

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM ESTOCÁSTICA E REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE PERMANÊNCIA CONSTRUÍDAS A PARTIR DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÕES DIÁRIAS

Maria Eduarda Ottoni Torres¹ ; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva²

Abstract: The management of water resources and the planning of projects for their use require detailed knowledge of the hydrological behavior of the water bodies of interest. However, a significant portion of the Brazilian territory lacks continuous streamflow monitoring, making long-term hydrological characterization difficult. This gap drives the development of methods that allow the inference of hydrological information in ungauged areas through conceptual models, empirical approaches, or statistical techniques. Especially in regions facing water availability pressures and limited streamflow coverage, the estimation of long-term flow duration curves (FDCs) in ungauged basins becomes an important and often required tool in the context of water resources management, as it offers an integrated view of hydrological behavior over the years. This study aims to develop a regional statistical model based on the index-flow approach for the synthetic reproduction of flow duration curves and to evaluate its predictive and regionalization performance. The modeling was applied to basins in the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH), Minas Gerais, using daily streamflow series with more than 30 years of continuous records. The results highlight the model's ability to estimate FDCs consistent with empirically derived curves, representing a promising tool for regional water management.

Resumo: A gestão de recursos hídricos e o planejamento de projetos para seu aproveitamento exigem um conhecimento detalhado do comportamento hidrológico dos corpos d'água de interesse. No entanto, uma parte significativa do território brasileiro carece de monitoramento fluviométrico contínuo, dificultando a caracterização hidrológica de longo prazo, o que impulsiona o desenvolvimento de métodos que permitam inferir informações hidrológicas em áreas sem monitoramento direto, por meio de modelos conceituais, abordagens empíricas ou técnicas estatísticas. Sobretudo em regiões sujeitas a pressões por disponibilidade hídrica associadas à baixa cobertura fluviométrica, a estimativa de curvas de permanência de longo termo (CPLTs) em bacias não monitoradas é uma ferramenta importante e frequentemente requerida no âmbito do manejo de recursos hídricos por oferecer uma visão integrada do comportamento hidrológico ao longo dos anos. Este estudo se propõe a desenvolver um modelo estatístico regional baseado na abordagem de vazão-índice para reprodução sintética de curvas de permanência, e avaliar a sua capacidade preditiva e de regionalização. A modelagem foi aplicada à bacias da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), Minas Gerais, por meio do emprego séries de vazão diária com mais de 30 anos de registros contínuos. Os resultados evidenciam a capacidade do modelo em estimar CPLTs coerentes com as curvas empíricas estimadas, representando um instrumento promissor para a gestão hídrica regional.

Palavras-Chave – curva de permanência de longo termo; index flow; regionalização hidrológica.

1) Discente do curso de graduação em Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia da UFMG

2) Professor do Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos e do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da Escola de Engenharia, ambos da UFMG.

INTRODUÇÃO

As curvas de permanência de vazões (CPs) representam uma das ferramentas mais consolidadas da engenharia de recursos hídricos, por condensarem informações de séries temporais em uma representação estatística robusta da disponibilidade hídrica de uma bacia. Sua ampla aplicação inclui desde o planejamento de obras hidráulicas até a formulação de políticas públicas de alocação e conservação de recursos hídricos. No entanto, sua construção depende da existência de séries históricas de vazão, um requisito que restringe seu uso em bacias hidrográficas que carecem de monitoramento fluviométrico contínuo.

Esse cenário tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas de regionalização, que buscam estimar CPs em bacias não monitoradas a partir de características físicas ou climáticas observadas em bacias vizinhas com dados disponíveis. Dentre os métodos propostos, destaca-se o modelo estocástico vazão-índice, inicialmente desenvolvido por Castellarin *et al.* (2004a, 2007), que propõe a decomposição da curva em dois componentes estocásticos: um associado à variabilidade climática de longo prazo e outro ao comportamento hidrológico intrínseco das bacias. Essa separação permite maior flexibilidade estatística e abre caminho para a estimativa de curvas em locais desprovidos de monitoramento de vazão, com base em regressões múltiplas sobre variáveis fisiográficas (Castellarin, 2004a).

No Brasil, a avaliação desse modelo foi explorada por Pinheiro (2009), em estudo aplicado às bacias dos rios Pará e Paraopeba, revelando resultados promissores quanto à viabilidade da regionalização com base em dados morfométricos obtidos por geoprocessamento. Estudos subsequentes reforçaram a pertinência de estratégias que evitam a dependência de dados climáticos, cuja cobertura espacial ainda é limitada em diversas regiões (Costa e Fernandes, 2020). Além disso, métodos estatísticos como a análise de momentos-L, simulações *bootstrap* e validações cruzadas têm se consolidado como ferramentas fundamentais para fortalecer a confiabilidade dessas estimativas em ambientes de incerteza (Naghetini, 2018).

Na Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), os desafios relacionados à escassez hídrica têm se intensificado na última década, especialmente após os eventos críticos registrados entre 2014 e 2020. A escassez de estações fluviométricas em muitas sub-bacias agrava as incertezas no planejamento e gestão hídrica, tornando urgente o aprimoramento de ferramentas de suporte à decisão baseadas em modelos regionalizados.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo desenvolver e testar um modelo estatístico para a regionalização de curvas de permanência em bacias não monitoradas da RMBH, com base na estrutura do modelo estocástico de vazão-índice. A proposta busca contribuir com a avaliação de alternativas metodológicas viáveis, robustas e replicáveis para o avanço dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos em regiões com baixa densidade de monitoramento hidrométrico.

MÉTODOS

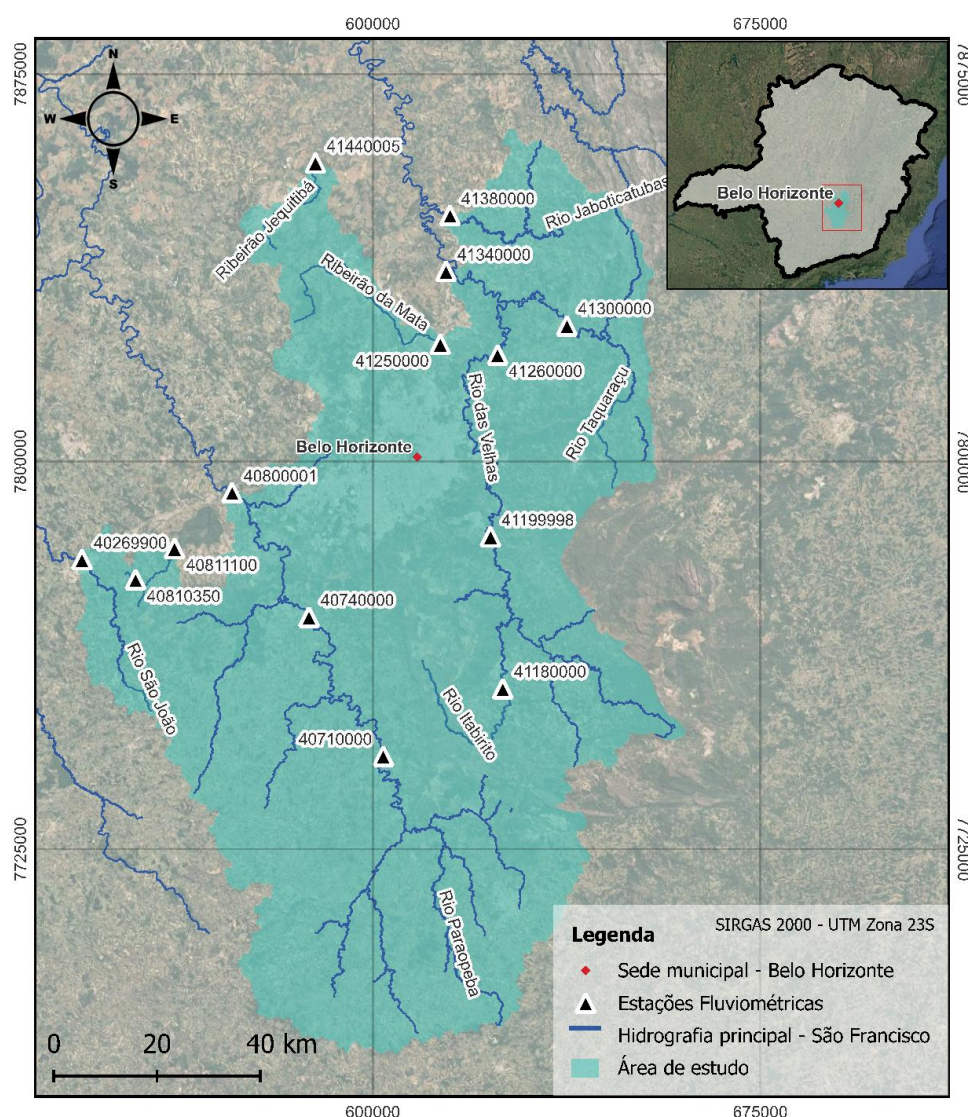
Área de Estudo e Dados do Modelo

A região selecionada para o estudo se trata do arco metropolitano da capital mineira, Belo Horizonte. Composta por 34 municípios e abrigando cerca de 6 milhões de habitantes (IBGE, 2023), a região apresenta forte urbanização e demanda crescente por recursos hídricos. O abastecimento público é predominantemente realizado por captações superficiais nos rios das bacias do Velhas, Paraopeba e Pará, que integram a bacia do rio São Francisco (IGAM, 2020). Eventos recentes de escassez hídrica, como os de 2014–2016 e o início da década de 2020, evidenciaram a vulnerabilidade

hídrica da RMBH e a necessidade de instrumentos técnicos capazes de estimar a disponibilidade hídrica mesmo em bacias não monitoradas.

Foram selecionadas 14 estações fluviométricas com base nos seguintes critérios: (i) extensão da série temporal – um mínimo de 30 anos de registros contínuos de vazões diárias; (ii) no máximo 20% de falhas em cada ano hidrológico disponível; e (iii) a existência de registros durante os eventos de escassez recentes. As estações foram obtidas na base da Agência Nacional de Águas (ANA) e, séries operando de forma sequencial em pontos próximos e equivalentes (como os postos 40810350 e 40810400) foram unificadas. O período comum entre as estações foi outubro de 1987 a setembro 2023 (36 anos hidrológicos). Os dados fluviométricos levantados passaram por verificação de anomalias e identificação de *outliers*, conforme os procedimentos técnicos da ANA (2020), assegurando integridade e qualidade da base hidrológica utilizada. A Figura 1 apresenta o mapa da área de estudo com a localização das estações fluviométricas utilizadas, os limites do conjunto de bacias hidrográficas que contribuem às estações e a macro hidrografia da região.

Figura 1 – Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo, com delimitação da região contribuinte das estações e principais cursos d'água.



Fonte: baseada em informações disponibilizadas pela ANA e IGAM (2025).

As características geomorfológicas das bacias foram extraídas do modelo digital de elevação (MDE) *Copernicus* (~ 30 m de resolução espacial). As análises foram desenvolvidas no software QGIS e complementadas por *scripts* desenvolvidos na linguagem R. As variáveis extraídas incluíram: área de drenagem (A), comprimento do talvegue (L), desnível hidráulico (DH), altitudes mínima e máxima, densidade de drenagem (DD), fator de forma (Kf) e coeficiente de compactidade (Kc). As variáveis físicas se encontram sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas das bacias de contribuição a cada estação fluviométrica.

Estação Fluviométrica	Código	A (km ²)	L (km)	DH (m)	Hmin (m)	Hmax (m)	DD (Juncões/km ²)	Kf	Kc
Itaúna Montante	40269900	340	51,81	278	807	1085	0,335	0,127	2,506
Belo Vale	40710000	2766	109,63	248	792	1040	0,391	0,230	1,997
Alberto Flores	40740000	3961	186,12	308	732	1040	0,397	0,114	2,202
Ponte Nova do Paraopeba	40800001	5691	240,20	341	699	1040	0,397	0,099	2,394
Fazenda Laranjeiras	40810350	11	3,38	223	858	1081	0,636	0,965	1,689
Jardim	40811100	112	19,03	288	774	1062	0,330	0,309	1,826
Itabirito Linigrafo	41180000	378	47,86	592	859	1451	0,368	0,165	2,333
Honório Bicalho Montante	41199998	1674	98,23	781	723	1504	0,396	0,174	1,889
Vespasiano	41250000	708	68,20	319	677	996	0,380	0,152	2,073
Pinhões	41260000	3730	173,09	516	662	1178	0,394	0,125	2,434
Taquaraçu	41300000	618	75,07	398	710	1108	0,364	0,110	2,253
Ponte Raul Soares	41340000	4862	220,80	535	643	1178	0,397	0,100	2,554
Ponte Preta	41380000	564	67,57	584	637	1221	0,374	0,124	2,016
Represa Jusante	41440005	239	36,66	124	670	794	0,427	0,178	2,047

A regionalização fundamentou-se na definição de região homogênea. A medida de heterogeneidade *H* de Hosking e Wallis (1997) foi calculada para as 14 estações, com base nas distribuições empíricas das vazões diárias. O valor obtido, *H* = 1,37, indicou que todas as estações podiam ser tratadas como pertencentes a uma única região homogênea. O grupo foi, então, dividido em 8 estações para calibração do modelo e 6 para validação.

Modelagem estocástica de curvas de permanência baseada no conceito de vazão-índice

O método de Castellarin *et al.* (2004a; 2007) consiste em um modelo estocástico para curvas de permanência que, em resumo, interpreta vazões médias diárias (*X*) como resultado do produto de duas variáveis aleatórias: a vazão-índice, que corresponde à média anual de vazões (*AF*) em um dado ano hidrológico, e a vazão média diária adimensionalizada (*X'*) pelo seu respectivo *AF*, como expresso na Equação (1).

$$X = AF \cdot X' \quad (1)$$

As vazões médias anuais *AF* representam a variabilidade interanual decorrente de flutuações climáticas em uma dada bacia hidrográfica, sobretudo da precipitação média anual. Por sua vez, a função densidade de probabilidade (FDP) de *X'* ($f_{X'}$) sintetiza o regime hidrológico anual da bacia, sendo influenciada pelo seu clima, tamanho e permeabilidade ao longo de um ano hidrológico qualquer. Dessa maneira, as curvas de permanência podem ser estatisticamente interpretadas como o complemento da função acumulada de probabilidades (FAP) das vazões médias diárias, de modo que, segundo Castellarin *et al.* (2004a), tem-se que uma vazão média diária pode ser expressa por:

$$F_x(x) = \int_{\Omega_{X'}} \int_{af_1}^{x/z} f_{AF,X'}(v, z) dv dz \quad (2)$$

Sendo $\Omega_{X'}$, o domínio da variável aleatória *X'*; af_1 o limite inferior do domínio da variável *AF*; $f_{AF,X'}$ a função densidade de probabilidades conjuntas de *AF* e *X'*; e *v* e *z* são argumentos integrandos

das variáveis AF e X' , respectivamente. Assumindo que X' e AF sejam variáveis independentes, a equação pode ser escrita na seguinte forma:

$$F_x(x) = \int_{\Omega_{X'}} f_{X'}(z) \int_{af1}^{x/z} f_{AF}(q/z) dv dz = \int_{\Omega_{X'}} f_{X'}(z) F_{AF}(q/z) dz \quad (3)$$

Sendo $f_{X'}$ a FDP de X' , e F_{AF} a FAP de AF .

A solução da Equação 3 pode ser obtida na forma analítica ou numérica, em função das distribuições de probabilidades selecionadas para representar AF e X' . A análise comparativa dessas distribuições previamente realizada por Pinheiro na região e adotada posteriormente por Costa e Fernandes (2020), os quais também aplicaram o método nas bacias dos rios Pará e Paraopeba (MG), fundamentou a adoção das distribuições Lognormal de 2 parâmetros (LN2p) e de 3 parâmetros (LN3p) no presente estudo. Os parâmetros de ambas as distribuições foram estimados pelo método dos momentos-L nas estações fluviométricas utilizadas para elaboração do modelo regional, conforme resumido na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros das distribuições Lognormal de 2 parâmetros e Lognormal de 3 parâmetros para o conjunto de estações fluviométricas de referência.

Posto Fluviométrico	μ LN2	σ LN2	μ LN3	σ LN3	ξ LN3
40710000	3,7727	0,3455	-0,6813	0,9661	0,1931
40740000	3,9950	0,3237	-0,6323	0,9275	0,1830
41180000	1,9219	0,2449	-1,1532	1,0739	0,4381
41250000	2,0008	0,3877	-1,1969	1,3404	0,2581
41260000	4,0154	0,2795	-1,0391	1,1263	0,3329
41300000	2,0885	0,3526	-0,9320	1,2284	0,1627
41340000	4,2392	0,2938	-0,9647	1,1105	0,2940
41440005	0,9713	0,3918	-0,9795	1,1431	0,2784

Obtenção dos parâmetros do modelo regional completo

Os parâmetros do modelo regional completo foram estabelecidos tomando-se como referência oito estações fluviométricas. O procedimento envolveu o desenvolvimento de uma análise de regressão múltipla entre os parâmetros ajustados para as distribuições indicadas (Tabela 2) e as variáveis físicas das bacias de contribuição a cada uma das estações de referência (Tabela 1). Os coeficientes de determinação R^2 mais elevados foram obtidos ao tomar-se os logaritmos naturais dos atributos físicos considerados. As variáveis explicativas presentes nos modelos pré-selecionados foram avaliadas, descartando-se aqueles em que essas variáveis apresentaram correlação superior a 0,85, o que poderia implicar em multicolinearidade. As equações descritoras dos modelos para cada parâmetro encontram-se descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos regionais completos

Parâmetro	Equação	R^2	R^2 ajustado	Erro padrão	Ftotal
μ LN2	$-14,1567 + 1,0746 \cdot \ln(A) + 1,4200 \cdot \ln(H_{\min})$	0,9935	0,9909	0,1206	380,10
σ LN2	$2,5341 - 0,3990 \cdot \ln(H_{\max}) - 0,6168 \cdot \ln(DD)$	0,9756	0,9659	0,0096	100,10
μ LN3	$-13,0787 + 0,4094 \cdot \ln(L) - 0,9778 \cdot \ln(DH) - 3,5548 \cdot \ln(DD) + 2,4076 \cdot \ln(kc) + 1,6267 \cdot \ln(H_{\min})$	0,9977	0,992	0,018	175,70
σ LN3	$11,6357 - 1,6216 \cdot \ln(H_{\min}) - 0,1857 \cdot \ln(L) + 0,3673 \cdot \ln(DH) - 1,4496 \cdot \ln(kc)$	0,9901	0,977	0,0202	75,18
ξ LN3	$1,7218 - 0,8248 \cdot \ln(kc) + 0,4889 \cdot \ln(DH) - 0,1617 \cdot \ln(L) + 3,0857 \cdot \ln(DD)$	0,9956	0,9898	0,0092	170,30

Definição do intervalo de confiança das curvas de permanência simuladas

Intervalos de confiança permitem estabelecer uma faixa de valores prováveis para o parâmetro populacional estimado com base em uma amostra. À vista disso, para as curvas de permanência regionalizadas foram estimados intervalos de confiança para os quantis simulados com base em uma abordagem não paramétrica de *bootstrap*. Essa técnica permite a avaliação da incerteza associada às estimativas, sendo especialmente útil em contextos em que a amostra é limitada e os parâmetros do modelo são obtidos por meio de regressões múltiplas (Naghetini, 2018).

A proposta de incluir intervalos de confiança nas curvas de permanência remonta à reformulação conceitual apresentada por Vogel e Fennessey (1994), que interpretaram tais curvas como estimativas amostrais e, portanto, sujeitas à variabilidade estatística. Vogel e Fennessey (1994) argumentam que as curvas simuladas representam uma realização possível para um ano típico qualquer e, portanto, podem ser interpretadas como curvas de permanência anuais (CPAs). Já a mediana desse intervalo representa a curva de permanência de longo termo (CPLT). Serinaldi (2011) complementa essa abordagem ao demonstrar que os intervalos de confiança obtidos por *bootstrap* se aproximam de métodos analíticos sob condições específicas, sendo particularmente eficazes para caracterizar a incerteza em durações extremas, onde as suposições paramétricas tendem a falhar.

A implementação computacional foi realizada no ambiente RStudio (versão 2024.12.1), a partir de *scripts* desenvolvidos em linguagem R. Para cada estação regionalizada, foram geradas 500 simulações dos parâmetros das distribuições LN2p e LN3p presentes nas equações de regressão descritas, assumindo-se que os resíduos seguiam uma distribuição Normal. A cada iteração, uma nova curva de permanência foi construída com base nos parâmetros simulados, resultando em um conjunto de curvas sintéticas representativas da variabilidade do modelo. A partir desse conjunto, para cada probabilidade de não excedência, foi definido o intervalo de confiança de 95%, tomando como limites os percentis 2,5% e 97,5% das curvas simuladas. Essa abordagem fornece uma representação visual da incerteza nos resultados apresentados, os quais são discutidos em seguida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aderência do modelo às curvas empíricas de calibração

A avaliação do desempenho do modelo regional foi inicialmente realizada com base nas oito estações fluviométricas utilizadas na etapa de calibração. Essa verificação tem como objetivo identificar se as equações de regressão obtidas são capazes de reproduzir, de forma suficientemente adequada, as curvas de permanência de longo termo que originaram os parâmetros regionalizados. Para tal, foram calculadas métricas globais de qualidade do ajuste entre a mediana das curvas simuladas (via *bootstrap*) e as estimadas por meio dos registros fluviométricos para cada estação de referência. As métricas consideradas foram o Erro Absoluto Médio (MAE), a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), o Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o Coeficiente de Determinação (R^2), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Índices de qualidade do ajuste entre curvas de permanência obtidas por meio do modelo regional (mediana) e estimadas através dos registros fluviométricos locais.

Estação Fluviométrica	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	NSE	R ²
40710000	12,7	56,3	0,898	0,953
40740000	17,60	55,8	0,924	0,949
41180000	3,35	13,5	0,741	0,948
41250000	2,68	6,82	0,973	0,999
41260000	10,9	25,6	0,975	0,977
41300000	1,81	6,19	0,979	0,996
41340000	13,6	31,9	0,978	0,991

41440005

0,319

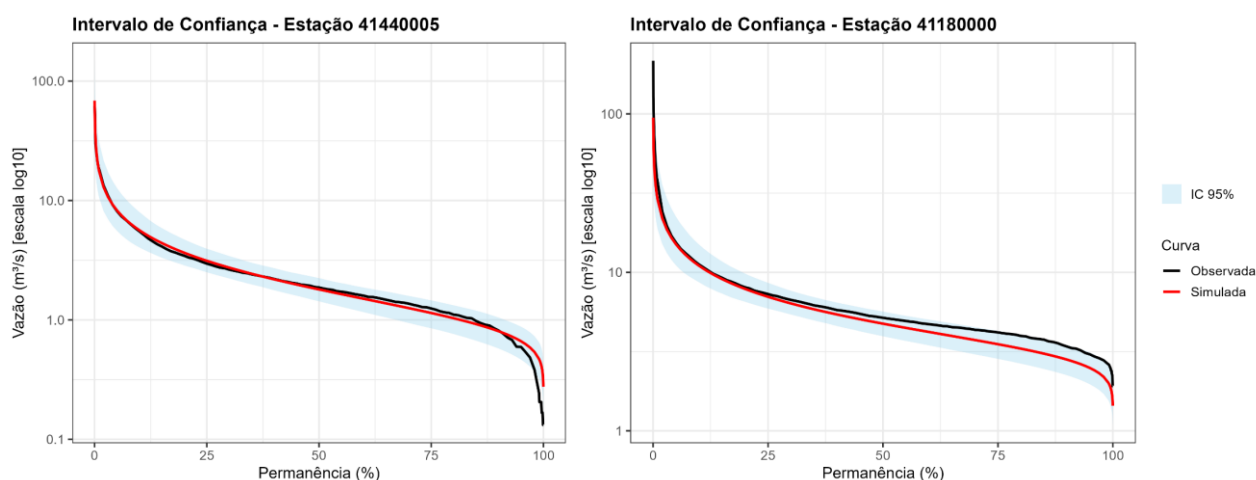
1,09

0,988

0,988

Os resultados indicam bom desempenho do modelo para a maioria das estações. A menor eficiência foi observada na estação 41180000 (NSE = 0,741), que ainda se manteve dentro de padrões aceitáveis para simulações hidrológicas. Os gráficos da Figura 2 apresenta as curvas obtidas com melhor e pior ajuste, respectivamente, dentre as estações fluviométricas utilizadas para construção do modelo regional.

Figura 2 - Curvas de permanência obtidas para as estações 41440005 e 41180000 a partir de registros fluviométricos (linha preta) e da mediana (linha vermelha) associada ao intervalo de confiança de 95% (sombreado em azul) do modelo regional.



Fonte: Elaboração própria via RStudio.

De modo geral, observou-se boa concordância entre as curvas simuladas e empíricas, com a maior parte dos valores observados situando-se dentro dos limites associados aos intervalos de confiança, especialmente para permanências intermediárias (entre 10% e 90%). Nas extremidades a dispersão aumenta ligeiramente, o que é esperado devido à maior variabilidade natural desses eventos e à sensibilidade das curvas de permanência de longo termo a valores extremos (Vogel e Fennessey, 1994).

Regionalização das curvas de permanência

Finalmente, procedeu-se a aplicação do modelo regional nas seis estações fluviométricas não utilizadas na etapa de calibração, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva do modelo em um cenário de ausência de monitoramento. Os parâmetros das distribuições Lognormal de dois (LN2p) e três parâmetros (LN3p) foram estimados por meio das equações de regressão múltipla ajustadas (Tabela 3), a partir das variáveis físicas das bacias (Tabela 1). A Tabela 5 apresenta os valores estimados dos parâmetros para as seis estações empregadas na etapa de validação.

Tabela 5 – Parâmetros das distribuições LN2p e LN3p estimados via modelo regional para as estações consideradas na etapa de validação.

Estação Fluviométrica	μ LN2	σ LN2	μ LN3	σ LN3	ξ LN3
40269900	1,612	0,419	0,019	0,784	-0,295
40800001	4,435	0,333	-0,493	0,873	0,113
40810350	-1,988	0,026	-4,012	1,683	2,342
40811100	0,359	0,437	-1,204	1,510	0,100
41199998	3,168	0,186	-2,181	1,633	0,854
41380000	1,820	0,305	-1,896	1,706	0,542

A avaliação desses parâmetros revela que duas bacias apresentaram comportamento estatístico anômalo: as estações 40810350 e 40269900. Nesses postos a aplicação das equações de regressão resultou em valores inconsistentes para os parâmetros das distribuições LN2p e LN3p, comprometendo integralmente a simulação da curva de permanência. A análise das características morfométricas dessas duas bacias confirma a ocorrência de extrapolação significativa dos limites inferior e superior do domínio do modelo regional, ilustrada pelo comparativo na Tabela 6. Nota-se que a bacia da estação 40810350 possui área e talvegue extremamente reduzidos, com um fator de forma quase unitário, refletindo um formato extremamente alongado e desproporcional ao conjunto de referência. Já a bacia da 40269900, embora com área mais próxima da faixa inferior, apresenta compacidade e fator de forma fora da dispersão central observada no grupo de calibração. As problemáticas levantadas implicaram na eliminação dessas estações.

Tabela 6 – Comparativo: Variáveis físicas de bacias com parâmetros inconsistentes e faixa do conjunto de calibração

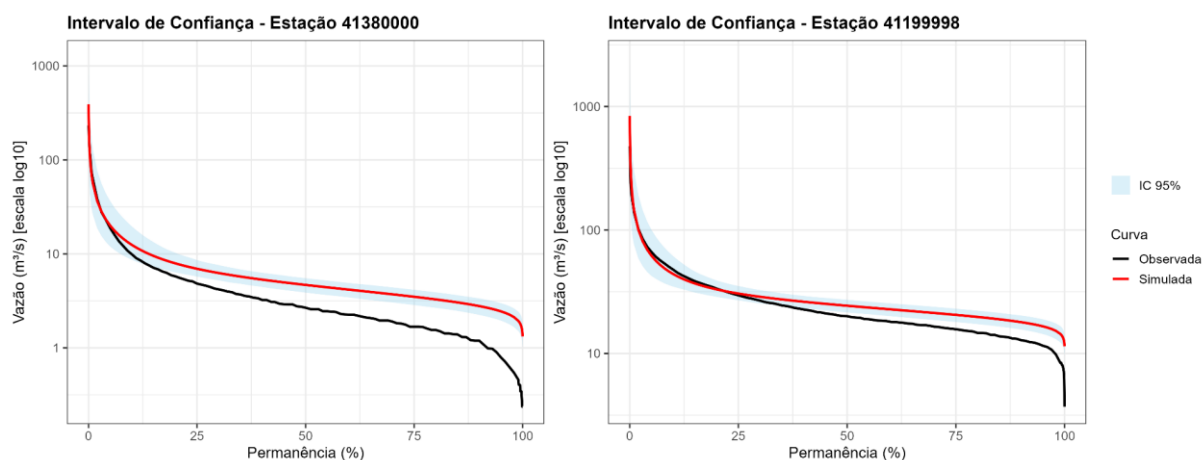
Estação	Área (km ²)	Talvegue (km)	Fator de Forma (Kf)	Coef. Compacidade (Kc)
40810350	11	3	0,965	1,689
40269900	340	52	0,127	2,506
Faixa (Calibração)	239 – 5691	37 – 240	0,099 – 0,309	1,826 – 2,394

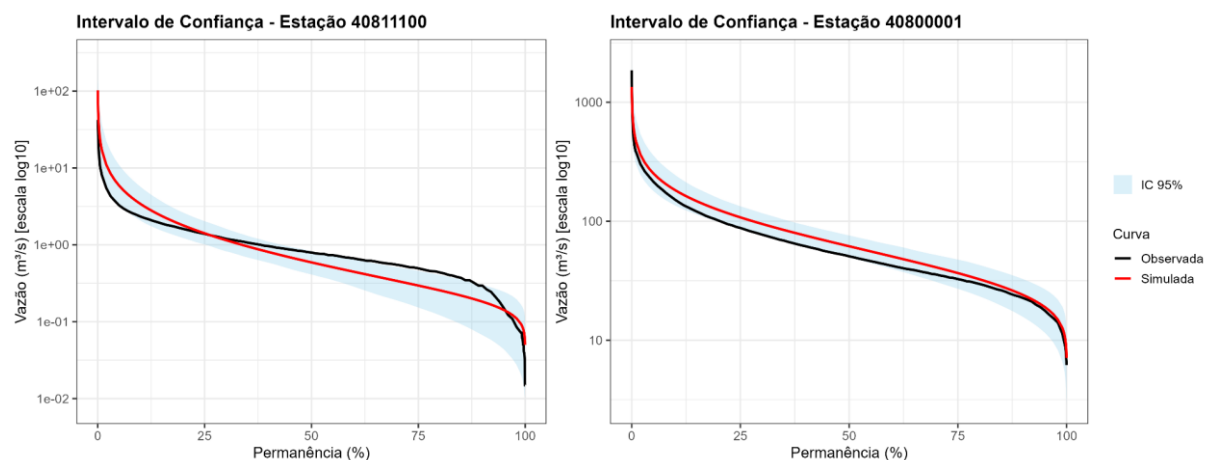
Para as demais estações de validação que apresentaram parâmetros estatísticos consistentes, o desempenho do modelo foi avaliado conforme item anterior, obtendo as métricas de qualidade de ajuste apresentadas na Tabela 7. As curvas de permanência obtidas a partir do emprego do modelo regional encontram-se representadas nos gráficos da Figura 3.

Tabela 7 - Comparação entre quantis observados e simulados e respectivos erros relativos.

Estação fluviométrica	MAE (m ³ /s)	RMSE (m ³ /s)	NSE	R ²
40800001	24,377	58,052	0,940	0,946
40811100	2,360	7,964	-0,664	0,991
41199998	10,709	38,649	0,745	0,959
41380000	4,235	16,069	0,832	0,938

Figura 3 – Curvas de permanência obtidas para as estações consideradas na etapa de validação a partir de registros fluviométricos (linha preta) e da mediana (linha vermelha) associada ao intervalo de confiança de 95% (sombreado em azul) do modelo regional.





A análise visual dos resultados indica que o modelo regional apresentou um desempenho satisfatório para as estações localizadas na bacia do rio São Francisco (código ANA iniciado pelos dígitos 40; sub-bacia 40), em contraste às localizadas na bacia do rio das Velhas (sub-bacia 41). Como verificado nas estações empregadas na construção do modelo, as curvas de permanência de longo termo obtidas para as estações 40811100 e 40800001 são melhor representadas para permanência situadas no intervalo entre 10% e 90%.

Infere-se que um modelo regional em que as curvas de permanência de longo termo estejam contidas entre os limites dos intervalos de confiança, em especial no trecho intermediário (10% a 90%), possa ser alcançado caso se adote um procedimento de validação cruzada (ex.: *jackknife*) durante a etapa de calibração. Não obstante, admite-se que uma reinterpretação Bayesiana da proposta metodológica poderia conduzir a resultados mais robustos. Independentemente, os resultados obtidos indicam que o *framework* avaliado permite a predição de curvas de permanências de intervalos e de seus respectivos intervalos de confiança. Esse fato, instiga a continuidade do estudo.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar e aplicar um modelo de regionalização de curvas de permanência em bacias não monitoradas da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), com base em variáveis morfométricas. A metodologia, fundamentada no modelo estocástico proposto Castellarin *et al.* (2004a, 2007) baseado no conceito de vazão-índice, demonstrou ser tecnicamente viável.

Os resultados evidenciaram uma concordância satisfatória entre as curvas simuladas e observadas, em especial para bacias cujos os atributos físicos não extrapolavam os limites das estações utilizadas na construção do modelo, com destaque para os coeficientes de eficiência (NSE e R^2), frequentemente superiores a 0,9. A inclusão dos intervalos de confiança obtidos por simulação *bootstrap* contribuiu para uma análise mais transparente da incerteza associada às estimativas, atendendo ao objetivo de estimar a confiabilidade das curvas regionalizadas. A análise também revelou os limites do modelo quando aplicado a bacias com características morfométricas muito distintas do conjunto de calibração, reforçando a importância da definição clara de um domínio de validade.

Conclui-se que a proposta metodológica é aplicável em contextos com baixa densidade de monitoramento fluviométrico e oferece suporte relevante para a gestão hídrica em regiões sujeitas a escassez e incerteza, como a RMBH. Estudos futuros devem explorar a ampliação da área em estudo e a incorporação de variáveis climáticas com vistas ao aprimoramento da capacidade preditiva do modelo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). (2020). “*Manual técnico de hidrologia: procedimentos para análise de séries hidrológicas*”. Brasília: ANA. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br> Acesso em: mai. 2025.
- CASTELLARIN, A.; VOGEL, R.M.; BRATH, A. (2004). “*A stochastic index flow model of flow duration curves*”. Water Resources Research, 40(3), p. W03104. DOI: 10.1029/2003WR002524.
- CASTELLARIN, A.; VOGEL, R.M.; BRATH, A. (2007). “*Flow duration curve regionalization: a critical review and research needs*”. Journal of Hydrology, 360(1–4), pp. 76–90. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.032.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. (2001). *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000*. Belo Horizonte: CPRM.
- HOSKING, J.R.M.; WALLIS, J.R. (1997). *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IBGE–INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2023). *Censo demográfico 2022: população e domicílios*. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>. Acesso em: mai. 2025.
- IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. (2021). *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais – 2020*. Belo Horizonte: IGAM. Disponível em: <https://www.igam.mg.gov.br>. Acesso em: mai. 2025.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. (2021). *Normais climatológicas do Brasil 1991–2020*. Brasília: INMET. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet>. Acesso em: mai. 2025.
- NAGHETTINI, M.; SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG. *Fundamentals of Statistical Hydrology*. [s.l.] Cham Springer International Publishing Springer, 2018.
- PINHEIRO, V. (2009). *Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas*. 142 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SERINALDI, F. (2011). “*Analytical confidence intervals for index flow and flow duration curves*”. Water Resources Research, v. 47, n. 2, p. W02544, 2011. DOI: 10.1029/2010WR009220.
- VOGEL, R.M.; FENNESEY, K.J. (1994). “*Confidence intervals for probability estimates of streamflow duration curves*”. Water Resources Bulletin, 30(5), pp. 851–861. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1994.tb03336.x.