

REGIONALIZAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA A PARTIR DA DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL A 3 PARÂMETROS PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS

Maria Fernanda Corrêa de Mello Ruas¹ & Matheus Fonseca Durães²

Resumo: A disponibilidade das águas superficiais apresenta variabilidade espacial e temporal, na qual os estudos probabilísticos envolvendo essas variáveis são de extrema importância para planejamento e gestão hídrica, atividades agrícolas, planejamento urbano e outras atividades. Este estudo aplicou o modelo Log-Normal a 3 parâmetros (LN-3P) para estimar vazões mínimas Q_{7,10} e Q₉₀ em quatro estações fluviométricas da bacia do Alto Rio Paraopeba (MG). A adequação da distribuição foi validada pelos testes de Kolmogorov-Smirnov (KS) e Chi-Quadrado (λ^2) ao nível de 5% de significância, e não foram detectadas tendências significativas na pluviosidade. Os resultados reforçam a eficiência do LN-3P para a gestão hídrica em bacias com dados limitados e indicam a necessidade de revisão dos critérios de outorga frente à variabilidade hidrológica e mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Distribuição Log-Normal 3P; Gestão de recursos hídricos; Regionalização hidrológica.

Abstract: Surface water availability exhibits spatial and temporal variability, making probabilistic studies involving these variables extremely important for water planning and management, agricultural activities, urban planning, and other activities. This study applied the three-parameter Log-Normal model (LN- 3P) to estimate minimum flows Q_{7,10}, and Q₉₀ at four fluviometric stations in the Upper Paraopeba River basin (MG). The goodness-of-fit of the distribution was validated by the Kolmogorov-Smirnov (KS) and Chi-Square (λ^2) tests at the 5% significance level, and no significant trends in rainfall were detected. The results reinforce the effectiveness of the LN-3P for water management in basins with limited data and indicate the need to revise the granting criteria in light of hydrological variability and climate change.

Keywords: Log-Normal 3P Distribution; Water resources management; Hydrological regionalization.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade das águas superficiais apresenta variabilidade espacial e temporal, necessitando portanto, de abordagens que garanta o seu uso para os

¹ Licenciada em Geografia, Bacharelado em Geografia, Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos – LCRH. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121. Bairro Santa Mônica, Bloco 5M, sala 302C. CEP: 38400-902. Uberlândia, MG. (34) 99892-6578, maria.ruas@ufu.br

² Professor, Laboratório de Climatologia e Recursos Hídricos – LCRH. Universidade Federal de Uberlândia. Avenida João Naves de Ávila, 2121. Bairro Santa Mônica, Bloco 5M, sala 302C. CEP: 38400-902. Uberlândia, MG. (34) 3239-8362, duraes@ufu.br

mais diversos fins, além de garantir sua função ecológica. Nesse sentido, países adotam critérios distintos para regular a água, de modo que ela seja usada de forma racional e que possibilite seu uso futuro.

No Brasil, essa regulação é feita a partir do ordenamento instituído pela Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), através da promulgação da lei nº 9.433/1997 (Brasil, 1997), conforme as condições estabelecidas na bacia hidrográfica.

O critério para alocação de recursos hídricos com fins de outorga baseia-se nas vazões mínimas de referência e no estabelecimento de limites percentuais de utilização dessas vazões por usos da água e para a diluição dos efluentes, comumente chamado de critérios de outorga.

Para Harris et al. (2000), o critério da vazão mínima de referência é um mecanismo adequado para a proteção dos rios, uma vez que essas alocações são feitas a partir de uma vazão de base de pequeno risco.

Segundo Silva et al. (2006), todo esse processo é dependente dos sistemas jurídicos, representados pelos comitês de bacia e agências reguladoras, e dos sistemas econômicos. Não obstante, a disponibilidade hídrica passa a ser parte fundamental dos estudos hidrológicos, sendo representada pelas vazões de médias e mínimas (Pruski et al., 2015).

No Brasil, cada estado adotado critérios próprios para o estabelecimento das vazões de referência para outorga, sendo os mais comuns a vazão mínima da média móvel de sete dias consecutivos e um tempo de recorrência de 10 anos ($Q_{7,10}$) e aquela baseada no valor correspondente à vazão que passa 90% do tempo em uma curva de permanência (Q_{90}).

Como apenas um percentual das vazões mínimas de referência é outorgável, há uma limitação do uso da água principalmente nos períodos de menor disponibilidade hídrica, afetando diferentes usuários e suas atividades econômicas e agravando-se com o aumento da demanda ao longo dos anos,

necessitando, portanto, o monitoramento contínuo e a disponibilização de dados fluviométricos.

Segundo Amorim et al. (2020), um dos principais fatores para uma efetiva gestão dos recursos hídricos é em relação à rede de monitoramento fluviométrico. Embora o monitoramento seja importante para estudos de gestão das águas, os dados de vazão ainda são um fator limitante para a maior parte das bacias brasileiras (Zaman et al., 2012), principalmente em pequenas bacias, as quais apresentam uma baixa densidade, além de serem acompanhadas de uma série histórica curta, insuficiente e com falhas de preenchimento (Beskow et al., 2014). Para suprir essa ausência de dados, podem ser utilizados técnicas expeditas como o método de proporção de área e de regionalização de vazões, conforme sugerido por Silva et al. (2006), uma vez que estes métodos são amplamente utilizados e conhecidos.

A regionalização hidrológica compreende um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais com dados escassos ou inexistentes. Um dos pontos a ser observado ao usar essa técnica, está na seleção dos postos de observação, os quais devem conter pelo menos 5 anos de dados (Silva et al., 2006) e apresentar um conjunto de postos representativos do comportamento das vazões em estudo na bacia (Tucci, 2001). Nesse tipo de estudo, devem ser avaliadas as características morfométricas e climáticas que mais explicam a distribuição da vazão. Para Tucci et al. (1998), são exemplos dessas características a área da bacia, o comprimento do talvegue principal, a densidade de drenagem, tempo de concentração, altitude média e a precipitação.

Embora não se defina uma distribuição de probabilidades a priori (Euclides, 1992), para estimar o valor da $Q_{7,10}$ em determinado ponto, utiliza-se dados estatísticos obtidos de uma série histórica de vazões e ajustada comumente pela distribuição Weibull ou, através da metodologia de regionalização de vazões mínimas (IGAM, 2010).

Em estudos envolvendo vazões mínimas, Silva et al. (2006) aplicaram os modelos LN-3P, Weibull e Gumbel na região do Alto rio Grande, em Minas Gerais. A distribuição selecionada como a mais adequada foi a LN-3P por produzir menores valores de qui-quadrado calculado em 6 das 7 estações analisadas. Outro estudo que também demonstrou resultado semelhante para a distribuição LN-3P foi o de Euclides (1992), que avaliou a bacia do rio Juatuba, também em Minas Gerais. Outros autores também demonstraram uma tendência de o modelo Log-normal ter uma predominância para vazões mínimas (Pinheiro, 2009; Lopes et al., 2017; Amorim et al.; 2020).

Diante disso, objetivou-se com este trabalho, estudar a aplicação do modelo de probabilidade LN-3P às séries históricas de vazões mínima média de sete dias consecutivos e mínima de permanência a 90%, para 4 estações fluviométricas na região do Alto rio Paraopeba, para desenvolver modelos matemáticos para regionalização dessas vazões, considerando a área como atributo principal e, com isso, avaliar impacto dos critérios de vazão outorgável na expansão da demanda hídrica.

A área drenada da sub-bacia hidrográfica do Alto rio Paraopeba corresponde a aproximadamente $5.027,83 \text{ Km}^2$ (IGAM, 2010), estendendo-se do rio Cristiano Otoni a Belo Vale (Figura 1). A região está situada a sudeste do estado de Minas Gerais, na qual corresponde a uma das três subdivisões da bacia hidrográfica

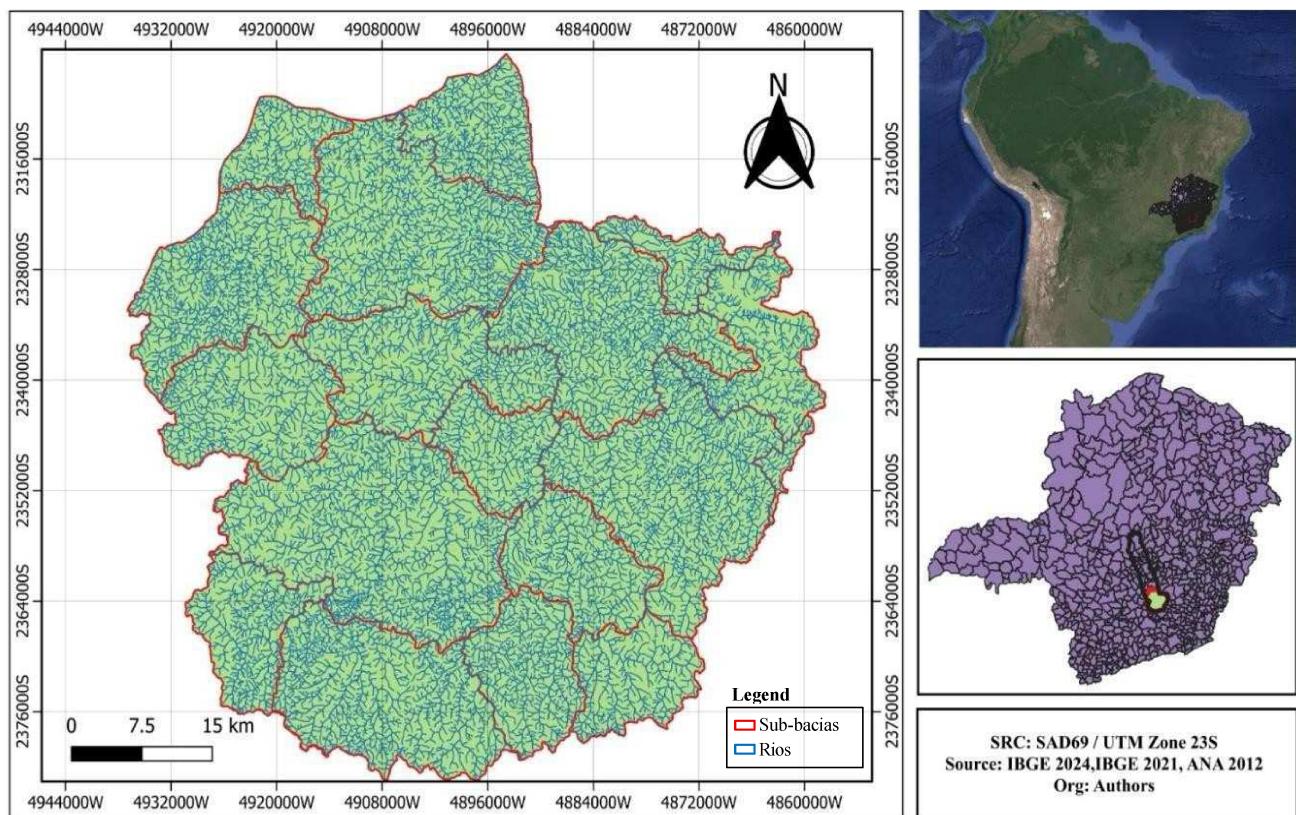
do rio Paraopeba.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área drenada da sub-bacia hidrográfica do Alto rio Paraopeba corresponde a aproximadamente 5.027,83 Km² (IGAM, 2010), estendendo-se do rio Cristiano Otoni a Belo Vale (Figura 1). A região está situada a sudeste do estado de Minas Gerais, na qual corresponde a uma das três subdivisões da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Figura 1: Localização da área de estudo, sub-bacia do Alto rio Paraopeba.



Fonte: RUAS; SILVA; DURÃES (2024)

A bacia possui grande importância ambiental, pois abriga áreas de preservação permanente, unidades de conservação e formações vegetais características, como campos rupestres. Ainda assim, apresenta problemas relacionados à

pressão antrópica, como o desmatamento, mineração, agropecuária, alto crescimento urbano e rompimento de barragens (Lima; Streicher, 2023).

O clima da região apresenta considerável variabilidade, caracterizando-se pela presença das tipologias Cwb, Cwa e Aw segundo a classificação de Köppen.

Essa diversidade climática reflete-se diretamente no regime de precipitação, que exibe uma amplitude significativa, variando de 1.800 mm anuais nas regiões de cabeceira a aproximadamente 1.150 mm na área próxima à foz, no reservatório de Três Marias. O regime pluviométrico é marcadamente sazonal, com os períodos mais chuvosos concentrados nos meses de verão, enquanto os menores índices pluviométricos são registrados entre maio e agosto. Especificamente na bacia do alto Paraopeba, predomina o clima do tipo Cwb, subtropical de altitude, caracterizado por inverno seco e verão ameno, com uma temperatura média anual de 23°C.

2.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise dos dados de precipitação, foi utilizado a estatística inferencial não paramétrica para a identificação de tendências ou mudanças no comportamento médio da chuva na escala anual e decadal com significância estatística em 8 estações fluviométricas (Tabela 1). Ressalta-se que as estações pluviométricas selecionadas foram de acordo com a sua localização geográfica, de maneira que os registros de precipitação representassem melhor o regime de chuvas da bacia, além do critério estabelecido por Tucci (2002), em que são selecionadas estações com o período de observação de no mínimo 10 anos.

Tabela 1 – Postos pluviométricas selecionados.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Série Histórica
2043018	Carandaí	-20,9558	-43,8008	1983-2015
2043013	Congonhas Linígrafo	-2052	-43,83	1942-2009
2043005	Conselheiro Lafaiete	-20,63	-43,75	1970-2023
2044007	Entre Rios de Minas	-20,6611	-44,0705	1969-2023
2044009	Fazenda Campo Grande	-20,63	-44,43	1977-2020
2044038	Resende Costa	-20,92	-44,24	1976-2017
2044040	Usina João Ribeiro	-20,64	-44,05	1974-2009
2144020	Usina São João del Rei	-20,92	-44,21	1962-2022

Fonte: ~~Hidroweb/ANA~~

Para avaliar a existência de tendência no regime de precipitação dado os recentes cenários de mudanças climáticas, foi adotado o teste de Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), dado pela seguinte equação:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} sinal(x_j - x_i) \quad (1)$$

Em que S é o resultado da soma das contagens de $(x_j - x_i)$; x_j é o primeiro valor após x_i e n é o número de dados da série temporal. Assim, para cada par de dados são atribuídos os seguintes valores:

$$sinal = \begin{cases} +1 & se (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & se (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & se (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Segundo o teste, a distribuição de probabilidade da estatística S tende à normalidade quando se tem uma amostra com grande número de observações, com média zero e variância dada por:

$$VAR(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

Onde t_p é o número de dados com valores iguais em certo grupo, q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados em um grupo p. Por fim, a estatística do teste de Mann-Kendall é baseada no valor da variável ZMK, conforme a seguinte equação:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{VAR(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Em relação às estações fluviométricas, elas foram analisadas e selecionadas seguindo os seguintes critérios: não apresentar falhas maiores que 15 dias consecutivos no período de estiagem e ter, no mínimo, 10 anos de observações contínuas. Além disso, foi aplicado os testes não paramétricos de aleatoriedade, estacionariedade, independência e homogeneidade conforme preconizado em Mello e Silva (2013).

O ajuste das distribuições de probabilidade foi realizado pelo método dos momentos, a partir de dados obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) – plataforma *Hidroweb*. A amostra compreende quatro estações pluviométricas localizadas na bacia do alto rio Paraopeba (Tabela 2).

Tabela 2 – Postos fluviométricas utilizados

Código	Estação	Latitude	Longitude	Área de drenagem (km ²)	Série Histórica
40710000	Belo Vale	-20,4081	-44,0211	2690	1966-2022
40579995	Congonhas Linígrafo	-20,5186	-43,8356	613	1988-2022
40549998	São Brás do Suaçuí - Montante	-20,6039	-43,9086	446	1983-2022
40680000	Entre Rios de Minas	-20,6603	-44,0719	469	1936-2022

Fonte: *Hidroweb/ANA*

Para cada série histórica de dados foram ajustados os parâmetros da distribuição Log-Normal a 3 parâmetros da função densidade de probabilidade (FDP), sendo representada pela seguinte equação:

$$f_x = \frac{1}{(x-\beta)\cdot\sigma_n\cdot\sqrt{2\cdot\pi}} \cdot e^{0,5\cdot\left(\frac{\ln(x-\beta)-\mu_n}{\sigma_n}\right)^2} \quad (5)$$

no qual β é o parâmetro de posição, σ_n é parâmetro de forma e μ_n é o de escala da

distribuição LN3P.

Com os parâmetros estimados pelo método dos momentos, procedeu-se à avaliação do ajuste de probabilidade em relação aos dados observados por meio dos testes de aderência Kolmogorov-Smirnov (KS), teste qualitativo, e Chi- quadrado (λ^2), teste quantitativo, adotando-se nível de significância de 5%conforme a metodologia proposta por Mello et al. (2020). A adequação dos modelos probabilísticos às séries anuais foi verificada a partir desses testes, amplamente empregados na literatura para avaliar a qualidade do ajuste de distribuições de probabilidade (Beskow et al., 2015; Sangigolo, 2008; Back et al., 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quanto à identificação de tendências temporais na área de estudo para os dados de chuva, os resultados dos testes de Mann-Kendall mostram que todas as estações avaliadas não apresentaram tendência significativa de elevação ou redução de pluviosidade ao longo dos anos (valor-p > 0,5), demonstrando assim, que não foi detectado algum tipo de variação considerado consistente para a precipitação nas escalas analisadas, com os dados se comportando de forma mais aleatória e estável. Comportamento similar foi observado em outros trabalhos, como o de Nunes e Silva (2022) que analisaram o regime de precipitação mensal e sazonal em Nova Lima – MG e de Salviano et al. (2016) que mostraram que em mais de 70% do território brasileiro não apresentaram algum tipo de tendência significativa.

Barroso et al (2020) apresentou resultados similares em seu estudo na bacia hidrográfica do Rio São Francisco, a maioria das estações pluviométricas (54,8%) não registrou mudanças significativas em suas séries históricas de precipitação. Essa ausência de tendência em ambos os estudos significativa pode ser atribuída à elevada variabilidade interanual intrínseca ao regime pluviométrico do bioma Cerrado, a qual se caracteriza pela alternância entre períodos de elevada pluviosidade e estiagens pronunciadas. Este padrão de variabilidade climática, marcado pela irregularidade na distribuição das chuvas, foi igualmente identificado em outros estudos conduzidos no domínio do Cerrado, corroborando a recorrência deste comportamento (Silva, Galvâncio, Nóbrega, 2011).

Diante dos resultados de não apresentar tendência nas séries pluviométricas, optou-se, neste trabalho, fazer a regionalização da vazão a partir da regressão linear simples.

A distribuição Log-normal a 3 parâmetros foi ajustada para cada uma das quatro estações fuviométricas. A aplicação da LN3P às séries históricas de vazões permitiu a estimativa consistente dos valores referência Q_{7,10} e Q₉₀ para as estações analisadas (Tabela 3).

Tabela 3 - Vazões Q_{7,10} e Q₉₀ e área de drenagem das estações fuviométricas selecionadas na bacia do Alto Rio Paraopeba (MG).

Estação	Q _{7,10} (m ³ /s)	Q ₉₀ (m ³ /s)	Área (km ²)	Testes de aderência
Entre Rios de Minas	1,27	1,73	469	KS = 0,68 λ ² = 0,81
Belo Vale	8,61	8,88	2690	KS = 0,21 λ ² = 0,89
São Brás do Suaçuí	1,14	1,65	446	KS = 0,95 λ ² = 0,86
Congonhas Linígrafo	1,60	1,89	613	KS = 0,23 λ ² = 0,99

Fonte: Ruas (2025).

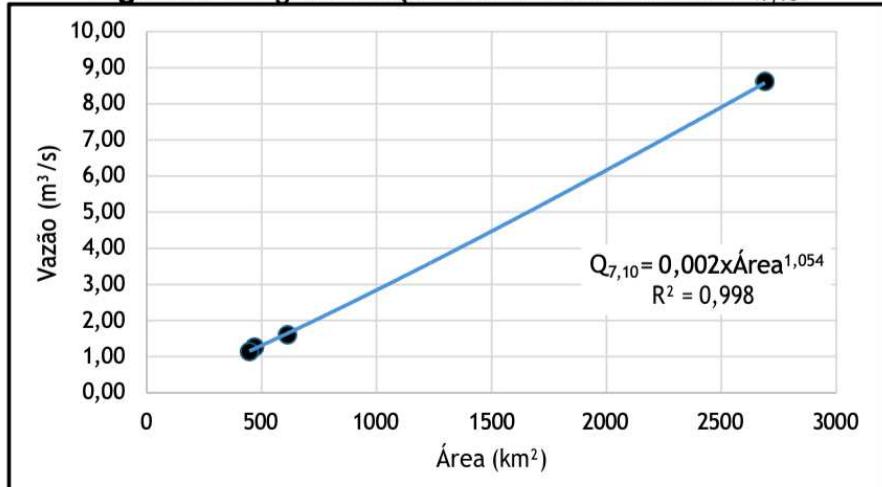
A análise das vazões Q_{7,10} e Q₉₀ revela padrões hidrológicos distintos entre as estações da bacia. A estação de Belo Vale apresenta as maiores vazões absolutas, Q_{7,10} com 8,61 m³/s e Q₉₀ com 8,88 m³/s, condizentes com sua extensa área de drenagem de 2.690 Km². As demais estações, com áreas entre 446-613 Km², exibem vazões menores, variando de 1,14 a 1,73 m³/s para Q_{7,10} e de 1,65 a 1,89 m³/s para Q₉₀. Todas as estações apresentam uma Q₉₀ superior a Q_{7,10}, com destaque à São Brás do Suaçuí (Q₉₀ 45% superior ao Q_{7,10}), indicando maior variabilidade sazonal, enquanto Congonhas Linígrafo mostra a menor diferença relativa (18%), apresentando um regime hídrico regular.

Os testes de aderência KS e λ² indicaram que a distribuição teórica adotada não difere significativamente dos dados observados, confirmando a adequação do ajuste probabilístico.

A partir das séries de vazão ajustadas pela distribuição LN3P, foi possível estabelecer equações de regionalizações mínimas de referência. As relações entre a área de drenagem e as vazões Q_{7,10}, bem como entre a área e as vazões Q₉₀, apresentaram elevados coeficientes de determinação ($R^2 > 0,998$), indicando um comportamento

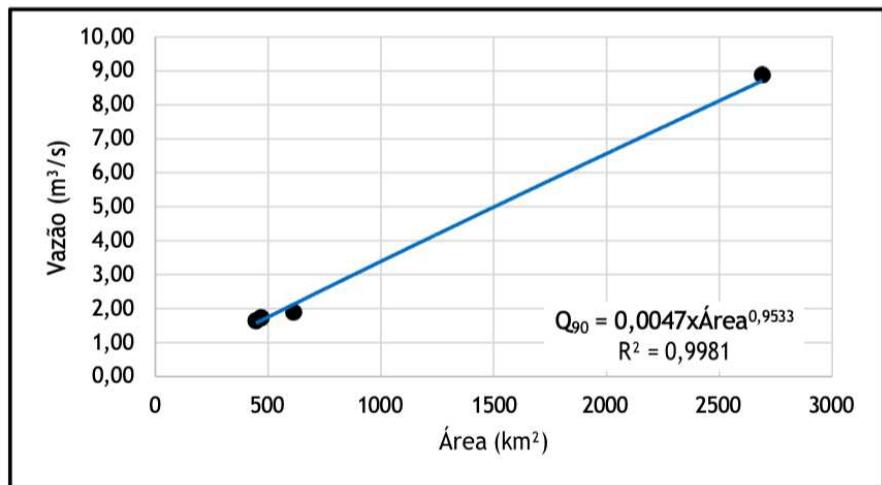
quase linear e consistência hidrológica dos modelos, conforme indicado nas figuras 1 e 2. Tais resultados demostram que a distribuição LN3P é apropriada para a modelagem das vazões mínimas na bacia do Alto Rio Paraopeba.

Figura 2 - Regionalização das vazões mínimas $Q_{7,10}$.



Fonte: Ruas (2025).

Figura 3 - Regionalização das vazões mínimas Q_{90} .



Fonte: Ruas (2025).

Granemann (2016) indicou que, na análise de frequência das vazões mínimas na bacia hidrográfica do rio Iguaçu - PR, a distribuição Log-Normal 2 Parâmetros (LN2P) apresentou melhor ajuste em quase todas as estações, conforme teste de Qui-Quadrado, em comparação com a distribuição Weibull (W2).

Em contrapartida, Chaves et al (2006) aplicou o modelo LN3P às séries históricas de vazões mínimas diárias anuais e mínimas de 7 dias consecutivos na região da Usina Hidrelétrica de Camargos – MG, originando equações de regionalização baseadas

nas características morfometrias e climáticas das bacias. Também, Silva et al. (2010) avaliou metodologias de regionalização das vazões mínimas de referência (Q7,10, Q90, Q95) na bacia do rio São Francisco, indicando que a distribuição LN-3P apresentou melhor ajuste para a Q7,10, sendo fundamental para regionalizações hidrológicas em áreas heterogêneas da bacia. Ambos os estudos destacaram a adequação do modelo LN-3P para representar vazões mínimas, com ajuste estatísticos coerentes para outorga e gestão hídrica. O regime de outorga para utilização dos recursos hídricos em Minas Gerais encontra-se disciplinado pelo Decreto Estadual nº 47.705/2019, pela Portaria IGAM nº 48/2019 e pelas Deliberações Normativas expedidas pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG).

A vazão de referência Q7,10 é adotada como parâmetro hidrológico essencial na quantificação da disponibilidade hídrica, sendo estimada por intermédio de metodologias de regionalização hidrológica desenvolvidas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), baseadas em séries temporais pluviométricas e fluviométricas.

Os limites quantitativos para captação e derivação de águas superficiais apresentam variabilidade em função de características específicas de cada bacia hidrográfica, do perfil do uso demandado — consuntivo ou não consuntivo e das normativas complementares formalizadas nos Planos Diretores de Recursos Hídricos. A estipulação da disponibilidade hídrica outorgável objetiva assegurar a preservação das vazões remanescentes, cruciais para a manutenção do equilíbrio hidrológico dos corpos d'água, promovendo a sustentabilidade dos usos múltiplos e a conservação dos ecossistemas aquáticos. Tal diretriz está em consonância com os preceitos basilares da Política Estadual de Recursos Hídricos, que enfatiza a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos.

Todavia, percebe-se o destaque a sazonalidade das demandas e a importância da regionalização para o acompanhamento e ajuste dos limites de outorga frente às variações climáticas (IGAM, 2025). Silva et al (2006) indicam a necessidade de flexibilização desses critérios e adoção de indicadores variados de vazões mínimas, vinculados a cenários projetados do clima e uso da água para garantir segurança hídrica e conservação de ecossistemas. A vulnerabilidade dos recursos hídricos frente às mudanças climáticas tem sido reconhecida pelo IGAM, especialmente no que tange à insuficiência dos critérios de outorga pautados em percentuais fixos da vazão de referência, diante do aumento da variabilidade hidrológica e da intensificação de

eventos extremos associados às alterações climáticas. Nesse contexto, a política estadual de recursos hídricos tem evoluído para incorporar abordagens dinâmicas e adaptativas, pautadas na atualização contínua das séries históricas fluviométricas e nos processos de regionalização hidrológica, conforme exposto no Relatório de Disponibilidade Hídrica Superficial de Minas Gerais (2021).

Consoante às Deliberações Normativas CERH-MG nº 49/2021 e nº 52/2023, a definição da disponibilidade hídrica outorgável passou a considerar a vazão de referência regionalizada, aplicando percentuais variáveis segundo a bacia hidrográfica e o tipo de uso, em substituição ao limite fixo anteriormente estabelecido em 30%.

Essas atualizações normativas têm por finalidade fortalecer a segurança hídrica e assegurar a manutenção das vazões ecológicas mínimas, alinhando-se aos preceitos da Política Estadual de Recursos Hídricos e às diretrizes para adaptação às mudanças climáticas, promovendo, assim, uma gestão hídrica mais resiliente e sustentável.

Estudos recentes têm evidenciado a necessidade de atualização dos modelos estatísticos e critérios de outorga para estimativas de vazões mínimas, em função dos impactos das mudanças climáticas sobre a variabilidade hidrológica. Em Minas Gerais, análises recentes têm demonstrado alterações significativas no regime pluviométrico, caracterizadas pela redução da precipitação média anual e pela maior concentração das chuvas em eventos intensos e irregulares. De acordo com o Relatório de Disponibilidade Hídrica Superficial de Minas Gerais (IGAM, 2021) e o Diagnóstico da Situação dos Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais (CPRM, 2022), essa tendência resulta na diminuição da infiltração e da recarga subterrânea, intensificando a redução das vazões mínimas e médias anuais observada em diversas bacias hidrográficas do estado. Pesquisas conduzidas por Silva et al. (2022) e Ribeiro et al. (2021) corroboram esses achados, indicando aumento da variabilidade intra e interanual das precipitações, com períodos secos mais prolongados e chuvas concentradas em poucos eventos extremos, o que acentua a vulnerabilidade hídrica e compromete a sustentabilidade dos usos múltiplos da água.

Nesse sentido, Barroso et al. (2020) sugere a flexibilização dos critérios rígidos de outorga e a incorporação de múltiplos indicadores associados a cenários climáticos futuros no processo de regionalização. Apesar de os resultados do presente estudo no Alto Rio Paraopeba confirmarem a adequação do modelo LN-3P para a previsão das vazões mínimas e a ausência de tendências significativas na pluviosidade

histórica, o contexto de mudanças climáticas, conforme salientado por Carvalho et al. (2022) e outros, reforça a necessidade de revisitar e atualizar continuamente as equações de regionalização, de forma a garantir maior robustez na gestão hídrica e sustentabilidade ambiental frente às incertezas projetadas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo avaliou a aplicação do modelo LN-3P às séries históricas de vazões mínimas Q7,10 e Q90 em 4 estações da bacia do Alto Rio Paraopeba, desenvolvendo modelos de regionalização a partir de características morfométricas e analisando os impactos dos critérios de outorga na gestão hídrica.

Os resultados indicam que a distribuição LN-3P é adequada para o ajuste das vazões mínimas, confirmado pelos testes de aderência KS e Qui-quadrado. A área de drenagem foi identificada como o principal determinante para maiores vazões. As equações matemáticas desenvolvidas demonstram precisão para regionalização, evidenciando uma relação linear entre a área e as vazões mínimas, com suporte adicional da análise temporal que não identificou tendências significativas na pluviosidade pelo teste de MK.

A aplicabilidade da LN-3P mostra-se relevante para a gestão de recursos hídricos, especialmente em contextos com carência de dados fluviométricos, corroborando estudos anteriores sobre sua eficácia.

Considerando as evidências robustas da literatura referentes aos impactos das mudanças climáticas sobre as vazões mínimas, ressalta-se a imperiosa necessidade da atualização contínua das equações de regionalização e dos critérios de outorga. Recomenda-se a adoção integrada de múltiplos indicadores hidrológicos, tais como as vazões de referência Q7,10, Q90, Q95 e Q98. Cada um desses indicadores hidrológicos expressa aspectos

distintos da disponibilidade hídrica: a Q7,10 é amplamente adotada como critério regulatório para outorga, representando a vazão mínima média de sete dias consecutivos com tempo de recorrência de 10 anos; a Q90 reflete a vazão que ocorre ou é superada em 90% do tempo, indicando a permanência da vazão ao longo do ano; já as vazões Q95 e Q98 caracterizam condições hidrológicas mais restritivas e sensíveis a eventos extremos

de estiagem, sendo assim essenciais para a avaliação de cenários futuros relacionados às mudanças climáticas.

A integração desses múltiplos parâmetros, combinada com projeções climáticas, fortalece a robustez dos processos de outorga e contribui para a sustentabilidade da gestão hídrica na bacia do Alto Rio Paraopeba.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Plataforma Hidroweb. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.snh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: jun. 2025.

AGÊNCIA PEIXE VIVO. Paraopeba: afluentes do São Francisco. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://l1nq.com/bm1BW>. Acesso em: set. 2025.

AMORIM, J. S.; JUNQUEIRA, R.; MANTOVANI, V. A.; VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; BENTO, N. L. Streamflow regionalization for the Mortes river basin upstream from the Funil Hydropower Plant, MG. Ambiente & Água, v. 15, n. 3, p. e2495, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2495>.

BARROSO, G. R.; FERREIRA, D. B.; CORDOVA, J. E.; DANTAS, M. S.; OLIVEIRA, S. C. Análise de séries temporais pluviométricas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco. In: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 3., 2020, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: CBHSF, 2020.

BESKOW, S.; MELLO, C. R.; FARIA, L. C.; SIMÕES, M. C.; CALDEIRA, T. L.; NUNES, G. S. Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 7, p. 748- 754, 2014. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000700012>.

BRASIL. Lei Federal n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

CALDEIRA, T. L.; BESKOW, S.; MELLO, C. R. de; FARIA, L. C.; SOUZA, M. R. de; GUEDES, H. A. S. Modelagem probabilística de eventos de precipitação extrema no estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 197-203, 2015.

CARVALHO, R. F. et al. Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas do semiárido brasileiro. Universidade de Brasília, 2022. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/34984/1/2022_MathieuDiasGirard_tcc.pdf.

CHAVES, H. M. L.; BRAGA, B.; PEREIRA, J. S. Regionalização de vazões mínimas e aplicação de distribuições probabilísticas na bacia da UHE de Camargos, MG. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 1, p. 374- 380, 2006.

Costa, G. K. L., Blanco, C. J. C., Soares, A. C. L., Cruz, J. S., & Mendonça, L. M. (2023). Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. Revista de Gestão de Água da América Latina, 20, e6. <https://doi.org/10.21168/rega.v20e6>

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Diagnóstico da Situação dos Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2022.

EUCLYDES, H. P. Estudo da aplicação de distribuições de probabilidade a séries de vazões mínimas na bacia do rio Juatuba, MG. Viçosa: UFV, 1992.

FERREIRA, D. B.; BARROSO, G. R.; CORDOVA, J. E.; DANTAS, M. S.; OLIVEIRA, S. C. Análise de séries temporais pluviométricas na porção mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco. In: SIMPÓSIO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 3., 2023, Belo Horizonte. Belo Horizonte: CBHSF, 2023.

GRANEMANN, A. R. B. Análise de frequência de vazões mínimas. 2016. Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

HARRIS, N. M.; GURNELL, A. M.; HANNAH, D. M.; PETTS, G. E. Classification of river regimes: a context for hydroecology. Hydrological Processes, v. 14, p. 2831-2848, 2000.

IGAM. Manual técnico e administrativo de outorga de direito de uso de recursos hídricos no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2010. 113 p.
INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba. Belo Horizonte: IGAM, 2010. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/>. Acesso em: jul. 2025.

KENDALL, M. G., Rank Correlation Measures. Ed. Charles Griffin. London, 1975
LOPES, T. R.; ZOLIN, C. A.; PRADO, G.; PAULINO, J.; ALMEIDA, F. T. Regionalization of maximum and minimum flow in the Teles Pires basin, Brazil. Engenharia Agrícola, v. 37, n. 1, p. 54-63, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v37n1p54-63/2017>.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. Econometrica 13, 245-259, 1945
MELLO, C. R., & SILVA, A. M. de. (2013). Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas. Lavras: Ed. UFLA. 455p.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. Hidrologia de Superfície: princípios e aplicações. 2. ed. Lavras: UFLA, 2020. 531 p.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM. Atlas Digital das Águas de Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2009. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/>. Acesso em: set. 2025.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Anexo 5.4. [S.d.]. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/>. Acesso em: jun. 2025.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM). Outorga. [S.d.]. Disponível em: <https://igam.mg.gov.br/outorga>. Acesso em: jul. 2025.

NUNES, D. R. C.; SILVA, P. A. L. Análise de tendência das séries temporais de precipitação pluviométrica do município de Nova Lima/MG. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.13, n.12, p.61-68, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.012.0006>

PINHEIRO, V. B. Calibração de um modelo chuva-vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico a partir de curvas de permanência sintéticas. 2009. 330 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

PRUSKI, F. F.; RODRIGUES, R. D. G.; NUNES, A. A.; PRUSKI, P. L.; SINGH, V. P. Low-flow estimates in regions of extrapolation of the regionalization equations: a new concept. Engenharia Agrícola, v. 35, n. 5, p. 808-816, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n5p808-816/2015>.

RICARDO, G. DA S., RAFAELI NETO, S. L., CAMPOS, C. G. C., & SCHINA, B. ÁLVARO. (2020). Prognósticos de alterações nas vazões de base como meio de suporte ao gerenciamento de recursos hídricos. Águas Subterrâneas , v. 34, n.1, p. 112–124. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29593>

RUAS, Maria Fernanda Corra de Mello; SANTOS, Lucas de Sousa; DURES, Matheus Fonseca. Estimativa probabilística de precipitação decendial mínima na bacia hidrográfica do Alto Rio Paraopeba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2024.

SALVIANO, M. F; GROOPPO, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SILVA, A. M.; OLIVEIRA, P. M.; MELLO, C. R.; PIERANGELI, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto rio Grande, Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415>

SILVA, D. D.; MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R.; et al. Regionalização de vazões mínimas de referência na bacia do rio São Francisco. Engenharia Agrícola, v. 30, n. 1, p. 392-403, 2010.

SILVA, R. M.; GALVÍNCIO, J. D.; NÓBREGA, R. S. Análise da precipitação no município de Cabrobó-PE. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, n. 21, p. 1-15, dez. 2011. Disponível em:

https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/361/310. Acesso em: set. 2025.

SOUZA, S. M. T. Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Hidrosistemas / Copasa, 1993. 264 p.

TUCCI, C. E. M. (2002). Regionalização de vazões . Porto Alegre: Ed. UFRGS.

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2001. p. 573-620.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). Hidrotec: metodologia e resultados. Viçosa, [s.d.]. Disponível em: <http://www.hidrotec.ufv.br/>. Acesso em: jul. 2025.

ZAMAN, M. A.; RAHMAN, A.; HADDAD, K. Regional flood frequency analysis in arid regions: A case study for Australia. *Journal of Hydrology*, v. 475, p. 74-83, 2012.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.08.054>