

Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Exatas
Departamento de Estatística
Programa de Especialização em *Data Science* e *Big Data*

Ana Carolina Canossa Becker

**Determinação de vazões em corpos
hídricos com foco em eventos extremos**

Curitiba
2024

Ana Carolina Canossa Becker

**Determinação de vazões em corpos hídricos com
foco em eventos extremos**

Monografia apresentada ao Programa de
Especialização em Data Science e Big Data da
Universidade Federal do Paraná como requisito
parcial para a obtenção do grau de especialista.

Orientador: Anderson Ara

Curitiba

2024

Determinação de vazões em corpos hídricos com foco em eventos extremos

Ana Carolina Canossa Becker¹
Anderson Ara²

Resumo

A obtenção de dados hidrológicos enfrenta desafios por conta dos altos custos de redes hidrométricas. Dentro desse contexto, a busca por metodologias de transferência de informações dentro de bacias hidrográficas apresenta relevância para estudos e projetos na área de recursos hídricos. Este estudo utilizou a metodologia "Index Flood" para estimar vazões em pontos onde não há monitoramento contínuo de longo prazo nas confluências de afluentes com o rio das Velhas. Essa regionalização foi realizada a partir de séries históricas de quatro estações fluviométricas. As séries de vazões máximas das estações selecionadas foram homogêneas e aderentes à distribuição de Gumbel, permitindo a criação de uma cheia índice representativa. A partir desta cheia índice, os valores para o Tempo de Retorno de 2 anos foram redimensionados por meio da regressão linear entre as vazões médias e a área de drenagem dos pontos de interesse, resultando em vazões estimadas entre 57,61 m³/s e 357,92 m³/s.

Palavras-chave: Cheia-índice, regionalização de vazões, teste de homogeneidade.

Abstract

Obtaining hydrological data faces challenges due to the high costs of hydrometric networks. Within this context, the search for methodologies to transfer information within watersheds is relevant for studies and projects in the water resources engineering field. This study used the 'Index Flood' methodology to estimate flows at points where there is no continuous long-term monitoring at the confluences of tributaries with the Velhas River. This regionalization was carried out using historical series from four river gauge stations. The maximum flow series from the selected stations were homogeneous and adhered to the Gumbel distribution, allowing the creation of a representative index flood. From this index flood, the values for a 2-year return period were obtained by linear regression between the average flows and the drainage area of the points of interest, resulting in estimated flows between 57.61 m³/s and 357.92 m³/s.

Keywords: Index flood, flow regionalization, homogeneity test.

¹Aluna do programa de Especialização em Data Science & Big Data

²Professor do Departamento de Estatística - DEST/UFPR.

1 Introdução

A obtenção de dados com variabilidade espacial e temporal para estudos em hidrologia e recursos hídricos enfrenta significativas dificuldades devido aos elevados custos associados à implantação, operação e manutenção de redes hidrométricas. Esta realidade incentivou a busca por metodologias de transferência de informações de um local para outro dentro da bacia hidrográfica [1]. Segundo o referido autor, a regionalização consiste em um conjunto de ferramentas que exploram ao máximo das informações existentes, visando a estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou com dados insuficientes.

O "Index Flood", ou "Cheia Índice", é uma metodologia amplamente utilizada em hidrologia para a análise regional de frequências de eventos de inundação. Esta técnica, apresentada por Dalrymple [2], baseia-se na premissa de que as características das cheias em diferentes locais de uma região hidrologicamente homogênea podem ser descritas por uma distribuição estatística comum, ajustada por um fator de escala local.

Ibeje e Ekwueme [3] mostraram a aplicação dessa metodologia e indicaram homogeneidade de seis estações fluviométricas estudadas e obtiveram superestimação dos valores de vazão obtidos a partir da curva regional em relação a valores medidos no local, o que, segundo os autores, não invalida o modelo, mas evidencia a necessidade de séries históricas mais longas e maior refinamento da aplicação do método.

A ampla gama de estudos recentes visando a estimativa de vazões extremas por métodos estatísticos [4, 5, 6, 7] indica ainda a necessidade de aprofundamento relativo à metodologias e suas aplicações.

Dentro desse contexto, o objetivo deste trabalho consiste na generalização e aplicação de informações de séries hidrológicas de quatro estações fluviométricas para estimar características hidrológicas em outros pontos da região avaliada.

2 Materiais e Métodos

A consulta das estações fluviométricas e suas respectivas séries de dados foi realizada no portal Hidroweb [8]. Foram selecionadas estações de monitoramento fluviométrico no rio das Velhas, situado no estado de Minas Gerais, que tivessem séries históricas de vazões maiores do que 30 anos e áreas de drenagem compatíveis com as áreas das bacias incrementais selecionadas. As estações selecionadas foram apresentadas na Figura 1 e na Tabela 1, que apresenta também os dados de cada estação e suas respectivas áreas de drenagem. Vale destacar que essas áreas, que diferem das áreas de drenagem disponibilizadas no portal Hidroweb [8], foram obtidas por meio do modelo digital de superfície gratuito Copernicus DEM [9], com base nas localizações descritas nas fichas descritivas das estações fluviométricas disponíveis no portal supracitado.

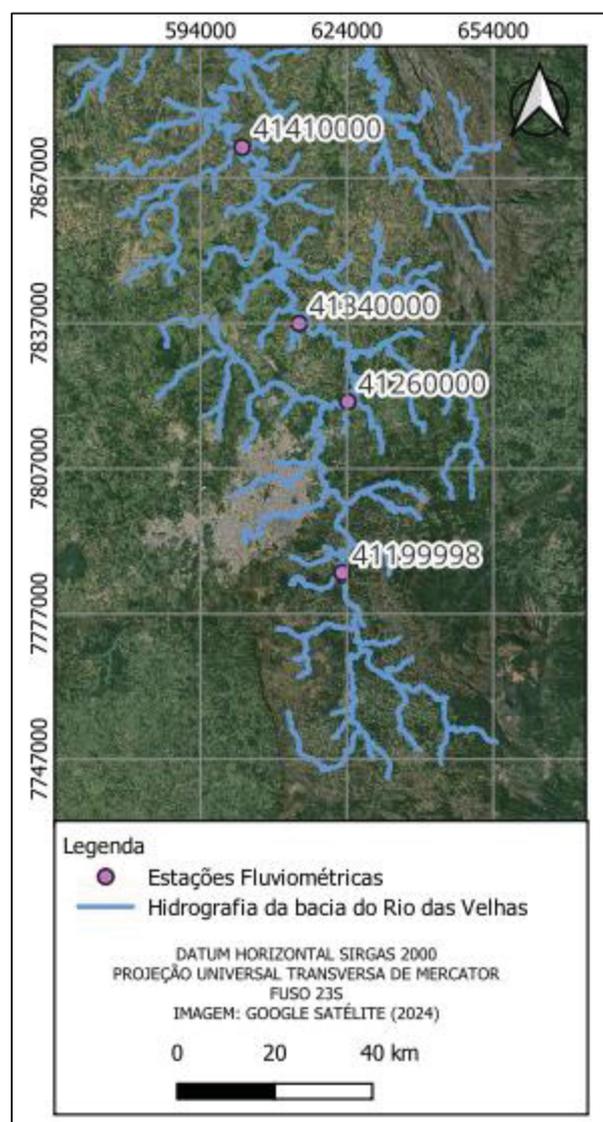


Figura 1: Localização das estações fluviométricas

Tabela 1: Estações fluviométricas selecionadas

Código	Nome	Latitude	Longitude	Área de Drenagem (km ²)
41199998	Honório Bicalho	-20,0239	-43,8228	1675
41260000	Pinhões	-19,7050	-43,8147	3732
41340000	Ponte Raul Soares	-19,5597	-43,9108	4867
41410000	Jequitibá	-19,2172	-44,0247	6509

A aplicação do método de index-flood requer um determinado grau de homogeneidade entre as estações que compõem a curva regional de distribuição de frequências. O método assume que as vazões adimensionais (razão entre a vazão e o fator de adimensionalização) em uma região hidrológicamente homogênea obedecem a uma distribuição de probabilidades única, ou seja, uma mesma distribuição de frequência para os dados avaliados, a menos de um fator de escala local denominado index-flood ou fator de adimensionalização. Logo, a hipótese de que as estações selecionadas são parte de uma região hidrológica homogênea foi avaliada pelo teste de homogeneidade descrito em Dalrymple [2].

O teste utiliza a relação $Q_{10}/Q_{MÁX MÊD}$, que é razão entre a vazão de tempo de retorno (TR) de 10 anos (Q_{10}) e TR 2,33 anos ($Q_{MÁX MÊD}$), como a base consistente para a comparação das características hidrológicas entre estações. A vazão de Q_{10} é recalculada ($Q_{10 RECALC}$) pelo produto de $Q_{MÁX MÊD}$ e a média dos valores de $Q_{10}/Q_{MÁX MÊD}$ obtidos em todas as estações. O valor de TR da $Q_{10 RECALC}$ é recalculado (TR_{RECALC}) e então comparado aos valores críticos de dispersão apresentados por Dalrymple [2], que são determinados em função do tamanho da amostra (N).

Após o teste de homogeneidade, foi realizada a regressão linear das vazões médias em função das áreas de drenagem, visando relacionar a vazão com o aumento da contribuição de água ao longo do rio.

Em seguida, a regionalização de vazões foi realizada pelo método index-flood (ou cheia-índice). O processo de adimensionalização do método index-flood requer a adimensionalização das séries de dados, visando desconsiderar o efeito do aumento da vazão ao longo do rio. Dessa forma, as vazões foram divididas pelo valor médio da série de vazões máximas anuais de cada estação.

Foi realizado o ajuste dos dados empíricos às distribuições de probabilidades de dois parâmetros apropriadas para séries assimétricas de vazões máximas (Exponencial, Gumbel, Log Normal). A aderência da distribuição empírica foi avaliada para definir o melhor ajuste às séries de máximas das estações selecionadas. Uma única distribuição de frequência foi selecionada para as quatro estações para viabilizar a ponderação de parâmetros regionais.

A distribuição estatística foi escolhida pela melhor

aderência determinada por reconhecimento visual e pelo p-valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS)[10] para nível de significância de 95%, sendo excluídas da análise estações que apresentaram p-valor inferiores a 0,05. Os parâmetros posição e escala do ajuste calculados por meio do método da máxima verossimilhança para as três distribuições avaliadas.

A elaboração da distribuição de probabilidade da cheia-índice se deu pela média dos parâmetros da distribuição calculada para cada uma das cheias ponderada pelo número de anos de cada uma das séries.

A partir da obtenção da cheia-índice, foram obtidas as vazões adimensionais para cada TR. Neste trabalho, o TR de 2 anos foi selecionado para seguir com a redimensionalização e obtenção dos resultados de vazão para cada ponto de interesse.

Os pontos de interesse das vazões incrementais foram posicionados junto ao ponto de contribuição dos principais tributários, conforme indicado na Figura 2 apresenta a delimitação das bacias incrementais. As coordenadas dos pontos de inserção das vazões incrementais, bem como suas respectivas áreas de drenagem acumuladas (AD), foram apresentadas na Tabela 2. As áreas de drenagem dos pontos incrementais (entre 1417 km² e 4757 km²) são da mesma ordem de grandeza das áreas de drenagem das estações fluviométricas utilizadas na regionalização (entre 1675 km² e 6509 km²).

A vazão obtida para cada ponto se deu pela obtenção da vazão média por meio da equação obtida pela regressão linear e pela multiplicação desse resultado pela vazão adimensional do TR de 2 anos obtido pela cheia índice.

As vazões instantâneas foram obtidas por meio da aplicação do coeficiente de Füller, conforme Equação 1, na qual Q_{inst} a vazão instantânea (m³/s), Q a vazão média diária (m³/s) e AD a Área de drenagem (km²).

$$Q_{inst} = Q \left(1 + \frac{2,66}{AD^{0,3}} \right) \quad (1)$$

As vazões incrementais, por sua vez, foram determinadas pela diferença entre a vazão do ponto incremental e a vazão que chega do ponto anterior.

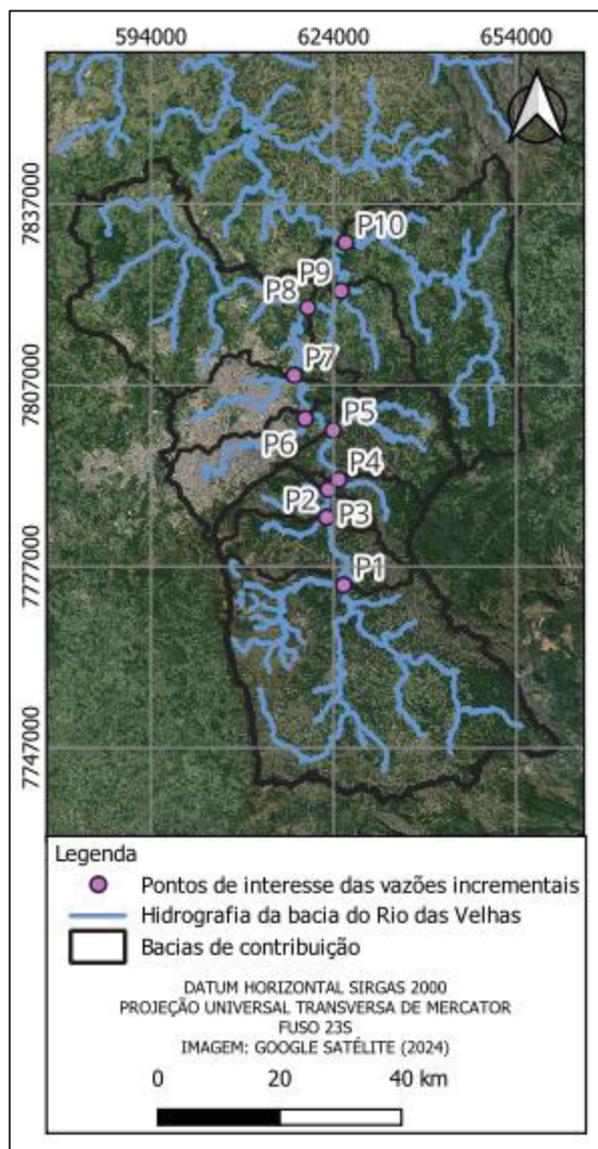


Figura 2: Pontos de inserção e bacias de contribuição das vazões incrementais

Tabela 2: Estações fluviométricas selecionadas

Ponto	Nome do tributário	Coordenadas UTM Fuso 23S		AD (km ²)
		Latitude	Longitude	
P1	Rio do Peixe	625783	7774116	1416,70
P2	Ribeirão dos Macacos	622975	7785331	1673,63
P3	Ribeirão da Água Preta	623220	7789952	1812,59
P4	Ribeirão da Prata	624972	7791612	1933,73
P5	Ribeirão do Gaia	624056	7799770	2254,88
P6	Córrego Barreiro	619448	7801690	2491,30
P7	Ribeirão da Onça	617655	7808884	2749,41
P8	Córrego José Maria	619903	7820102	3661,73
P9	Ribeirão Vermelho	625338	7822863	3899,81
P10	Rio Taquaraçu	626072	7830882	4757,02

3 Resultados e discussões

3.1 Teste de homogeneidade

Os valores de $Q_{MÁX\ MÉD}$, Q_{10} , $Q_{10}/Q_{MÁX\ MÉD}$ e sua respectiva média para as quatro estações, $Q_{10\ RECALC}$ e seu respectivo valor de TR e N são apresentados na Tabela 3. Os valores de TR_{RECALC} foram plotados juntamente com os limites críticos (Figura 3), onde é possível verificar que TR_{RECALC} de todas as estações ficaram compreendidos entre os valores limites. Esse comportamento indica que as estações podem ser usadas de forma intercambiável para a ponderação de parâmetros e a construção da curva regional adimensional.

Tabela 3: Teste de homogeneidade para as estações selecionadas

Estação	$Q_{MÁX\ MÉD}$ ($Q_{2,33}$ anos) (m^3/s)	Q_{10} (m^3/s)	$Q_{10}/Q_{MÁX\ MÉD}$	$Q_{10\ RECALC}$ (m^3/s)	TR_{RECALC} (anos)	Nº de anos
Honório Bicalho (41199998)	208,6	340,0	1,63	348	11,1	54
Pinhões (41260000)	508,4	862,1	1,70	849	9,4	51
Ponte Raul Soares (41340000)	582,6	986,0	1,69	973	9,5	80
Jequitibá (41410000)	692,7	1150,6	1,66	1157	10,2	60
Média de $Q_{10}/Q_{MÁX\ MÉD}$			1,59			

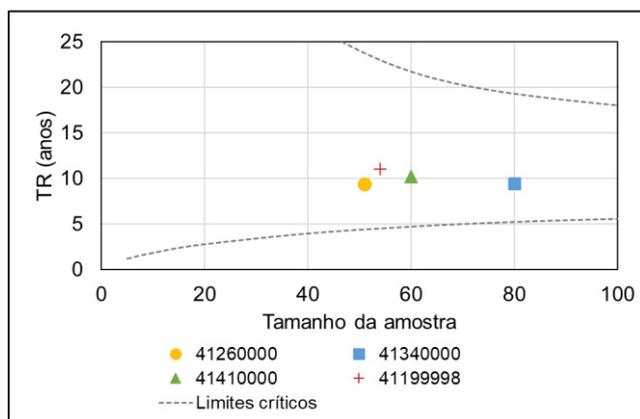


Figura 3: Valores de TR e limites críticos

3.2 Regressão linear de vazões médias

As vazões médias e áreas de drenagem de cada estação foram apresentadas na Tabela 4. A Figura 4 apresenta a curva regional de vazões médias. A equação potencial representativa obtida foi de $Q_{méd} = 0,2761 AD^{0,8995}$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e validade para áreas de drenagem entre $1675\ km^2$ e $6509\ km^2$.

Tabela 4: Vazões médias

Código	Área de Drenagem (km^2)	$Q_{méd}$ (m^3/s)
41199998	1675	209,3
41260000	3732	501,4
41340000	4867	582,0
41410000	6509	690,0

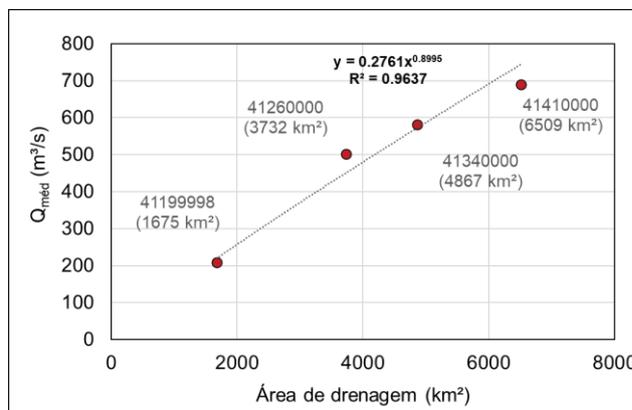


Figura 4: Curva regional de vazões médias

3.3 Ajuste das distribuições de probabilidade

Foi realizado o ajuste das distribuições de probabilidade às séries de vazões máximas empíricas adimensionalizadas pela média para cada uma das quatro estações avaliadas, conforme a Figura 5 até a Figura 8.

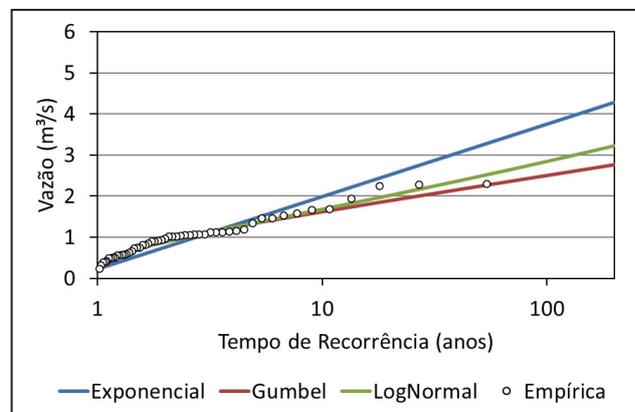


Figura 5: Ajuste das distribuições de probabilidades às vazões da estação 41199998 – Honório Bicalho Montante

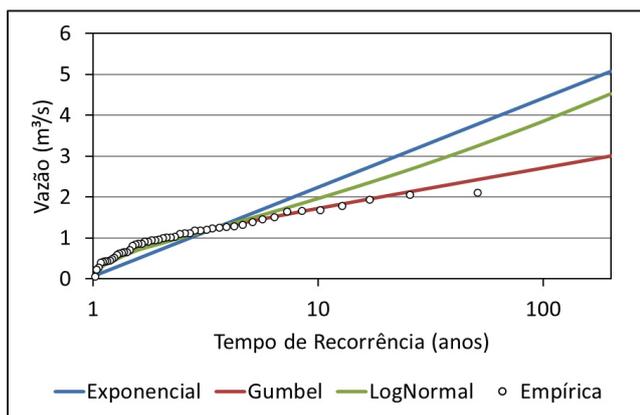


Figura 6: Ajuste das distribuições de probabilidades às vazões da estação 41260000 – Pinhões

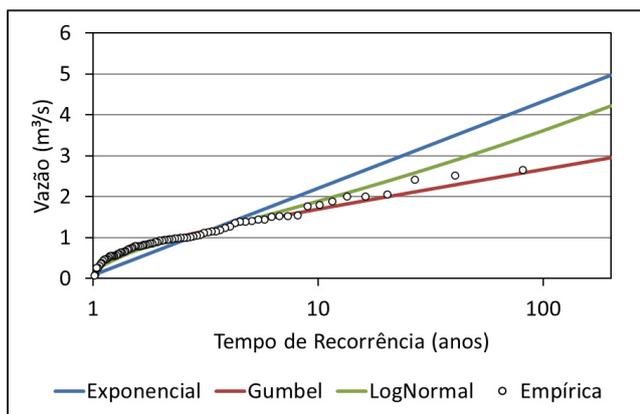


Figura 7: Ajuste das distribuições de probabilidades às vazões da estação 41340000 – Ponte Raul Soares

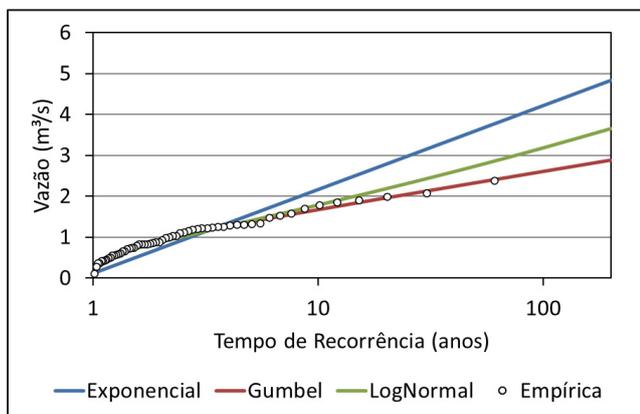


Figura 8: Ajuste das distribuições de probabilidades às vazões da estação 41410000 – Jequitibá

Os parâmetros das distribuições e os respectivos valores de KS são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de parâmetros posição e escala e resultado do teste de KS

Distribuição	Honório Bicalho (41199998)	Pinhões (41260000)	Ponte Raul Soares (41340000)	Jequitibá (41410000)	
Gumbel	Posição	0,78	0,77	0,76	0,77
	Escala	0,38	0,42	0,41	0,40
	KS	0,95	0,91	0,95	0,97
Exponencial	Posição	0,23	0,05	0,08	0,11
	Escala	0,77	0,95	0,92	0,89
	KS	0,09	0,01*	0,00*	0,01*
Lognormal	Posição	-0,12	-0,16	-0,16	-0,13
	Escala	0,50	0,65	0,62	0,55
	KS	0,77	0,31	0,39	0,89

*Hipótese nula rejeitada no teste KS

A distribuição exponencial foi descartada, tendo em vista a rejeição da hipótese nula no teste KS em três das quatro estações. É notável, entre as distribuições apresentadas, que o ajuste de Gumbel se aproxima dos quantis de maiores TRs da distribuição empírica, expressando o melhor resultado de ajuste por aderência visual.

3.4 Determinação da cheia-índice

Tendo em vista que as estações Honório Bicalho (41199998), Pinhões (41260000), Ponte Raul Soares (41340000) e Jequitibá (41410000) são hidrológicamente homogêneas, os dados da série das estações podem ser usados para representar uma distribuição de probabilidade única de vazões adimensionais.

Os parâmetros dos ajustes obtidos na Tabela 5 foram ponderados pelo número de observações para a determinação do parâmetro regional, que resultaram nos valores de 0,770 para posição e 0,403 para escala (Tabela 6). O ajuste apresenta boa aderência às séries adimensionalizadas, conforme apresentado na Figura 9. As vazões adimensionalizadas resultantes para cada TR foram apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6: Parâmetros regionais

Estação	Nº de anos	Posição	Escala
Honório Bicalho (41199998)	53	0,779	0,376
Pinhões (41260000)	50	0,770	0,422
Ponte Raul Soares (41340000)	80	0,761	0,415
Jequitibá (41410000)	60	0,774	0,397
Parâmetros regionais		0,770	0,403

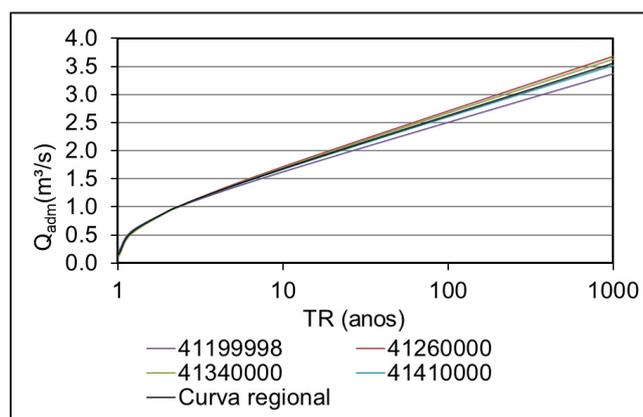


Figura 9: Curva regional adimensional

Tabela 7: Vazões adimensionais para cada TR

TR	Vazão adimensional (m³/s)
1,01	0,153
1,2	0,535
2	0,918
2,33	1,003
3	1,134
5	1,375
10	1,678
20	1,968
25	2,060
50	2,344
75	2,508
100	2,625
1000	3,555

3.5 Redimensionalização das vazões e determinação das vazões em pontos determinados

A Tabela 8 apresenta a redimensionalização das vazões e determinação das vazões nos pontos de interesse. A vazão Q foi obtida a partir do produto do resultado da cheia-índice (Tabela 7) com a vazão obtida por meio da equação obtida na Figura 4.

A vazão instantânea foi obtida por meio da aplicação do coeficiente de Füller e a vazão incremental é dada pela diferença entre as vazões obtidas em cada linha.

Tabela 8: Vazões incrementais para o TR 2 anos

Ponto	Q (m³/s) Q = 0,918 × 0,2761 AD ^{0,9995}	Q instantânea (m³/s) Q inst = Q (1+2,66/AD ^{0,3})	Q incremental (m³/s) Q incr = Q n - Q n-1
P1	173,15	225,38	-
P2	219,90	283,00	57,61
P3	267,03	341,84	58,85
P4	343,14	437,42	95,58
P5	480,71	606,84	169,42
P6	616,80	773,87	167,03
P7	680,90	849,24	75,37
P8	912,96	1120,09	270,85
P9	1099,23	1343,95	223,86
P10	1406,81	1701,87	357,92

4 Considerações finais

Este trabalho estimou vazões em diversos pontos de rios afluentes ao rio das Velhas por meio da aplicação de uma distribuição de probabilidade para uma cheia índice, construída a partir das séries históricas adimensionalizadas de quatro estações fluviométricas. As séries de vazões máximas das quatro estações selecionadas apresentaram comportamento homogêneo e foram mais aderentes à distribuição de Gumbel.

A existência de homogeneidade permitiu a obtenção de uma cheia índice representativa do trecho de rio avaliado. A partir desta distribuição, foi realizada a redimensionalização dos valores obtidos para o TR de 2 anos por meio de regressão linear entre as vazões médias e a área de drenagem do ponto de interesse. As vazões obtidas variaram entre 57,61 m³/s e 357,92 m³/s.

Agradecimentos

Agradecimento à empresa HIDROBR pelo apoio na execução do trabalho.

Referências

- [1] TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2 ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, 2001.
- [2] DALRYMPLE, T. *Flood Frequency Analysis*. US Geological Survey. Water Supply Paper, 1543 A. 1960.
- [3] IBEJE, A. O.; EKWUEME, B. N. Regional Flood Frequency Analysis using Dimensionless Index Flood Method. *Civil Engineering Journal*, v. 6, n. 12, p. 2425-2436, 2020.
- [4] BARNA, D. M.; ENGELAND, K; KNEIB, T; THORARINSDOTTIR, T. L.; XU, C. Y. *Regional index flood estimation at multiple durations with generalized additive models*. 2023.
- [5] BELLO, I. P; OLIVEIRA, L. F. C.; SOUZA, G. R; CORREA, F. V; CAMINHA, A. R; FILHO, M. V. S. Obtenção do index-flood para regiões homogêneas de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*. 2022.
- [6] MUHAMMAD, M; LU, Z. Estimating the UK Index Flood: an improved spatial flooding analysis. *Environmental Modelling & Assesment*. 2020.
- [7] STRNAD, F.; MORAVEC, V.; MARKONIS, Y. MACA, P.; STOCES, M. HANEL, M. An Index-Flood Statistical Model for Hydrological Drought Assessment. *Water*, v. 12, n. 1213, p. 1-17, 2020.
- [8] Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. *HIDROWEB*. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>>. Acesso em: jul/2024.
- [9] COPERNICUS. *Digital Elevation Model*. Disponível em: <<https://spacedata.copernicus.eu/collections/coper>>

nicus-digital-elevation-model>. Acesso em:
jul/2024.

[10] MONAHAN, J. F. *Numerical methods of statistics*, second edition. Cambridge University Press. 2011.