

REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES DA REGIÃO BAIANA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARDO, BRASIL

STREAMFLOW REGIONALIZATION FOR PARDO WATERSHED REGION LOCATED IN BAHIA STATE, BRAZIL

Stênio Carvalho Rocha^a, Danilo Paulúcio da Silva^b, João Batista Lopes da Silva^c,
Deisy de Assis Coelho^d, Dionísio Novais Brandão^e

^aEngenheiro Ambiental, ^bUniversidade Estadual do Sudoeste da Bahia, ^cUniversidade Federal do Sul da Bahia,
^dEngenheira Ambiental, ^eGraduando em Engenharia Ambiental

steniophn@hotmail.com, dpaulucio@uesb.edu.br, silvajbl@ufsb.edu.br, deisy.assis@gmail.com, dionisio.novais1998@gmail.com

Submissão: 06 de outubro de 2023 Aceite: 18 de junho de 2024

Resumo

O rio Pardo está localizado nos estados de Minas Gerais e Bahia no Brasil, sendo importante manancial para o desenvolvimento da região. Entretanto, as variações sazonais e o uso inadequado desse recurso têm propiciado conflitos pelo seu uso. Visando uma gestão participativa e igualitária é essencial conhecer a quantidade de água disponível. Assim, o objetivo deste presente estudo foi regionalizar vazões máximas, mínimas e médias para a região baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo. Para tanto, foram utilizados dados fisiográficos e fluviométricos e aplicou-se a técnica de regionalização de vazões baseada em regressões múltiplas para estimativa de vazões máximas com períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos, vazão média de longa duração e vazões mínimas com 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) de permanência para a região baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo. Constatou-se que a região em estudo pertence a uma única região homogênea, tendo a área de drenagem e comprimento total da rede de drenagem como as variáveis de melhor correlação. Dentre os modelos de regressão testados para o rio principal, o tipo potencial foi o que apresentou melhores resultados para as vazões máximas estudadas, média de longa duração e mínima com 90% de permanência (Q_{90}). Para vazão mínima, com 95% de permanência (Q_{95}), o modelo exponencial foi o que apresentou melhores resultados. Nos afluentes, a inexistência de estações fluviométricas limitou a aplicação do método da conservação de massas apenas a modelos de regressão do tipo linear, todavia, o método se mostrou eficiente na estimativa de vazões afluentes, permitindo a continuidade nos valores de vazão.

Palavras-chave: modelos hidrológicos; recursos hídricos; vazões máximas; vazões de referência.

Abstract

The Pardo River is located in the states of Minas Gerais and Bahia in Brazil and is an important source of water for developing the region. However, seasonal variations and inappropriate use of this resource have led to conflicts over its use. With the aim of participatory and equal management, it is essential to know the amount of water available. The aim of this study was therefore to regionalize maximum, minimum and average flows for the Pardo river basin in Bahia. To this end, physiographic and pluviometric data were used, and a flow regionalization technique based on multiple regressions was applied to estimate maximum flows with return periods of 10, 20, 50, 100, and 500 years, long-term average flows, and minimum flows with 90% (Q_{90}) and 95% (Q_{95}) permanence for the Bahia region of the Pardo river basin. It was found that the region under study belongs to a single homogeneous region, with the drainage area and total length of the drainage network having the best correlation. Among the regression models tested for the main river, the potential type showed the best results for the studied

maximum flows, long-term averages, and minimum flows with 90% permanence (Q90). For the minimum flow with 95% permanence (Q95), the exponential model showed the best results. In the tributaries, the lack of pluviometric stations limited the application of the mass conservation method to linear regression models, but the method proved to be efficient for estimating tributary flows, allowing for continuity in the flow values.

Keywords: hydrological models; water resources; maximum flows; reference flows.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos naturais tem acarretado maior pressão sobre o ambiente, com destaque para os usos das águas. No Brasil, algumas bacias hidrográficas já apresentam dificuldades no atendimento às demandas hídricas, gerando conflitos entre seus usuários, sendo que a presença desse recurso está diretamente ligada ao desenvolvimento econômico, social e ambiental do local (Tonetti; Adami, 2022).

A região hidrográfica do Atlântico Leste, possui grande parte de sua área localizada no semiárido, região esta que passa por longos períodos de estiagens e apresenta a segunda menor disponibilidade hídrica em comparativo com as demais regiões hidrográficas do Brasil (Brasil, 2023a). Dentre os principais rios dessa região hidrográfica, o rio Pardo vem apresentando redução nas vazões ao longo dos anos, sendo necessária a restrição no uso dos recursos hídricos por meio da Resolução ANA nº 101 (Brasil, 2021).

Na bacia hidrográfica do rio Pardo estão inseridos 35 municípios dos estados de Minas Gerais e Bahia, cujo desenvolvimento é dependente, dentre outros fatores, das águas do rio Pardo e seus afluentes. A região da bacia situada no estado de Minas Gerais tem perfil predominantemente agrícola, ao passo que as principais atividades desenvolvidas na região baiana incluem pecuária de corte e leite, cultura do cacau (praticada na região litorânea da bacia) e indústrias dos mais variados segmentos, comércio e serviços, principalmente em Vitória da Conquista (IBGE, 2017).

Para promover gerenciamento eficiente de recursos hídricos é imprescindível conhecer a quantidade da água na bacia hidrográfica. Assim o monitoramento hidrológico é de suma importância para essa finalidade, viabilizando o planejamento de usos múltiplos da água, além do atendimento das legislações vigentes (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2022). Entretanto, devido aos altos custos de

implantação de estações fluviométricas e às grandes extensões territoriais, torna-se impraticável o monitoramento de toda a rede hidrográfica, sendo necessária otimização dos dados disponíveis (Sivapalan et al., 2003; Mishra; Coulibaly, 2009). Além das questões relacionadas à rede de monitoramento e à pouca quantidade de estações fluviométricas, nem todas se encontram em operação, assim é perceptível a necessidade de ferramentas para otimização desses dados (Pereira; Barbieiro; Quevedo, 2022).

A regionalização de vazões tem por objetivo a otimização dos dados disponíveis possibilitando a estimativa de vazões em locais sem dados (Alves, 2022). No Brasil, dentre as metodologias mais utilizadas, está a proposta pelo *Natural Environment Research Council* (NERC, 1975), que foi adaptada pela ELETROBRÁS (1985). O método consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e na aplicação de regressões múltiplas entre valores de vazão e características físicas e/ou meteorológicas da bacia hidrográfica (as características físicas e/ou meteorológicas da bacia são as variáveis utilizadas na regressão), sendo conhecido por apresentar bons resultados e fácil aplicação (Ferreira et al, 2021). Outro método aplicado em estudo de vazões afluentes é o da conservação de massas. O método, proposto por Novaes (2005), pressupõe que a vazão é nula quando a área de drenagem for igual a zero, o que garante a continuidade dos valores de vazão.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi ajustar funções de regionalização para estimar vazões máximas com diferentes períodos de retorno, vazões médias de longa duração e vazões mínimas com 90% (Q₉₀) e 95% (Q₉₅) de permanência e, assim, viabilizar a estimativa de vazões em diferentes posições da hidrografia da bacia do rio Pardo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

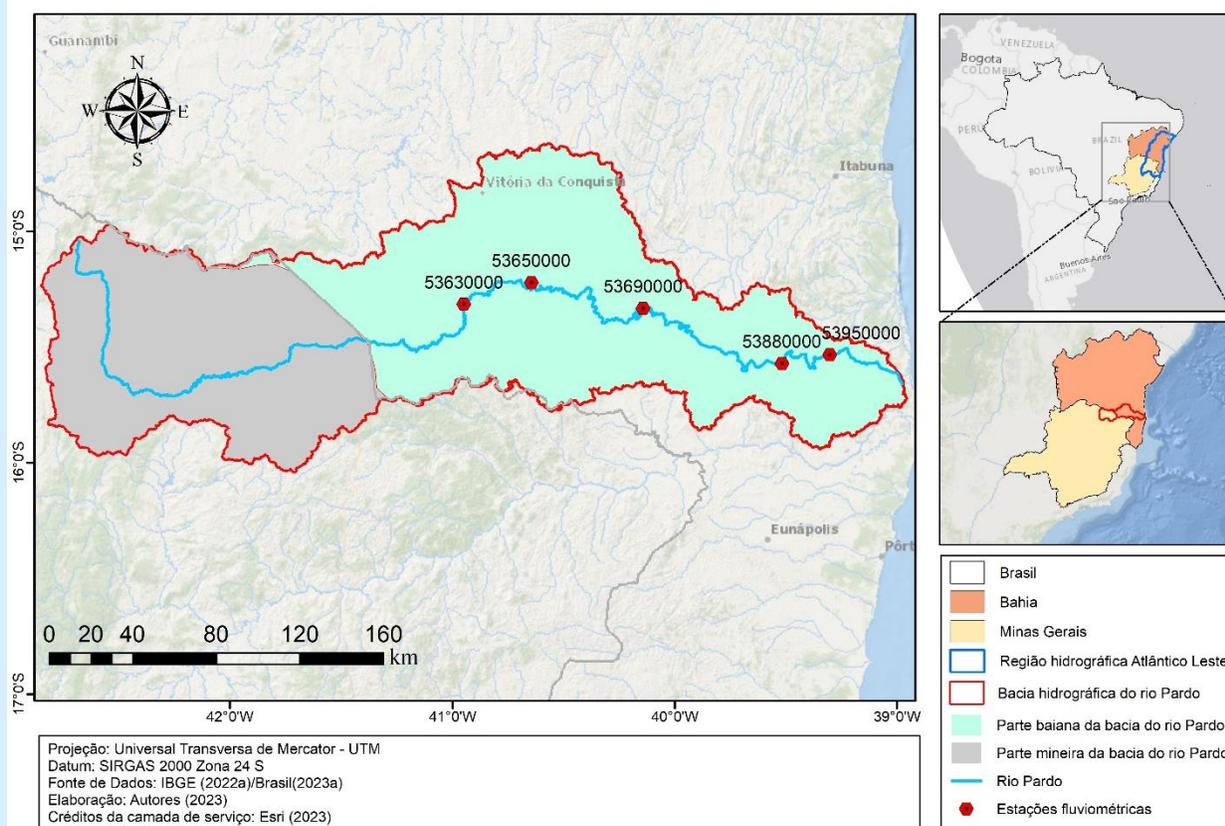
2.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado na região baiana da bacia hidrográfica do rio Pardo, ottobacia de nível 5 (67778), localizada ao Sul do estado (Figura 1). A bacia hidrográfica do rio Pardo, tem como circunvizinhas ao sul, a bacia hidrográfica do rio Jequitinhonha, ao norte, as bacias hidrográficas do rio de Contas e do rio Cachoeira, a oeste, a bacia hidrográfica do rio São Francisco e ao leste, o oceano Atlântico. Contida entre os paralelos $-14,62^\circ$ e $-16,1^\circ$ e meridianos $-42,81^\circ$ e $-39,2^\circ$, a bacia hidrográfica possui cerca de 32.818 km² de área de drenagem e abrange parcial ou integralmente o

território de 35 municípios, 22 na parte baiana e 13 na parte mineira (IBGE, 2022a), sendo que a população total residente nestes municípios é de cerca de 955.466 pessoas (IBGE, 2022b).

O rio Pardo nasce na Serra Negra no município Rio Pardo de Minas no estado de Minas Gerais, a cerca de 750 metros de altitude, percorrendo 756 km até a sua foz localizada no município de Canavieiras no estado da Bahia. Os principais afluentes são o Ribeirão Salitre, o Riacho das Veredas e os rios São João do Paraíso, Verruga e Catolé Grande, pela margem esquerda, e os rios Mosquito, Manjerona, Maiquinique e Macarani pela margem direita (Bahia, 2014).

Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Pardo e estações fluviométricas utilizadas



Fonte: elaborada pelos autores a partir de dados do IBGE (2022a) e de Brasil (2023a).

2.2 Obtenção dos dados

Para informações morfométricas da bacia foram utilizadas imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução de 30 metros

(USGS, 2023). As imagens foram processadas utilizando as ferramentas disponíveis no software ArcGIS 10.8® para obtenção das características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Pardo.

As estações fluviométricas presentes no rio Pardo foram identificadas, para a obtenção das séries históricas de dados de vazões, no portal HidroWeb, pertencente à rede hidrometeorológica da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (Brasil, 2023b). Dentre as estações registradas como pertencentes à bacia do Rio Pardo, foram identificadas estações com problemas de disponibilidade de dados ou que apresentavam inconsistências que não puderam ser reparadas. Assim, para este estudo, foram considerados exclusivamente os dados das estações cujos dados se encontravam disponíveis para o período estudado, que foi de 1984 a 2015 (Figura 1).

O fato de se encontrarem disponíveis dados de vazões apenas em estações localizadas na parte baiana da bacia, inviabilizou a realização de estudos na parte mineira da bacia. Portanto, as equações de regionalização ajustadas neste trabalho são aplicáveis somente para a parte baiana da bacia. Todavia, estudos de regionalização de vazões para a parte mineira da bacia do rio Pardo podem ser consultados no trabalho realizado por Euclides *et al.* (2011).

Os dados das estações utilizadas (Figura 1) foram submetidos a procedimentos de análise de consistência, visando a correção de erros grosseiros de digitação e anotação de cotas e preenchimento de falhas. A análise de consistência foi realizada com auxílio do *software* Hidro 1.4 (Brasil, 2023b) e ainda por meio de consulta aos boletins diários presentes no Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (Brasil, 2023c).

2.3 Procedimentos de Regionalização

A regionalização de vazões para a bacia do rio Pardo foi elaborada com base no método de regressões múltiplas, comumente denominado método tradicional. O método é recomendado pela ELETROBRÁS (1985) para estimativas hidrológicas em locais sem dados, pois apresenta resultados satisfatórios (Maciel, 2019). Para estimativa de vazões afluentes foi utilizado o método da Conservação de Massas, sendo este aplicado aos afluentes de níveis 6 e 7 da ottocodificação que drenam suas águas diretamente para a calha do rio Pardo.

2.3.1 Cálculo de vazões máximas, médias e mínimas

No estudo optou-se por regionalizar as vazões máximas para os períodos de retorno de 10, 20, 50, 100 e 500 anos, por serem as de maior utilização em dimensionamentos de obras hidráulicas como galerias pluviais (5 a 20 anos), barragens de concreto de pequeno porte para abastecimento (50 a 100 anos) e extravasores de barragens de concreto (500 anos), sendo esses valores atrelados principalmente à segurança da obra a ser executada (Chimene, 2019).

Os modelos de distribuição de probabilidade testados nesse estudo foram: Gumbel, Pearson tipo 3, Log-Pearson tipo 3, Log-Normal tipo 2 e Log-Normal tipo 3 para vazões máximas. Para a identificação do modelo que melhor se ajusta às condições locais e à vazão em análise foi utilizado o *software* SisCAH 1.0 (Sousa *et al.*, 2009; Moreira; Maia; Silva, 2022). No algorítmico do SisCAH foram implementadas funções para geração de séries históricas de vazões máximas para diferentes períodos de retorno, bem como ferramentas estatísticas para indicar ao usuário o modelo probabilístico de melhor ajuste. As ferramentas estatísticas implementadas no *software* como indicadores de aderência incluem amplitude do intervalo de confiança, erro padrão e coeficiente de assimetria.

Além das vazões máximas, também foram regionalizadas as vazões mínimas e a vazão média de longa duração. Para vazões mínimas, foram selecionadas as vazões com 90% e 95% de permanência na série histórica. Tais vazões de referência foram consideradas neste estudo por serem utilizadas para concessão de outorgas de direito ao uso dos recursos hídricos no estado da Bahia e nos rios federais, respectivamente (Bahia, 2007; Silva; Medeiros; Fontes, 2021). As vazões médias de longa duração permitem a avaliação do potencial hídrico afluente, sendo estas também estimadas.

2.3.2 Obtenção das variáveis de regionalização testadas

As variáveis independentes foram utilizadas para explicar o comportamento da vazão ao longo da hidrografia. As variáveis independentes mais utilizadas em estudos de regionalização são variáveis físicas, descritivas e hidrológicas (Virães; Pinto, 2023). Para a escolha das variáveis é necessário que elas apresentem boa correlação com

os dados de vazão (Rego, 2013; Mello; Pessoa; Santana, 2020).

No estudo foram obtidas características fisiográficas a montante de cada estação fluviométrica da bacia hidrográfica do rio Pardo, sendo elas: área de drenagem (A); perímetro (P); comprimento total da rede de drenagem (Lt) e comprimento do rio principal (Lp). Tais características foram submetidas a teste de correlação com as vazões, sendo selecionadas as que apresentaram melhores resultados.

2.4 Regiões hidrologicamente homogêneas e variáveis independentes

2.4.1 Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas

A identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, ou seja, regiões que possuam o mesmo comportamento hidrológico dentro da área de estudo, podem ser realizadas por análises físicas, climáticas ou estatísticas. No estudo levou-se em conta a análise estatística, com a aplicação do método da conveniência geográfica, ou zonas previamente definidas (Naghetini; Pinto, 2007; Basso, 2019). No método são ajustadas equações de regressão entre valores de vazão e características morfométricas da bacia, sendo utilizados os valores dos coeficientes de determinação ajustado (R^2a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual médio (ER%).

A obtenção de resultados satisfatórios dos coeficientes indica comportamento hidrológico semelhante para toda região em análise (Maciel, 2019). Assim, a região foi considerada hidrologicamente homogênea uma vez que apresentou valor de R^2a superior a 0,90, valor de σF menor que 1,5 e ER% menor que 30% (Tucci, 2002).

2.4.2 Identificação das variáveis independentes de melhor ajuste

Por meio da plataforma do Sistema Computacional para Regionalização de Vazões (SisCoRv) versão 1.0 (Sousa *et al.*, 2013), realizaram-se testes preliminares a fim de identificar, dentre as variáveis obtidas, as que apresentassem melhores valores de coeficiente de determinação ajustado (R^2a) (Equação 1), erro padrão fatorial (σF) (Equação 2) e erro percentual (ER%) (Equação 3).

$$R^2a = 1 - \frac{(n-1)}{[n-(k+1)]} (1 - R^2) \quad (1)$$

$$\sigma F = e^D \quad (2)$$

$$ER\% = \left(\frac{Q_0 - Q_e}{Q_0} \right) \times 100 \quad (3)$$

Em que n corresponde ao tamanho da amostra, k é o número de variáveis independentes e D corresponde ao desvio padrão da amostra, Q_0 é a vazão observada ($m^3 \cdot s^{-1}$) e Q_e é a vazão estimada pelo modelo ($m^3 \cdot s^{-1}$).

2.5 Obtenção de parâmetros das equações para o rio Pardo e estimativa de vazões

De posse das variáveis independentes e definidas as regiões homogêneas, procedeu-se o ajustamento de equações de regressão. A função matemática utilizada para relacionar as variáveis é dada pela Equação 4:

$$Q = f(C1, C2, C3, \dots, Cn) \quad (4)$$

($m^3 \cdot s^{-1}$) em função das variáveis independentes (C1, C2, C3, ..., Cn).

Foram testados os modelos de regressão linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco, sendo selecionado o que apresentasse os melhores valores de R^2a e σF . Além disso, levou-se em consideração o erro apresentado pelo modelo na estimativa, comparando-se valores de vazão estimados e observados. Para isso foi utilizado o erro percentual (ER%), sendo o máximo aceitável 30%, conforme recomendado pela ELETROBRÁS (1985).

A regionalização das vazões do estudo foi realizada com o auxílio do *software* Sistema Computacional para Regionalização de Vazões (SisCoRV) versão 1.0 (Sousa *et al.*, 2013). Foram estimadas as vazões para a parte baiana do rio Pardo; para isso calcularam-se as variáveis dos modelos a cada 10 km ao longo do rio, com as ferramentas disponíveis no *software* ArcGIS 10.8 (ESRI, 2020). Posteriormente, foram estimadas as vazões e incorporadas ao seu respectivo trecho, sendo criados mapas com a variação de cada vazão

ao longo do rio.

2.6 Obtenção dos parâmetros das equações para afluentes

Para o ajuste de equações afluentes foi considerado o método da conservação de massas, proposto por Pereira (2004) e adaptado por Novaes (2005). O método, aplicado às vazões médias e mínimas, utiliza a contribuição afluente e dados de estações fluviométricas pertencentes ao tributário, para traçar modelos de regressão potencial ou exponencial em função da área de drenagem. O método pressupõe que a vazão seja nula quando a área de drenagem for igual a zero, forçando o modelo a passar pela origem (Araújo, 2019).

A determinação da contribuição afluente é feita pela diferença entre a vazão no ponto situado imediatamente a jusante da confluência com a foz afluente, e a vazão do ponto situado imediatamente a seu montante. Como não existiam estações fluviométricas nos afluentes considerados neste estudo, foi utilizada regressão linear (Equação 5) para estimar a vazão.

$$Q = b \cdot A \quad (5)$$

Em que A é a área de drenagem no ponto desejado (km²) e b é o coeficiente angular da reta.

Para definição dos afluentes que iriam compor o estudo, levou-se em consideração a Ottocodificação. Foi adotado como critério de escolha rios de sexta e sétima ordem que drenem suas águas para o rio Pardo, uma vez que este é de quarta ordem, sendo selecionados 14 mananciais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características físicas

Nos testes de correlação com vazões, as variáveis área de drenagem (A) e comprimento total da rede de drenagem (Lt) apresentaram melhores resultados sendo, efetivamente, consideradas nos ajustes dos modelos de regionalização. Para cada estação foram calculados os valores de área e comprimento total da rede de drenagem. Em estudos de regionalização realizados por Bazzo *et al.* (2017), a área de drenagem foi utilizada como variável

explicativa para a estimativa da Q95, sendo possível obter modelos simples devido à facilidade de obtenção dessa variável.

Os valores de área de drenagem calculados para as estações fluviométricas de montante para jusante (Figura 1) foram, respectivamente: 16297,65 km²; 18537,47 km²; 26081,22 km²; 29419,45 km² e 30644,27 km². O comprimento total da rede de drenagem calculado para cada estação fluviométrica de montante para jusante foi, respectivamente: 10.212,06 km; 11.759,41 km; 17.231,80 km; 19.817,78 km e 20.728,55 km. Ao observar o posicionamento das estações fluviométricas (

A identificação da área é imprescindível em estudos de bacias hidrográficas, pois permite avaliar o seu potencial hídrico, além de apresentar alta correlação com valores de vazão sendo uma das variáveis mais utilizadas em estudos de regionalização hidrológica (Tucci, 2013). Araújo (2019), ao gerar modelos de regionalização de vazões para diferentes regiões hidrologicamente homogêneas da bacia hidrográfica do rio Paranapanema (PR/SP), obteve bons resultados, nos quais a variável área juntamente com a variável comprimento do rio principal se destacaram como as melhores variáveis explicativas para os estudos de regionalização. Ribeiro (2018), ao estimar vazões mínimas de referência para a bacia hidrográfica do rio Branco (RR), obteve a variável área de drenagem como a principal característica fisiográfica para equações de regionalização, assim como Mello, Pessoa e Santana (2020) observaram uma forte dependência linear entre área de drenagem e vazão, que resultou em um coeficiente de correlação de Pearson (r) maior que 0,7.

3.2 Vazões mínimas, médias e máximas das estações consideradas

Os modelos de distribuições de probabilidade Log-Normal 3 Parâmetros e Gumbel apresentaram menor amplitude no intervalo de confiança a 95% de probabilidade, sendo estes utilizados para estimativa das vazões para as estações em estudo (Tabela 1). A distribuição de probabilidade Gumbel prevaleceu para a estimativa de vazões das estações 53630000 e 53650000. Além disso, a distribuição foi a que apresentou melhor ajuste para a maioria das equações ajustadas de estimativa de vazões para o período de retorno de 500 anos, sendo este modelo

um dos mais utilizados para estimativa de valores extremos de variáveis hidrológicas (Nobre; Campos, 2021). Estes resultados corroboram com os resultados de Lopes *et al.* (2016) que, ao regionalizarem vazões mínimas e máximas para a bacia hidrográfica do rio Ivaí – PR, identificaram por

meio de teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov que os modelos Log-Normal 3 parâmetros e o de Gumbel foram os que apresentaram melhor ajuste, o que indica condições hidrológicas semelhantes entre as bacias.

Tabela 1 - Vazões mínimas, médias e máximas anuais

| Estações | Vazões (m ³ .s ⁻¹) | | | | | | | |
|-----------------|---|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | Q _{max10} | Q _{max20} | Q _{max50} | Q _{max100} | Q _{max500} | Q ₉₀ | Q ₉₅ | Q _{mlt} |
| 53630000 | 360,95* | 464,81* | 599,25* | 699,99* | 932,79* | 1,10 | 0,47 | 9,61 |
| 53650000 | 540,64* | 690,19* | 883,78* | 1028,84* | 1364,06* | 1,64 | 0,76 | 13,41 |
| 53690000 | 739,08** | 993,70* | 1235,47* | 1416,64* | 1835,30* | 9,34 | 7,04 | 36,42 |
| 53880000 | 1088,93** | 1288,61** | 1539,65** | 1724,13** | 2528,88* | 11,08 | 8,26 | 47,08 |
| 53950000 | 1170,38** | 1354,40** | 1578,19** | 1737,92** | 2628,42* | 11,56 | 7,42 | 59,44 |

Vazões mínimas com permanência de 90% (Q₉₀) e 95% (Q₉₅) na série histórica, vazões médias anuais de longa duração (Q_{mlt}) e vazões máximas anuais com períodos de retorno de 10 (Q_{max10}), 20 (Q_{max20}), 50 (Q_{max50}), 100 (Q_{max100}) e 500 anos (Q_{max500}) obtidos para as estações consideradas neste estudo.

*Estimada a partir da distribuição Gumbel. **Estimada a partir da distribuição Log-Normal 3 Parâmetros. Fonte: autores, 2023.

3.3 Ajuste das equações para o rio Pardo

Modelos com menor número de variáveis possibilitam a obtenção de vazões de forma mais rápida, uma vez que se evitaria a necessidade de obtenção de variáveis que podem não se encontrar disponíveis ou não serem de fácil obtenção sem conhecimento mais aprofundado em outras áreas de conhecimento, tais como geoprocessamento. Tal fato permite maior acessibilidade à prática da regionalização de vazões. De todos os modelos testados neste trabalho para vazões máximas, o que apresentou melhores resultados foi o tipo potencial, sendo a variável área suficiente para obtenção de bons resultados para a maioria das vazões (Tabela 2).

A vazão mínima com 90% de permanência se ajustou melhor ao modelo potencial, sendo necessária apenas a área para descrever o comportamento do afluente (Tabela 2). O modelo exponencial, no entanto, foi o que melhor descreveu o comportamento da vazão mínima com 95% de permanência, sendo necessária a adição da variável comprimento total da rede de drenagem (Lt) à variável área (A) para a obtenção de coeficientes satisfatórios.

A vazão média de longa duração seguiu a mesma tendência demonstrada pelas vazões máximas, visto que o modelo de melhor ajuste foi o potencial, sendo necessária apenas a variável área para descrever o comportamento das vazões.

Na Figura 2 estão apresentados os valores de vazões observadas versus as vazões estimadas pelos modelos selecionados para as 5 estações fluviométricas utilizadas no estudo, acompanhados dos valores de coeficientes de correlação ajustados (R²a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual (ER%) correspondentes aos modelos selecionados (Tabela 2). São apresentadas ainda, retas de igualdade entre os valores estimados e observados para cada vazão (reta identidade). Valores próximos a reta identidade denotam boa estimativa dos modelos testados, ao passo que valores distantes da reta implicam em estimativas ruins dos valores de vazão. Notam-se, valores próximos à reta identidade inferindo em boa estimativa das vazões pelos modelos testados.

Os valores de R²a, σF variaram de 0,94 a 0,99 e 0,05 a 0,26, respectivamente, enquanto que a média dos valores de ER% variaram entre 3,35 e 17,03 (Figura 2). Os resultados indicam bom ajuste dos modelos e baixo erro na estimativa das vazões

e, portanto, pelo método da conveniência geográfica, a região pode ser considerada como hidrológicamente homogênea.

Tabela 2 - Equações de regressão ajustadas

$$Q_{90} = 1,692785 \cdot 10^{-17} \cdot A^{(3,990149)}$$

$$Q_{95} = 1,208467 \cdot 10^{-5} \cdot e^{((A \cdot 0,003104) + (Lt \cdot -0,004046))}$$

$$Q_{mld} = 1,200163 \cdot 10^{-11} \cdot A^{(2,824625)}$$

$$Q_{m\acute{a}x10} = 2,836510 \cdot 10^{-5} \cdot A^{1,693269}$$

$$Q_{m\acute{a}x20} = 1,278141 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,565681}$$

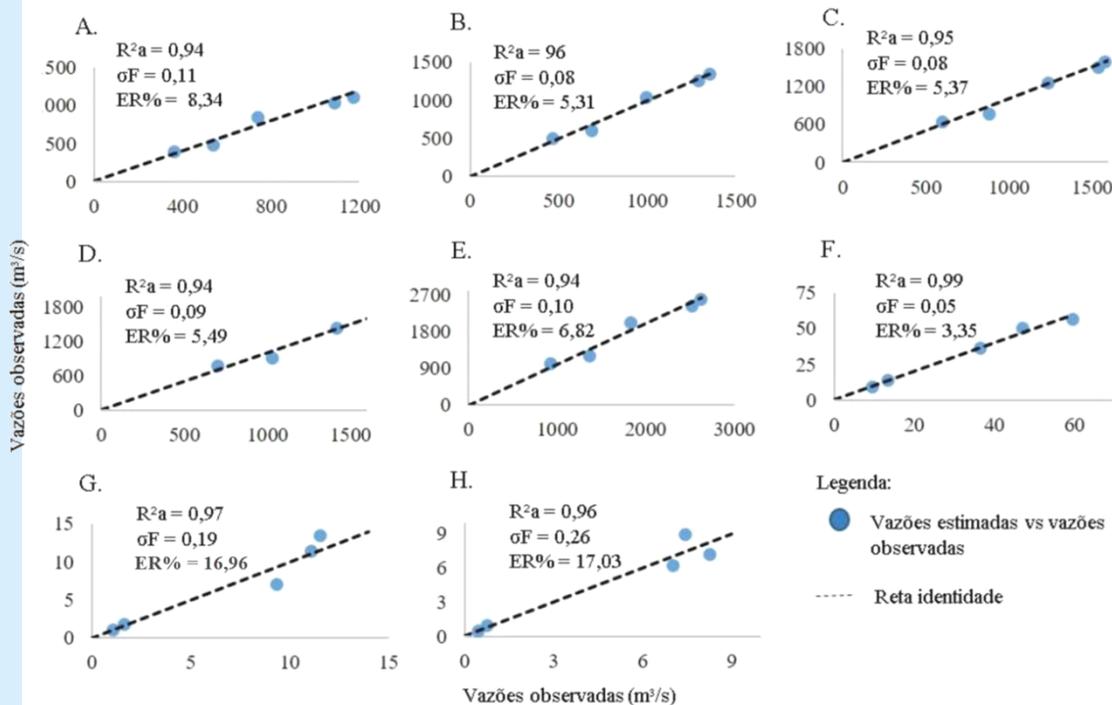
$$Q_{m\acute{a}x50} = 6,740315 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,421320}$$

$$Q_{m\acute{a}x100} = 1,757802 \cdot 10^{-3} \cdot A^{1,339059}$$

$$Q_{m\acute{a}x500} = 4,533636 \cdot 10^{-4} \cdot A^{1,506017}$$

$e = 2,718282$; $A = \text{área}$; $Lt = \text{comprimento total da rede de drenagem}$.
 Fonte: autores, 2023.

Figura 2 - Vazões máximas, médias e mínimas



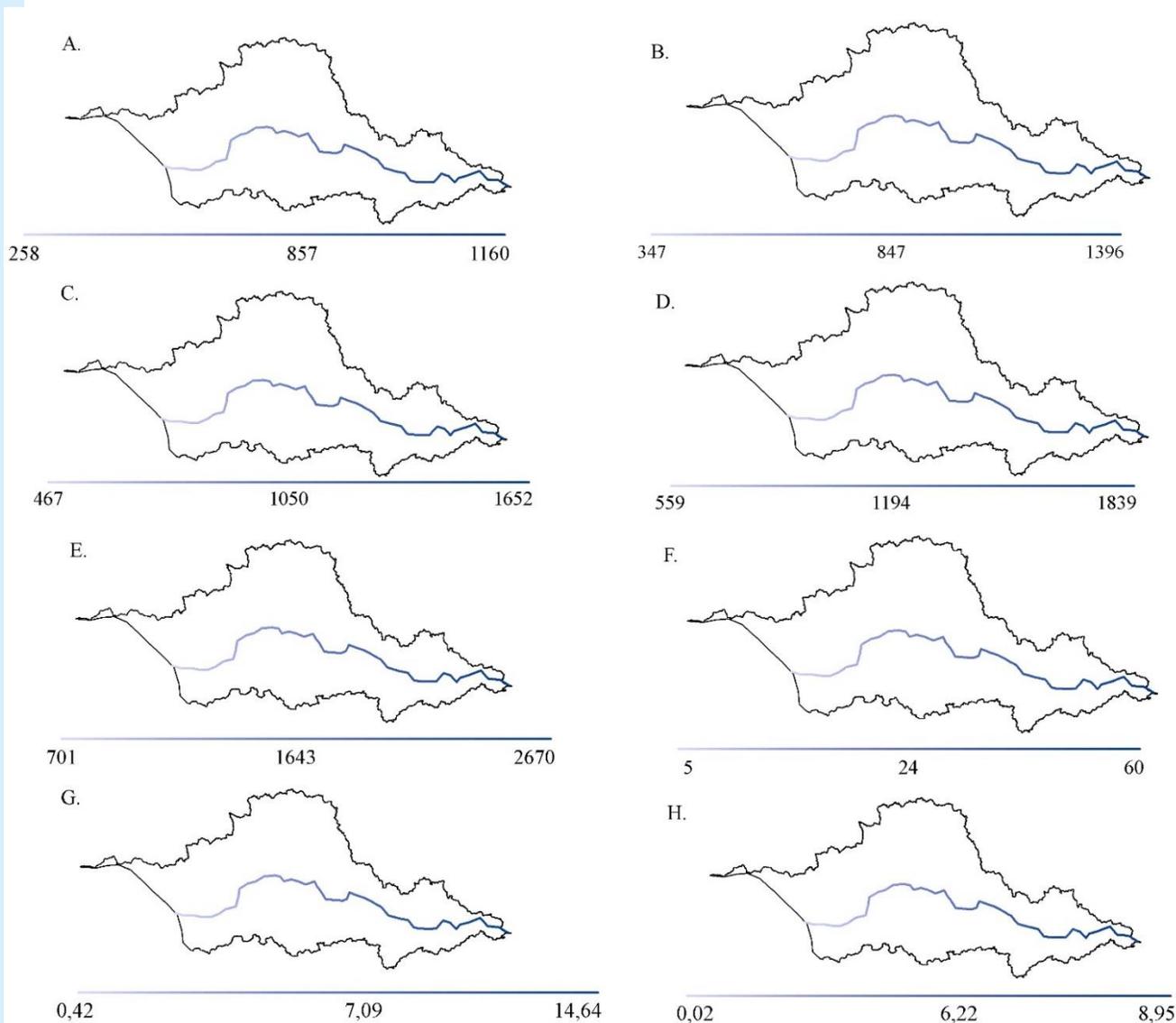
Vazões máximas com períodos de retorno de 10 anos (A), 20 anos (B), 50 anos (C), 100 anos (D) e 500 anos (E), média de longa duração (F), mínima com permanência de 90% (G) e 95% (H) observadas versus vazões estimadas, coeficiente de determinação ajustado (R^2a), erro padrão fatorial (σF) e erro percentual médio (ER%), obtidas das equações de regressão ajustadas pelo Método Tradicional para a bacia hidrográfica do rio Pardo - BA, acompanhada das suas retas de identidade. Fonte: autores, 2023.

3.4 Estimativa de vazões para o rio principal

Na Figura 3 estão apresentadas vazões máximas, médias e mínimas estimadas a cada 10 km para o rio Pardo. Os valores de vazões máximas variaram de $257,79 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2669,89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para os diferentes períodos de retorno analisados. As vazões médias de longa duração estimadas foram

entre $4,86 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ a $59,82 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$, para toda a extensão do rio principal. As estimativas de vazões mínimas com Q_{90} e Q_{95} , variaram de $0,42 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ a $14,64 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ e $0,02 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ a $8,95 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$, respectivamente, e como apresentado na Figura 3, as vazões são mais intensas à medida que se avança a jusante da bacia.

Figura 3 - Vazões máximas ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), médias ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e mínimas ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)



Vazões máximas ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com período de retorno de 10 anos ($Q_{\max 10}$) (A), 20 anos ($Q_{\max 20}$) (B), 50 anos ($Q_{\max 50}$) (C), 100 anos ($Q_{\max 100}$) (D) e 500 anos ($Q_{\max 500}$) (E), vazão média de longa duração ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (Q_{mld}) (F) e vazões mínimas ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com recorrência de 90% (Q_{90}) (G) e 95% (Q_{95}) (H) na curva de permanência, estimadas a cada 10km para o rio Pardo – BA.

Fonte: autores, 2023.

3.5 Ajustes das equações para os afluentes

Para os afluentes foi possível o ajuste apenas do modelo de regressão linear, visto que eles não dispunham de estações fluviométricas para o período considerado neste trabalho. Os modelos

foram ajustados com intercepto passando pela origem, de acordo com o proposto por Novaes (2005). Os coeficientes angulares das equações ajustados para cada afluente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes angulares de funções lineares com intercepto passando pela origem ($Q=b.A$)

| Rios | Q_{90} | Q_{mld} | Rios | Q_{90} | Q_{mld} |
|-------------|----------|-----------|--------------------|----------|-----------|
| Prata | 1,6 | 4,9 | Largo | 0,4 | 2,2 |
| Angelim | 1,5 | 4,6 | Vereda | 0,3 | 1,8 |
| Nado | 1,4 | 4,5 | Salitre | 0,2 | 1,4 |
| Catolé | 1,2 | 4,2 | Galante | 0,2 | 1,3 |
| Maiquinique | 0,9 | 3,4 | Anta | 0,2 | 1,4 |
| Manjerona | 0,6 | 2,8 | Mamoeiro | 0,1 | 1,2 |
| Verruga | 0,5 | 2,4 | Riacho das Veredas | 0,1 | 1,2 |

Coeficientes angulares de funções lineares com intercepto passando pela origem ($Q=b.A$), para Q_{90} e Q_{mld} ajustados a partir do método da conservação de massas, para estimativa das vazões em afluentes de níveis 6 e 7 (Ottocodificação) que drenam diretamente para calha do rio Pardo, sendo Q as vazões (Q_{90} ou Q_{mld}) em L/s; b o coeficiente angular e A , área de drenagem em Km^2 .

Fonte: Autores, 2023.

O método da conservação de massas permite que a estimativa de vazões seja realizada com maior consistência, visto que essa metodologia é capaz de garantir a continuidade dos valores de vazão entre os afluentes e o rio principal. Em estudos realizados por Molina *et al.* (2014) no rio Amambai – MS, ao compararem modelos de regionalização de vazões mínimas, o método da conservação de massas obteve maior eficiência para a regionalização de vazões mínimas. O método da conservação de massas se mostrou eficiente para estimava de vazões mínimas e média para a bacia hidrográfica do rio Pardo.

Ainda no estudo realizado por Araújo (2019), ao comparar os métodos tradicional e conservação de massas, obteve resultado satisfatórios para ambos os métodos, porém, em relação à vazão de permanência de 90%, o método de conservação de massas apresentou melhores resultados, com mais baixo valor de erro médio (EM) e maior coeficiente de Nash-Sutcliff, sendo o método indicado para conhecer vazões em rios afluentes na bacia hidrográfica.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados conclui-se que: a área de estudo pode ser considerada como região hidrologicamente homogênea, o que possibilita a utilização das equações para toda a área analisada; a utilização exclusiva da área de drenagem, como variável independente dos modelos de regionalização, proporcionou bons resultados para a maioria das vazões consideradas neste estudo, com exceção da vazão de referência Q_{95} (vazão com 95% de permanência da série histórica) em que, além da área de drenagem, também foi utilizado o comprimento total da rede de drenagem; na aplicação das funções de regionalização para a parte baiana da bacia, ajustadas para estimativa de vazões máximas, foi observada grande variação nos valores de vazão ao longo do rio Pardo, considerando diferentes períodos de retorno (T): 258 a 1160 $m^3.s^{-1}$ (T = 5 anos); 347 a 1396 $m^3.s^{-1}$ (T = 10 anos); 467 a 1652 $m^3.s^{-1}$ (T = 50 anos); 559 a 1839 $m^3.s^{-1}$ (T = 100 anos); e 701 a 2670 $m^3.s^{-1}$ (T = 500 anos); para as vazões médias de longa duração foi verificada variação de 4,86 $m^3.s^{-1}$ a 59,82 $m^3.s^{-1}$. As

vazões mínimas com ocorrência de 90 % e 95% da curva de permanência variaram entre 0,42 m³.s⁻¹ e 14,64 m³.s⁻¹ e entre 0,02 m³.s⁻¹ a 8,95 m³.s⁻¹, respectivamente; e a aplicação dos métodos tradicional e de conservação de massas se mostrou apropriada para regionalização de vazões para a área em estudo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB (bolsa de mestrado) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (bolsa de iniciação tecnológica e inovação), pelo apoio financeiro concedido para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. B. **Regionalização de vazões mínimas de referência e média de longa duração da bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia**. 2022. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2022.

ARAÚJO, F. C. **Regionalização de vazões na bacia hidrográfica do rio Paranapanema**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

BAHIA. Secretaria do Meio Ambiente. Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Bahia). **Programa Monitora Qualidade das Águas do Estado da Bahia**: Campanha 02/2014, RPGA do Rio Pardo. Salvador/BA. 2014. Disponível em: inema.ba.gov.br. Acesso em: 12 jul. 23.

BAHIA. Secretaria do Meio Ambiente. Instituto de Gestão das Águas e Clima. **Instrução Normativa Nº 01/2007**. Dispõe sobre a emissão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos de domínio do Estado da Bahia, assim como a sua renovação, ampliação, alteração, transferência, revisão, suspensão e extinção, e dá outras providências. 2007. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/legislacao-ambiental/instrucoes-normativas/instru-o-normativa-ing-n-01>. Acesso em: 13 de jul. 2023.

BASSO, R. E. **Estimativa de chuvas intensas em locais sem dados no Rio Grande do Sul**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

BAZZO, K. R. *et al.* Regionalização da Vazão Q95: comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v.12, n. 5, set./out. 2017.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Resolução nº 101, de 27 de setembro de 2021**. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/regulacao-e-fiscalizacao/alocacao-de-agua-e-marcos-regulatorios/marcos-regulatorios/Resolu101_2021MRPardocorrigida.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Região Hidrográfica Atlântico Leste**. Brasília, DF: ANA, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/regioes-hidrograficas/regiao-atlantico-leste>. Acesso em: 10 jul. 2023.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **HidroWeb- Sistema de Gerenciamento de Dados Hidrometeorológicos**. Brasília, DF: ANA, 2023b. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 17 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. Brasília, DF: ANA, 2023c. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/gestorpcd>. Acesso em: 20 mar. 2023.

CHIMENE, C. A. **Cheia de projeto**: equacionando os períodos de retorno obtidos de cheia de projeto com hietogramas sintéticos a cheia de projeto

obtido de chuvas observadas. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ELETROBRÁS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S. A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. *ArcGIS Desktop*. [S.l.]: [s.n.], v. 10.8, 2020.

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F.; OLIVEIRA, E. P. Atualização dos estudos hidrológicos na bacia hidrográfica do rio Pardo em Minas Gerais. **Atlas Digital do Estado de Minas Gerais**, Viçosa, 2011.

FERREIRA, R. G. *et al.* Geostatistical modeling and traditional approaches for streamflow regionalization in a Brazilian Southeast watershed. [S. l.]. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. [S.l.]. 2017. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 11 jul. 23.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Municipal 2022**. [S.l.]. 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 14 jul. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. [S.l.]. 2022b. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 14 jul. 2023.

LOPES, T. R. *et al.* Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí-PR. [S. l.]: **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 188-188, jun. 2016.

MACIEL, A. L. *et al.* Regionalização e espacialização de vazões de permanência: estudo aplicado na bacia rio Piracicaba-MG. [S. l.]: **Revista Brasileira de climatologia**, Ano 15, v. 24, jan./jun. 2019.

MELLO, F. W. P. J.; PESSOA, F. C. L.; SANTANA, L. R. Regionalização de vazões mínimas da bacia hidrográfica do Rio Mearim no estado do Maranhão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 6, p. e114962651-e114962651, 2020.

MISHRA, A. K.; COULIBALY, P. Developments in hydrometric network design: A review. [S. l.]. **Reviews of Geophysics**, v. 47, n. 2, Jun. 2009.

MOLINA, S. K. M. *et al.* Caracterização de disponibilidade hídrica e comparação de metodologias de regionalização de vazões. **Geosciences= Geociências**, v. 33, n. 3, p. 506-515, out. 2014.

MOREIRA, G. de B.; MAIA, J. L.; SILVA, J. P. O. Disponibilidade hídrica superficial da bacia hidrográfica do rio Suaçuí: análise por diferentes metodologias de definição de vazão de referência. [S. l.]: **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e0211325987, 2022.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL. **Flood Studies Report**. Her Majesty's Stationary Office, London, 1975.

NOBRE, M. R. P.; PEREIRA, M. de S.; CAMPOS, R. Estudo de vazões máximas de projeto usando uma distribuição de Gumbel. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e140101220098, set. 2021.

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

PEREIRA, M. A. F.; BARBIEIRO, B. L.; QUEVEDO, D. M. de. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para uma gestão integrada dos recursos hídricos. [S. l.]:

Sociedade & Natureza, Uberlândia, v. 32, p. 292-303, 2022.

REGO, F. S. **Regionalização de vazões considerando a evapotranspiração real em seu processo de formação**. 2013. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

RIBEIRO, T. B. **Estimativa e regionalização das vazões mínimas de referência para a Bacia do Rio Branco - RR, como suporte à gestão dos recursos hídricos**. 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2018.

SILVA, G. O. M. de; MEDEIROS, Y. D. P.; FONTES, A. S. Atualização do sistema de suporte à decisão para outorga de uso de recursos hídricos do estado da Bahia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 18, n. 2021, jul. 2021.

SIVAPALAN, M. *et al.* IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. [S. l.]: **Hydrological sciences journal**, v. 48, n. 6, p. 857-880, Dec. 2003.

SOUSA, H. T. *et al.* **SisCAH - Sistema computacional para Análise Hidrológica**. 1. ed. Brasília, DF: ANA; Viçosa, MG: UFV, v. 1, 2009.

SOUSA, H. *et al.* **SisCoRV - Sistema Computacional para Regionalização de Vazões**. 1. ed. Brasília, DF: ANA; Viçosa, MG: UFV, v. 1, 2013.

TONETTI, J.; ADAMI, R. M. Demandas do Consumo da Água Captada Pela Empresa de Abastecimento Público do Município de Pedras Grandes (SC) e Possíveis Conflitos. **Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v. 28, p. 1-19, 2022.

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002. 256 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Universidade/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

UNITED STATES OF AMERICA. United States Geological Survey. **Earth Explorer**. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

VIRÃES, M. V.; PINTO, E. J. de A. **Projeto de regionalização de vazões nas bacias hidrográficas brasileiras: sistema de alerta da bacia do Mundaú, vazões máximas diárias, análise de frequência regional**. Recife: Serviço Geológico do Brasil/CPRM, Relatório, 2023.