

**COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA
ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA
NACIONAL**

**SUBPROJETO – REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES VIA
MODELAGEM HIDROLÓGICA**

**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

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Avaliação do método de estimativa de vazão de referência em locais sem dados a partir da vazão específica incremental



ESTE MATERIAL FAZ PARTE DE UM CONJUNTO DE RELATÓRIOS CRIADOS NO CONTEXTO DO PROJETO DE COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL, ENTRE O INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH-UFRGS) E A AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA).

AUTORES: Walter Collischonn, Mino Viana Sorribas, Rodrigo Cauduro Dias de Paiva.

COMO CITAR: Collischonn, W., Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., 2021. 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].

Porto Alegre - RS

Outubro 2021

Sumário

1	Apresentação	4
2	Introdução	6
2.1	O problema da continuidade de vazões.....	7
2.2	O método da vazão específica incremental	9
2.3	Amplificação da incerteza com o método da vazão específica incremental	12
3	Metodologia	15
3.1	Seleção de postos fluviométricos.....	15
3.2	Método da vazão específica incremental	16
3.3	Comparação com o método da vazão específica.....	17
3.4	Critério teórico de escolha entre o método de vazão específica e o método da vazão específica incremental para estimar vazões em locais sem dados.....	17
3.5	Métricas de erro.....	21
4	Resultados	23
4.1	Avaliação geral	23
4.2	Avaliação de acordo com a disponibilidade de postos fluviométricos (casos 1 a 4)	25
4.3	Relações entre erros e relações de área (casos 1 a 4)	31
4.3.1	Caso 1: monitoramento somente a jusante.....	31
4.3.2	Caso 2: incremental monitorada, mas sem postos a montante do local.....	35
4.3.3	Caso 3: incremental monitorada somente a montante do local	38
4.3.4	Caso 4: incremental monitorada, inclusive com postos a montante do local	39
4.4	Avaliação empírica do critério de escolha entre os métodos.....	41
5	Conclusões.....	47
6	Referências.....	48

1 APRESENTAÇÃO

Este relatório refere-se ao produto “IPH-ANA-HGE-SR-R7”, do subprojeto “Regionalizações de vazões via modelagem hidrológica”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, na forma de um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

O projeto está dividido em 4 subprojetos voltados para a (i) capacitação e transferência tecnológica do modelo hidrológico MGB para aplicações e desenvolvimento na ANA, (ii) desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando modelagem hidrológica (Modelo MGB América do Sul), e desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e respectivas incertezas em nível nacional, (iii) avaliação de estimativas de áreas inundadas do modelo MGB e (iv) estimativas de fluxos e estoques hidrológicos em escala nacional com base no modelo MGB aplicadas às Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) no Brasil. Os produtos esperados incluem novas bases de dados, relatórios, manuais técnicos, cursos de capacitação e publicações técnico científicas.

O objetivo proposto para o subprojeto “Regionalização de vazões via modelagem hidrológica” é o desenvolvimento e avaliação de métodos para a regionalização de vazões naturais em escala nacional usando o modelo hidrológico MGB, desenvolvido em escala continental para toda a América do Sul (MGB-AS), além do desenvolvimento de base de dados de estimativas de vazões e estimativa das incertezas em nível nacional em compatibilidade com a base de dados BHO da ANA.

A avaliação de resultados da modelagem hidrológica para fins de regionalização de vazão, tem como etapa fundamental a comparação de estimativas de vazão obtidas com o modelo MGB-AS com as estimativas obtidas através de métodos mais tradicionais, como a regionalização de vazões.

Um método tradicional extremamente relevante, e adotado pela própria ANA, é o método baseado na vazão específica incremental (ANA 2020a, NOTA TÉCNICA Nº 75/2020/SPR). Este método consiste em considerar como região homogênea a área incremental entre duas ou mais estações fluviométricas, admitindo-se, em cada região (área incremental), uma vazão específica incremental constante, resultado da diferença entre a vazão do posto de jusante e a soma das vazões dos postos imediatamente a montante, dividida pelas respectivas diferenças de área de drenagem.

O método de regionalização por vazão específica incremental tem algumas vantagens operacionais interessantes, se comparado a outros métodos de regionalização. Estas vantagens incluem o controle ou ausência de vazões incrementais negativas, a possibilidade de inclusão do efeito de reservatórios de regularização, e a representação, ainda que de forma simplificada, da heterogeneidade das regiões hidrográficas, desde que a rede de monitoramento seja suficientemente densa.

O objetivo desse relatório é avaliar os erros do método da vazão específica incremental utilizando as informações de vazão observada em postos fluviométricos do Brasil. As estimativas de vazão média e Q95 foram realizadas para os locais dos postos fluviométricos, simulando

cenários em que não haveria dados. Os erros calculados, em relação a vazão real, foram quantificados, de forma a produzir uma visão geral do método da vazão incremental, para comparação com outras abordagens de regionalização.

2 INTRODUÇÃO

As vazões de referência (e.g. vazão média e vazão Q95) são importantes para a gestão de recursos hídricos, pois fornecem uma informação resumida e objetiva a respeito da disponibilidade hídrica em condições naturais. Conseguir estimar as vazões de referência em locais não-monitorados é um dos desafios fundamentais da hidrologia. Os métodos clássicos utilizados para resolver este problema consistem em agrupar os dados observados disponíveis numa determinada região e relacionar com características das bacias, através de diversos procedimentos denominados “regionalização de vazões” (Salinas et al. 2013; Tucci, 2002). Tradicionalmente, os estudos de regionalização utilizam equações de regressão entre a vazão e características mais facilmente mensuráveis da bacia hidrográfica, como a área de drenagem e a pluviosidade média anual; embora seja possível considerar outros fatores relacionados a variabilidade hidrológica regional, como índices topográficos (e.g. declividade, densidade de drenagem) e de sazonalidade.

As equações de regressão utilizados no Brasil costumam ser do tipo potência (equação 1) ou linear (equação 2), embora muitas outras tenham sido propostas.

$$Q = a \cdot A^b \cdot P^c \cdot X^d \quad (1)$$

$$Q = a + b \cdot A + c \cdot P + d \cdot X \quad (2)$$

onde Q é a vazão de referência; A é a área de drenagem; P é a precipitação média anual; X é uma variável independentes adicional qualquer; a, b, c, e d são coeficientes definidos pela minimização de erros nos locais em que a vazão de referência é conhecida.

Por exemplo, Melo et al. (2017), em um estudo de regionalização da Q95 na bacia do rio Paraíba do Sul, definiu a seguinte equação em uma das sub-regiões nas quais a bacia foi dividida:

$$Q_{95} = 0,005769 \cdot A^{0,9495} \quad (3)$$

Esta equação adota uma relação não linear entre a vazão Q95 e a área de drenagem (A) na região. Esta não linearidade é, em geral, pequena, como se observa pelo valor próximo de 1 do expoente da variável A. Entretanto, esta não linearidade, muito comum em equações de regionalização obtidas por regressão, pode conflitar com algumas hipóteses adotadas operacionalmente no balanço entre demandas e ofertas em bacias hidrográficas, conforme discutido adiante neste relatório.

Uma alternativa ao método de regionalização por equações de regressão é o método baseado na vazão específica incremental. Este método consiste em considerar como região homogênea a área incremental entre duas ou mais estações, admitindo-se em cada região (área incremental) uma vazão específica incremental constante, resultado da diferença entre a vazão do posto de jusante e as vazões dos postos imediatamente a montante dividida pelas respectivas diferenças de área (ANA 2020, NOTA TÉCNICA Nº 75/2020/SPR).

Uma das vantagens do método da vazão específica incremental é a relação linear entre a vazão incremental e a área de drenagem. Esta relação linear diminui o risco de ser definida uma região cuja vazão incremental é negativa e mantém a continuidade de vazões ao longo da rede de drenagem.

Por outro lado, o método da vazão específica incremental pode amplificar eventuais erros na estimativa da vazão de referência, por utilizar operações de subtração entre duas variáveis com considerável incerteza (a vazão de montante e a vazão de jusante), conforme discutido adiante neste relatório. Além disso, a possibilidade de estimar de vazões incrementais negativas também não é completamente eliminada, a não ser que a análise seja precedida de um procedimento de seleção de postos fluviométricos de apoio, de tal forma que, em nenhum conjunto de postos fluviométricos consecutivos, a vazão de referência diminua de montante para jusante.

Talvez em função dos problemas de amplificação de erros, discutidos mais adiante, o desempenho do método da vazão específica incremental não tenha apresentado vantagens em relação aos métodos tradicionais de regionalização numa análise comparativa com dados da bacia do rio São Francisco. Nesta região, Silva et al. (2009) concluíram que o método de vazão específica incremental apresentou erros maiores na estimativa de vazões mínimas em locais sem dados do que o método de regionalização tradicional, utilizando equações de regressão.

2.1 O PROBLEMA DA CONTINUIDADE DE VAZÕES

Os problemas decorrentes das limitações metodológicas em preservar a continuidade de vazões, e da heterogeneidade das bacias hidrográficas, foi discutido em algumas publicações como Novaes et al. (2009). Quando equações de regressão, como as apresentadas acima, são utilizadas operacionalmente, em cálculos de balanço hídrico entre oferta e demanda em uma bacia hidrográfica, um problema que pode ocorrer é o surgimento de vazões incrementais negativas em determinados locais. Estas vazões negativas não são resultado de um processo físico, mas de uma inadequação da equação de regressão geral em representar a situação local.

O exemplo ilustrado pela Figura 1 apresenta um exemplo hipotético, na confluência dos rios Petey e Mokoy, que passam a formar o rio Mbohapy. Na figura, a área de drenagem nos pontos A (no rio Petey) e B (no rio Mokoy) é de 500 km², e a área de drenagem no ponto C (no rio Mbohapy) é de 1010 km². Considerando que a equação de regressão encontrada para estimar a Q95 em toda a bacia é a equação 3, a Q95 no ponto A é igual a 2,1 m³.s⁻¹. O mesmo valor também é encontrado no ponto B. No ponto C, localizado um pouco a jusante da confluência, em um ponto cuja área de drenagem é igual a 1010 km², a Q95 estimada pela equação de regressão é 4,1 m³.s⁻¹.

Equação de regionalização: $Q_{95} = 0,005769 \cdot A^{0,9495}$

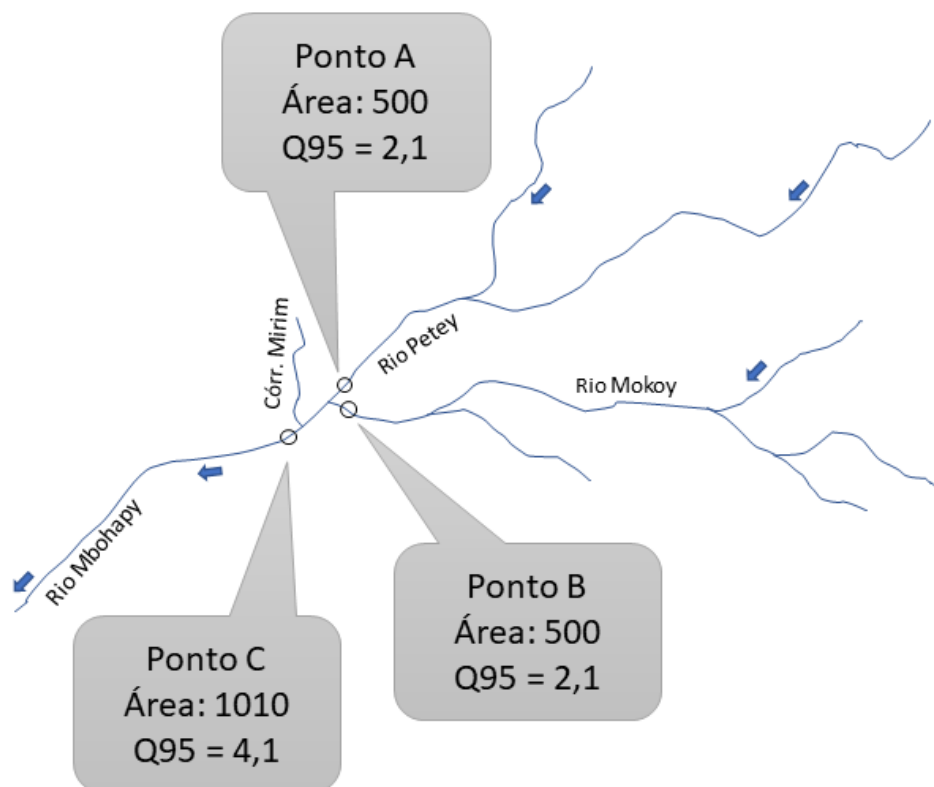


Figura 1: Exemplo hipotético em que uma equação de regionalização pode ser incompatível com a hipótese da continuidade da vazão de referência.

Observa-se que a Q95 no ponto C ($4,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) é menor do que a soma dos valores da Q95 em A e B, que resulta em $4,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Assim, neste exemplo, a equação de regionalização gera resultados que não são compatíveis com a hipótese de continuidade da vazão de referência.

A inadequação deriva da incompatibilidade entre duas hipóteses: 1) que a vazão de referência varia de forma não linear com a área; 2) que a vazão de referência em um local pode ser estimada pela propagação simples (soma) das vazões de referência de montante, mais a vazão de referência incremental.

Para manter a validade da segunda hipótese (continuidade das vazões), seria necessário que a vazão incremental na região definida entre os pontos A, B e C fosse negativa. Isso significa, por exemplo, que a Q95 no Córrego Mirim, ilustrado na figura, teria que ser negativa. Esse valor negativo, por outro lado, é incompatível com a equação de regressão, qualquer seja o valor da área de drenagem do Córrego Mirim.

A hipótese da continuidade não é, necessariamente, correta. Embora seja razoável pressupor que exista a continuidade das vazões instantâneas em uma confluência, não é razoável supor que vazões de referência, obtidas a partir de uma análise estatística, devem respeitar a continuidade. No exemplo da figura Figura 1, a Q95 do rio Petey pode acontecer em um dia diferente da Q95 do rio Mokoy, e, por isso, a Q95 logo a jusante da confluência não necessariamente é igual à soma das duas Q95 a montante.

Entretanto, do ponto de vista prático, especialmente em análises operacionais de balanço hídrico entre demandas e ofertas, tipicamente realizadas em análises de outorga de uso da água, a hipótese da continuidade é útil. Por isso, quando o objetivo da estimativa de vazão em locais sem dados é a análise operacional de balanço hídrico, a regionalização por equações de regressão, como as equações 1 e 2, pode ser preterida em relação à regionalização baseada no método da vazão específica incremental.

2.2 O MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL

Uma forma simples de contornar o problema operacional do surgimento de vazões incrementais negativas, quando se adota equações de regressão como a equação 3, é utilizar o método de vazão específica incremental para estimar as vazões nos locais sem dados.

O método de estimativa de vazões em locais sem dados pela vazão específica incremental, ou, de forma mais resumida, método da vazão específica incremental, consiste em considerar como região homogênea a área incremental entre duas ou mais estações, admitindo-se em cada região (área incremental) uma vazão específica incremental homogênea, resultado da diferença entre a vazão do posto de jusante e as vazões dos postos imediatamente a montante dividida pelas respectivas diferenças de área (ANA 2020 NOTA TÉCNICA Nº 75/2020/SPR).

O método pode ser descrito matematicamente por duas equações, que podem ser interpretadas com o auxílio do exemplo ilustrado na Figura 2 :

$$Qe_k = \left(\sum_{i=1}^N Qm_{k,i} \right) + q_k \cdot \left(A_k - \left(\sum_{i=1}^N Am_{k,i} \right) \right) \quad (4)$$

$$q_k = \frac{Q_j - \sum_{i=1}^M Qm_{j,i}}{A_j - \sum_{i=1}^M Am_{j,i}} \quad (5)$$

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; Qe_k é a vazão estimada no local sem dados; $Qm_{k,i}$ é a vazão observada em cada um dos N postos fluviométricos localizados a montante de K; $Qm_{j,i}$ 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; $Am_{k,i}$ 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; $Am_{j,i}$ 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.

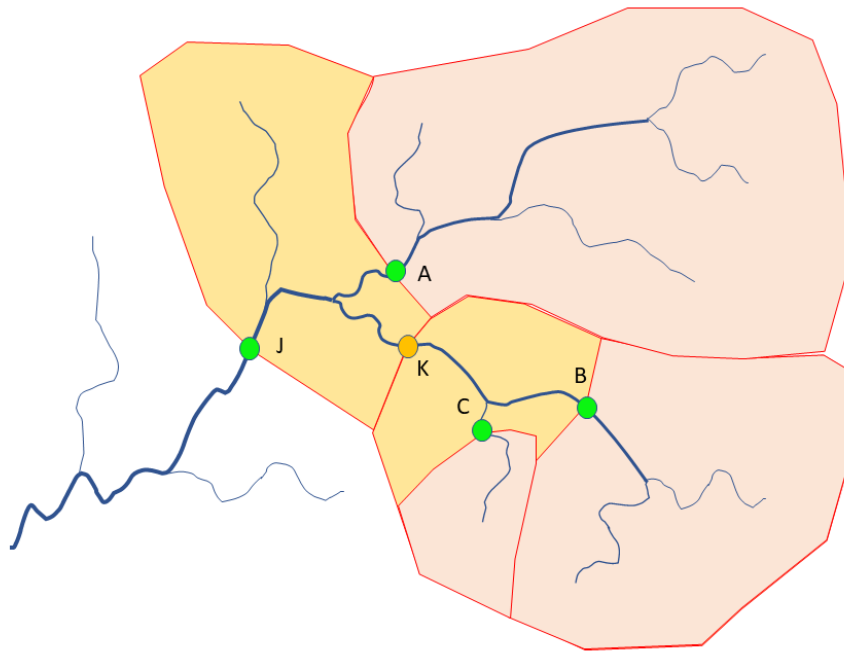


Figura 2: Exemplo ilustrativo do método da vazão específica incremental.

O método da vazão específica incremental pode ser aplicado independentemente da presença ou não de postos fluviométricos a montante do local sem dados K, e independentemente da presença ou não de postos fluviométricos a montante de J que não estão localizados a montante de K. A Figura 3 ilustra quatro casos diferentes de combinações da localização de postos fluviométricos em relação ao local sem dados K, onde se deseja estimar a vazão.

O caso 1 é o caso mais simples, em que 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.

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 pontos A, B, C, D e o posto fluviométrico J.

Por simplicidade a Figura 3 apresenta (além do posto a jusante J) somente dois postos de apoio no 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.

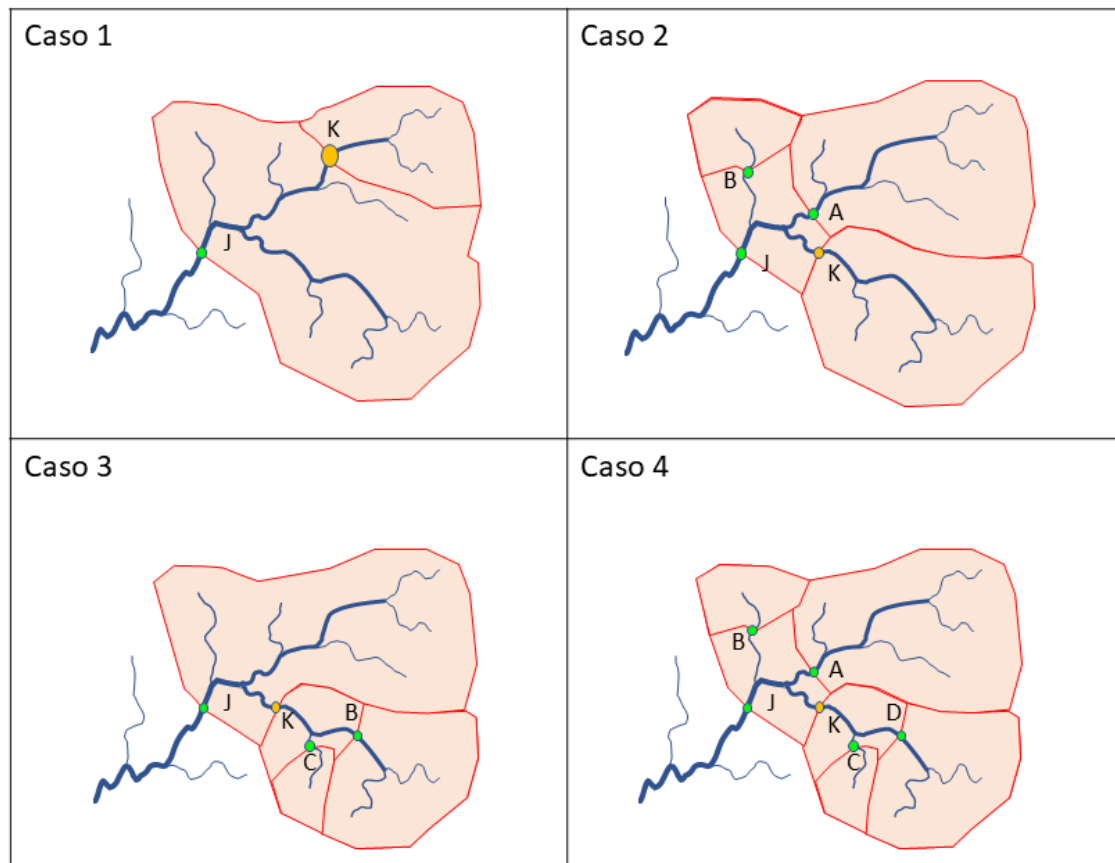


Figura 3: Casos típicos de combinações da localização de postos fluviométricos em relação ao local sem dados K, onde se deseja estimar a vazão, utilizando o método da vazão específica incremental.

Assim, o método da vazão incremental específica requer que exista pelo menos um posto fluviométrico a jusante do local de interesse para sua aplicação. A área incremental é definida entre esse posto fluviométrico de jusante e os postos fluviométricos localizados logo a montante. Em princípio, a aplicação do método requer que exista pelo menos o posto a jusante (J) do local de interesse (K) e outro posto que não esteja localizado entre J e K. Se não houver postos a montante do local de interesse, o método se resume em utilizar a vazão específica do posto de jusante. Em termos de posicionamento de postos fluviométricos, os quatro casos mencionados podem ser identificados pela tabela de contingência definida no Quadro 1.

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

2.3 AMPLIFICAÇÃO DA INCERTEZA COM O MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL

A estimativa da vazão específica incremental está baseada na equação 5, em que há uma operação de subtração entre dois valores de vazão que não são inteiramente livres de erro.

Uma variável z que é obtida pela subtração de duas outras variáveis (x e y) 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:

$$\Delta z = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (6)$$

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 incremental 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 pode ser desprezada.

A equação 6 pode ser utilizada para descrever a forma como o erro da vazão incremental varia em função da vazão incremental. Considerando que a bacia é razoavelmente homogênea, isto é, a vazão é uma função da área de drenagem, e que o erro de estimativa da vazão em um posto fluviométrico é de 10%, então o erro da estimativa da vazão incremental segue a curva apresentada na Figura 4.

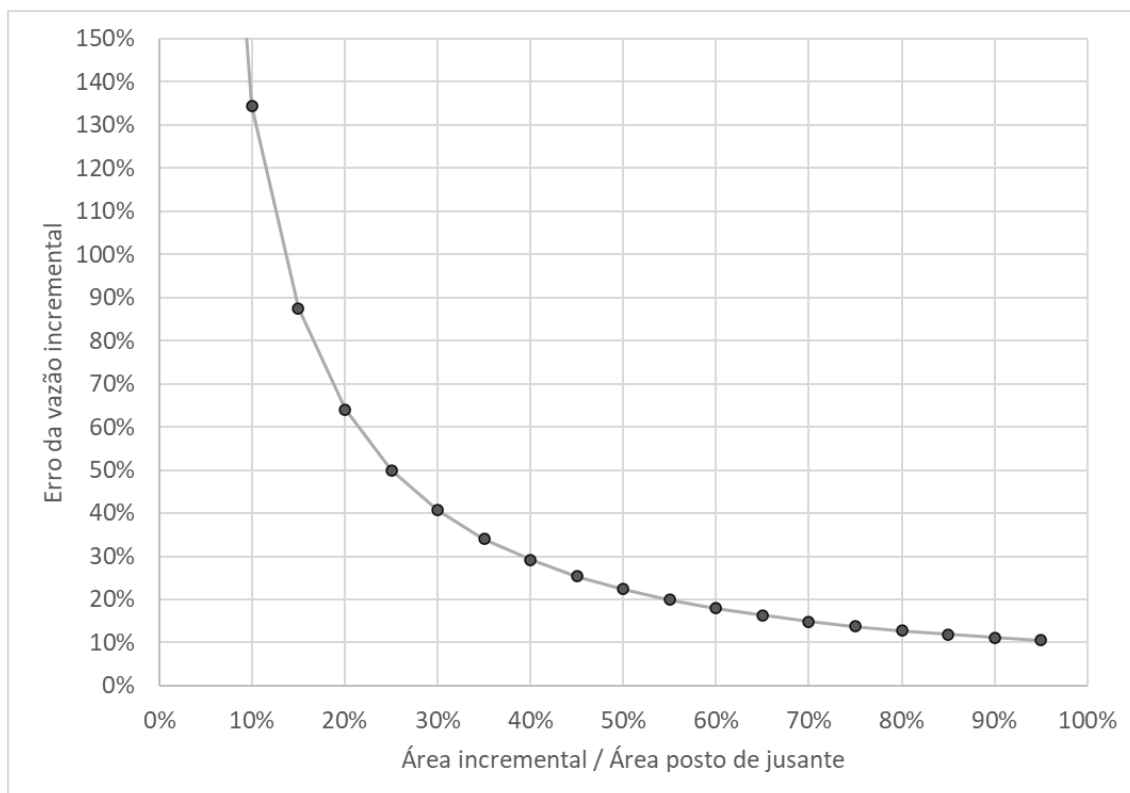


Figura 4: Erro esperado da estimativa da vazão incremental, por propagação de erros das medições nos postos fluviométricos que definem a região incremental, em relação à área de drenagem, considerando que o erro de estimativa da vazão em cada posto fluviométrico é de 10%.

Um erro de 10% na estimativa de uma vazão de referência (obtido de séries longas) em um posto fluviométrico pode ser considerado um valor plausível. Na análise do método da vazão específica, descrita no relatório anterior (Sorribas et al., 2021a; 2021b), observa-se que postos fluviométricos localizados muito próximos uns dos outros podem ter vazões de referência específicas com diferenças da ordem de 10%.

Isto pode ocorrer por diversos motivos, mas um deles, com certeza, é a própria incerteza da curva-chave. Conforme descrito por Santos et al. (2001), a precisão da curva de descarga é bastante variável, sendo possível considerar normais, valores de 5 a 10% para vazões obtidas a partir de níveis observados; e de 10 a 20% em trechos de extrapolação.

Os estudos de análise de consistência descritos por ANA (2020b) apontam que os desvios absolutos entre as vazões medidas e a curva-chave foi uma das informações utilizadas para qualificar os postos fluviométricos. Em postos fluviométricos que apresentam desvios médios abaixo de 8,5% foram qualificados entre “bom” e “ótimo”; entre 8,5% e inferior a 12,5% foram dados como “razoável”; e entre 12,5% e 104,9% foram denominados “péssimos”. Assim, observa-se que erros médios de até 10% tem sido considerado aceitáveis. Por outro lado, erros grandes e inaceitáveis podem ocorrer principalmente em trechos extrapolados devido à ausência de medições suficientes, problemas ou características da seção hidráulica (e.g. remanso, instabilidade de leito), por exemplo. É importante lembrar que a extrapolação de curvas-chave tende a produzir incertezas para pequenas vazões (Grisson e Kobiyama, 2009) e, portanto, com efeito direto sobre estimativas de vazões de referência de vazões mínimas.

A análise apresentada aqui sugere que a estimativa de vazões em locais sem dados pelo método da vazão específica incremental está sujeita a uma incerteza amplificada em relação às

estimativas originais da vazão nos postos fluviométricos. A magnitude dessa amplificação depende da magnitude da vazão incremental em relação à vazão total. Isto significa que, em regiões relativamente homogêneas, a amplificação é muito alta quando a área de drenagem da bacia incremental representa apenas uma pequena fração da área da bacia hidrográfica total. Assim, é possível que a amplificação do erro seja tão alta a ponto de o método da vazão específica incremental tornar-se inadequado em diversas situações práticas.

Neste capítulo apresentamos uma avaliação de erros obtidos ao utilizar o método da vazão da específica incremental para estimar vazões de referência (vazão média e Q95), a partir de dados de 1336 postos fluviométricos do Brasil. O objetivo do trabalho é responder à pergunta: Qual é a acurácia da estimativa da vazão de referência utilizando o método da vazão específica?

3 METODOLOGIA

A metodologia para avaliar os erros da estimativa de vazão em locais sem dados utilizando o método da vazão específica incremental foi baseada em simulação da ausência de dados em locais em que efetivamente existem dados de vazão observada. Para isto foram selecionados postos fluviométricos da base de dados Hidroweb, e foram utilizadas métricas de quantificação dos erros, conforme descrito a seguir.

Para comparar os resultados do método de vazão incremental com um benchmark, foram obtidas as vazões nos mesmos locais utilizando o método da vazão específica, utilizando como “doador” o próximo posto fluviométrico localizado a jusante.

3.1 SELEÇÃO DE POSTOS FLUVIOMÉTRICOS

O estudo foi realizado a partir de vazões de referência, Q95 e vazão média, calculados a partir de séries diárias de postos fluviométricos obtidos da base de dados Hidroweb da ANA. Foram considerados somente postos com séries de dados ao longo do período entre jan/1980 e dez/2014 com pelo menos 20 anos de dados. Além disso, considerou-se somente postos sem efeito significativo de regularização artificial e/ou erros grosseiros nas séries de dados, ou de interesse especial para a ANA. Uma análise de erros de estimativa na vazão de longo termo associados a variabilidade amostral (Collischonn et al. 2021) demonstraram que as estimativas a partir de 20 anos de dados apresentam erros inferiores a 5% na vazão média e inferiores a 15% na Q95 (quando comparados a séries de 30 a 35 anos) na maioria dos casos avaliados.

Considerando esses critérios, foram identificados 1069 postos fluviométricos, sendo que 795 postos apresentam posto fluviométrico a jusante, enquanto os demais são utilizados como suporte para delineamento das áreas incrementais.

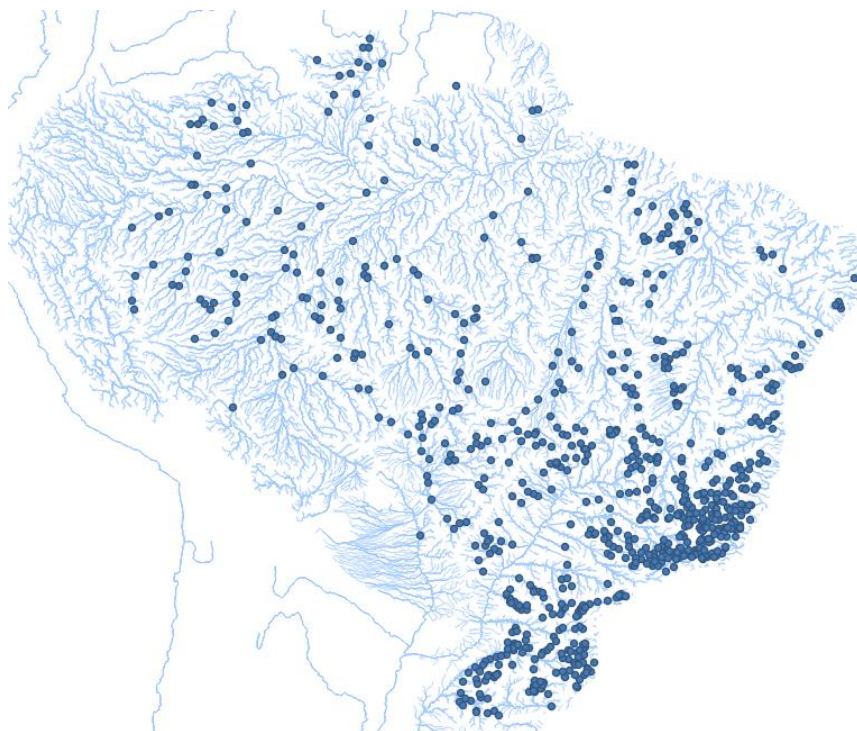


Figura 5: Postos fluviométricos utilizados para avaliação dos erros do método da vazão incremental.

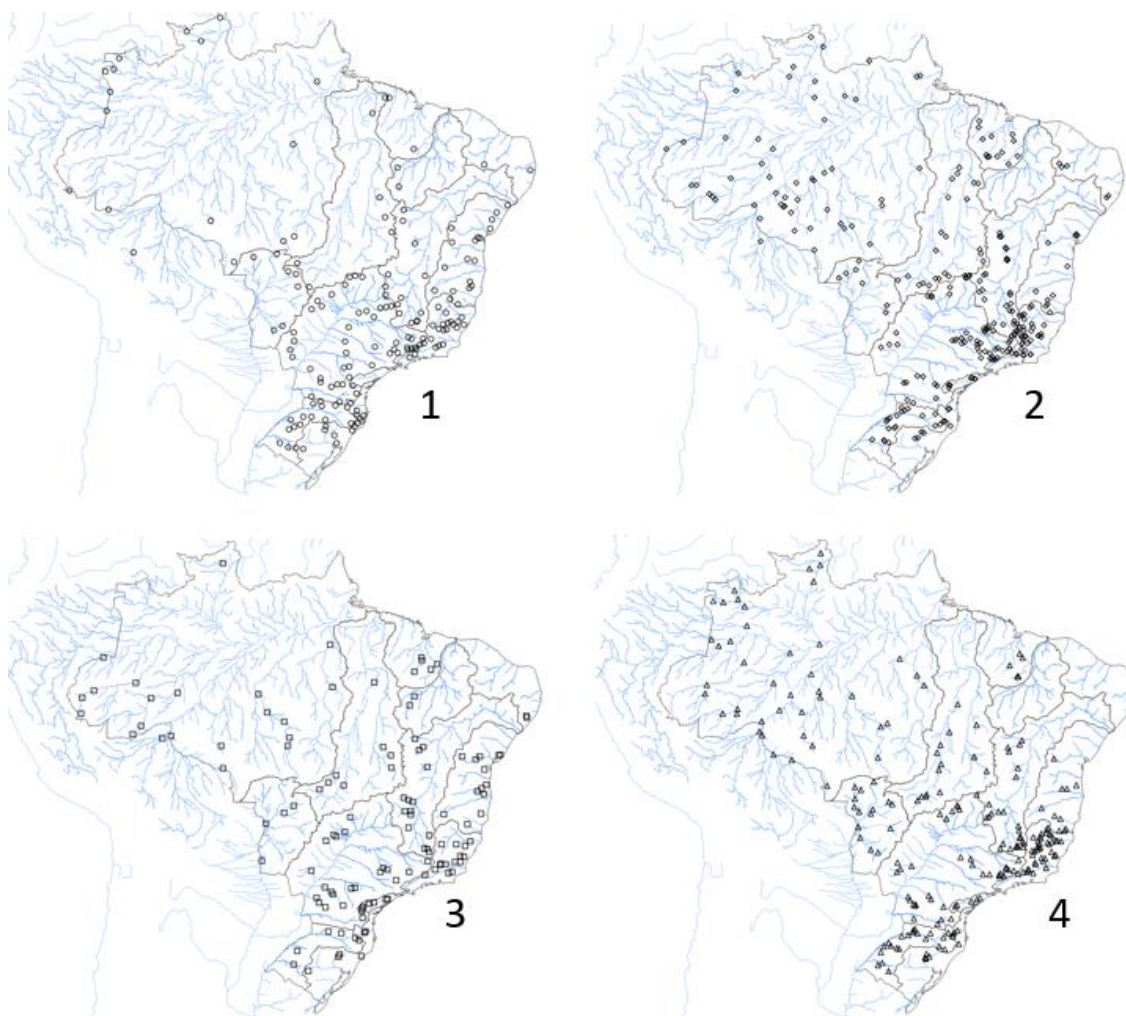


Figura 6: Classificação de postos fluviométricos por casos (1,2,3 ou 4 – ver figura 3) na avaliação do método da vazão incremental

3.2 MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL

A avaliação dos erros do método da vazão específica incremental foi realizada por meio de simulação, conforme descrito a seguir.

O primeiro passo da análise foi a realização do delineamento de áreas incrementais (ou subbacias incrementais) limitadas a jusante e/ou montante pelos postos fluviométricos. Para tanto, a Base Hidrográfica Ottocodificada da ANA foi utilizada, pois permite uma boa aproximação da localização dos postos fluviométricos na rede de drenagem, além da extração de relações topológicas entre os trechos de rio necessárias, por exemplo, para identificar trechos a montante e jusante entre si.

A partir da base de sub-bacias incrementais, o método da vazão específica incremental foi aplicado para estimar as vazões nos postos fluviométricos. Para isso, adotou-se um procedimento computacional de simulação, que remove um posto fluviométrico por vez (imitando uma situação de local não-monitorado), e realiza a estimativa de vazão no mesmo local utilizando as informações dos demais postos que formam a área incremental devidamente

atualizada, com as equações 4 e 5. Essa simulação é realizada para todos os postos fluviométricos onde é possível delinear uma nova área incremental quando se remove o mesmo.

O processo é similar à validação cruzada baseada em “leave-one-out” (em português, “deixar um fora”) que é bastante utilizada em modelos baseados em dados, no entanto, aqui utiliza-se essa abordagem para realizar uma amostragem dos erros decorrentes da utilização do método da vazão específica incremental.

Assim, para cada local onde as vazões de referência são conhecidas (e.g. obtidas a partir de dos dados de séries longas dos postos fluviométricos), realizou-se uma estimativa da vazão média e da Q95 pelo método da vazão específica incremental, atualizando a área incremental (e postos/vazões utilizados) supondo que o posto não existia, seguido da estimativa da vazão.

Os erros foram obtidos a partir da comparação entre os valores das vazões reais observadas e os valores estimados, de cada posto em análise, agrupados em conjuntos.

Por fim, separamos a análise de erro conforme o tipo de situação de disponibilidade de dados em relação ao local sem dados, referentes aos casos 1, 2, 3 e 4 já descritos anteriormente. Foram identificados 170, 268, 126 e 227 postos fluviométricos para cada caso, respectivamente. Devido à ocorrência de casos isolados de incremental negativa ou vazões Q95 nulas, alguns postos foram removidos da análise (*viz.* quatro na vazão média e quatorze na Q95).

3.3 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA

Os resultados obtidos pelo método da vazão específica incremental foram comparados com o método da vazão específica do posto de jusante, de forma a avaliar uma alternativa metodológica de simples aplicação. Casos definidos como “tipo 1” (ver Figura 3), totalizando 170 postos fluviométricos, foram removidos da avaliação comparativa, porque nestes casos os dois métodos (método da vazão específica, e método da vazão específica incremental) são equivalentes, e geram o mesmo resultado.

O método da vazão específica foi tratado no relatório anterior (Sorribas et al., 2021), em que se demonstrou que o desempenho do método depende da escolha do posto fluviométrico doador. Naquele relatório foi descrito um método de escolha de doador ideal, ou otimizado, em função de critérios de distância e semelhança de área de drenagem. Aqui, o método de vazão específica foi utilizado como benchmark, porém utilizando um método simplificado de escolha de doador, que é o método do próximo posto fluviométrico a jusante. Este método de escolha de doador, embora muito mais simples, teve desempenho comparável ao método otimizado nos testes relatados no relatório anterior (Sorribas et al., 2021).

3.4 CRITÉRIO TEÓRICO DE ESCOLHA ENTRE O MÉTODO DE VAZÃO ESPECÍFICA E O MÉTODO DA VAZÃO ESPECÍFICA INCREMENTAL PARA ESTIMAR VAZÕES EM LOCAIS SEM DADOS

O método da vazão específica incremental está sujeito a uma amplificação do erro, em função da operação de subtração, conforme discutido antes.

Para o caso 2, ilustrado na Figura 7, podemos comparar os erros dos dois métodos para estimar a vazão no ponto K: método da vazão específica usando os dados do posto J, e método da vazão específica incremental, usando dados dos postos A e J.

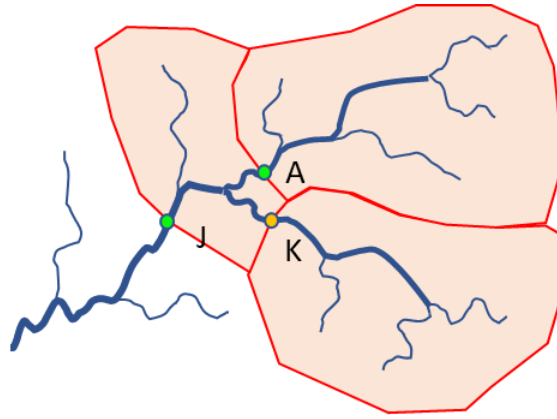


Figura 7: Ilustração do caso em que a vazão no ponto K pode ser estimada pelo método da vazão específica, usando dados do posto J, ou pelo método da vazão específica incremental, usando dados dos postos A e J.

Caso os dados de vazão nos locais A e J fossem perfeitos, isentos de erro, então o erro de estimar a vazão em K usando o método da vazão específica baseada apenas nos dados de J seria causado apenas pela heterogeneidade da bacia, e poderia ser calculado exatamente por:

$$erro_1 = \frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}}$$

Em regiões homogêneas, onde a vazão específica não varia no espaço, o erro acima seria igual a zero. Em regiões heterogêneas o erro tende a ser maior do que zero.

Considerando que os dados de vazão medidos em J são imperfeitos, e que a vazão incremental Q_{inc} não contém erros, o erro do método da vazão específica baseada apenas nos dados de J poderia ser estimado por:

$$erro_1 = \frac{EQ_J}{A_J} + \left(\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}} \right)$$

Por outro lado, quando é usado o método da vazão incremental, o erro da estimativa da vazão no ponto K depende tanto dos erros da vazão nos postos A e J. Podemos chamar o erro da estimativa da vazão incremental de EQ_{inc} .

O erro da vazão incremental específica é dado, então, por:

$$erro_2 = \frac{EQ_{inc}}{A_{inc}}$$

O caso em que os erros dos dois métodos são iguais é definido por $erro_1=erro_2$, ou seja:

$$\frac{EQ_{inc}}{A_{inc}} = \frac{EQ_J}{A_J} + \left(\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}} \right)$$

Reorganizando, a equação fica:

$$\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}} = \frac{EQ_{inc}}{A_{inc}} - \frac{EQ_J}{A_J}$$

Esta equação é interessante porque o termo do lado esquerdo está relacionado à intensidade do sinal (heterogeneidade da vazão específica da região), enquanto o termo do lado direito está relacionado ao ruído, causado pela imperfeição das medições de vazão.

$$\underbrace{\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}}}_{\text{sinal}} = \underbrace{\frac{EQ_{inc}}{A_{inc}} - \frac{EQ_J}{A_J}}_{\text{ruído}}$$

Considerando que o sinal pode ser positivo ou negativo, é mais conveniente analisar o seu valor absoluto, em relação ao ruído. Desta forma, a equação final pode ser escrita como:

$$\left| \underbrace{\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}}}_{\text{sinal}} \right| = \underbrace{\frac{EQ_{inc}}{A_{inc}} - \frac{EQ_J}{A_J}}_{\text{ruído}}$$

A equação acima indica as condições em que o sinal é igual ao ruído. Nesta situação os erros dos dois métodos de estimativa de vazão no ponto K são iguais.

A condição que define os casos em que o método da vazão incremental tem um erro potencialmente menor do que o erro do método da vazão específica é dada pela condição em que o sinal é maior do que o ruído, expressa pela inequação abaixo:

$$\left| \underbrace{\frac{Q_J}{A_J} - \frac{Q_{inc}}{A_{inc}}}_{\text{sinal}} \right| > \underbrace{\frac{EQ_{inc}}{A_{inc}} - \frac{EQ_J}{A_J}}_{\text{ruído}} \quad (7)$$

onde Q_J é a vazão medida no posto de jusante; EQ_J é o erro estimado desta vazão (podemos considerar $EQ_J = Q_J/10$, considerando um erro de 10%); A_J é a área de drenagem do posto de jusante; A_{inc} é a área de drenagem incremental; Q_{inc} é a vazão incremental, estimada por $(Q - Q_M)$, onde Q_M é a vazão no posto de montante (posto A na figura acima) ou a soma das vazões dos postos a montante de J; EQ_{inc} é a estimativa do erro da vazão incremental, estimado como segue abaixo:

$$EQ_{inc} = \sqrt{(EQ_J)^2 + (EQ_M)^2}$$

onde EQ_M é o erro estimado da vazão Q_M e EQ_J é o erro estimado da vazão Q_J .

Considerando um caso hipotético, de uma região muito heterogênea, em que a vazão específica na cabeceira da bacia, a montante do posto A (ver Figura 8) é igual a $1,4 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, e a vazão específica na região incremental entre os postos A e J é igual a $0,6 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, o comportamento do ruído e do sinal depende da fração da área incremental em relação à área de drenagem total, conforme mostra a Figura 8.

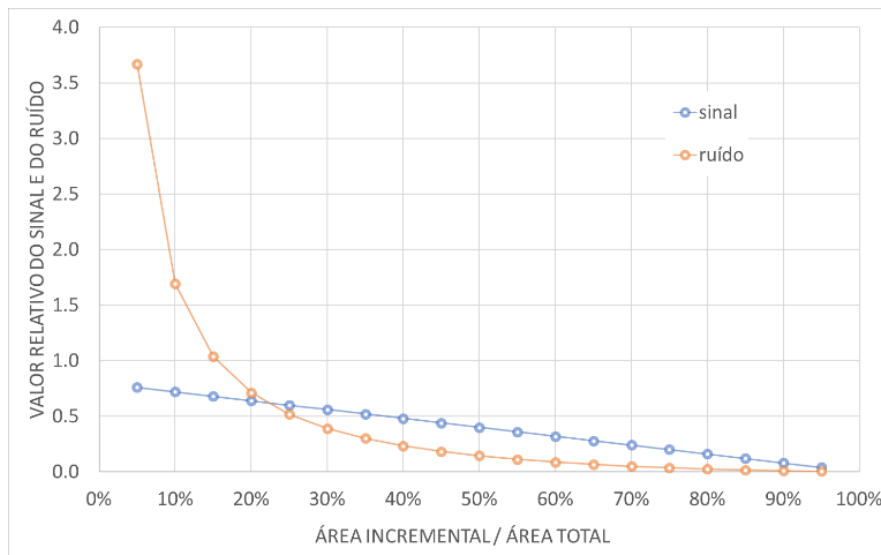


Figura 8: Comportamento do sinal e do ruído em relação à razão entre a área incremental e a área total numa região heterogênea em que a vazão específica a montante é de 1,6 e a vazão específica na região incremental é igual a 0,4.

Observa-se que no caso da bacia muito heterogênea o sinal é maior do que o ruído em todas as situações em que a área incremental é maior do que, aproximadamente, 20% da área total. Quando a área incremental é menor do que 20% da área total, a amplificação dos erros causada pela operação de subtração entre dois valores incertos (as vazões em A e J) provoca um crescimento muito rápido dos erros, fazendo com que a amplitude do ruído supere a amplitude do sinal.

Isso significa que, nesta situação, o método da vazão específica incremental deveria ser escolhido em todos os casos em que a área incremental é maior do que 20%, aproximadamente. Nos outros casos, o método da vazão específica, utilizando os dados de vazão do posto de jusante, seria vantajoso.

Por outro lado, considerando um caso hipotético, de uma região menos heterogênea, em que a vazão específica a montante do posto A (ver figura anterior) é igual a $1,1 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, e a vazão específica na região incremental entre os postos A e J é igual a $0,9 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$, o comportamento do ruído e do sinal depende da fração da área incremental em relação à área de drenagem total, conforme mostra a Figura 9.

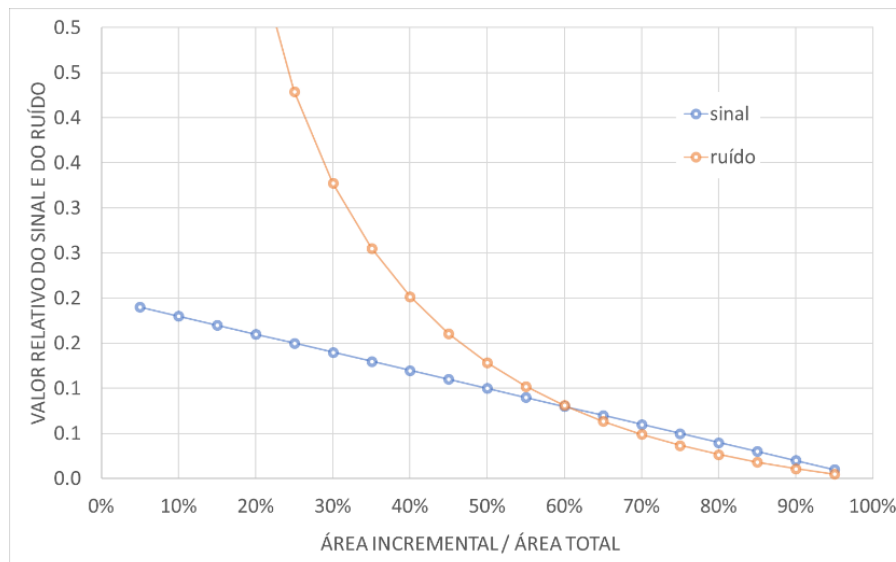


Figura 9: Comportamento do sinal e do ruído em relação à razão entre a área incremental e a área total numa região heterogênea em que a vazão específica a montante é de 1,1 e a vazão específica na região incremental é igual a 0,9.

Observa-se que, no caso da bacia pouco heterogênea, o sinal é maior do que o ruído em todas as situações em que a área incremental é maior do que, aproximadamente, 60% da área total. Quando a área incremental é menor do que 60% da área total, a amplificação dos erros causada pela operação de subtração entre dois valores incertos (as vazões em A e J) provoca um crescimento muito rápido dos erros, e o método da vazão específica, utilizando os dados de vazão do posto de jusante, seria vantajoso.

Esses dois exemplos mostram como a adoção ou não do método da vazão incremental depende de dois fatores: 1) a heterogeneidade da bacia; 2) a razão entre área incremental e área total.

Quando a razão entre a área incremental e a área total é muito pequena o método da vazão incremental tende a ser sempre desvantajoso. Quando a região é muito homogênea o método da vazão incremental também tende a ser desvantajoso.

O grau de homogeneidade da bacia pode ser estimado pelo termo denominado “sinal” na inequação apresentada acima. É importante ressaltar, entretanto, que esta estimativa está sujeita a erros, porque tanto a vazão em J como a vazão em A não são medidas com perfeição. De qualquer forma, são, possivelmente, a indicação mais clara da heterogeneidade da bacia sobre a qual pode se basear uma tomada de decisão sobre qual método aplicar para estimar a vazão no ponto K.

3.5 MÉTRICAS DE ERRO

Existem diferentes métricas para calcular o erro entre os valores estimados e os valores “reais”. A diferença entre a vazão estimada por um modelo e o valor “real” é, tipicamente, denominado de resíduo:

$$RES = QR_{est} - QR_{real} \quad (8)$$

onde: RES é o resíduo; QR_{est} é a QR estimada por um modelo; QR_{real} é a QR observada, obtida dos dados do posto fluviométrico.

O resíduo também pode ser calculado em termos de vazão específica:

$$RES = \frac{QR_{est} - QR_{real}}{A} \quad (9)$$

onde A é a área de drenagem da bacia hidrográfica.

O erro relativo entre as estimativas de vazões de referência pode ser calculada por:

$$ER(\%) = 100 \left(\frac{QR_{est} - QR_{real}}{QR_{real}} \right) \quad (10)$$

onde: ER é o erro relativo (%); QR_{est} é a vazão de referência (pode ser a vazão média ou a Q95) estimada com base na série curta; QR_{real} é a vazão de referência estimada com base na série longa.

No contexto de disponibilidade hídrica é importante que a métrica de desempenho seja capaz de indicar a proporcionalidade de excesso/déficit hídrico da estimativa. A métrica denominada de Razão entre Vazões Médias (RQM), descrita a seguir, é proposta e utilizada para avaliar o desempenho entre valores observados e estimados das vazões de referência.

$$RQM = Sinal(QM_{est} - QM_{real}) \cdot Máximo \left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}; \frac{QM_{real}}{QM_{est}} \right) \quad (11)$$

onde: RQ é a métrica de razão de vazões; QM_{est} é a vazão média de série curta; QM_{real} é a vazão média de série longa. Essa métrica indica a proporção entre vazão estimada e a “real”, de tal maneira que um valor $RQ=+2$ indica que a vazão estimada é o dobro da “real” e, um valor $RQ=-2$ indica que a vazão estimada é a metade da “real”. Um ajuste perfeito fornece um valor de $RQM=1$.

Ao considerar que a magnitude dos erros de superestimativa e subestimativa (em proporção) são equivalentes e igualmente importantes, a métrica pode ser utilizada ignorando o sinal, critério esse adotado para as análises no presente estudo, ou seja, em valores absolutos, ABSRQM:

$$ABSRQM = Máximo \left(\frac{QM_{est}}{QM_{real}}; \frac{QM_{real}}{QM_{est}} \right) \quad (12)$$

onde: ABSRQM é a métrica de razão de vazões, em valor absoluto; QM_{est} é a vazão estimada; QM_{real} é a vazão média observada, obtida dos dados do posto fluviométrico.

Em geral, as métricas foram aplicadas para as vazões de referência Q95 e QM. A equação 11, adaptada para a vazão de referência Q95, resulta na métrica RQ95, e a equação 12, adaptada para a Q95, resulta na métrica ABSRQ95.

4 RESULTADOS

4.1 AVALIAÇÃO GERAL

A partir da amostra de erros das estimativas de vazões de referência obtidos pelo método da vazão específica incremental (método INC) no processo de “leave-one-out” elaborou-se o cálculo dos percentis e curva de frequência acumulada para vazão média e para Q95. A aproximação empírica da distribuição dos erros nas estimativas com o método da vazão específica do posto de jusante (método JUS) foi realizada da mesma maneira.

As curvas de frequência para ABSRQM são apresentadas na Figura 10. Do gráfico é possível observar que a mediana (percentil 50%) foi de 1,09 e 1,13 para os métodos INC e JUS, respectivamente. O valor de 1,09 indica estimativas em cerca de $\pm 9\%$ a menos ou a mais em relação ao observado. Por sua vez, o valor de 1,13 sugere erros próximos a $\pm 13\%$. Em geral, os resultados demonstram bastante semelhança em termos de acurácia nos resultados, com pequena vantagem do método da vazão incremental. O percentil 75% de ABSRQM - ou seja, três em cada quatro casos avaliados - foi de 1,25 e 1,27 para os métodos INC e JUS, respectivamente, mostrando que os dois métodos são quase equivalentes.

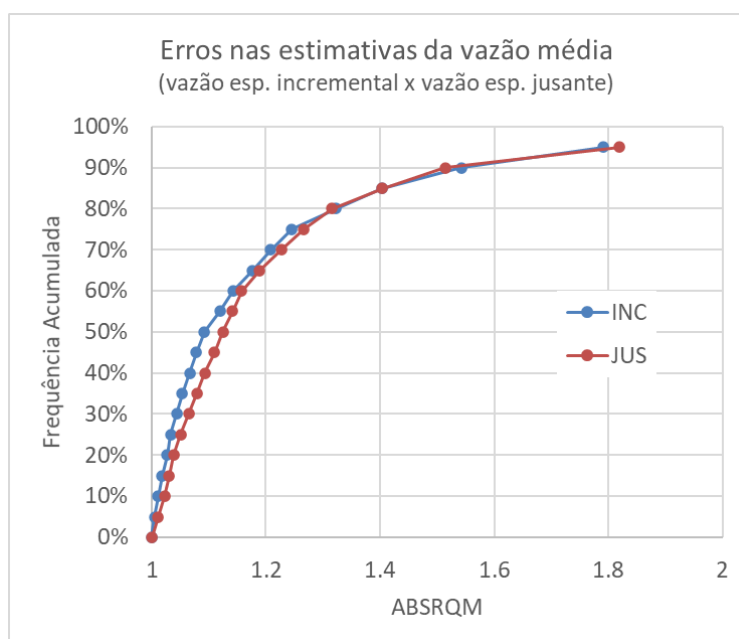


Figura 10: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) com o método vazão específica incremental (INC) e método da vazão específica do posto a jusante (JUS).

As curvas de frequência da métrica ABSRQ95 são apresentadas na Figura 11. O resultado é bastante similar ao obtido para a vazão média, com uma pequena vantagem em utilizar o método JUS em relação ao método INC. Para as vazões Q95, os valores das medianas foram de 1,17 e 1,24, para INC e JUS, respectivamente. Quando $ABSRQ95 = 1,17$, o valor estimado se encontra no intervalo entre 14% a menos e 17% a mais do que o valor real. Quando $ABSRQ95 = 1,24$, a métrica equivale a erros entre 19% a menos e 24% a mais do que o valor real. Os intervalos são numericamente diferentes acima e abaixo devido a métrica adotada considerar os erros proporcionais, acima ou abaixo, ao valor observado equivalentes. No caso em que $ABSRQ95$ é superior a 2, o que ocorre em cerca de 15% dos casos, pode-se dizer que a estimativa

obtida é superior ao dobro ou menor do que a metade do valor real. O percentil de 75% de ABSRQ95 - ou seja, três em cada quatro casos avaliados - foi de 1,53 e 1,59 para os métodos INC e JUS, respectivamente.

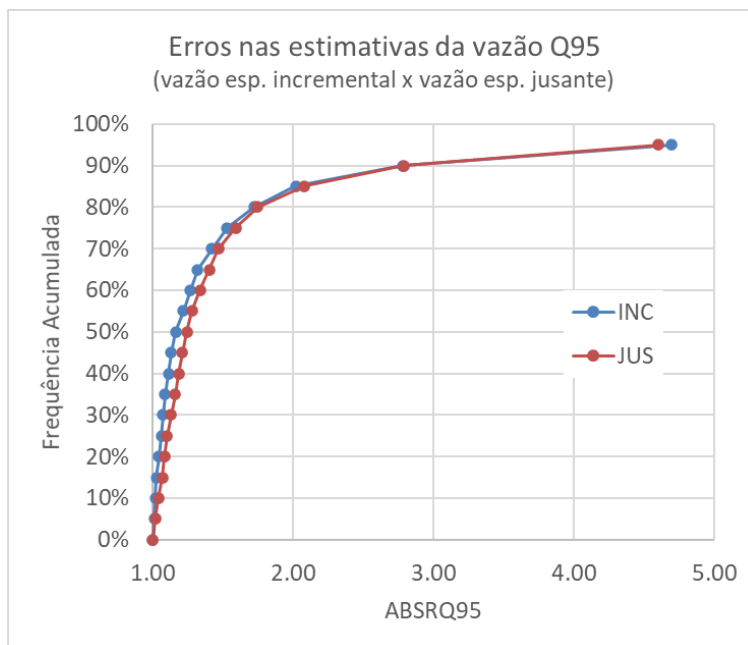


Figura 11: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) com o método vazão específica incremental (INC) e método da vazão específica do posto a jusante (JUS)

A Figura 12 apresenta a distribuição espacial dos postos fluviométricos utilizados na análise e os erros na vazão média, pela métrica de ABSRQM, com o método INC. É possível observar que os pontos azuis (locais com erros baixos) estão distribuídos de forma razoavelmente homogênea em todo o Brasil, o mesmo acontecendo com os pontos amarelos e laranjas (locais com erros mais altos), não sendo possível identificar um padrão espacial para a ocorrência de erros.

A Figura 13 apresenta o mesmo resultado de distribuição espacial com os resultados da métrica ABSRQ95, mostrando que, também neste caso, não é possível identificar uma região em que predominam resultados bons (pontos azuis) ou ruins (pontos amarelos e vermelhos).

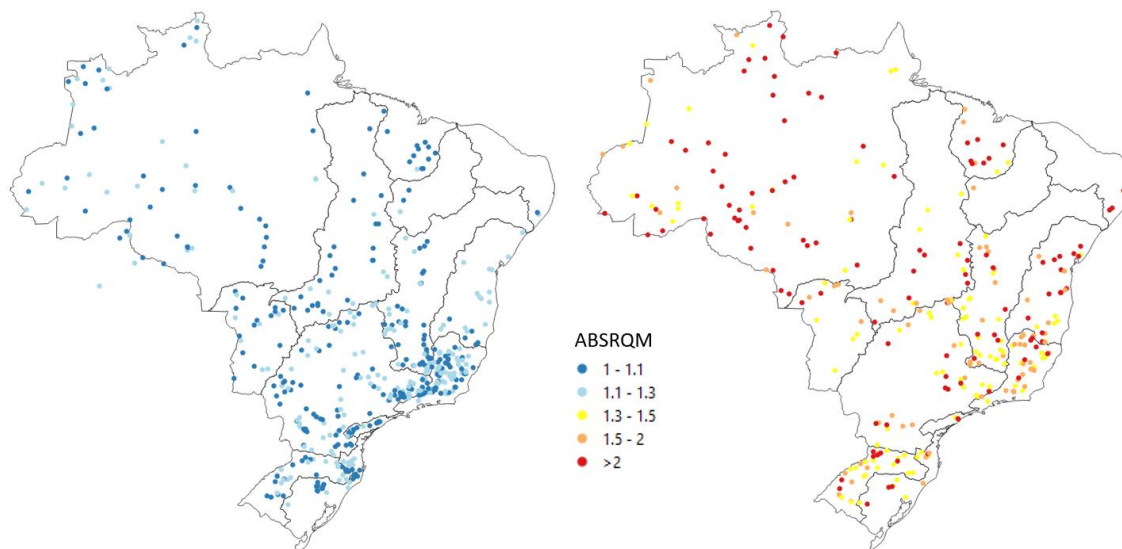


Figura 12: Mapa de erros na vazão média pela métrica ABSRQM nos locais de postos fluviométricos, para o método da vazão específica incremental. A esquerda de 1,1 a 1,3; a direita, valores > de 1,3.

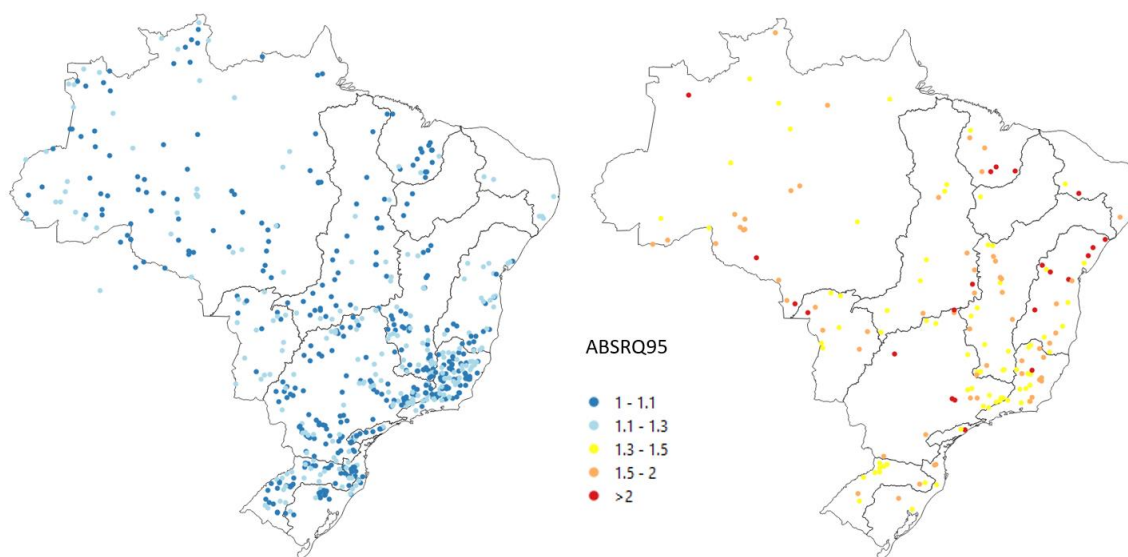


Figura 13: Mapa de erros na vazão média pela métrica ABSRQ95 nos locais de postos fluviométricos, para o método da vazão específica incremental. A esquerda de 1,1 a 1,3; a direita, valores > de 1,3.

4.2 AVALIAÇÃO DE ACORDO COM A DISPONIBILIDADE DE POSTOS FLUVIOMÉTRICOS (CASOS 1 A 4)

Conforme mencionado, a aplicação do método da vazão incremental pode resultar em diferentes situações entre a localização do local sem dados - onde se deseja realizar a estimativa de vazão – e os postos fluviométricos com dados que contribuem para a definição e cálculo da área e vazão incremental. Nesse trabalho, foram identificados quatro casos gerais, conforme descrito na introdução. De forma a verificar se existem diferenças de acurácia ao utilizar o método para cada caso, realizou-se uma análise descritiva baseada na distribuição empírica dos erros obtidos.

A Figura 14 apresenta para cada um dos casos, a frequência acumulada dos erros na vazão média, resumidos por ABSRQM. Essa comparação serve apenas de guia para identificar padrões gerais e verificar os valores obtidos em cada caso, mas é importante destacar que as estatísticas são oriundas de amostras diferentes. Do gráfico é possível observar que os casos 3 e 4 apresentaram resultados bastante similares entre si, e com erros inferiores aos do caso 1 e 2. Isso sugere que a presença de postos a montante do local sem dados tende a reduzir os erros. O caso 2 apresentou erros mais acentuados e representa a situação em que a estimativa com o método da vazão incremental específica utiliza, além da vazão do posto de jusante, vazões de outros postos fluviométricos que não se localizam diretamente a montante ou jusante do local de interesse. A Figura 15 apresenta a mesma avaliação para os erros de estimativa da Q95, apresentando um comportamento similar.

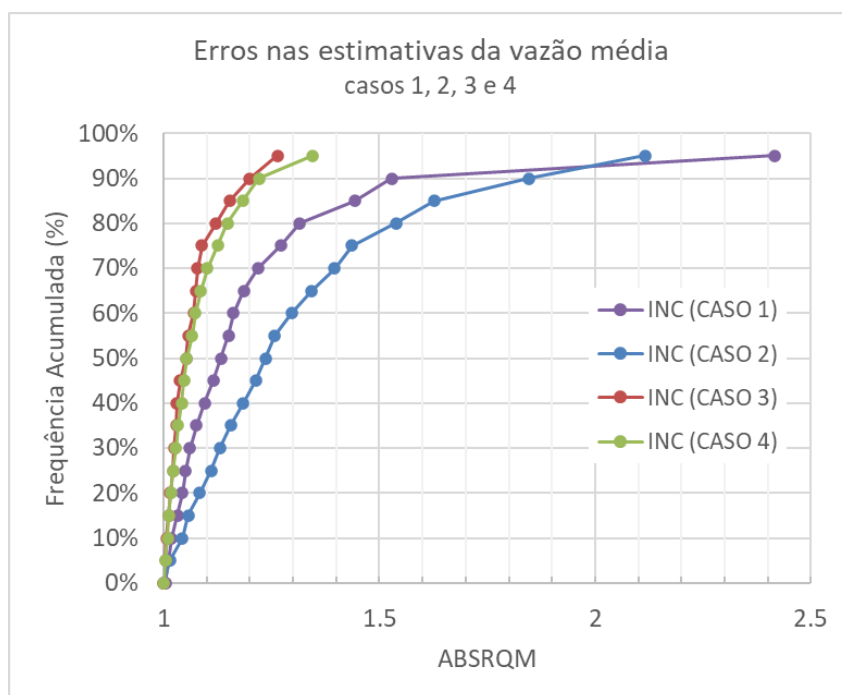


Figura 14: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) com o método vazão específica incremental (INC), para cada caso.

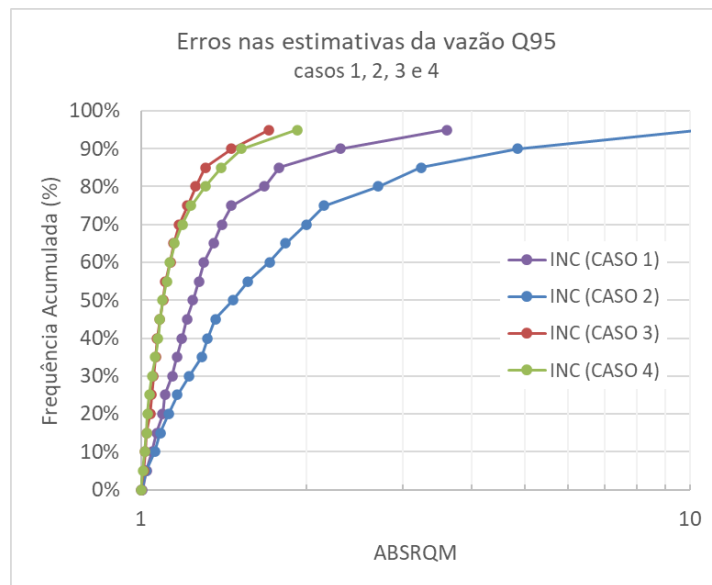


Figura 15: Distribuição de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95(ABSRQ95) com o método vazão específica incremental (INC), para cada caso.

Os resultados das distribuições dos erros para os diferentes casos sugerem que a acurácia do método da vazão específica incremental depende da configuração do local sem dados, em relação aos postos fluviométricos que compõem a bacia incremental. Por exemplo, os valores da mediana de ABSRQM foram de 1,13 (casos 3 e 4), 1,23 (casos 1) e 1,5 (casos 2); e os valores do percentil 75% foram de 1,08 (caso 3), 1,12 (caso 4), 1,27 (casos 1) e 1,43 (casos 2); indicando diferenças significativas nos erros em cada situação.

A partir dessa constatação, seguiu-se com uma comparação entre o método da vazão específica incremental e uma estimativa alternativa, realizada com a vazão específica do posto fluviométrico de jusante. Como os casos 1 são equivalentes a esse método, a avaliação é realizada somente para casos 2, 3 e 4.

As distribuições dos erros são apresentadas a seguir para ABSRQM (Figura 16 a Figura 18) e ABSRQ95 (Figura 19 a Figura 21).

A Figura 16 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQM considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 2. Observa-se que os erros do método INC tendem a ser maiores do que os do método JUS. Em outras palavras, nas situações que se encaixam no caso 2, o método da vazão específica incremental (INC) não tem vantagem sobre o método da vazão específica que utiliza como doador o posto fluviométrico localizado a jusante. O valor de ABSRQM equivalente ao percentil 75% é igual a 1,43 no caso do método INC e de 1,35 no caso do método JUS.

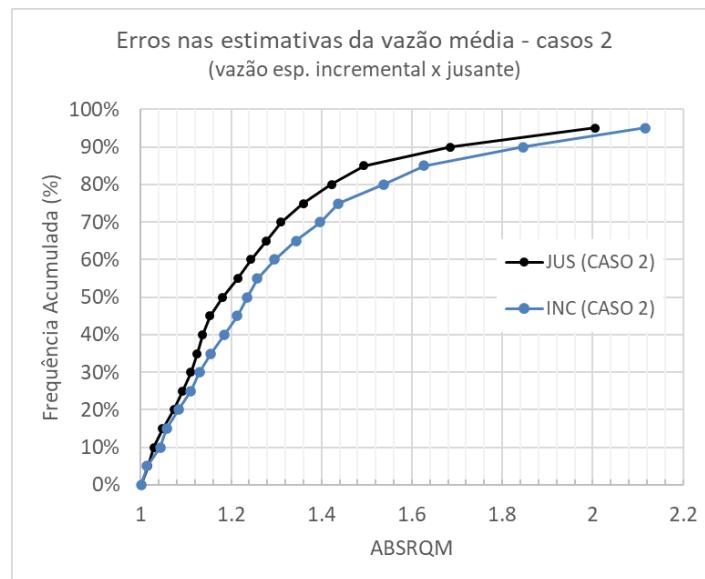


Figura 16: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 2

A Figura 17 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQM considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 3, que é caracterizado pela situação em que existe um ou mais postos fluviométricos a montante do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 3. Observa-se na Figura 17 que nesta situação o método INC apresenta erros menores do que o método JUS.

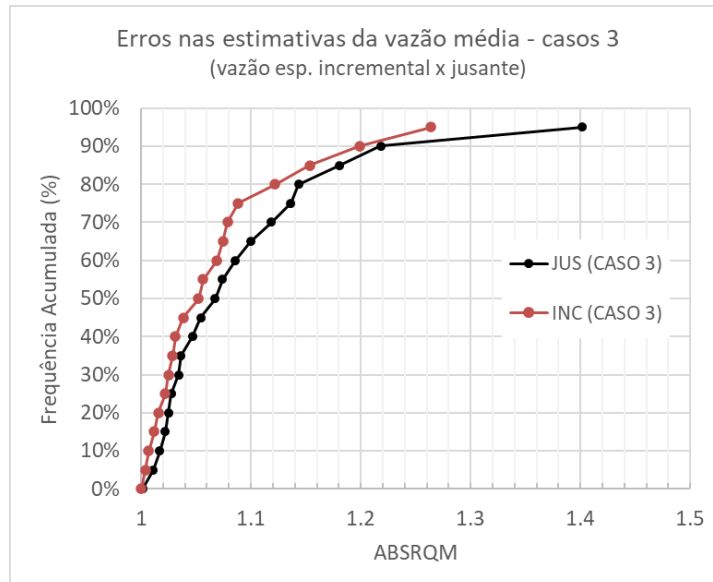


Figura 17: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 3.

A Figura 18 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQM considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 4, que também é caracterizado por contar com um ou mais postos fluviométricos a montante do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 3. Observa-se que nesta situação o método INC é claramente melhor do que o método JUS.

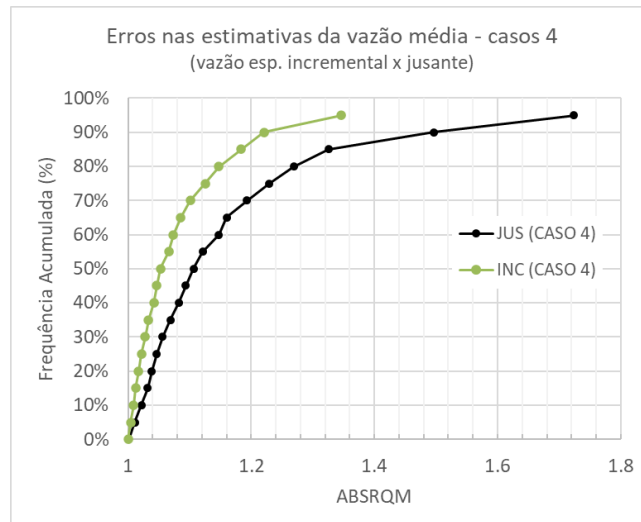


Figura 18: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão média (ABSRQM) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 4

Os resultados da métrica ABSRQ95 são semelhantes. A Figura 19 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQ95 considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 2, que é o caso em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 3. Observa-se que, nesta situação, o método INC tem erros um pouco superiores aos do método JUS.

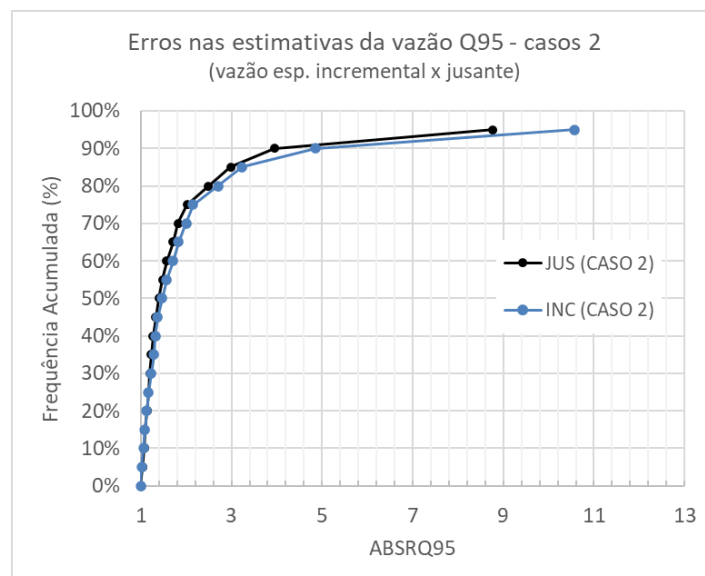


Figura 19: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 2

A Figura 20 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQ95 considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 3. Observa-se que, nesta situação, o método INC tem clara vantagem sobre o método JUS.

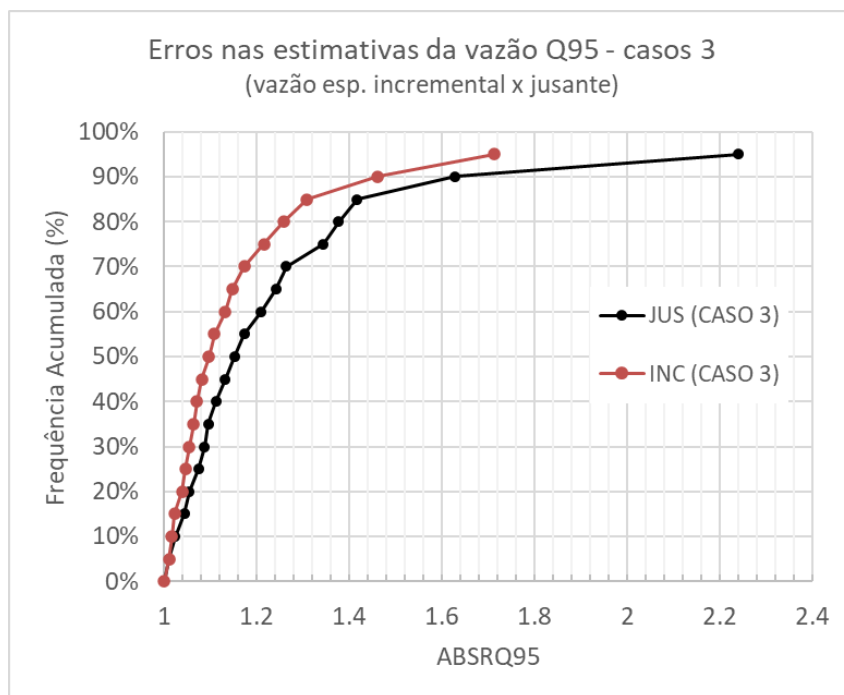


Figura 20: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 3

A Figura 21 apresenta a distribuição de valores da métrica ABSRQ95 considerando os dois métodos de estimativa (INC e JUS) nos postos fluviométricos do caso 4. Observa-se que, nesta situação, o método INC também é claramente melhor do que o método JUS.

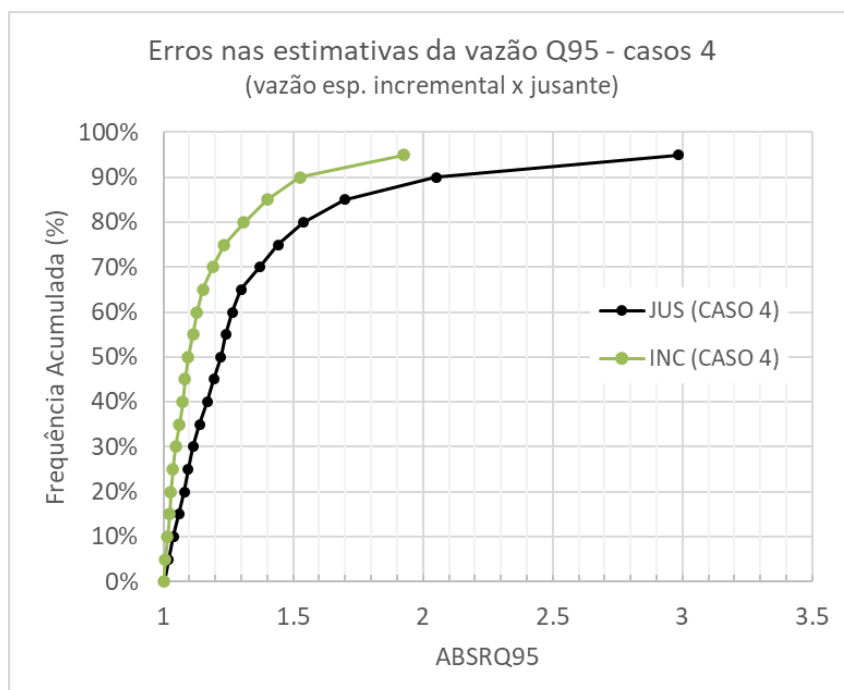


Figura 21: Comparação das distribuições de frequência dos erros nas estimativas da vazão Q95 (ABSRQ95) com o método vazão específica incremental (INC) e vazão esp. do posto de jusante (JUS) para o caso 4.

Em geral, o que se observa nos resultados das vazões de referência (vazão média e Q95) é que o método da vazão incremental é claramente superior ao método da vazão específica (com doador a jusante) quando há ao menos um posto fluviométrico a montante do local sem dados. Esta situação corresponde aos casos 3 e 4 ilustrados na Figura 3.

No caso 2, em que não há um posto fluviométrico a montante do local sem dados, o método da vazão incremental parece não trazer vantagem. Isto sugere que, no caso 2, a estimativa de vazão pelo método incremental talvez sofra com o problema da amplificação dos erros, conforme relatado nos itens anteriores.

A Tabela 1 resume os erros ABSRQM e ABSRQ95 utilizando o percentil 75% obtido para o conjunto de postos de cada caso, evidenciando que a presença de postos a montante (casos 3 e 4) tende a favorecer o método da vazão específica incremental.

Tabela 1. Percentil 75% de ABSRQM e ABSRQ95 na comparação entre vazão específica incremental (INC) e vazão específica de jusante (JUS), para o conjunto de postos nos casos 2, 3 e 4.

MÉTRICA	CASO	INC	JUS
ABSRQM (PERCENTIL 75)	2	1,43	<u>1,35</u>
	3	<u>1,08</u>	1,13
	4	<u>1,12</u>	1,22
ABSRQ95 (PERCENTIL 75)	2	2,15	<u>2,02</u>
	3	<u>1,21</u>	1,34
	4	<u>1,23</u>	1,44

4.3 RELAÇÕES ENTRE ERROS E RELAÇÕES DE ÁREA (CASOS 1 A 4)

Para permitir uma previsão da incerteza associada com uma estimativa de vazão em um local sem dados quando se utiliza o método da vazão incremental, foram exploradas as relações entre as métricas de erro e informações facilmente disponíveis, como as áreas de drenagem a montante e a jusante (incremental) dos postos fluviométricos e do local sem dados. Estas relações foram buscadas considerando, separadamente, os quatro casos ilustrados na Figura 3.

4.3.1 Caso 1: monitoramento somente a jusante

O caso 1 é a situação em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados (K), e não existem postos fluviométricos a montante do posto J, localizado a jusante do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 22. A vazão específica é estimada unicamente pela vazão do posto de jusante e, portanto, nesse caso o método da vazão incremental é equivalente ao da vazão específica. Em geral, espera-se que o erro do método aumente com a distância e/ou relação de áreas entre o local de não-monitorado e o posto.

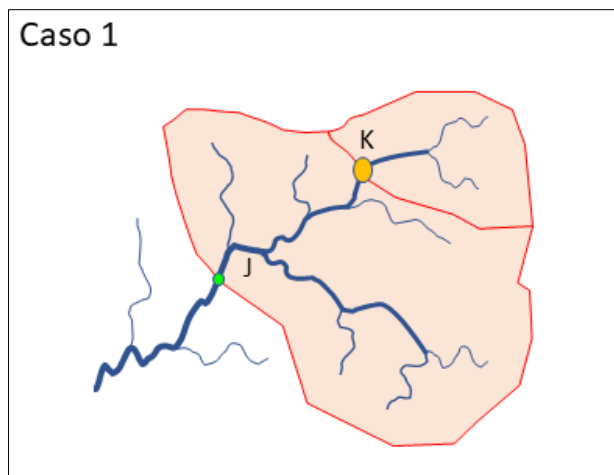


Figura 22: Ilustração do caso 1 para a aplicação do método da vazão específica incremental.

A Figura 23 apresenta, para o caso 1, como o erro da estimativa da vazão média específica (em $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) varia com a razão entre a área de drenagem no local sem dados (AK) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (Aj). Esta razão varia entre zero e um. O valor do erro representado é o percentil 75% de todos os erros em valor absoluto, dentro de categorias de área da razão A_k/A_j , centrada nos valores plotados. Observa-se na Figura 23 que o erro da vazão média no caso 1 é maior quando o local sem dados está mais afastado do posto fluviométrico, isto é, quando A_k/A_j se aproxima de zero, e menor quando o local sem dados está mais próximo do posto fluviométrico (A_k/A_j se aproxima de 1), como esperado.

A Figura 24 apresenta, também para o caso 1, como a métrica ABSRQM varia com a razão entre a área de drenagem no local sem dados (Ak) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (Aj). O valor do erro representado é o percentil 75% de todos os erros dentro de categorias de valores de área da razão A_k/A_j , centradas nos valores plotados. Aqui erro da vazão média no caso 1 é maior quando o local sem dados está mais afastado do posto fluviométrico.

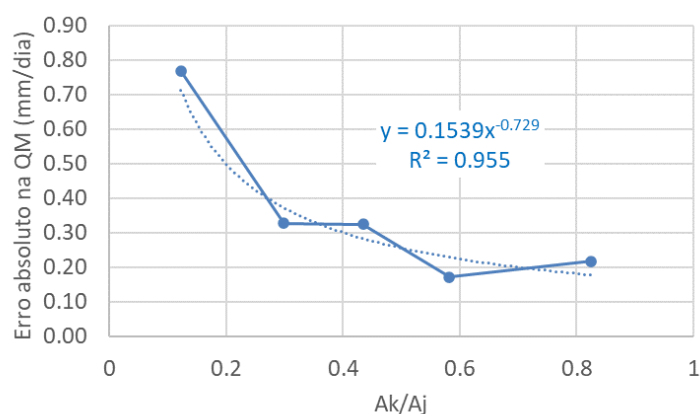


Figura 23: Relação entre o percentil 75% do erro da estimativa da vazão média específica (em $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (Ak) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (Aj), no caso 1.

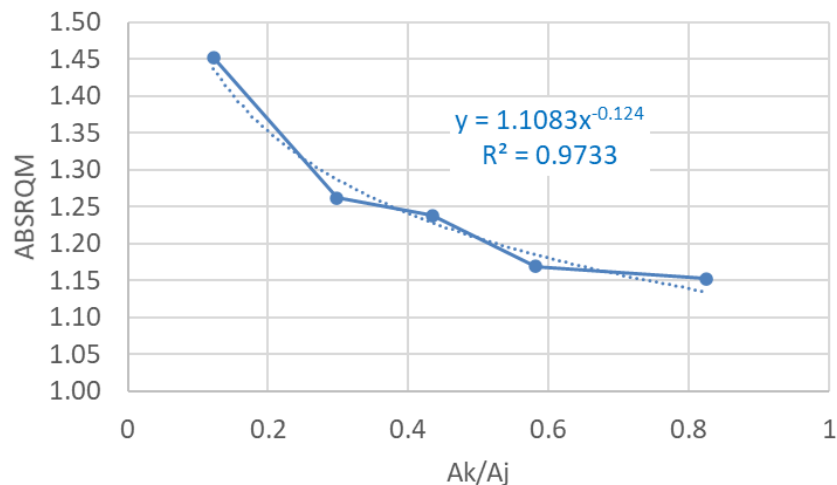


Figura 24: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQM e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j), no caso 1.

A equação ajustada com os dados da Figura 24 é $y = 1,1083 \cdot x^{-0,124}$, e ela indica que quando a razão entre áreas de drenagem ($x = A_k/A_j$) se aproxima de zero, o valor do percentil 75% dos erros se aproxima de 1,1083. O valor $ABSRQM = 1,1083$ indica que 75% dos erros são da ordem de 10% a menos ou a mais do que o valor real. Isto sugere que, mesmo que dois postos fluviométricos operassem exatamente no mesmo local, suas vazões médias seriam diferentes em aproximadamente 10%. Este resultado confirma que pode ser esperado um erro da ordem de 10% na vazão de referência, mesmo em locais com dados.

Aplicando o mesmo procedimento de análise para Q95, a Figura 25 apresenta como o erro absoluto da estimativa da Q95 específica (em $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) varia com a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j). O valor do erro representado é o percentil 75% de todos os erros em valor absoluto, dentro de categorias de área da razão A_k/A_j , centradas nos valores plotados. Assim como no caso da vazão média, observa-se que os erros em estimativas da Q95, no caso 1, é maior quando o local sem dados está mais afastado do posto fluviométrico.

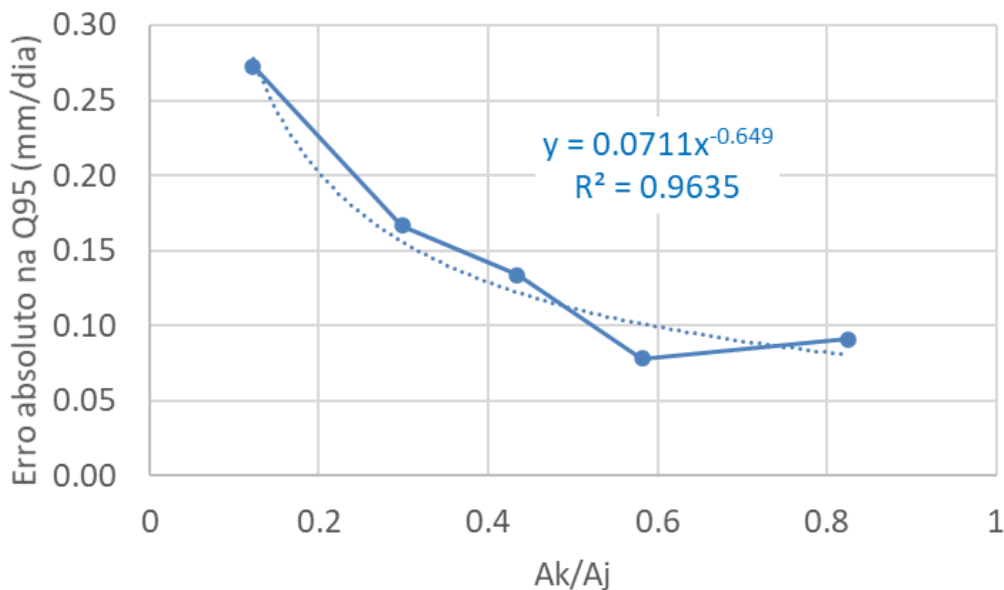


Figura 25: Relação entre o percentil 75% do erro da estimativa da Q95 específica (em mm.dia-1) e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (Ak) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (Aj), no caso 1.

A Figura 26 apresenta, de maneira similar as anteriores, como a métrica ABSRQ95 varia com a razão entre as áreas de drenagem, sendo possível observar novamente que o erro da Q95, no caso 1, também tende a ser maior quando o local sem dados está mais afastado do posto fluviométrico.

A equação ajustada com os dados da Figura 26 é $y=1,2283 \cdot x^{-0,234}$ e indica que quando a razão entre áreas de drenagem ($x=Ak/AJ$) se aproxima de zero, o valor do percentil 75% dos erros se aproxima de 1,2283. O valor ABSRQM=1,2283 indica que 75% dos erros são da ordem de 19% a menos até 23% a mais do que o valor real. Isto sugere que, mesmo que dois postos fluviométricos operassem exatamente no mesmo local, suas vazões Q95 seriam diferentes em, aproximadamente, 20%.

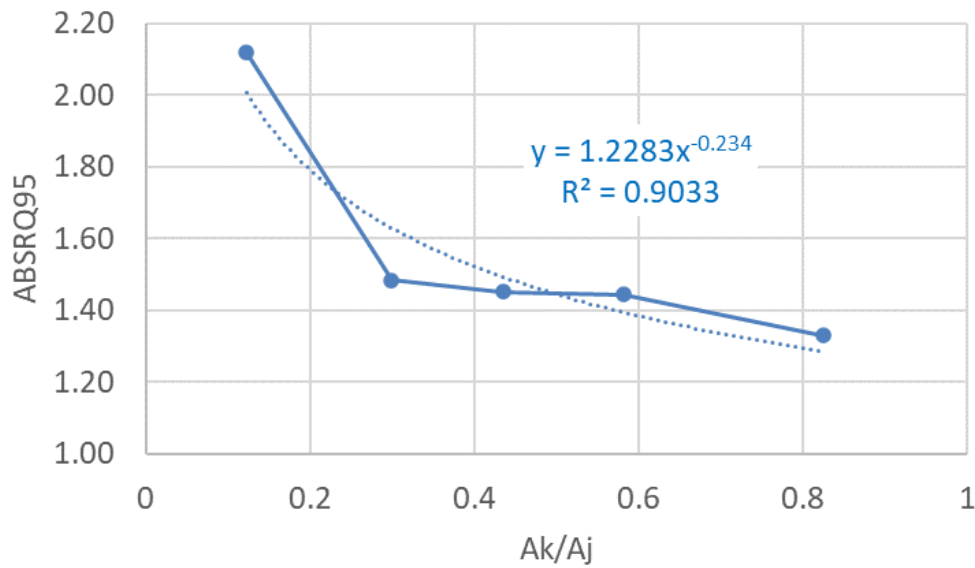


Figura 26: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQ95 e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j), no caso 1.

Os resultados do caso 1 são semelhantes aos resultados obtidos com o método da vazão específica, descritos no relatório anterior (Sorribas et al. 2021b), conforme o esperado. As diferenças entre os resultados daqui e aqueles ocorrem em função do número diferente de postos fluviométricos utilizados na análise.

4.3.2 Caso 2: incremental monitorada, mas sem postos a montante do local

O caso 2 é a situação em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados (K), mas existe um ou mais postos fluviométricos a montante do posto fluviométrico J , localizado a jusante de do local sem dados, conforme ilustrado na Figura 27.

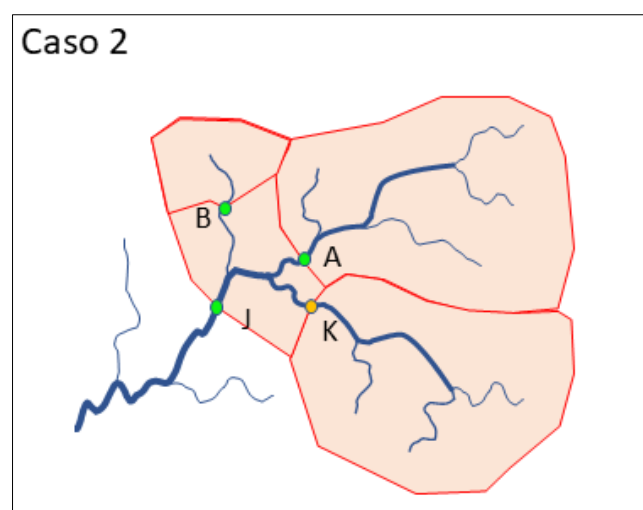


Figura 27: Ilustração do caso 2 para a aplicação do método da vazão específica incremental.

No caso 2 também se espera que o erro da estimativa da vazão no local sem dados K seja maior quando a área de drenagem no ponto K é muito menor do que a área de drenagem no ponto J, ou seja, o erro tende a aumentar quando a razão A_k/A_j se aproxima de zero.

A Figura 28 apresenta uma aproximação dessa relação obtida para as métricas ABSRQM e ABSRQ95, em seus percentis 75%. O erro na estimativa para vazões médias obtido pela curva ajustada sugere valores de ABSRQM entre 1,22 (se o local sem dados está muito próximo do posto de jusante) e 1,60 (se o local sem dados drena uma área relativamente pequena).

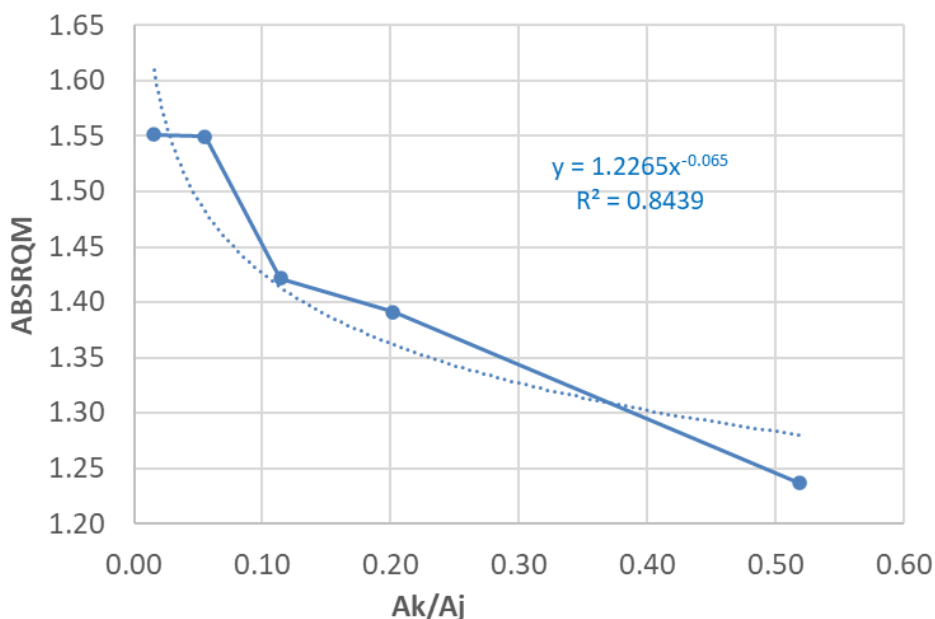


Figura 28: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQ95 e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j), no caso 2.

A Figura 29 apresenta a relação entre a métrica ABSRQ95 e a razão de áreas de drenagem A_k/A_j nas situações do caso 2. Observa-se que o valor de ABSRQ95 é muito mais alto quando a razão de áreas é próxima de zero.

O ajuste de uma equação única para ABSRQ95 (azul) resulta em subestimativas para uma grande faixa de valores de A_k/A_j e, além disso, aponta para um valor limite de 0,84 que é incompatível com a métrica utilizada (mínimo = 1). Como é possível observar um aumento expressivo do erro quando a relação de áreas é muito pequena, foram considerados dois ajustes de função em separado, destacados em verde e laranja. A primeira função de ajuste, dada por $y=0,2459 \cdot x^{-0,836}$ pode ser usada no intervalo definido por $0 < A_k/A_j < 0,08$, aproximadamente. A segunda função de ajuste, dada por $y=1,4158 \cdot x^{-0,137}$ pode ser usada no intervalo definido por $0,08 < A_k/A_j < 1$, aproximadamente.

Por fim, cabe destacar que nessa avaliação do caso 2, os grupos de relação de áreas utilizados têm seu último intervalo centrado em 0,52, com intervalo entre 0,25 e 0,78, portanto, a aplicação da equação nessa faixa desconhecida deve ser realizada com ressalvas. Além disso, conforme a discussão inicial sobre a propagação das incertezas no método da vazão incremental, quando a área incremental é muito pequena, existe uma tendência de amplificação das incertezas do método. Neste caso, como demonstram a análise teórica e os resultados anteriores, utilizar a vazão específica do posto de jusante pode ser mais apropriado.

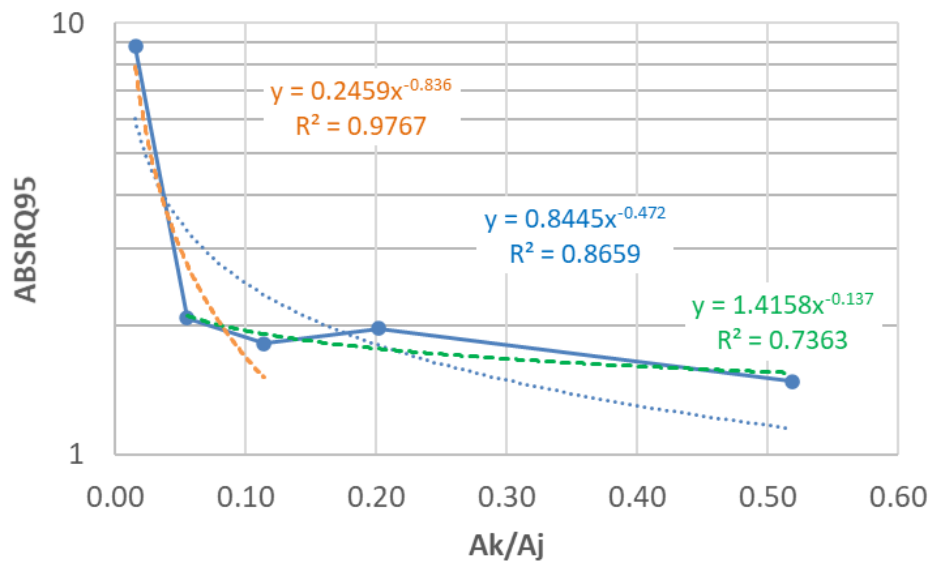


Figura 29: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQ95 e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (Ak) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (Aj), no caso 2.

Ao mesmo tempo, espera-se que o erro da estimativa da vazão no local sem dados K seja maior quando a área incremental (Ainc) entre A, B e J é pequena, em relação à área de drenagem total em J, relação que é verificada na Figura 30. Os valores de erros plotados representam o percentil 75% dos valores de ABSRQM, em intervalos de categorias da relação de área incremental (centrada nos valores de Ainc/AJ). É possível observar que os erros são maiores quando a área incremental é pequena ($Ainc/AJ < 0,25$, $ABSRQM = 1,55$). Nas demais faixas de relação de área, os erros foram similares ao já apresentado na tabela 1, com ABSRQM próximo a 1,4, ou seja, os valores estimados entre 28% a menos ou 40% a mais do valor real.

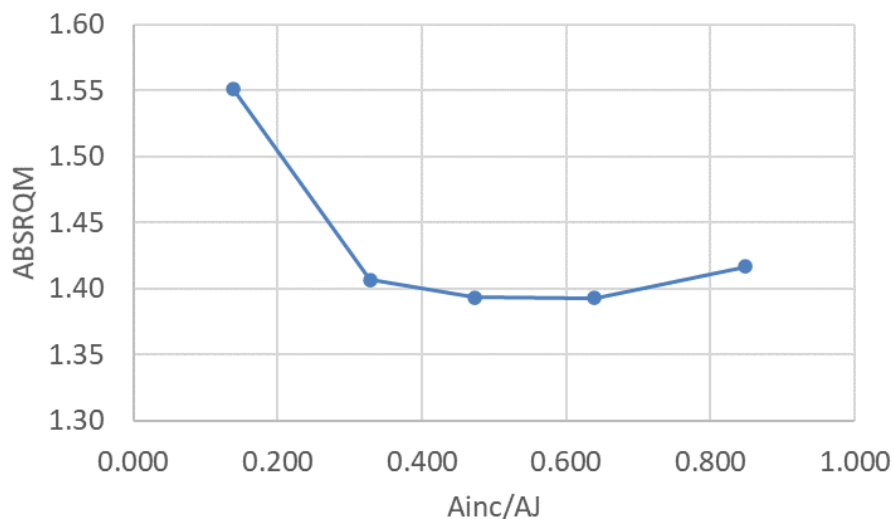


Figura 30: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQM e a razão entre a área incremental (Ainc) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (AJ), no caso 2.

A Figura 31 apresenta os resultados do percentil 75% de ABSRQ95, em faixas de área incremental, desenvolvido conforme descrito para ABSRQM. O gráfico também apresentou erros mais acentuados na faixa inferior de relação de área. O percentil de 75% dos valores ABSRQ95 variaram entre 1,5 e 1,7 quando a área incremental representa cerca de 55 a 65% da área total; e próximo a 2,0 quando a incremental é 30 ou 85% da área total.

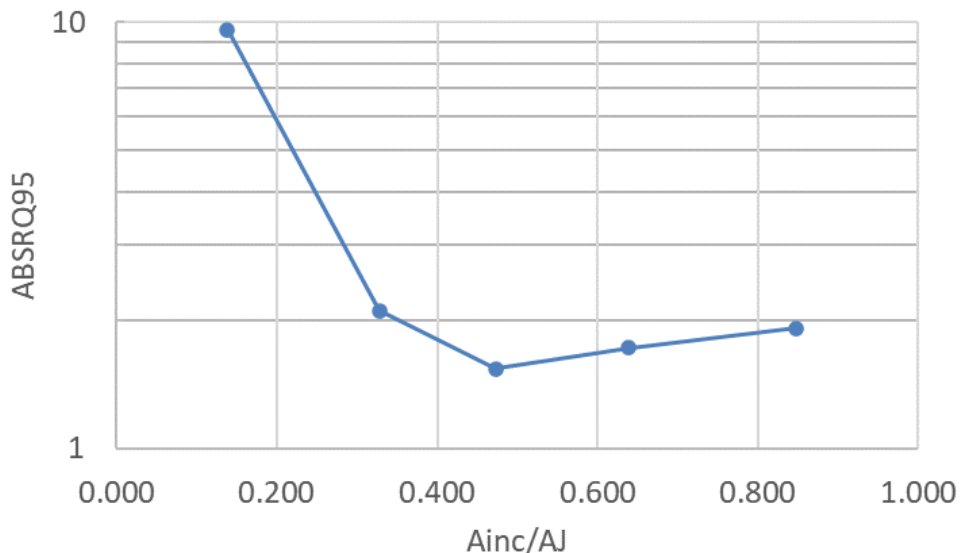


Figura 31: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQ95 e a razão entre a área incremental (Ainc) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (AJ), no caso 2.

A grande incerteza nas situações em que a área incremental é pequena pode ser uma consequência da amplificação dos erros na operação de subtração, conforme discutido na antes.

4.3.3 Caso 3: incremental monitorada somente a montante do local

O caso 3 é a situação em que existe um ou mais postos fluviométricos a montante do local sem dados (K), e em que todos os postos fluviométricos a montante de J estão, também, a montante de K, conforme ilustrado na Figura 32.

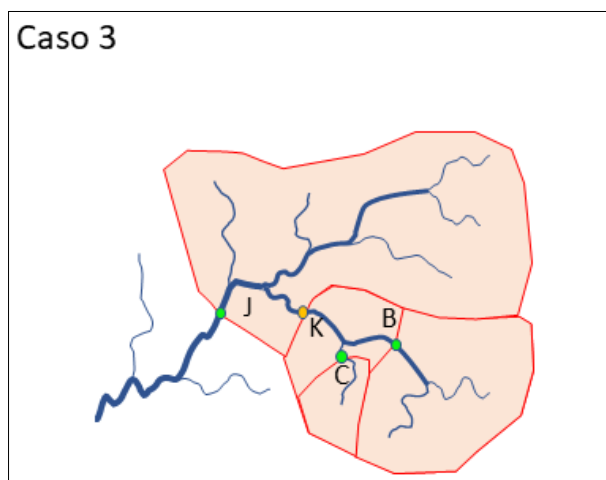


Figura 32: Ilustração do caso 3 para a aplicação do método da vazão específica incremental.

A Figura 33 apresenta a variação dos erros ABSRQM e ABSRQ95 (percentil 75%) em função da relação de áreas do local sem dados e do posto de jusante. Em geral, espera-se que os erros

sejam maiores quando o local está mais distante do posto e a razão A_k/A_j é menor, o que foi observado de maneira mais evidente para a vazão Q95. Para a vazão média os valores ficam próximos a $ABSRQM = 1,1$, equivalente a cerca +/- 10%. Os valores de $ABSRQ95$ ficaram entre 1,1 e 1,20 para relações de área $>0,7$ aproximadamente.

A Figura 34 apresenta a variação dos erros $ABSRQM$ e $ABSRQ95$ (percentil 75%) em função da relação de áreas dos postos a montante (somatório), e no local sem dados. Da mesma maneira, espera-se que os erros sejam maiores quando o local está mais distante dos postos (ou quando a área monitorada a montante é pequena) e a razão A_{km}/A_k é menor, o que foi observado de maneira mais evidente para a vazão Q95.

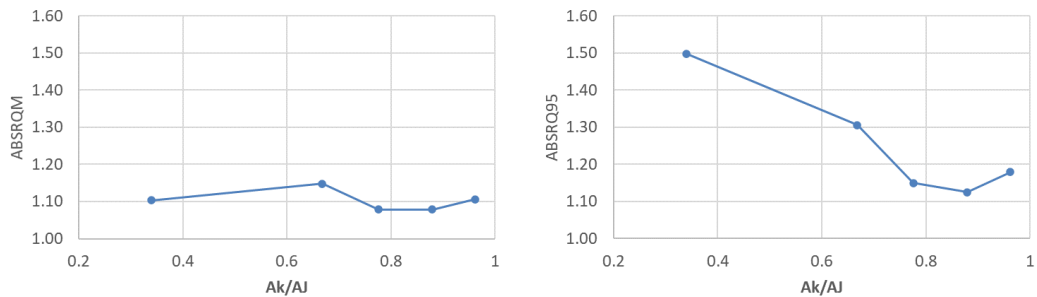


Figura 33: Relação entre o percentil 75% da métrica $ABSRQM$ (esquerda) e $ABSRQ95$ (direita), e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j), no caso 3.

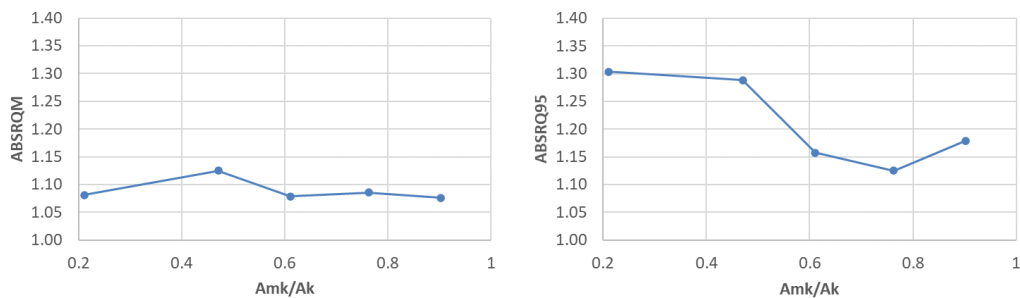


Figura 34: Relação entre o percentil 75% da métrica $ABSRQM$ (esquerda) e $ABSRQ95$ (direita), e a razão entre a área de drenagem no posto a montante (A_{km}) e no local sem dados (A_k), no caso 3.

4.3.4 Caso 4: incremental monitorada, inclusive com postos a montante do local

O caso 4 é a situação em que existem postos fluviométricos a montante do local sem dados (K), e existem postos fluviométricos a montante de J que não estão a montante de K , conforme ilustrado na Figura 35.

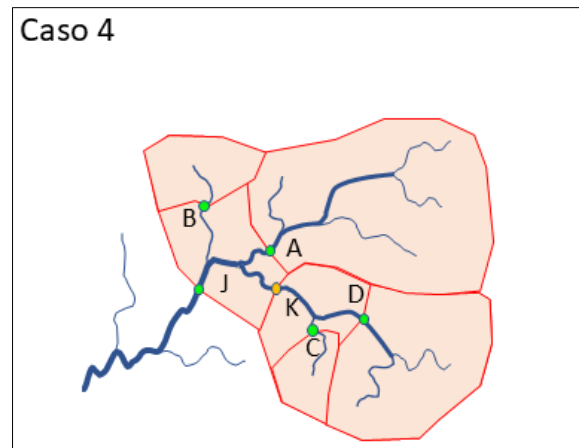


Figura 35: Ilustração do caso 4 para a aplicação do método da vazão específica incremental.

A Figura 36 apresenta a variação dos erros ABSRQM e ABSRQ95 (percentil 75%) em função da relação de áreas do local sem dados e do posto de jusante. Em geral, espera-se que os erros sejam maiores quando o local está mais distante do posto e a razão A_k/A_j é menor, o que foi observado para vazão média e para vazão Q95. Para a vazão média os valores de ABSRQM ficaram entre 1,05 e 1,2; e para a vazão Q95 os valores de ABSRQ95 ficaram entre 1,5 e 1,1.

A Figura 37 apresenta a variação dos erros ABSRQM e ABSRQ95 (percentil 75%) em função da relação de áreas dos postos a montante (somatório), e no local sem dados. Da mesma maneira, espera-se que os erros sejam maiores quando o local está mais distante do posto ou quando a área monitorada a montante é pequena) e a razão A_{km}/A_k é menor, o que foi observado de maneira mais evidente para a vazão Q95.

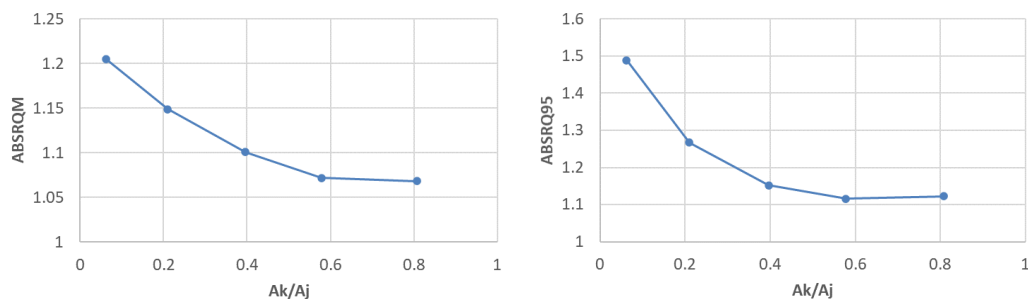


Figura 36: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQM (esquerda) e ABSRQ95 (direita), e a razão entre a área de drenagem no local sem dados (A_k) e a área de drenagem no posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados (A_j), no caso 4.

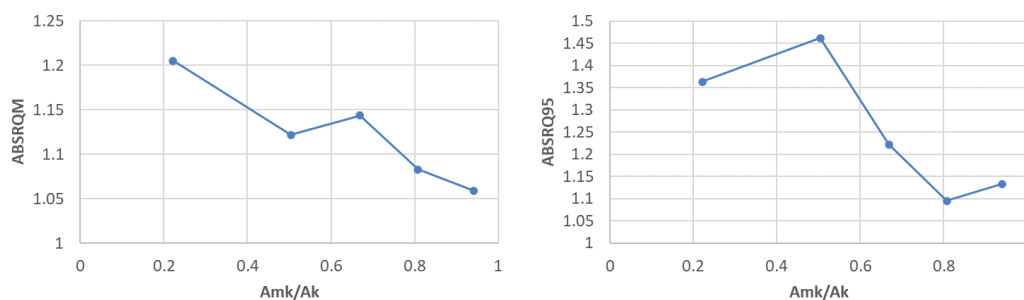


Figura 37: Relação entre o percentil 75% da métrica ABSRQM (esquerda) e ABSRQ95 (direita), e a razão entre a área de drenagem no posto a montante (A_{km}) e no local sem dados (A_k), no caso 4.

4.4 AVALIAÇÃO EMPÍRICA DO CRITÉRIO DE ESCOLHA ENTRE OS MÉTODOS

Os resultados apresentados até aqui demonstram que o método de estimativa de vazão em locais sem dados baseado na vazão incremental é claramente superior ao método da vazão específica nos casos 3 e 4, que correspondem aos casos em que existe ao menos um posto fluviométrico a montante do local sem dados, além do posto fluviométrico localizado a jusante do local sem dados. Isso sugere que nas situações dos casos 3 e 4, quando é possível aplicar tanto o método da vazão incremental como o método da vazão específica, o método da vazão incremental deve ser escolhido.

No caso 1 o método da vazão incremental é equivalente ao método da vazão específica baseado nos dados do posto fluviométrico de jusante.

Finalmente, no caso 2, a análise teórica e os resultados empíricos obtidos até aqui sugerem que a escolha entre um e outro método é um pouco mais complexa.

A análise empírica dos resultados do caso 2, apresentada na Figura 16 (vazão média) e na Figura 19 (Q95) sugere que, em geral, o método da vazão incremental tem erros maiores do que o método da vazão específica com base nos dados do posto fluviométrico de jusante. Já a análise teórica sugere que, no caso 2, seria possível decidir entre o método de vazão incremental e o método de vazão específica aplicando a equação 7, que compara a intensidade do sinal, com a intensidade do ruído esperado nas vazões de referência medidas.

Para aprofundar a análise das situações em que pode ser vantajoso aplicar um ou outro método, alguns critérios foram testados de forma empírica. Inicialmente, a equação 7 foi aplicada em todos os locais que se enquadraram no caso 2, e foi obtida uma razão entre a intensidade do sinal (dado pelo lado esquerdo da equação) e a intensidade do ruído (dado pelo lado direito da equação). Nos casos em que a razão sinal/ruído é maior do que 1 seria vantajoso, do ponto de vista teórico, aplicar o método da vazão incremental. Já nos casos em que a razão sinal/ruído é menor do que 1 seria vantajoso aplicar o método da vazão específica.

Para aplicar a equação 7 e obter a relação sinal/ruído, considerou-se, de forma simplificada, que o erro da estimativa da vazão de referência em um posto fluviométrico com dados é igual a 10% da própria vazão de referência.

A Figura 40 apresenta uma comparação dos erros de estimativa na vazão média obtidos pelos métodos INC e JUS, separando os casos em que a relação entre sinal e ruído é maior (ou menor) do que 1.

No gráfico da esquerda da Figura 38, em que a relação sinal/ruído é maior do que 1, o esperado seria que o método de vazão incremental (INC) apresentasse valores menores da métrica ABSRQM do que o método de vazão específica com dados do posto de jusante (JUS). Entretanto, os resultados mostram que isso não ocorreu. A análise empírica mostra que, mesmo nas situações em que, do ponto de vista teórico, seria vantajoso estimar a vazão média utilizando o método da vazão incremental (método INC), ainda é vantajoso utilizar o método da vazão específica com dados do posto de jusante (método JUS).

No gráfico da direita da Figura 38, em que a relação sinal/ruído é menor do que 1, o resultado esperado do ponto de vista teórico realmente ocorreu na análise empírica. Isto significa que quando a relação teórica sinal/ruído é menor do que 1 o método de vazão incremental (INC) não deveria ser utilizado.

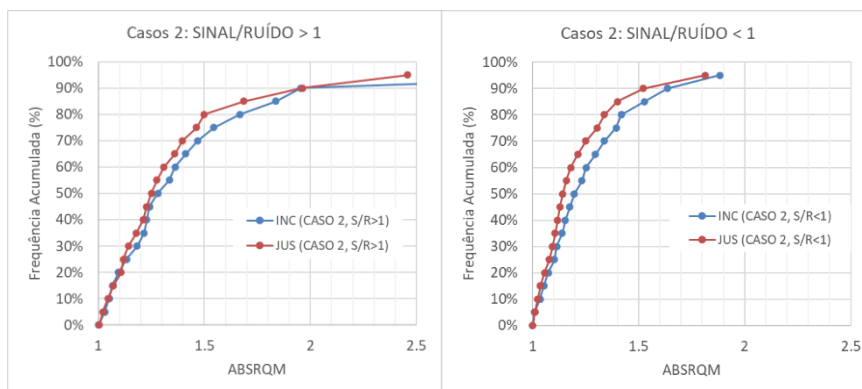


Figura 38: Distribuição de erros na vazão média (ABSRQM) para os métodos INC e JUS, quando a relação de sinal/ruído > 1 (esquerda) e sinal/ruído < 1 (direita)

A mesma análise foi realizada considerando as estimativas da vazão Q95, e está ilustrada na Figura 39. O gráfico do lado esquerdo da Figura 39 mostra que, quando a relação teórica entre sinal e ruído é maior do que 1, os dois métodos (INC e JUS) apresentam erros muito semelhantes na estimativa da Q95. Isto sugere que, mesmo quando o método INC é vantajoso do ponto de vista teórico, a análise empírica não reflete esta vantagem. Já o gráfico do lado direito mostra que os resultados empíricos estão de acordo com o critério teórico, ou seja, quando a relação teórica sinal/ruído é menor do que 1, o método de vazão incremental (INC) realmente não apresenta vantagens em relação ao método de vazão específica baseado nos dados do posto fluviométrico de jusante (JUS).

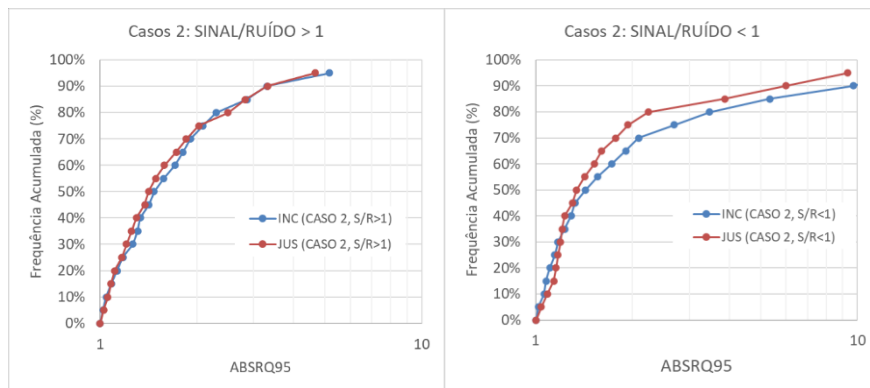


Figura 39: Distribuição de erros na vazão Q95 (ABSRQ95) para os métodos INC e JUS, quando a relação de sinal/ruído > 1 (esquerda) e sinal/ruído < 1 (direita)

Procurando aprofundar ainda mais a análise das situações em que um e outro método apresentam vantagens na estimativa da vazão média, foi determinado, para cada local, o método que resulta no menor erro. O resultado mostrou que ocorreram mais casos em que o menor erro foi obtido pelo método JUS (171 casos) do que pelo método INC (101 casos), confirmando os resultados da Figura 16 e da Figura 38.

Além disso, foi elaborada uma figura (Figura 40) relacionando o melhor método (entre os dois testados aqui) e duas variáveis que poderiam explicar a diferença entre os métodos: a relação teórica sinal/ruído (no eixo vertical) e a razão entre áreas de drenagem incremental e total (no eixo horizontal). Na Figura 40, cada ponto corresponde a um local em que foi estimada a vazão média, correspondendo ao caso 2, e as cores em azul escuro e claro, indicam qual método, INC ou JUS, forneceu a estimativa de vazão média com menor valor para a métrica de ABSRQM. Observa-se que os pontos de cor azul escura e de cor azul clara estão distribuídos por toda a região, sem um agrupamento evidente. Com base nas considerações teóricas, a expectativa seria que os pontos de cor azul escura, em que o método INC é melhor do que o método JUS, ficassem agrupados na região superior do gráfico, em que a razão sinal/ruído é maior do que 1 (a linha azul horizontal corresponde à razão sinal/ruído igual a 1), especialmente na região em que a área incremental é relativamente grande frente à área total (à direita da linha azul vertical, que corresponde a $A_{inc}/A_J=0,25$). As considerações teóricas também sugerem que os pontos de cor azul clara deveriam se agrupar mais no canto inferior esquerdo do gráfico, mas mesmo nesta região, identificada pela letra A, há uma presença considerável de pontos de cor azul escuro.

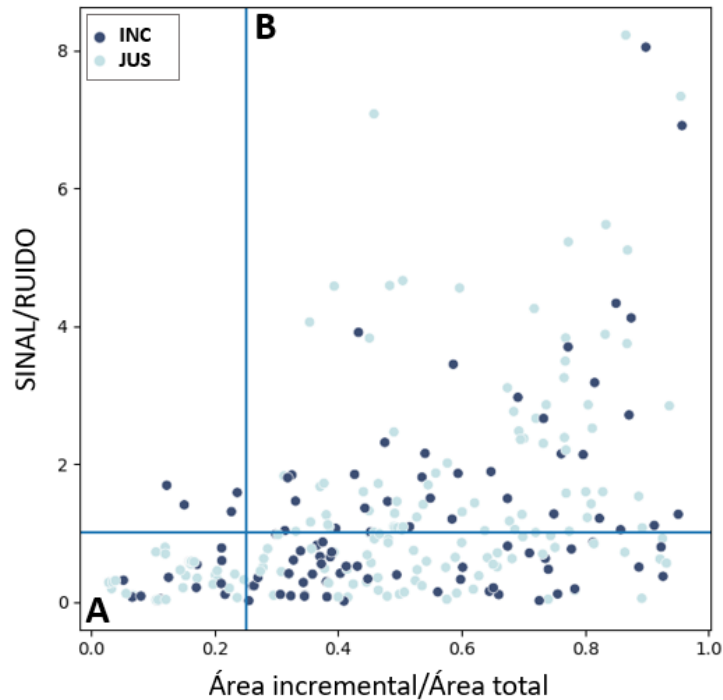


Figura 40: Relação entre relação de área incremental e relação de sinal e ruído da vazão, para cada local em análise. As categorias definem se os valores da estimativa da vazão média por ABSRQM foi menor ao utilizar o método da vazão específica incremental (INC) ou a vazão específica do posto de jusante (JUS)

O gráfico da Figura 40 foi dividido em quadrantes, considerando uma linha horizontal definida pela razão teórica sinal/ruído = 1, e uma linha vertical definida pelo valor (arbitrário) $A_{inc}/A_j=0,25$. Do ponto de vista teórico o quadrante inferior esquerdo, marcado com a letra A, deveria ser a região com menor concentração de pontos de cor azul escuro. Já o quadrante superior direito, marcado com a letra B, deveria ser a região com maior concentração de pontos de cor azul escuro. Entretanto, o que se observou é que, mesmo na região B, apenas 32% dos pontos tem cor azul escuro, ou seja, apenas 32% dos casos apresentaram ABSRQM menor ao utilizar o método INC do que o método JUS.

A Figura 41 apresenta as distribuições de valores de ABSRQM nos quadrantes A e B definidos antes. Observa-se que na região A (gráfico do lado esquerdo) o método da vazão incremental realmente apresenta erros maiores do que o método da vazão específica, como previsto pelo critério teórico. Já na região B (gráfico do lado direito) a diferença entre os dois métodos é menor, mas ainda assim o método INC não é melhor do que o método JUS.

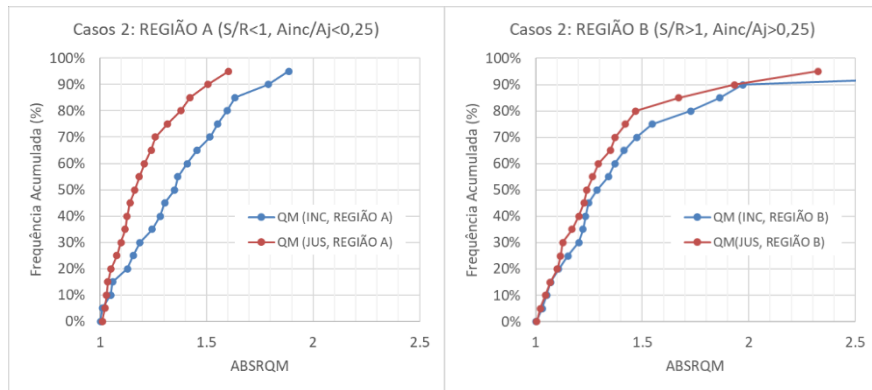


Figura 41: Distribuição de erros na vazão média (ABSRQM) para os métodos INC e JUS para as regiões A (esquerda) e B (direita) definidas no diagrama de sinal e ruído.

A mesma análise foi realizada para a vazão Q95 com resultados semelhantes aos obtidos para vazão média, conforme se observa na Figura 42. Em 80% de todos os locais correspondentes ao caso 2 a vazão Q95 estimada pelo método da vazão incremental apresentou erro maior do que a vazão Q95 estimada pelo método da vazão específica, com dados do posto de jusante, o que também confirma os resultados apresentados na Figura 19 e na Figura 39.

Na Figura 42, os pontos azuis escuro e claro estão espalhados de forma razoavelmente homogênea, sem agrupamentos evidentes. O gráfico desta figura também foi dividido em quadrantes, conforme explicado antes.

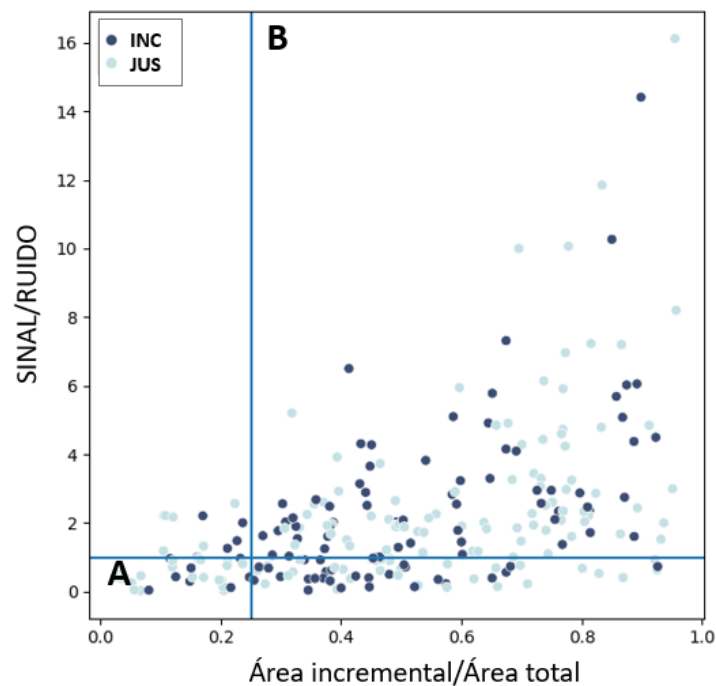


Figura 42: Relação entre relação de área incremental e relação de sinal e ruído da vazão, para cada local em análise. As categorias definem se os valores da estimativa da vazão Q95 por ABSRQ95 foi menor ao utilizar o método da vazão específica incremental (INC) ou a vazão específica do posto de jusante (JUS)

A Figura 43 mostra que, ao comparar a distribuição dos erros de estimativa da Q95 dos métodos JUS E INC, em cada um dos quadrantes (A e B) identificados na Figura 42, observa-se que o desempenho dos dois métodos é semelhante, tanto na região A, em que o método da vazão

específica supostamente teria os melhores resultados, como na região B, em que o método da vazão incremental teria os menores erros. Isto sugere que não é adequado o critério teórico proposto para escolher entre um e outro método de estimativa de vazão Q95 em locais sem dados que se enquadram no caso 2.

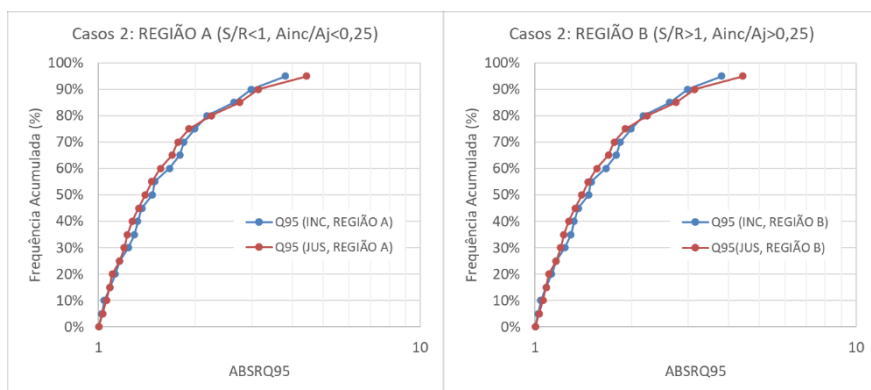


Figura 43: Distribuição de erros na vazão Q95 (ABSRQ95) para os métodos INC e JUS para as regiões A (esquerda) e B (direita) definidas no diagrama de sinal e ruído.

5 CONCLUSÕES

O presente relatório apresentou uma avaliação das estimativas de vazões de referência (vazão média e Q95) baseadas no método da vazão incremental específica. Este método é bastante utilizado, porque é relativamente simples de aplicar, porque permite representar a heterogeneidade da bacia e porque é coerente com a hipótese da continuidade da vazão de referência ao longo da rede de drenagem.

Entretanto o método da vazão incremental específica sofre com o problema da amplificação de erros de medição, o que pode fazer com que, em alguns casos, apresente erros maiores do que métodos ainda mais simples, como o método da vazão específica utilizando dados de um posto fluviométrico doador a jusante.

Uma análise teórica simplificada foi apresentada, resultando num critério objetivo e simples que poderia, potencialmente, ser utilizado para decidir em quais situações o método da vazão incremental teria vantagens sobre o método da vazão específica.

Uma análise empírica foi apresentada, comparando o método da vazão incremental com o método da vazão específica em 795 postos fluviométricos do Brasil, simulando a situação em que não houvesse dados nos locais correspondentes a estes postos fluviométricos.

Foram identificados 4 tipos de situação na aplicação do método da vazão incremental, dependendo da disponibilidade de dados a montante do local sem dados, e em cursos d'água vizinhos.

Nos casos em que existem postos fluviométricos a montante do local sem dados, o método da vazão incremental é claramente superior ao método da vazão específica, tanto na estimativa da vazão média como na estimativa da vazão específica. O erro do método da vazão incremental quando existem dados de postos fluviométricos a montante e a jusante do local sem dados é da ordem de 10%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão média, e da ordem de 20%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão Q95.

Nos casos em que não existem postos fluviométricos a montante do local sem dados, o método da vazão incremental não é superior ao método da vazão específica, mesmo quando o critério teórico obtido neste mesmo relatório sugere o contrário. Na situação identificada como caso 2, em que não há postos fluviométricos a montante do local sem dados, e em que o local sem dados está localizado em um rio que drena para um outro curso d'água localizado entre dois postos fluviométricos, o erro da estimativa do método da vazão incremental é da ordem de -30% a +43%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão média, e de -50% a +115%, na maioria dos casos, quando é estimada a vazão Q95.

O critério teórico apresentado foi testado com dados empíricos, mas não foi capaz de prever, de forma consistente, em quais situações o método da vazão incremental teria vantagens sobre o método da vazão específica. Por outro lado, o critério permite, ao menos, prever em quais situações o método da vazão incremental não é, definitivamente, melhor do que o método da vazão específica.

Finalmente, foram elaboradas funções que relacionam o erro da estimativa da vazão pelo método da vazão incremental com as relações entre as áreas de drenagem dos postos fluviométricos utilizados como apoio. Estas relações podem ser utilizadas para prever a incerteza da estimativa da vazão de referência em locais sem dados.

6 REFERÊNCIAS

- ANA (2020a) 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 (2020b) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Estudos de análise de consistência de dados fluviométricos de estações de monitoramento da ANA em operação nas bacias hidrográficas selecionadas / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – 1. ed. – Brasília : ANA, 2020
- Clarke R. T. & Tucci C. E. M. (2003) Regionalização Hidrológica. Em: Paiva J. B. D. de & Paiva E. M. C. D. DE (Orgs.), Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 169-222, 2003.
- Collischonn, W.; Sorribas, M. V.; Paiva, R.C.D. 2021. IPH-ANA-HGE-SR-R4 Relatório Técnico: O efeito da variabilidade amostral sobre a estimativa de vazões de referência. Porto Alegre, 2021.
- 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.
- 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.
- Novaes, L. F., Pruski, F. F., Pereira, S. B., Queiroz, D. O., & Rodriguez, R. D. G. (2009). Gestão de Recursos Hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas Revista Engenharia na Agricultura-Reveng, 17(1).
- 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).
- Silva, O. B., Bueno, E. D. O., Tucci, C. E., & Castro, N. M. (2003). Extrapolação espacial na regionalização da vazão. RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 8(1), 21-37.
- Silva, D. D., de Azevedo Marques, F., & Lemos, A. F. (2009). Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do Rio São Francisco. Revista Engenharia na Agricultura-Reveng, 17(5), 392-403.
- Santos I. et al. (2001) Hidrometria Aplicada, 372p. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba. ISBN 85-88519-01-1
- 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. 2021. IPH-ANA-HGE-SR-R6 Relatório Técnico: Avaliação do método da vazão específica com doador único em postos fluviométricos do Brasil. Porto Alegre, 2021. Tucci C. E. M. (2002) Regionalização de vazões. Editora da Universidade. UFRGS. 1a edição. Porto Alegre.