustrado na figura 5.2. Esta avaliação foi realizada por simulação, considerando que no local de interesse (cada um dos 272 postos fluviométricos) não havia dados observados, e estimando a vazão para o local com base nos dois (ou mais) postos fluviométricos que definiam a região incremental. Os resultados podem ser vistos nas figuras 5.3 (vazão média) e 5.4 (Q_{95}), juntamente com os resultados obtidos nos mesmos locais utilizando o método da vazão específica, escolhendo sempre o posto fluviométrico de jusante como doador.

Na figura 5.3 pode-se observar que o método da vazão incremental tem uma tendência maior a subestimar a vazão média nos locais de interesse, enquanto o método da vazão específica tem uma tendência maior de superestimar as vazões médias.

O erro relativo da estimativa da vazão média pelo método da vazão incremental, nas situações que se enquadram no caso 2, é de -53% no percentil 5%, e de +53% no percentil 95%. Isto significa que em 90% dos casos o erro relativo está no intervalo definido por 53% a menos e 53% a mais do que a vazão média que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse.

Na figura 5.4 pode-se observar que a mediana dos erros relativos da estimativa da Q_{95} dos dois métodos está muito próxima de zero. O método da vazão incremental apresenta erros relativos maiores do que o método da vazão específica quando a vazão é subestimada. Já quando a vazão é superestimada, o método de vazão incremental apresenta erros menores do que o método da vazão específica.

Estes resultados mostram que não há um aumento evidente das incertezas na utilização do método da vazão incremental em relação ao método clássico da vazão específica (usando como doador o posto de jusante), como teoricamente esperado para as situações que se enquadram no caso 2, ilustrado na figura 5.2. Ou seja, pelo critério da incerteza aqui estimado, os métodos são equivalentes.

Cabe destacar que na simulação a aplicação do método foi automática, não havendo supervisão ou interferência para as situações em que o método estima valores irreais, a não ser no caso de incrementos nulos ou negativos, ocasião em que a estação avaliada foi excluída da análise de incertezas.

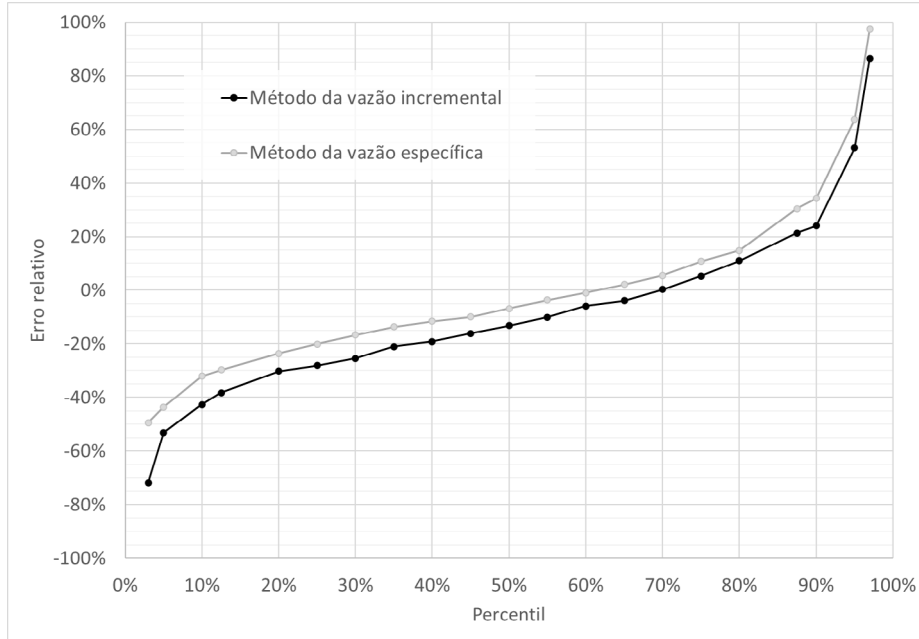


Figura 5.3: Distribuição dos erros relativos dos métodos da vazão incremental e da vazão específica (usando como doador o posto fluviométrico de jusante) na estimativa da vazão média obtidos por simulação com dados em 272 postos fluviométricos no Brasil, e que correspondem ao caso 2 ilustrado na figura 5.2.

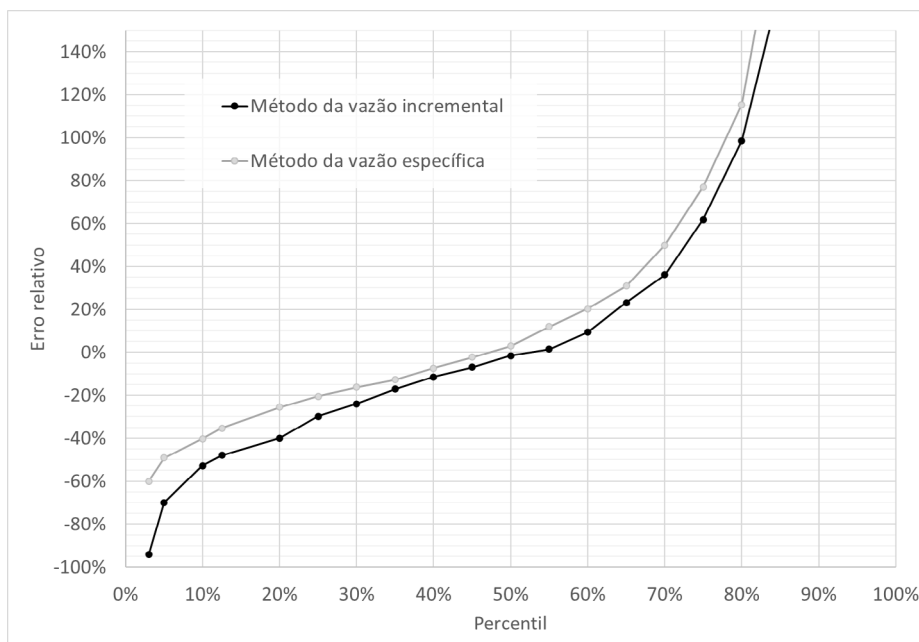


Figura 5.4: Distribuição dos erros relativos dos métodos da vazão incremental e da vazão específica (usando como doador o posto fluviométrico de jusante) na estimativa da vazão de referência Q_{95} obtidos por simulação com dados em 272 postos fluviométricos no Brasil, e que correspondem ao caso 2 ilustrado na figura 5.2.

A tabela 5.1 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão de referência que contém 50%, 75% e 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão incremental, nas situações em que não há postos fluviométricos a montante do local de interesse (caso 2 da figura 5.2).

Tabela 5.1: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão incremental, nas situações que se enquadram no caso 2, ilustrado na figura 5.2, obtidos com base em simulações em 272 postos fluviométricos no Brasil.

Vazão de referência	Confiança	Limite inferior	Limite superior
Vazão média	50%	-5%	+39%
Vazão média	75%	-18%	+62%
Vazão média	90%	-35%	+113%
Q ₉₅	50%	-38%	+42%
Q ₉₅	75%	-67%	+92%
Q ₉₅	90%	-90%	+232%

5.1.3 Incerteza da vazão média pelo método da vazão específica incremental nos casos 3 e 4

Nas situações 3 e 4, ilustradas na figura 5.2, há ao menos um posto fluviométrico a montante do local sem dados. O desempenho do método da vazão incremental foi testado através de simulações, estimando a vazão média em postos fluviométricos com boas séries de dados, como se eles correspondessem a locais sem dados. As simulações foram realizadas em 353 postos fluviométricos em todo o Brasil. Os resultados são apresentados na figura 5.5, que apresenta a distribuição empírica de erros relativos da estimativa da vazão média. Para comparação, a figura 5.5 também apresenta a distribuição dos erros da estimativa da vazão média pelo método da vazão específica, utilizando como doador o posto fluviométrico localizado a jusante do local de interesse.

Observa-se, na figura 5.5, que os erros relativos do método da vazão incremental são claramente menores do que os do método da vazão específica. Isto mostra que, nos casos 3 e 4 ilustrados na figura 5.2, que correspondem à situação em que há um posto fluviométrico a montante do local de interesse, há um claro benefício em utilizar o método da vazão incremental, se comparado ao método da vazão específica.

O erro relativo do método da vazão incremental, nos casos 3 e 4, é de -18% no percentil 5%, e de +21% no percentil 95%. Isto significa que em 90% dos casos o erro relativo está no intervalo definido por 18% a menos e 21% a mais do que a vazão média que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse.

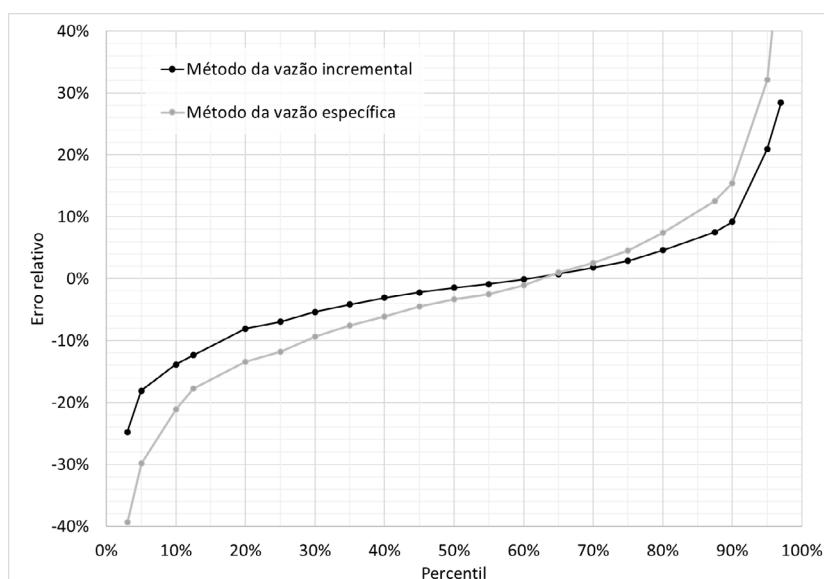


Figura 5.5: Distribuição dos erros relativos dos métodos da vazão incremental e da vazão específica (usando como doador o posto fluviométrico de jusante) na estimativa da vazão média, obtidos por simulação com dados em 353 postos fluviométricos no Brasil, e que correspondem aos casos 3 e 4 ilustrados na figura 5.2.

A tabela 5.2 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da vazão média que contém 50%, 75% e 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão incremental, nas situações em que há postos fluviométricos a montante do local de interesse (casos 3 e 4 da figura 5.2).

Tabela 5.2: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão incremental, nas situações que se enquadram nos casos 3 e 4, ilustrados na figura 5.2, obtidos com base em simulações em 353 postos fluviométricos no Brasil.

Vazão de referência	Confiança	Limite inferior	Limite superior
Vazão média	50%	-3%	+7%
Vazão média	75%	-7%	+14%
Vazão média	90%	-17%	+22%

5.1.4 Incerteza da Q_{95} pelo método da vazão específica incremental nos casos 3 e 4

O desempenho do método da vazão incremental na estimativa da Q_{95} também foi testado através de simulações, considerando dados de 353 postos fluviométricos em todo o Brasil que se enquadravam nos casos 3 e 4 ilustrados na figura 5.2.

Os resultados são apresentados na figura 5.6, que apresenta a distribuição empírica de erros relativos da Q_{95} obtida pelo método da vazão incremental, juntamente com a distribuição dos erros da estimativa pelo método da vazão específica, utilizando como doador o posto fluviométrico localizado a jusante do local de interesse.

Assim como no caso da vazão média, observa-se, na figura 5.6, que os erros relativos da estimativa da Q_{95} , obtidos pelo método da vazão incremental são claramente menores do que os do método da vazão específica.

Na estimativa da Q_{95} nos casos 3 e 4, o erro relativo pelo método da vazão incremental é de -25% no percentil 5%, e de +64% no percentil 95%. Isto significa que, em 90% dos casos simulados, o erro relativo está no intervalo definido por 25% a menos e 64% a mais do que a Q_{95} que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse.

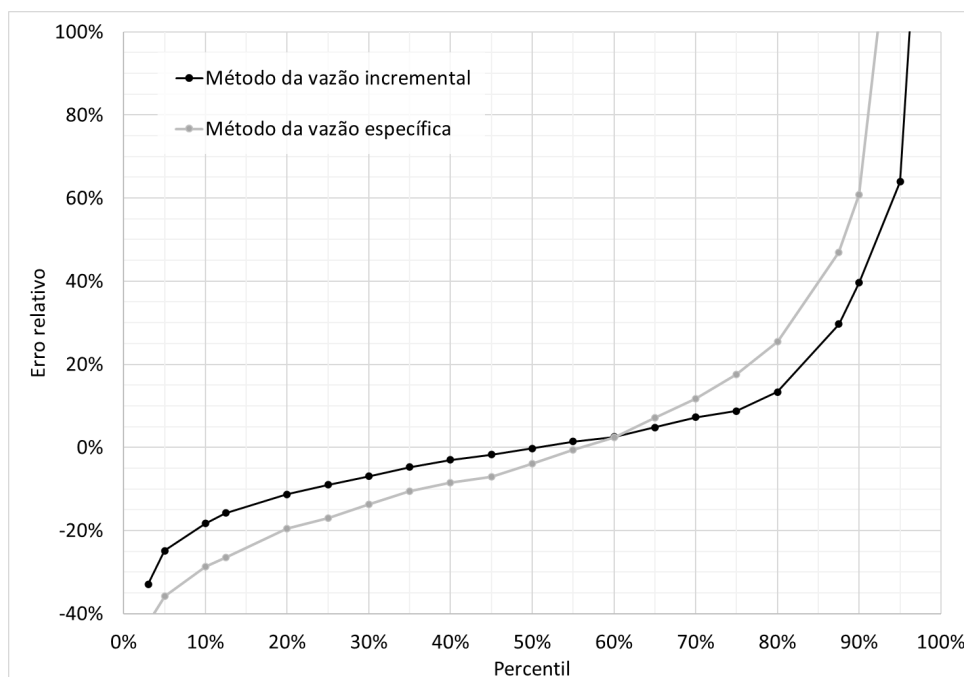


Figura 5.6: Distribuição dos erros relativos dos métodos da vazão incremental e da vazão específica (usando como doador o posto fluviométrico de jusante) na estimativa da Q_{95} , obtidos por simulação com dados em 353 postos fluviométricos no Brasil, e que correspondem aos casos 3 e 4 ilustrados na figura 5.2.

A tabela 5.3 apresenta os limites mínimo e máximo de um intervalo de confiança em torno da estimativa da Q_{95} que contém 50%, 75% e 90% das vazões de referência “reais” nas simulações realizadas, utilizando o método da vazão incremental, nas situações em que há postos fluviométricos a montante do local de interesse (casos 3 e 4 da figura 5.2).

Tabela 5.3: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método da vazão incremental, nas situações que se enquadram nos casos 3 e 4, ilustrados na figura 5.2, obtidos com base em simulações em 353 postos fluviométricos no Brasil.

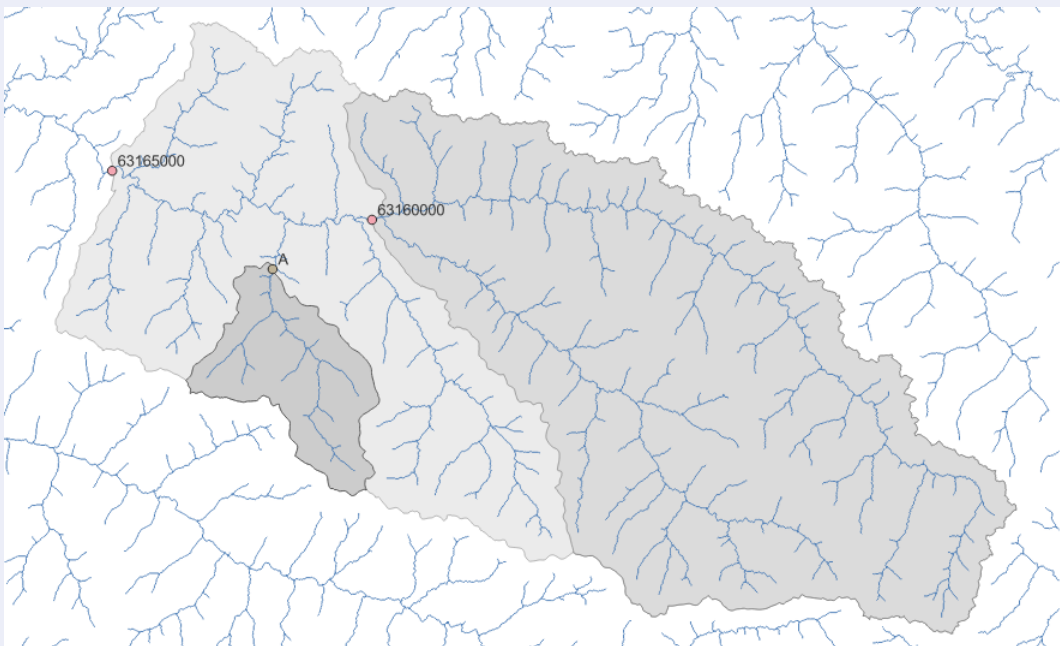
Vazão de referência	Confiança	Limite inferior	Limite superior
Q_{95}	50%	-8%	+10%
Q_{95}	75%	-23%	+19%
Q_{95}	90%	-25%	+64%

5.2 Exemplo de aplicação do método da vazão específica incremental

Neste exemplo vamos estimar a vazão média do rio Iacri, que é um afluente do rio Aguapeí, no Estado de São Paulo, num local A, onde não existem dados, a partir dos dados de dois postos fluviométricos localizados sobre o próprio rio Aguapeí. A área de drenagem do rio Iacri, no local A, é de 420 km².

O posto fluviométrico Fazenda Bom Retiro (código 63160000) está localizado a montante da confluência entre os rios Iacri e Aguapeí, em um local onde a área de drenagem do rio Aguapeí é 3650 km². Já o posto fluviométrico Rinópolis (código 63165000) está localizado a jusante da confluência entre os rios Iacri e Aguapeí, em um local com área de drenagem de 6220 km².

No posto 63160000 a vazão média, no período de 1971 a 2000, é igual a 40,8 m³.s⁻¹. No posto 63165000 a vazão média, no mesmo período de observação, é igual a 67,5 m³.s⁻¹.



A vazão incremental na região entre os dois postos fluviométricos é, portanto, igual a:

$$Q_{inc} = 67,5 - 40,8 = 26,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A vazão específica na região incremental pode ser calculada pela equação 5.2:

$$q_k = \frac{Q_j - \sum_{i=1}^M Q_{m_{j,i}}}{A_j - \sum_{i=1}^M A_{m_{j,i}}} = \frac{67,5 - 40,8}{6220 - 3650} = \frac{26,7}{2570} = 0,0104 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$$

E a vazão média do rio Iacri, no local A, pode ser calculada pela equação 5.1:

$$Q_A = \left(\sum_{i=1}^N Qm_{K,i} \right) + q_K \cdot \left(A_K - \left(\sum_{i=1}^N Am_{K,i} \right) \right) = 0 + 0,0104 \cdot (420) = 4,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A incerteza da estimativa, considerando apenas a incerteza da curva-chave nos dois postos fluviométricos, pode ser estimada pela equação 5.4:

$$ERQM = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{12 \cdot Q_J}{100}\right)^2 + \left(\frac{12 \cdot Q_M}{100}\right)^2}}{Q_J - Q_M} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{12 \cdot 67,5}{100}\right)^2 + \left(\frac{12 \cdot 40,8}{100}\right)^2}}{Q_J - Q_M} = 35\%$$

Assim, espera-se que o valor de Q_A está no intervalo definido por:

$$4,4 - 4,4 \cdot 35\% < Q_A < 4,4 + 4,4 \cdot 35\%$$

Ou seja:

$$2,8 < Q_A < 5,9$$

Portanto, espera-se que a vazão média do rio Iacri, no local sem dados A, esteja no intervalo entre 2,8 e 5,9 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, considerando as incertezas relacionadas à curva-chave dos postos fluviométricos.

A incerteza também pode ser estimada considerando os resultados das simulações resumidas na tabela 5.1. Ali se observa que um intervalo de confiança que contém 90% dos dados observados nas simulações é definido por um limite inferior igual a -35% e um limite superior igual a +113%. Isto significa que em 90% dos casos a vazão média que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse está no intervalo definido por 35% a menos e 113% a mais do que a vazão média estimada pelo método da vazão incremental.

Assim, espera-se que o valor de Q_A esteja no intervalo definido por:

$$4,4 - 4,4 \cdot 35\% < Q_A < 4,4 + 4,4 \cdot 113\%$$

Ou seja:

$$2,8 < Q_A < 9,4$$

Portanto, espera-se que a vazão média do rio Iacri, no local sem dados A, esteja no intervalo entre 2,1 e 9,4 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

5.3 Exemplo de aplicação do método da vazão específica incremental com vários postos fluviométricos

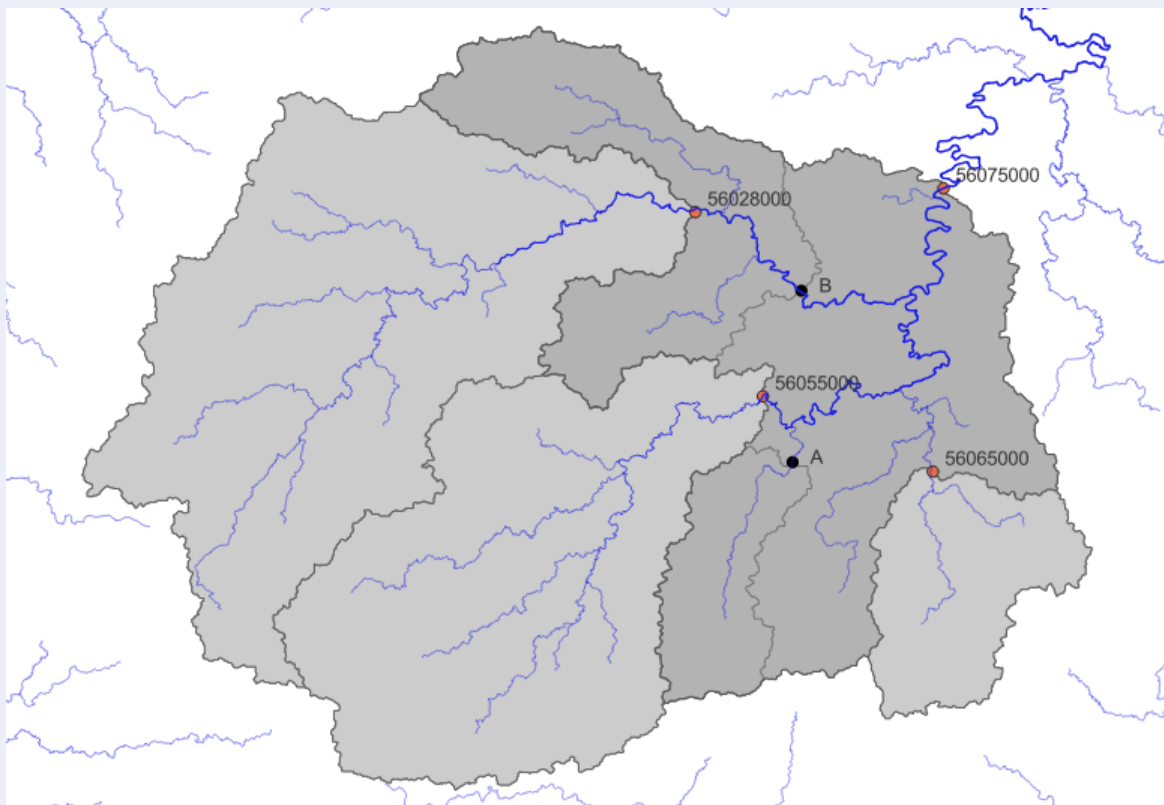
Neste exemplo vamos estimar a vazão Q_{95} em dois locais na bacia do rio Piranga (MG), com base em dados de quatro postos fluviométricos, utilizando o método da vazão específica incremental. Os quatro postos fluviométricos estão apresentados no mapa a seguir, e são: 56028000 (Rio Piranga) com área de drenagem de 1400 km²; 56055000 (Rio Xopotó) com área de 1090 km²; 56065000 (Rio Turvo) com área de 297 km²; 56075000 (Rio Piranga) com área de 4260 km².

Os locais em que se deseja estimar a Q_{95} são os pontos A (no Ribeirão Santo Antônio) e B (no rio Piranga), que também são apresentados no mapa. A área de drenagem no ponto A é de 196 km², e no ponto B é de 1880 km².

Não há nenhum posto fluviométrico a montante do ponto A. Já o ponto B está localizado a jusante do posto fluviométrico 56028000.

A Q_{95} nos postos fluviométricos no período de 1942 a 2017, considerando apenas os dias de observação em que nenhum dos postos fluviométricos apresenta falha na série de dados, é:

- Posto 56028000: $Q_{95} = 6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Posto 56055000: $Q_{95} = 6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Posto 56065000: $Q_{95} = 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Posto 56075000: $Q_{95} = 25,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;



A vazão incremental na região entre os quatro postos fluviométricos (identificada pela cor mais escura no mapa) é dada por:

$$Q_{inc} = 25,0 - 6,9 - 6,6 - 1,5 = 10,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A vazão Q_{95} específica na região incremental pode ser calculada pela equação 5.2:

$$q_k = \frac{Q_j - \sum_{i=1}^M Qm_{j,i}}{A_j - \sum_{i=1}^M Am_{j,i}} = \frac{25,0 - 15,0}{4260 - 2787} = \frac{10,0}{1473} = 0,0068 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$$

A Q_{95} no ponto A, cuja área de drenagem é 196 km^2 , e a montante do qual não há nenhum posto fluviométrico, é calculada pela equação 5.1:

$$Q_A = (\sum_{i=1}^N Qm_{K,i}) + q_k \cdot (A_K - (\sum_{i=1}^N Am_{K,i})) = 0 + 0,0068 \cdot (196 - 0) = 1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A incerteza da estimativa da Q_{95} no ponto A pode ser estimada pela equação 5.5, modificada pela presença de mais postos fluviométricos no cálculo da vazão incremental:

$$ERQ95 = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{34 \cdot Q_{95,j}}{100}\right)^2 + \sum_i^N \left(\frac{34 \cdot Q_{95M,i}}{100}\right)^2}}{Q_{95,j} - \sum_i^N Q_{95M,i}}$$

Ou seja:

$$ERQ95 = 100 \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{34 \cdot 6,9}{100}\right)^2 + \left(\frac{34 \cdot 6,6}{100}\right)^2 + \left(\frac{34 \cdot 1,5}{100}\right)^2 + \left(\frac{34 \cdot 25,0}{100}\right)^2}}{10} = 91\%$$

Portanto, a Q_{95} no ponto A é estimada em $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mas com uma incerteza de $\pm 91\%$, considerando apenas as incertezas relacionadas à curva-chave.

A incerteza da estimativa da Q_{95} no ponto A, cuja localização se enquadra no caso 2 ilustrado na figura 5.2, pois não há postos fluviométricos a montante, também pode ser estimada utilizando os resultados das simulações apresentados na tabela 5.1. Ali se observa que um intervalo de confiança que contém 90% dos dados observados nas simulações é definido por um limite inferior igual a -90% e um limite superior igual a $+232\%$. Isto significa que em 90% dos casos a Q_{95} que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse está no intervalo definido por 90% a menos e 232% a mais do que a Q_{95} estimada pelo método da vazão incremental.

Assim, espera-se que o valor da Q_{95} no local A esteja no intervalo definido por:

$$1,3 - 1,3 \cdot 90\% < Q_A < 1,3 + 1,3 \cdot 232\%$$

Ou seja:

$$0,13 < Q_A < 4,32$$

Portanto, a Q_{95} no ponto A é estimada em $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mas a incerteza desta estimativa sugere que seu valor real possa estar entre $0,13$ e $4,32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (considerando um intervalo de confiança de 90%).

A Q_{95} no ponto B, cuja área de drenagem é 1880 km^2 , e que está localizado a jusante do posto fluviométrico 56028000, onde a Q_{95} é igual a $6,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e a área de drenagem é igual a 1400 km^2 , também pode ser calculada pela equação 5.1:

$$Q_B = \left(\sum_{i=1}^N Qm_{K,i} \right) + q_K \cdot \left(A_K - \left(\sum_{i=1}^N Am_{K,i} \right) \right)$$

$$Q_B = 6,9 + 0,0068 \cdot (1880 - 1400) = 10,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

A incerteza da estimativa da Q_{95} no ponto B pode ser estimada com auxílio da tabela 5.3, pois a localização do ponto B e dos postos fluviométricos com dados coincide com um caso do tipo 4.

Na tabela 5.3, se observa que um intervalo de confiança que contém 90% dos dados observados nas simulações é definido por um limite inferior igual a -39% e um limite superior igual a +33%. Isto significa que em 90% dos casos a Q_{95} que seria obtida com um posto fluviométrico no próprio local de interesse está no intervalo definido por 39% a menos e 33% a mais do que a Q_{95} estimada pelo método da vazão incremental.

Assim, espera-se que o valor da Q_{95} no local A esteja no intervalo definido por:

$$10,2 - 10,2 \cdot 39\% < Q_B < 10,2 + 10,2 \cdot 33\%$$

Ou seja:

$$6,2 < Q_B < 13,6$$

Portanto, a Q_{95} no ponto B é estimada em $10,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, mas a incerteza desta estimativa sugere que seu valor real possa estar entre $6,2$ e $13,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (considerando um intervalo de confiança de 90%).



ESTIMATIVA DA VAZÃO DE REFERÊNCIA COM **MEDIÇÕES** ESPORÁDICAS



O método das medições esporádicas é um método em que se estima a vazão de referência em um local sem dados, utilizando uma única, ou apenas algumas medições de vazão no local de interesse e também é conhecido pelo nome de método das medições pontuais, ou spot-gauging, em inglês.

Este método se mostra como uma alternativa especialmente para a estimativa de vazões de referência baixas e principalmente em locais com pequena área de drenagem, onde os postos fluviométricos são relativamente mais escassos. Assim, esse capítulo apresenta uma estimativa de incerteza envolvendo apenas a vazão Q_{95} e com foco em bacias com áreas de drenagem inferiores a 1000 km².

A situação mais extrema do método das medições esporádicas é a situação em que se utiliza uma única medição de vazão no local sem dados, onde se deseja estimar a vazão de referência. Esta medição única, denominada Q_{Su} deve, necessariamente, ser realizada após um período com vários dias (preferencialmente semanas) sem chuva relevante na bacia hidrográfica. No mesmo dia em que é realizada a medição de vazão no local sem dados, é necessário estimar a vazão Q_{Sg} no local em que existe um posto fluviométrico com uma série longa e confiável, e que esteja localizado na mesma região do ponto não monitorado. A vazão Q_{Sg} pode ser medida diretamente, ou estimada indiretamente pela medição de cota na régua, e convertida para vazão através da curva-chave.

Utilizando a série longa dos dados do posto fluviométrico é calculada a vazão Q_{95g} , e é calculado o valor K , dado pela equação 6.1, que é a razão entre a Q_{95g} e Q_{Sg} . Este valor de K é, então, multiplicado pela vazão medida no local sem dados, para obter uma estimativa da vazão Q_{95} no local sem dados (Q_{95u}), de acordo com a equação 6.2 (Sorribas et al., 2021c).

$$K = \frac{Q_{95g}}{Q_{Sg}} \quad (6.1)$$

$$Q_{95u} = Q_{Su} \cdot K \quad (6.2)$$

onde: K é o fator de proporcionalidade no local com dados; Q_{95g} é a vazão Q_{95} no local com dados (posto fluviométrico); Q_{Sg} é a vazão medida no local com dados; Q_{95u} é a estimativa da vazão Q_{95} no local sem dados; e, Q_{Su} é a vazão medida no local sem dados.

O método considera válida a hipótese que, no dia da medição, a proporção entre a vazão medida e a vazão de referência (Q_{95}) é a mesma nos dois locais.

6.1 Incerteza da estimativa de vazões de referência com medições esporádicas

Para estimar a incerteza do método das medições esporádicas, foi utilizado um procedimento de simulação, em que o método foi aplicado em pares de postos fluviométricos próximos, considerando que um deles não teria séries longas de dados, mas apenas medições únicas. Assim, foi obtida uma estimativa da Q_{95} no local "sem dados", seguindo as equações 6.1 e 6.2, e esta estimativa foi comparada com a Q_{95} obtida com a série de dados observada.

Este procedimento foi repetido para 435 postos fluviométricos com área de drenagem menor do que 1000 km², localizados em diversas regiões do Brasil, utilizando até 5 postos fluviométricos na vizinhança como postos de apoio, e repetindo as estimativas 20 vezes em datas diferentes. Como pontos de apoio foram utilizados postos fluviométricos com área de drenagem inferior a 10.000 km². Assim, foram obtidas 100 estimativas da Q_{95} em cada local "sem dados". As datas das medições únicas foram escolhidas aleatoriamente, considerando que a vazão no posto fluviométrico de apoio é inferior à Q_{75} (vazão igualada ou superada em 75% do tempo), e que o hidrograma no posto fluviométrico de apoio apresenta uma recessão de ao menos N dias, em que N é um número aleatório entre 15 e 45 dias. A recessão é um período em que a vazão somente diminui de um dia para o seguinte, ou se mantém inalterada, nunca aumenta.

A figura 6.1 apresenta os gráficos de distribuição de frequência dos erros relativos nas estimativas da vazão Q_{95} com o método de medição esporádica, com uma única medição, nos casos em que o local sem dados e o posto fluviométrico são encadeados, e onde não são encadeados. Observa-se que a mediana, nos dois casos, é próxima de zero, e que os erros relativos crescem mais rapidamente, tanto positivamente como negativamente, nos casos em que o posto fluviométrico de apoio e o local sem dados não estão encadeados.

Em locais encadeados os valores dos erros relativos nos percentis 5% e 95% são, respectivamente, -40% e +62%. Isto significa que, em 90% dos casos testados, o erro relativo da estimativa da Q_{95} utilizando o método da medição esporádica utilizando como posto fluviométrico de apoio um local a jusante ou a montante do local de interesse ficou no intervalo entre 40% a menos e 62% a mais do que a Q_{95} que seria obtida com os dados observados no próprio local de interesse.

Em locais não encadeados, os erros relativos correspondentes aos mesmos percentis 5% e 95% são, respectivamente, -48% e +88%.

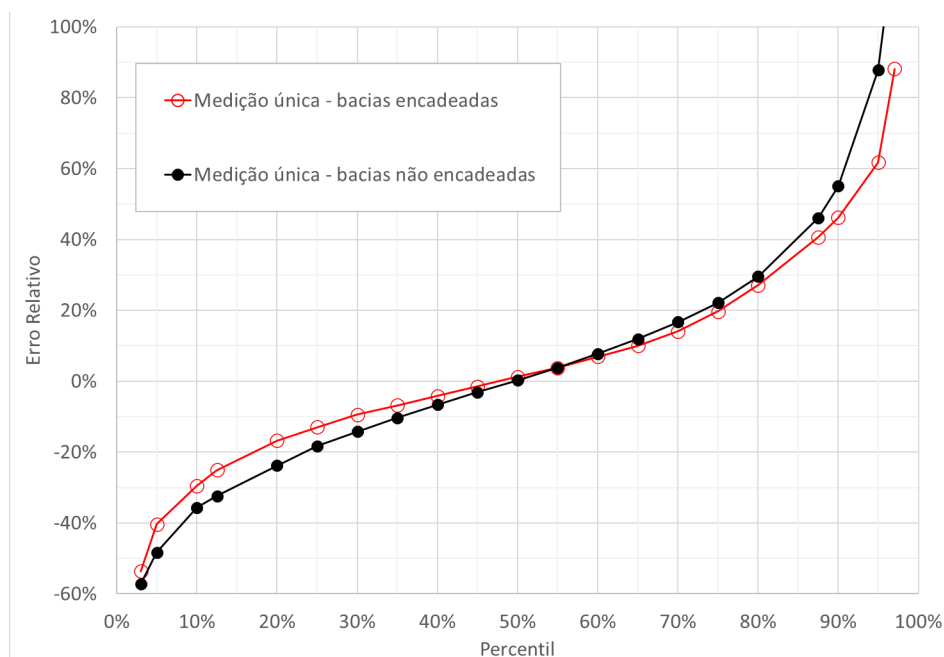


Figura 6.1: Distribuição de frequência dos erros relativos nas estimativas da vazão Q_{95} com o método de medição esporádica, com uma única medição, nos casos em que o local sem dados e o posto fluviométrico de apoio são encadeados, e onde não são encadeados.

A incerteza do método da medição esporádica tende a ser maior em bacias mais áridas, ou onde, por influência das características geológicas, a vazão de base tende a ser mais baixa. A figura 6.2 apresenta os gráficos de distribuição de frequência dos erros relativos nas estimativas da vazão Q_{95} com o método de medição esporádica, com uma única medição, em locais com Q_{95} específica (razão entre a Q_{95} e a área de drenagem) mais alta e em locais com Q_{95} específica mais baixa. O limite adotado para diferenciar alta e baixa Q_{95} específica foi 4 litros por segundo por km^2 . Observa-se que os erros relativos tendem a ser claramente menores nas bacias com Q_{95} específica mais alta (linha azul). No gráfico da figura 6.2 estão considerados de forma conjunta os casos em que o posto fluviométrico está e não está encadeado com o local de interesse.

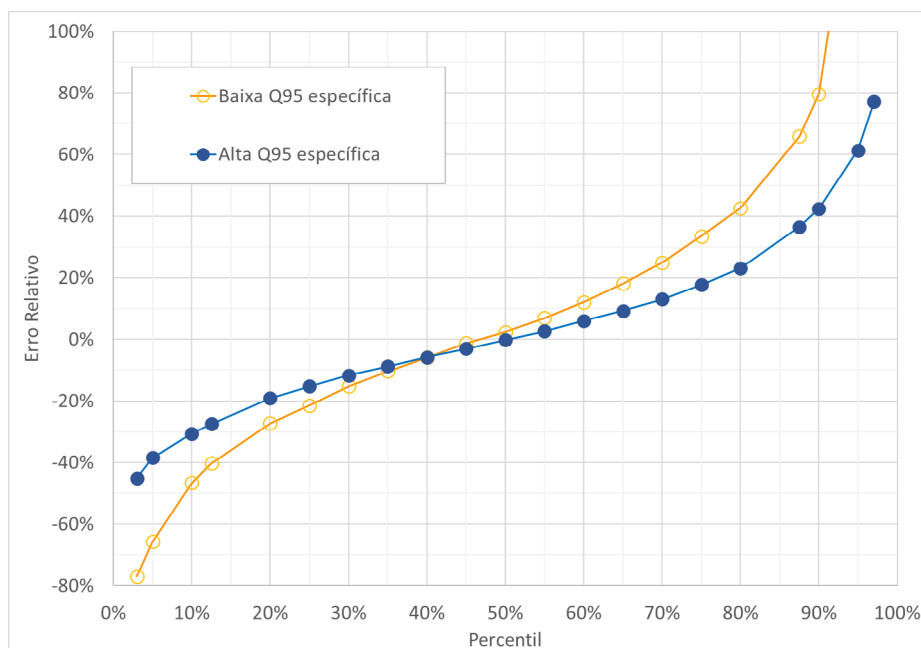


Figura 6.2: Distribuição de frequência dos erros relativos nas estimativas da vazão Q_{95} com o método de medição esporádica, com uma única medição, em bacias com Q_{95} específica alta (Q_{95} específica $> 4 \text{ litros}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$) e em bacias com Q_{95} específica baixa (Q_{95} específica $< 4 \text{ litros}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$).

Com base nos resultados das simulações também foi possível estimar limites superior e inferior de uma banda de confiança em torno do valor estimado que contém diferentes percentuais dos dados “reais” (Q_{95} estimada com base nos dados locais). A tabela 6.1 apresenta os limites inferior e superior de incerteza da estimativa do método da medição esporádica, considerando três intervalos de confiança diferentes: 50%, 75% e 90%. A tabela 6.1 foi obtida considerando todos os 435 postos fluviométricos utilizados nas simulações. Estes postos fluviométricos estão distribuídos em todo o Brasil, mas a tabela é mais representativa da região Sudeste, que concentra uma parcela relevante dos postos fluviométricos utilizados.

A tabela 6.2 apresenta os limites inferior e superior de incerteza da estimativa do método da medição esporádica considerando os três intervalos de confiança, mas apenas para os casos de locais encadeados. Já a tabela 6.3 apresenta resultados semelhantes, porém para o caso de locais não encadeados.

A tabela 6.4 apresenta os limites de incerteza da estimativa da Q_{95} pelo método da medição esporádica em bacias com valores de Q_{95} específica mais alta (maior do que 4 litros por segundo por km²), e a tabela 6.5 apresenta os resultados equivalentes, porém para bacias com valores de Q_{95} mais baixa (menor do que 4 litros por segundo por km²).

Tabela 6.1: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método das medições esporádicas para a estimativa da Q_{95} em todos os 435 postos fluviométricos testados.

Intervalo de confiança	Limite inferior	Limite superior
50%	-18%	20%
75%	-31%	44%
90%	-45%	88%

Tabela 6.2: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método das medições esporádicas para a estimativa da Q_{95} apenas nos locais encadeados entre os 435 postos fluviométricos testados.

Intervalo de confiança	Limite inferior	Limite superior
50%	-16%	15%
75%	-29%	33%
90%	-38%	68%

Tabela 6.3: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método das medições esporádicas para a estimativa da Q_{95} apenas nos locais não-encadeados entre os 435 postos fluviométricos testados.

Intervalo de confiança	Limite inferior	Limite superior
50%	-18%	22%
75%	-32%	48%
90%	-47%	93%

Tabela 6.4: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método das medições esporádicas para a estimativa da Q_{95} apenas nos locais com Q_{95} específica superior a 4 litros por segundo por km² entre os 435 postos fluviométricos testados.

Intervalo de confiança	Limite inferior	Limite superior
50%	-15%	18%
75%	-27%	38%
90%	-38%	62%

Tabela 6.5: Limites inferior e superior da banda de incerteza que contém 50%, 75% e 90% dos dados na simulação da aplicação do método das medições esporádicas para a estimativa da Q_{95} apenas nos locais com Q_{95} específica inferior a 4 litros por segundo por km^2 entre os 435 postos fluviométricos testados.

Intervalo de confiança	Limite inferior	Limite superior
50%	-25%	27%
75%	-40%	68%
90%	-62%	192%

6.2 Exemplo de aplicação do método da medição pontual ou esporádica



Neste exemplo vamos estimar a vazão de referência Q_{95} num local não monitorado U pelo método da medição esporádica, apoiado por dados de um posto fluviométrico G, localizado nas proximidades.

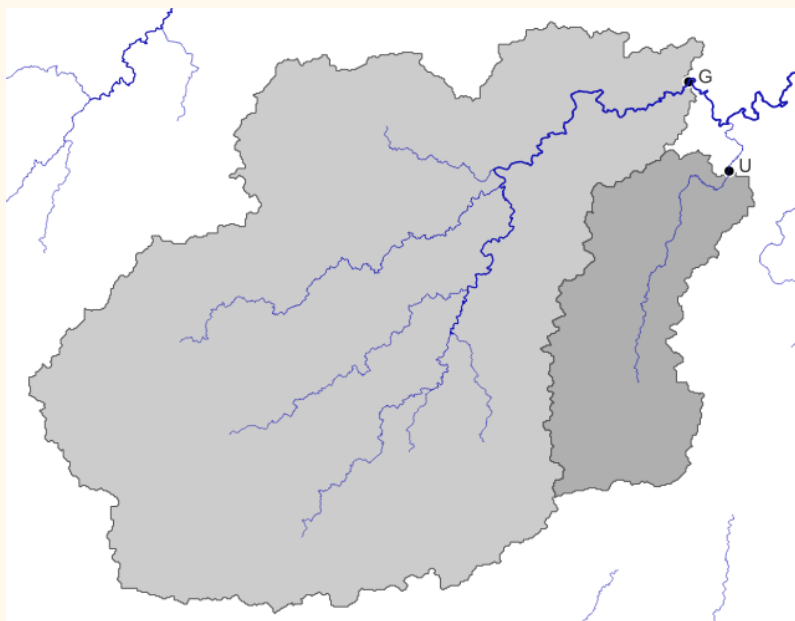
No posto fluviométrico G há uma série de dados observados suficientemente longa para elaborar uma curva de permanência de vazões, o que permite conhecer a Q_{95} de forma razoavelmente acurada. Vamos considerar que a Q_{95} no local G é igual a $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

O clima de toda a região apresenta chuvas sazonais, sendo que, em geral, não ocorrem chuvas relevantes nos meses de junho e julho.

Num determinado dia de julho, após um período de 3 semanas sem ocorrência de chuvas em toda a região, foram realizadas medições de vazão nos dois locais (U e G), com os seguintes resultados:

$$QS_g = 9,6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$QS_u = 2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$



No posto fluviométrico G é possível calcular o valor de K, pela equação 6.1:

$$K = \frac{Q_{95_g}}{Q_{S_g}} = \frac{6,6}{9,6} = 0,69$$

Considerando que a mesma razão entre Q_{95} e vazão do dia da medição ocorre também no local sem dados U, é possível estimar a vazão Q_{95} neste local usando a equação 6.2:

$$Q_{95_u} = Q_{S_u} \cdot K = 2,7 \cdot 0,69 = 1,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

No local U a área de drenagem é de 196 km². Então a sua Q_{95} específica, em litros por segundo por km², é:

$$1000 \frac{Q_{95_g}}{196} = 1000 \frac{1,9}{196} = 9,7 \text{ litros} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$$

Como esta vazão Q_{95} específica é maior do que 4 litros.s⁻¹.km⁻², os limites mínimo e máximo do intervalo de confiança da Q_{95} podem ser obtidos da tabela 6.4, ou da tabela 6.3 (porque os locais U e G não estão encadeados). A tabela 6.4 mostra que, considerando o intervalo de confiança de 90%, o limite inferior é -38% e o superior é +62%. A tabela 6.3 mostra, para o mesmo intervalo de confiança, os valores de -47% e +93%. Por precaução, pode ser adotada a banda de confiança mais larga entre as duas válidas neste caso, portanto o limite mínimo é 47% inferior à Q_{95u} e o limite superior é 93% superior à Q_{95u} :

$$1,9 - 1,9 \cdot 47\% < Q_{95_u} < 1,9 + 1,9 \cdot 93\% \\ 1,0 < Q_{95_u} < 3,7$$

Portanto, espera-se que a Q_{95} no local sem dados U, obtida pelo método da medição esporádica, esteja no intervalo entre 1,0 e 3,7 m³.s⁻¹.

6.3 Comparação do método da medição esporádica com o método da vazão específica

O método da medição esporádica, embora menos utilizado do que o método da vazão específica, provavelmente apresenta uma grande vantagem em termos de redução da incerteza da estimativa de vazões de referência baixas, como a Q_{95} , em locais sem dados.

A figura 6.3 apresenta a comparação entre estes dois métodos, em termos da distribuição dos erros relativos da estimativa. Os resultados apresentados na figura 6.3 foram obtidos nas simulações com os postos fluviométricos e consistem de resultados dos dois métodos comparados nos mesmos locais, e utilizando os mesmos postos fluviométricos de apoio.

A figura 6.3 mostra, claramente, que os erros relativos do método de medições esporádicas são menores do que os do método da vazão específica. Embora a mediana seja aproximadamente igual a zero nos dois métodos, a diferença é bastante evidente em outros percentis. Por exemplo, o erro relativo no percentil 20% é de -33% no método da vazão específica e de -22% no método da medição esporádica. E no percentil 80% o erro relativo é de +47% no método da vazão específica e +29% no método da medição esporádica.

Os resultados resumidos na figura 6.3 incluem tanto as situações em que o local de interesse e o posto fluviométrico de apoio estão encadeados como as situações em que não estão encadeados. Outros testes realizados, mas não apresentados aqui, mostram que o método das medições esporádicas é superior ao método da vazão específica tanto nos casos de locais encadeados como de não encadeados, e tanto no caso de bacias com alto e com baixo valor da Q_{95} específica.

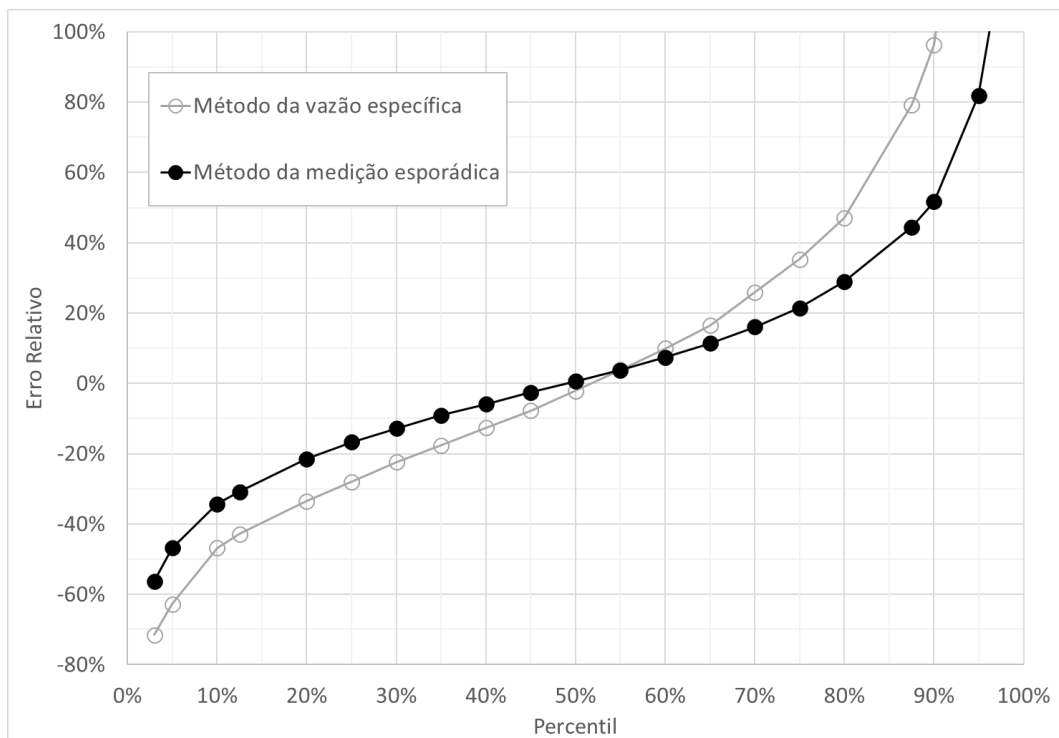
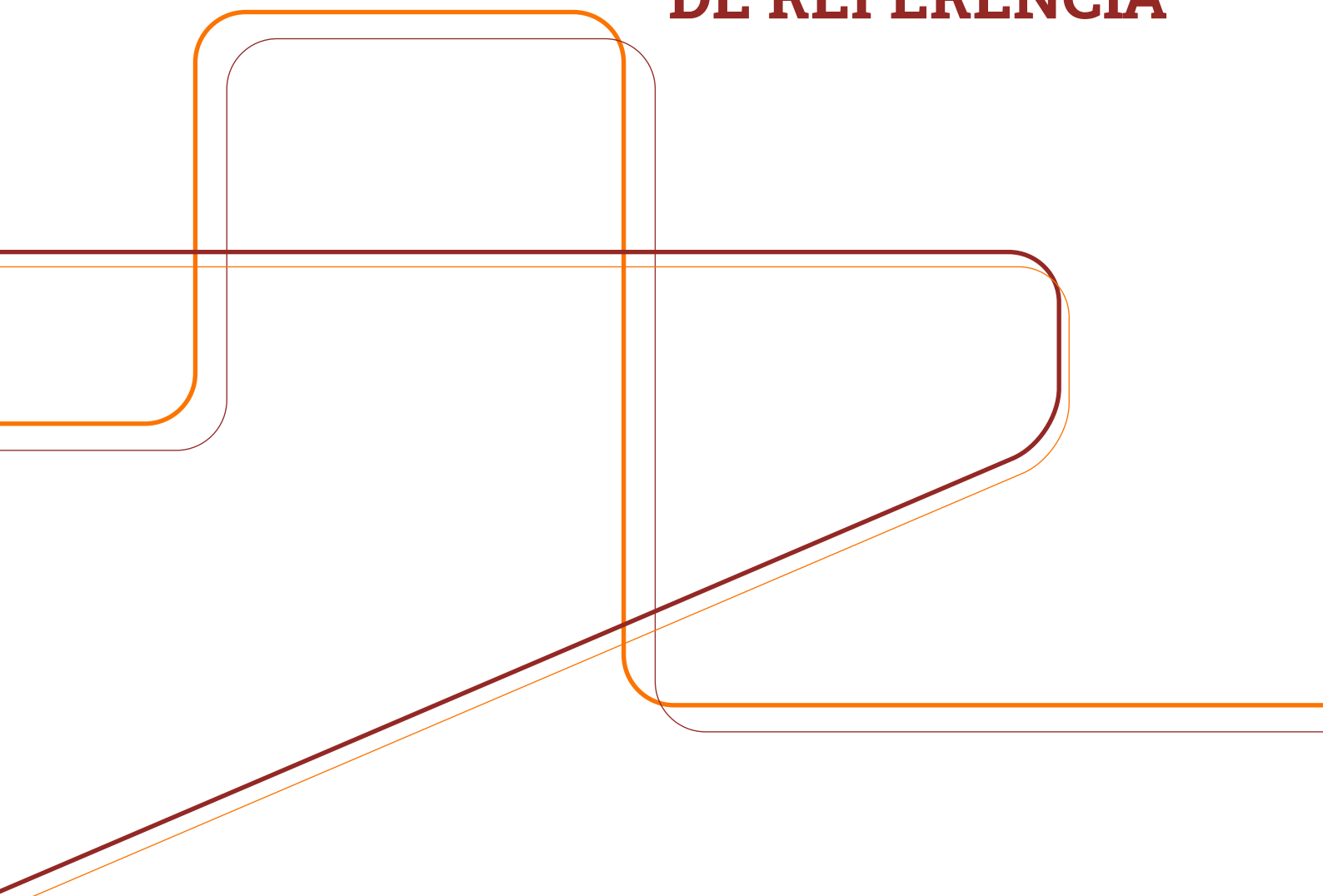


Figura 6.3: Distribuição de frequência dos erros relativos nas estimativas da vazão Q_{95} com o método de medição esporádica comparado com o método da vazão específica nos mesmos locais.



RESUMO

DA INCERTEZA DOS MÉTODOS
DE ESTIMATIVA DAS VAZÕES
DE REFERÊNCIA



Os resultados dos itens anteriores podem ser resumidos na forma de tabelas com a comparação da incerteza dos diferentes métodos. Nos itens seguintes apresentamos o resumo da incerteza dos métodos de estimativa da vazão média (item 7.1) e da Q_{95} (item 7.2).

7.1 Incerteza da estimativa da vazão média pelos diferentes métodos

A tabela 7.1 resume os resultados da análise de incerteza dos métodos de estimativa da vazão média, considerando um intervalo de confiança de 90% .

A primeira linha da tabela 7.1 mostra que a incerteza da vazão média estimada em um posto fluviométrico onde há uma série longa de dados observados é da ordem de 12%, conforme discutido no capítulo 2.

A partir da segunda linha da tabela 7.1, os valores são comparáveis entre si, pois apresentam estimativas de incerteza com relação à condição mais favorável, que seria ter disponível uma série longa de dados no local.

Assim, a segunda linha da tabela 7.1 mostra que em locais com apenas 1 ano de dados, os limites inferior e superior da estimativa da vazão média são, respectivamente, -42% e +73%. Esta incerteza pode ser reduzida caso seja aplicado o método do ajuste climático, conforme descrito no capítulo 3. Neste caso os limites inferior e superior da estimativa da vazão média são, respectivamente, -22% e +28%, conforme mostrado na terceira linha da tabela 7.1.

Em locais sem dados, a melhor situação ocorre quando há postos fluviométricos a montante e a jusante do local de interesse. Neste caso é possível aplicar o método da vazão incremental, e estimar a vazão média com limites inferior e superior de -17% e +22%, respectivamente.

Quando não há a possibilidade de aplicar o método da vazão incremental com ao menos um posto fluviométrico a montante, o método indicado para estimar a vazão média é o método da vazão específica, por ser mais simples que o método incremental. Neste caso o grau de incerteza depende da posição relativa entre o local de interesse e o posto fluviométrico utilizado como doador (ver capítulo 4). Em locais sem dados em que o posto fluviométrico doador está localizado a montante ou a jusante do local de interesse, e a área de drenagem no local de interesse está entre a metade e o dobro da área no posto fluviométrico doador, os limites de incerteza são, quase sempre, inferiores a 30%.

Em locais sem dados onde o ponto de interesse e o posto fluviométrico doador não estão encadeados, a incerteza é tal que em 90% dos casos os erros da estimativa da vazão média estão entre -58% e +110%.

Tabela 7.1: Incerteza da estimativa da vazão média de acordo com métodos e disponibilidade de dados, para o intervalo de confiança de 90%.

Dados observados	Método	Situação	Limite inferior	Limite superior
Muitos anos (>30 anos)	Estatística de série longa (~ 30 anos)	Curva-chave normal	-12%	+12%
1 ano	Estatística de apenas 1 ano de dados	Sem ajuste climático	-42%	+73%
1 ano	Estatística de apenas 1 ano de dados	Com ajuste climático	-22%	+28%
5 anos	Estatística de 5 anos de dados	Sem ajuste climático	-24%	+32%
5 anos	Estatística de 5 anos de dados	Com ajuste climático	-13%	+15%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $Au/Ag > 2$	-31%	70%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $1 < Au/Ag < 2$	-18%	25%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $0,5 < Au/Ag < 1$	-31%	27%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $0,2 < Au/Ag < 0,5$	-41%	53%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $Au/Ag < 0,2$	-43%	88%
Sem dados	Vazão específica	Posto fluviométrico de apoio não-encadeado	-58%	+110%
Sem dados	Vazão incremental	Com postos fluviométricos a montante	-17%	+22%

7.2 Incerteza da estimativa da Q_{95} pelos diferentes métodos

Este item e a tabela 7.2 resumem os resultados da análise de incerteza dos métodos de estimativa da Q_{95} , considerando um intervalo de confiança de 90%.

A primeira linha da tabela 7.2 mostra que a incerteza da Q_{95} estimada em um posto fluviométrico onde há uma série longa de dados observados é da ordem de 34%, conforme discutido no capítulo 2.

A partir da segunda linha da tabela 7.2, os valores são comparáveis entre si, pois apresentam estimativas de incerteza com relação à condição mais favorável, que seria ter disponível uma série longa de dados no local.

Assim, conforme a segunda linha da tabela 7.2, em locais com apenas 1 ano de dados, a incerteza da estimativa da Q_{95} é tal que, em 90% dos casos, espera-se que o valor real esteja entre 55% a menos e 122% a mais do valor estimado. Esta incerteza pode ser reduzida caso seja aplicado o método do ajuste climático, conforme descrito no capítulo 3. Neste caso, a incerteza da estimativa da Q_{95} cai, ficando em um intervalo entre 36% a menos e 57% a mais do que o valor estimado, conforme mostrado na terceira linha da tabela 7.2. Entretanto, cabe dizer que, neste caso, esta incerteza não está considerando a própria incerteza da curva-chave, conforme discutido no capítulo 3.

Em locais sem dados, a melhor estimativa da Q_{95} pode ser obtida em locais em que há postos fluviométricos a montante e a jusante do local de interesse. Neste caso

é possível aplicar o método da vazão incremental, cujo intervalo de confiança na estimativa da Q_{95} está em 36% a menos e 57% a mais do que o valor estimado, conforme mostrado na última linha da tabela 7.2.

Quando não há a possibilidade de aplicar o método da vazão incremental com ao menos um posto fluviométrico a montante, o método indicado para estimar a vazão Q_{95} , entre os métodos avaliados, é o método clássico de vazão específica, uma vez que não houve evidentes diferenças nas incertezas obtidas entre este método e o da incremental, nessa circunstância. Adotando o método da vazão específica, o grau de incerteza depende da posição relativa entre o local de interesse e o posto fluviométrico utilizado como doador (ver capítulo 4). Em locais sem dados em que o posto fluviométrico doador está localizado a montante ou a jusante do local de interesse, diz-se que os dois locais estão encadeados, porque suas respectivas bacias hidrográficas se sobrepõem. Em locais sem dados em que o posto fluviométrico doador não está localizado nem a montante nem a jusante do ponto de interesse, diz-se que os locais não estão encadeados.

Em locais com forte grau de encadeamento, as áreas de drenagem do ponto de interesse e do posto fluviométrico doador são próximas. Por isso a razão Au/Ag , sendo Au a área de drenagem no local de interesse e Ag a área de drenagem do posto fluviométrico doador, é próxima de 1. Em locais com menor grau de encadeamento a razão Au/Ag é muito pequena, ou muito grande. A tabela 7.2 mostra que, em locais sem dados que são encadeados com os postos fluviométricos doadores, a incerteza do método da vazão específica para estimar a Q_{95} varia de acordo com o grau de encadeamento, sendo menor quando a razão de áreas é próxima de 1. Por exemplo, em locais sem dados localizados a montante dos postos fluviométricos de apoio, em que a área de drenagem no local sem dados está no intervalo entre 50% e 100% da área no local com dados ($0,5 < Au/Ag < 1$), a incerteza da estimativa da Q_{95} ficou no intervalo entre -50% e +46%. Já em locais mais a montante, em que a área de drenagem do local sem dados (Au) é menor do que 20% da área de drenagem do posto fluviométrico de apoio (Ag), ou seja, onde Au/Ag é menor do que 0,2, a incerteza da estimativa da Q_{95} ficou no intervalo entre -89% e +161%.

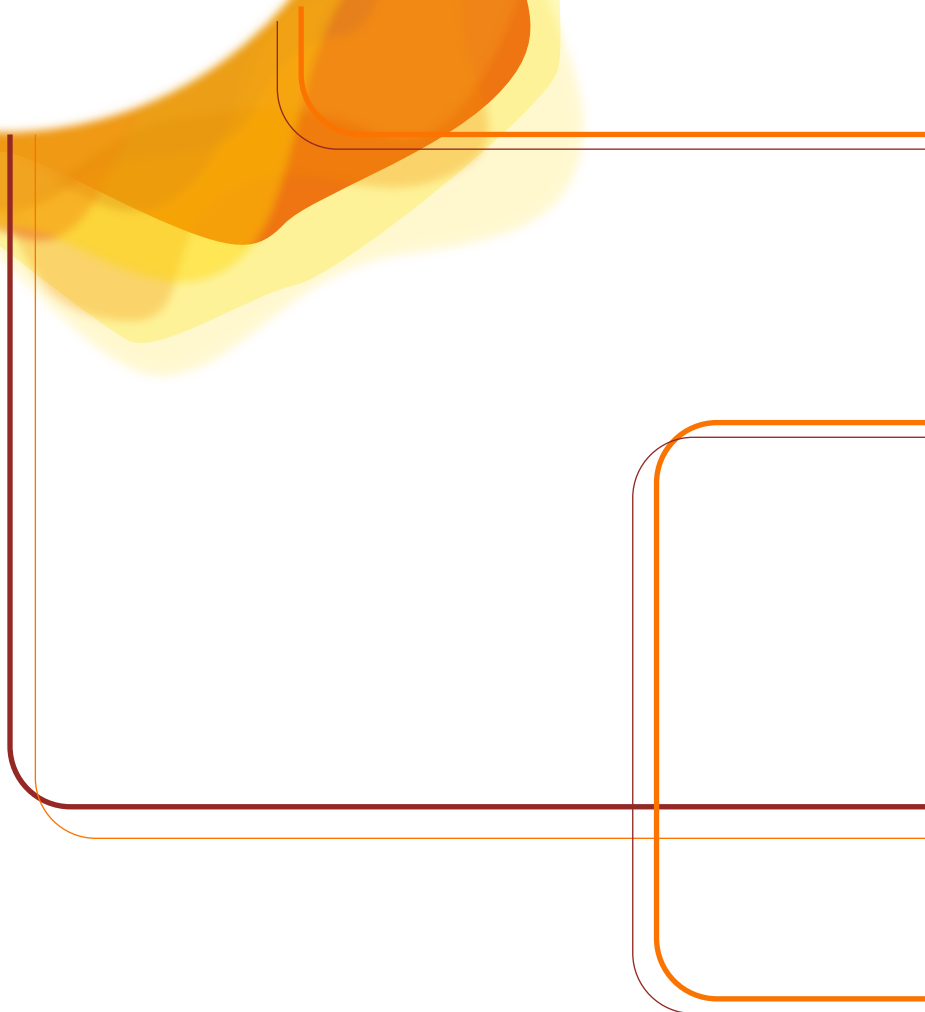
Por outro lado, em locais sem dados onde o ponto de interesse e o posto fluviométrico doador não estão encadeados, os limites inferior e superior que englobam 90% dos casos são, respectivamente, -91% e +315%.

A tabela 7.2 também mostra que o método da medição esporádica, com uma única medição de vazão realizada durante um período de estiagem, conforme descrito no capítulo 6, apresenta vantagens em termos de redução da incerteza da estimativa, quando comparado ao método da vazão específica, especialmente nos casos de locais não encadeados, ou em locais muito distantes do posto fluviométrico de apoio, em que a razão Au/Ag é muito grande ou muito pequena.

De maneira geral, a tabela 7.2 demonstra o valor dos dados observados no próprio local de interesse, por menor que seja a série de dados observados.

Tabela 7.2: Incerteza da estimativa da vazão Q_{95} de acordo com métodos e disponibilidade de dados, para o intervalo de confiança de 90%.

Dados observados	Método	Situação	Limite inferior	Limite superior
Muitos anos (>30 anos)	Estatística de série longa (~ 30 anos)	Curva-chave normal	-34%	+34%
1 ano	Estatística de apenas 1 ano de dados	Sem ajuste climático	-55%	+122%
1 ano	Estatística de apenas 1 ano de dados	Com ajuste climático	-36%	+57%
5 anos	Estatística de 5 anos de dados	Sem ajuste climático	-36%	+55%
5 anos	Estatística de 5 anos de dados	Com ajuste climático	-27%	+37%
Medição única na estiagem	Medição esporádica	Geral	-45%	88%
Medição única na estiagem	Medição esporádica	Posto fluviométrico de apoio encadeado	-38%	68%
Medição única na estiagem	Medição esporádica	Posto fluviométrico de apoio não-encadeado	-47%	93%
Medição única na estiagem	Medição esporádica	Q_{95} específica < 4 litros.s-1.km ²	-62%	192%
Medição única na estiagem	Medição esporádica	Q_{95} específica > 4 litros.s-1.km ²	-38%	62%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $Au/Ag > 2$	-46%	131%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $1 < Au/Ag < 2$	-28%	68%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $0,5 < Au/Ag < 1$	-50%	46%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $0,2 < Au/Ag < 0,5$	-61%	80%
Sem dados	Vazão específica	Locais encadeados com $Au/Ag < 0,2$	-89%	161%
Sem dados	Vazão específica	Posto fluviométrico de apoio não-encadeado	-91%	+315%
Sem dados	Vazão incremental	Com postos fluviométricos a montante	-39%	+33%



RECOMENDAÇÕES GERAIS

PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES
DE REFERÊNCIA COM MÉTODOS
SIMPLES EM LOCAIS COM

CARÊNCIA
DE DADOS



Por princípio, a melhor forma de obter vazões de referência é a partir de longas séries de dados observados no local de interesse. Entretanto, as redes de monitoramento são esparsas e instaladas dinamicamente no tempo, sendo praticamente inevitável recorrer a outras soluções.

Todas as formas de obtenção de vazões de referência, porém, estão sujeitas a incertezas, que são de diferentes origens e magnitudes.

Quanto mais expressivas são essas incertezas, mais relevantes se tornam uma eficiente comunicação a seu respeito e o aprimoramento de metodologias para sua efetiva incorporação nos processos de tomada de decisão, sobretudo no que se refere à gestão de recursos hídricos.

No campo dos estudos hidrológicos, a avaliação de incertezas pode ser particularmente útil, considerando que intervalos de confiança mais estreitos correspondem a melhores opções metodológicas, desde que as premissas de construção destes intervalos para os diferentes métodos sejam equivalentes.

No decorrer deste livro foram apresentados quatro métodos simples para obter vazões de referência na existência de pouco ou nenhum dado no local interesse. Da mesma forma, foram avaliadas as incertezas dos resultados desses métodos em relação à informação proveniente de uma série longa de vazões observadas.

Com base nos intervalos de confiança obtidos para cada caso avaliado, pode-se definir a seguinte ordem de preferência para obtenção de vazões de referência:

1. Estatística de vazões em local com série longa de dados observados.
2. Método da vazão incremental, quando há postos fluviométricos a montante e a jusante do local de interesse (capítulo 5).
3. Estatística de vazões em local com série curta de dados observados, corrigida pelo método do ajuste climático (capítulo 3).
4. Método da vazão específica, com dados de um posto fluviométrico localizado a montante ou a jusante do local sem dados, cuja área de drenagem seja maior do que a metade e menor do que o dobro da área de drenagem do local sem dados.
5. Método das medições esporádicas.
6. Método da vazão específica, com dados de um posto fluviométrico com uma das duas situações seguintes:

localizado a montante do local sem dados, e com uma área de drenagem menor do que a metade da área de drenagem do local sem dados;

localizado a jusante do local sem dados, e com área de drenagem maior do que o dobro da área de drenagem do local sem dados.

7. Método da vazão específica com apoio de dados de um posto fluviométrico não encadeado com o local de interesse, isto é, não está localizado nem a montante nem a jusante do local sem dados em que a vazão de referência deve ser determinada.

O que foi apresentado nos capítulos anteriores pode ser sintetizado em uma série de recomendações para o hidrólogo que precisa estimar uma vazão de referência, como a vazão média ou a Q_{95} , em um local sem dados.

1. O local tem uma série de dados longa (30 anos ou mais)?

Em caso positivo, calcule a vazão de referência diretamente da série de vazão observada, utilizando as estatísticas apropriadas. A incerteza da estimativa está relacionada com a variabilidade climática e com a incerteza da curva-chave. Assumindo que o período de 30 anos ou mais é representativo, a principal fonte de incerteza é a curva-chave. A tabela 2.1 apresenta estimativas da incerteza relacionadas à curva-chave que podem servir como um indicativo. Uma análise mais formal pode ser feita analisando mais profundamente os dados do próprio posto fluviométrico.

Em caso negativo, é necessário verificar se o local tem ao menos uma série curta de dados, ou se há postos fluviométricos a montante e a jusante que possam apoiar a aplicação do método da vazão incremental.

2. Há postos fluviométricos com séries longas a montante e a jusante do local de interesse?

Em caso positivo, o método da vazão específica incremental poderá ser aplicado, conforme o capítulo 5. A incerteza da estimativa pode ser estimada com base nas tabelas 5.2 e 5.3.

3. O local tem uma série curta de dados (1 ano ou mais)?

Em caso positivo, calcule a vazão de referência diretamente da série de vazão observada, utilizando as estatísticas apropriadas, e aplique o método de ajuste climático, descrito no capítulo 3 para reduzir a incerteza associada à variabilidade do clima. Para estimar os limites inferior e superior do intervalo de confiança utilize as tabelas 3.1 e 3.2, na coluna “sem ajuste climático”.

4. Há um posto fluviométrico a montante ou a jusante, cuja área de drenagem seja maior do que a metade e menor do que o dobro da área de drenagem do local sem dados?

Em caso positivo, calcule a vazão de referência pelo método da vazão específica, conforme o capítulo 4. Para estimar os limites inferior e superior do intervalo de confiança utilize as tabelas 4.3 a 4.6.

5. Há tempo e recursos suficientes para realizar uma única medição de vazão?

Em caso positivo, uma vazão de referência baixa, como a $Q_{0,95}$, poderá ser estimada pelo método das medições esporádicas, conforme descrito no capítulo 6. A incerteza pode ser estimada utilizando as tabelas 6.1 a 6.5.

6. Há um posto fluviométrico a montante ou a jusante do local sem dados, cuja área de drenagem seja maior do que um décimo e menor do que dez vezes a área de drenagem do local sem dados?

Em caso positivo, calcule a vazão de referência pelo método da vazão específica, conforme o capítulo 4. Para estimar os limites inferior e superior do intervalo de confiança utilize as tabelas 4.3 a 4.6.

7. Há um posto fluviométrico na região do local sem dados, mesmo que não esteja localizado nem a montante nem a jusante do local sem dados?

Em caso positivo, calcule a vazão de referência pelo método da vazão específica, conforme o capítulo 4. Para estimar os limites inferior e superior do intervalo de confiança utilize as tabelas 4.1 e 4.2.

REFERÊNCIAS

Alexandre, A. M. B., Martins, E. S., Clarke, R.T., Reis Jr., D.S. (2005) Regionalização de Parâmetros de Modelos Hidrológicos. XVI SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João pessoa - PB

Alfieri, L., Lorini V., Hirpa, F. et al. (2020) Aglobal streamflow reanalysis for 1980-2018. *Journal of Hydrology* X, 5, 100049, doi:10.1016/j.hydroa.2019.100049

ANA (2020) Agência Nacional do Águas e Saneamento Básico (Brasil). Nota Técnica nº 75/2020/SPR - Atualização da Base de Disponibilidade Hídrica Superficial da ANA. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/files/7ac42372-3605-44a4-bae4-4dee7af1a2f8/NT75_2020.pdf

ANA (2021) Agência Nacional do Águas e Saneamento Básico (Brasil). Nota Técnica nº 52/2021/SPR - Regionalização de vazões na UGRH do Doce: Q90, Q95, Q710, Qmlt (anuais e mensais). Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br>

Beskow, S., de Mello, C. R., Vargas, M. M etal. (2016). Artificial intelligence techniques coupled with seasonality measures for hydrological regionalization of Q90 under Brazilian conditions. *Journal of Hydrology*, 541, 1406-1419. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.046

Betterle A, Botter G (2021). Does catchment nestedness enhance hydrological similarity? *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094148. doi: 10.1029/2021GL094148

Boiten, W. (2008). *Hydrometry: a comprehensive introduction to the measurement of flow in open channels*. 3rd edition. UNESCO-IHE Lecture Note Series. CRC Press/Balkema: Leiden. ISBN 978-0-415-46763-6. XI, 247 pp.

Castellarin, A., R. M. Vogel, A. Brath (2004). A stochastic index flow model of flow duration curves, *Water Resour. Res.*, 40, W03104, doi:10.1029/2003WR002524.

Chopart S, Saquet E (2008). Usage des jaugeages volants en regionalisation des débits 'étiage (Using spot gauging data to interpolate low flow characteristics), *Revue des sciences de léau (Journal of Water Science)*, 21 (3), 267-281

Clark, M. P., Rupp, D. E., Wood, R. A. et al. (2008) Hydrological data assimilation with the ensemble Kalman filter: Use of streamflow observations to update states in a distributed hydrological model. *Advanced in Water resources*. v. 31, n. 10, p. 1309-1324.

Clarke, R. T. (1999). Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefinición. *Journal of Hydrology*, 222(1-4), 185-190.

Clarke, R. T., Mendióndo, E. M., & Brusa, L. C. (2000). Uncertainties in mean discharges from two large South American rivers due to rating curve variability. *Hydrological Sciences Journal*, 45(2), 221-236.

Collischonn W., Dorneles F. (2013) *Hidrologia para Engenharias e Ciências Ambientais*. ISBN: 978-85-8868-634-2

Collischonn, W., Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., (2021a). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: O efeito da variabilidade amostral sobre a estimativa de vazões de referência: IPH-ANAHGE-SR-R4. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Collischonn, W., Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., (2021b). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: Avaliação do método de estimativa de vazão de referência em locais sem dados a partir da vazão específica incremental: IPH-ANA-HGE-SR-R7. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Cruz, J. C. (2001). Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais. Tese de Doutorado. IPH UFRGS.

Cruz, J. C., & Tucci, C. E. M. (2008). Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos. Porto Alegre, RS. Vol. 13, n. 1 (jan./mar. 2008), p. 111-124.

Dinis, L.S., Clarke, R.T. (2001) Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais” In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, Aracajú: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. CD-ROM

ELETROBRÁS, Centrais Elétricas Brasileiras SA (1985) Metodologia para Regionalização de Vazões. 440 p. Rio de Janeiro, Brasil.

Drogue, G.; Khediri, W. B. (2016). Catchment model regionalization approach based on spatial proximity: Does a neighbor catchment-based rainfall input strengthen the method?. Journal of Hydrology: Regional Studies, 8, 26-42.

Eng, K., Kiang, J. E., Chen, Y. Y., Carlisle, D. M., & Granato, G. E. (2011) Causes of systematic over- or underestimation of low streamflows by use of index-streamgage approaches in the United States. Hydrological Processes, 25(14), 2211-2220.

Etter, S.; Strobl, B.; Seibert, J.; Van Meerveld, H. I. (2020). Value of crowd-based water level class observations for hydrological model calibration. Water Resources Research, 56(2), e2019WR026108.

Gama, C. H. A., Paiva, R. C. D., & Collischonn, W. (2021). Reanálise hidrológica: assimilação de dados aplicada à modelagem da América do Sul: resultados preliminares. Em: Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.

Gama C. H. A. (2019) Previsão operacional de vazões baseada em modelo hidrológico concentrado, assimilação de dados e previsões meteorológicas. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Porto Alegre-RS, Brasil.

Gama, C. H. de A., Ribeiro, L. de C., Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Sorribas, M. V., (2021). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: Estimativas de vazões de referência com modelo MGB-SA: IPH-ANAHGE-SR-R9. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

- Garcia, R., Costa, V., & Silva, F. (2020). Bayesian rating curve modeling: Alternative error model to improve low-flow uncertainty estimation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(5).
- Grison F., Kobiyama, M. (2009) Erros e incertezas na estimativa de vazões e no traçado de curvas-chave. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*.
- Gottschalk, L., Leblois, E., Skøien, J.O. (2011) Distance measures for hydrological data having a support. *Journal of Hydrology*, 402, Issues 3–4, 415-421,doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.020.
- Guo, Y., Zhang, Y., Zhang, L., & Wang, Z. (2021) Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, e1487.
- Guse B, Castellarin A, Thielen A, Merz B (2009) Effects of intersite dependence of nested catchment structures on probabilistic regional envelope curves. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1699–1712, doi: 10.5194/hess-13-1699-2009
- Horner, I., Renard, B., Le Coz, J., Branger, F., McMillan, H. K., & Pierrefeu, G. (2018). Impact of stage measurement errors on streamflow uncertainty. *Water Resources Research*, 54(3), 1952-1976.
- Jaccon, G., & Cudo, K. J. (1989). *Hidrologia Curva-Chave. Análise e traçado*. DNAEE Brasília, 273pp.
- Jiménez, K. Q., Collischonn, W., & Paiva, R. C. D. de (2019). Data assimilation using the ensemble Kalman filter in a distributed hydrological model on the Tocantins River, Brasil. *RBRH*, 24, e14. Doi:10.1590/2318-0331.241920180031
- Kiang, J. E., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Le Coz, J., Westerberg, I. K., ... & Mason, R. (2018). A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. *Water Resources Research*, 54(10), 7149-7176.
- Laaha, G., & Blöschl, G. (2005). Low flow estimates from short stream flow records—a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306(1-4), 264-286.
- Laaha, G., van Loon, A. F., Lang Delus, C., & Koffler, D. (2014). Regional assessment of low flow processes and prediction methods across European regimes. Paper presented at *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, Hanoi, Vietnam.
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573-587.
- Maldonado, L. H., Kazay, D. F., & Lopez, E. E. R. (2018). The estimation of the uncertainty associated with rating curves of the river Ivinhema in the state of Paraná/Brazil. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 40, p. 06029). EDP Sciences.
- Mansanarez, V., Westerberg, I. K., Lam, N., & Lyon, S. W. (2019). Rapid Stage-Discharge Rating Curve Assessment Using Hydraulic Modeling in an Uncertainty Framework. *Water resources research*, 55(11), 9765-9787.

- McMahon, T. A., & Peel, M. C. (2019). Uncertainty in stage–discharge rating curves: application to Australian Hydrologic Reference Stations data. *Hydrological Sciences Journal*, 64(3), 255-275.
- McMillan, H. K., & Westerberg, I. K. (2015). Rating curve estimation under epistemic uncertainty. *Hydrological Processes*, 29(7), 1873-1882.
- McMillan, H., Seibert, J., Petersen-Overleir, A., Lang, M., White, P., Snelder, T., ... & Kiang, J. (2017). How uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications. *Water Resources Research*, 53(7), 5220-5228.
- McMillan, H., T. Krueger, and J. Freer (2012), Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality, *Hydrological Processes*, 26(26), 4078–4111.
- Meller, A., Bravo, J. M., Collischonn, W. (2012) Assimilação de Dados de Vazão na Previsão de Cheias em Tempo-Real com o Modelo Hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 209-224, 2012.
- Melo, J. S., Villas Boas, M. D., Pinto, E. J. D. A., & Vieira, M. D. S. (2017). Regionalização de vazão de 95% de permanência da subbacia 58: Bacia do Rio Paraíba do sul. *Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH.
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473. doi:10.1029/wr026i007p01465
- Naggettini, M., & Pinto, E. J. D. A. (2007). *Hidrologia estatística*. CPRM.
- Otsuki, R. G., & Reis Jr, D. S. (2011). Análise Comparativa de Metodologias de Estimativa de Séries de Vazões Médias Mensais Aplicadas a Estudos Energéticos de Aproveitamentos Hidrelétricos. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Macaé, AL.
- Pereira, M., Kayser, R., & Collischonn, W. (2013). Regionalização de vazões assistida por modelagem hidrológica para análises de disponibilidade de água, estudo de caso: bacia do rio ibicuí-rs. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves.
- Pessoa, M. M. E. P. (2017) Obtenção De Vazões Em Locais Sem Dados Através De Modelos Hidrológicos Com Assimilação De Dados. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Porto Alegre-RS, Brasil.
- Pool, S.; Viviroli, D.; Seibert, J. (2017). Prediction of hydrographs and flow-duration curves in almost ungauged catchments: Which runoff measurements are most informative for model calibration?. *Journal of Hydrology*, 554, 613-622.
- Pool, S.; Viviroli, D.; Seibert, J. (2019). Value of a limited number of discharge observations for improving regionalization: A large-sample study across the United States. *Water Resources Research*, 55(1), 363-377.

- Reis, J. A. T., Guimarães, M. A., Barreto Neto, A. A., Bringhamti, J. (2008) Indicadores regionais aplicáveis à avaliação do regime de vazão dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Itabapoana. *Geociências*, 21, 4, 509-516
- Ries KG, Friesz PJ (2000) Methods for estimating lowflow statistics for Massachusetts streams: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4135, 81 p. doi: 10.3133/wri004135
- Rojas-Serna, C., Lebecherel, L., Perrin, C., Andréassian, V., Oudin, L. (2016). How should a rainfall-runoff model be parameterized in an almost ungauged catchment? A methodology tested on 609 catchments. *Water Resources Research*, 52(6), 4765-4784.
- Salinas J. L., Laaha G., Rogger M., Parajka J., Viglione A., Sivapalan M., Blöschl G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins--Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 10(1).
- Santana, A.G.; Cardoso, E.R.; Silva, F.F.; Genz, F.; Ribeiro, C.A.O. (2000) Estimativa da Vazão de Referência, com Carência de Dados, Para Outorga na Bahia. In: Anais. V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal/RN, 2000
- Santos, I. D., Fill, H. D., Sugai, M. R. V. B., Buba, H., Kishi, R. T., Marone, E., & Lautert, L. F. (2001). *Hidrometria aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento.
- Santos K. A. (2015) Regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 39, bacias dos rios Capibaribe, Ipojuca, Una, Goiana, Mundaú, Paraíba do Meio, Coruripe, Sirinhaém, São Miguel e Camaragibe. CPRM.
- Saraiva, I., Fernandes, W., & Naghettini, M. (2011). Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. *RBRH—Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16(1), 115-125.
- Silveira, G. L., Tucci, C. E. M.; Silveira, A. L. L. (1998) Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre 3(3), 111–131.
- Skøien, J. O., Merz, R., and Blöschl, C. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 277–287, <https://doi.org/10.5194/hess-10-277-2006>.
- Sorribas M. V., Collischonn W., Paiva R. C. D, et al. (2021a) Estudo sobre erros do método da vazão específica na estimativa de vazão em locais sem dados: uma primeira análise. Em: Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.
- Sorribas, M. V., Collischonn, W., Paiva, R. C. D., (2021b). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: Avaliação do método da vazão específica com doador único em postos fluviométricos do Brasil: IPH-ANA-HGESR-R6. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Sorribas, M. V., Collischonn, W., Paiva, R. C. D. (2021c). Erros na estimativa de vazões Q95 com medições esporádicas “spot gauging”: uma análise de coletas simultâneas por meio de simulação. Em: Anais do XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte - MG.

Sorribas, M. V., Collischonn, W., Paiva, R. C. D., (2021d). Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional: Relatório técnico: O efeito do ajuste climático em séries curtas sobre a estimativa de vazões de referência: IPHANA-H-GE-SR-R5. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Sun, W.; Wang, Y.; Wang, G., Et Al. (2017). Physically based distributed hydrological model calibration based on a short period of streamflow data: case studies in four Chinese basins. *Hydrology & Earth System Sciences*, 21(1).

Tallaksen, L. M., & Van Lanen, H. A. (Eds.). (2004). *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater* (Vol. 48). Elsevier.

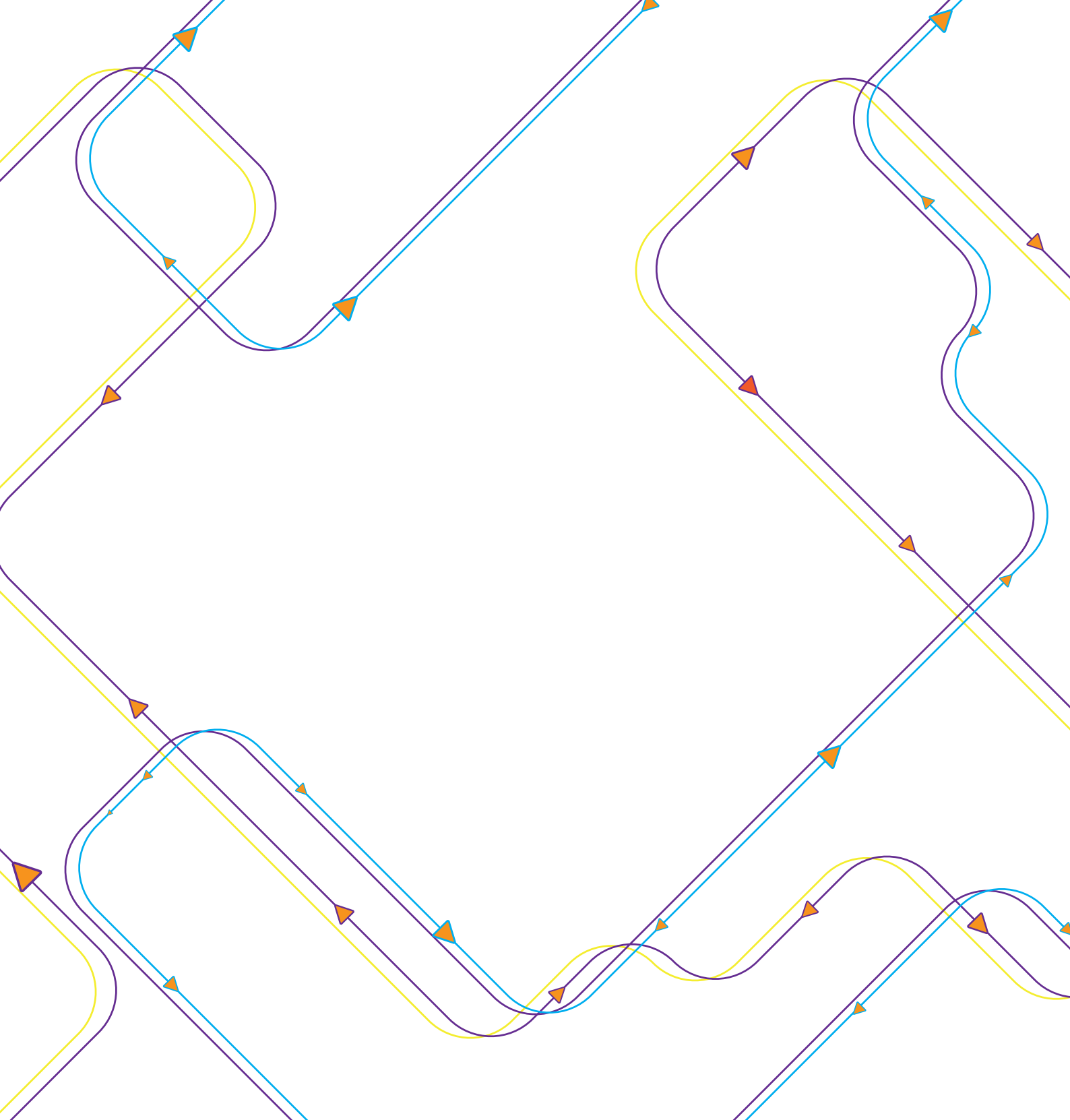
Tucci, C.E.M. (1993) [ed.] *Hidrologia: ciência e aplicação*. Editora da Universidade. Porto Alegre-RS, Brasil. 943p.

Tucci, C. E. M. (2002) *Regionalização de vazões*. Editora da Universidade. UFRGS. 1a edição. Porto Alegre.

Wongchuig, S. C., de Paiva, R. C. D., Siqueira, V., Collischonn, W. (2019). Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin. *Journal of Hydrology*, 570, 755-773.

Westerberg, I. K.. Et al.(2016). Uncertainty in hydrological signatures for gauged and ungauged catchments. *Water Resources Research*, 52(3)

Zhang, Z. (2017) The index gage method to develop a flow duration curve from short-term streamflow records. *Journal of Hydrology*, 553, 119-129.



ABRHidro 45
ANOS
Associação Brasileira de Recursos Hídricos

 **ANA**
AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
E SANEAMENTO BÁSICO

**MINISTÉRIO DA
INTEGRAÇÃO E DO
DESENVOLVIMENTO
REGIONAL**

GOVERNO FEDERAL

UNIÃO E RECONSTRUÇÃO

ISBN: 978-85-88686-49-6

9 788588 686496