

Regionalização de vazões mínimas da bacia hidrográfica do Rio Mearim no estado do Maranhão

Regionalization of minimum flows in the hydrographic basin of the Rio Mearim in the state of Maranhão

Regionalización de caudales mínimos en la cuenca hidrográfica del río Mearim en el estado de Maranhão

Recebido: 22/01/2020 | Revisado: 07/02/2020 | Aceito: 17/04/2020 | Publicado: 20/04/2020

Frederico Wagner Pereira Jansen de Mello

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3222-2201>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: mellofrederico@yahoo.com

Francisco Carlos Lira Pessoa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6496-9043>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: fclpessoa@ufpa.br

Laila Rover Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1824-6976>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: lailasrover@gmail.com

Resumo

Métodos de regionalização vem sendo utilizados para estimar as vazões em regiões que apresentam carência ou mesmo inexistência de dados hidrológicos. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de regionalização de vazões mínimas de referência Q_{90} para a bacia hidrográfica do Rio Meari, no estado do Maranhão. Foram utilizados dados consistidos de 28 estações fluviométricas e de 28 estações pluviométricas. As variáveis área de drenagem, precipitação anual média e precipitação mensal média foram empregadas como características físico-climáticas da bacia em estudo. Os modelos regionais foram desenvolvidos por intermédio do Método Tradicional. Parâmetros de validação, como o coeficiente de Pearson (r), o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), o erro médio absoluto (BIAS) e o índice de desempenho “c”, foram empregados para verificar o ajuste e o desempenho dos modelos.

A equação regional linear de vazão mínima Q_{90} , explicada a partir da área de drenagem e precipitação anual média, foi o modelo que mostrou o melhor desempenho no ajuste dos valores observados e simulados, classificando-se como bom, uma vez que foram encontrados valores de R^2 e NASH superiores a 0,60, do mesmo modo que RMSE inferiores a 2, BIAS igual a 0,01 e índice de desempenho (c) superior a 0,65.

Palavras-chave: Modelos regionais; Regressão múltipla; Q_{90} .

Abstract

Regionalization methods have been used to estimate flows in regions that present lack or even lack of hydrological data. Thus, the present study aimed to develop a model of regionalization of minimum flows of reference Q_{90} for the hydrographic basin of Rio Mearim, in the state of Maranhão. Data consisting of 28 streamflow gauge and 28 rainfall gauge were used. The variables drainage area, average annual precipitation and average monthly precipitation were used as physical-climatic characteristics of the basin under study. Regional models were developed using the Traditional Method. Validation parameters, such as the Pearson coefficient (r), the coefficient of determination (R^2), the Nash-Sutcliffe coefficient (NASH), the root of the mean square error (RMSE), the mean absolute error (BIAS) and the index “c” performance indicators were used to verify the fit and performance of the models. The linear regional equation of minimum flow Q_{90} , explained from the drainage area and average annual precipitation, was the model that showed the best performance in adjusting the observed and simulated values, being classified as good, since values of R^2 and NASH greater than 0.60, as well as RMSE less than 2, BIAS equal to 0.01 and performance index (c) greater than 0.65.

Keywords: Regional models; Multiple regression; Q_{90} .

Resumen

Se han utilizado métodos de regionalización para estimar flujos en regiones que carecen o incluso carecen de datos hidrológicos. Así, el presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo de regionalización de flujos mínimos de referencia Q_{90} para la cuenca hidrográfica de Río Mearim, en el estado de Maranhão. Se utilizaron datos consistentes en 28 estaciones fluviométricas y 28 estaciones pluviométricas. Las variables área de drenaje, precipitación anual promedio y precipitación mensual promedio se usaron como características físico-climáticas de la cuenca en estudio. Los modelos regionales se desarrollaron utilizando el Método Tradicional. Parámetros de validación, como el coeficiente de Pearson (r), el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH), la raíz del error

cuadrado medio (RMSE), el error absoluto medio (BIAS) y el índice Los indicadores de rendimiento "c" se utilizaron para verificar el ajuste y el rendimiento de los modelos. La ecuación regional lineal de flujo mínimo Q_{90} , explicada por el área de drenaje y la precipitación anual promedio, fue el modelo que mostró el mejor desempeño en el ajuste de los valores observados y simulados, clasificándose como buenos, ya que los valores de R^2 y NASH mayor que 0.60, así como RMSE menor que 2, BIAS igual a 0.01 e índice de rendimiento (c) mayor que 0.65.

Palabras clave: Modelos regionales; Regresión múltiple; Q_{90} .

1. Introdução

A construção e manutenção de uma rede hidrológica abrangente e fornecedora de dados consistentes é peça essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que funciona como fonte de informações confiáveis aos estudos hidrológicos. Todavia, em territórios extensos como o Brasil, a implantação de uma rede de postos hidrológicos que cubra toda a sua área consiste em um investimento bastante elevado (Gasques *et al.*, 2018). As séries históricas de vazões são extraídas de estações fluviométricas instaladas ao longo das bacias, as quais se encontram em quantidade insuficiente, não contemplando diversas seções da hidrografia (Beskow *et al.*, 2016; Lopes *et al.*, 2016). Além da escassez de estações de monitoramento, a rede hidrometeorológica brasileira ainda esbarra em outras deficiências, como a pequena extensão das séries históricas e a quantidade de falhas nos registros existentes (Beskow *et al.*, 2014; Cecílio *et al.*, 2018). Essas carências na base de dados hidrológicos dificultam a quantificação da vazão de projeto, utilizada para previsão de enchentes, otimização da produção de energia hidrelétrica, projeto de estruturas hidráulicas e sistemas de reserva e suprimento de água para abastecimento público (Swain & Patra, 2017).

Contudo, tais problemáticas podem ser minimizadas por meio da utilização de metodologias que permitam estimar vazões em seções de rios que não apresentam medições, o que coloca a regionalização hidrológica enquanto instrumento de grande valia ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos (Tucci, 2002; Piol *et al.*, 2019). Compensando a deficiência de dados em determinadas seções a partir da otimização dos dados existentes, a técnica de regionalização utiliza as características físicas e climáticas da área de interesse como base para os modelos de regionalização (Barbosa *et al.*, 2005; Pruski *et al.*, 2012).

Pela grande contribuição da regionalização na previsão de vazões, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos, como por exemplo, nos estudos desenvolvidos por Pessoa *et al.*, 2011; Costa *e. al.*, 2012 e Silva *et al.*, 2019, os quais estimaram curvas de permanência de vazão na região da Amazônia em função de características físico-climáticas por meio de modelos de regionais. Já no trabalho de Barros *et al.*, 2019, os autores propuseram modelos regionais que permitem determinar vazões mínimas de referência $Q_{95\%}$ na Amazônia. Outros estudos como os de Novaes *et al.* 2009; Silva *et al.*, 2015; Melati, 2016; Bazzo *et al.*, 2017; Gasques *et al.* 2018 e Matias, 2018, também utilizaram o método de regressão múltipla na elaboração de modelos de regionalização de vazões mínimas em função de variáveis físicas e climáticas de cada posto de medição.

O Estado do Maranhão, assim como a maioria dos Estados brasileiros, carece de informações quantitativas e qualitativas sobre o regime de vazões de suas bacias hidrográficas. A Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Maranhão (SEMA/MA), que constitui o órgão responsável pelo licenciamento ambiental no Estado, assinala que aspectos como a já mencionada carência de dados de medições em determinadas regiões dificultam a análise de processos de licenciamento ambiental, atrasando sua decisão, uma vez que a elaboração de estudos ambientais tendem a apresentar deficiências (PNLA, 2019). Entre esses processos estão os de concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos. Segundo o Decreto nº 27.845/2011, que regulamenta a Lei nº 8.149/2004, a vazão mínima de referência utilizada no Estado é a Q_{90} (Maranhão, 2011).

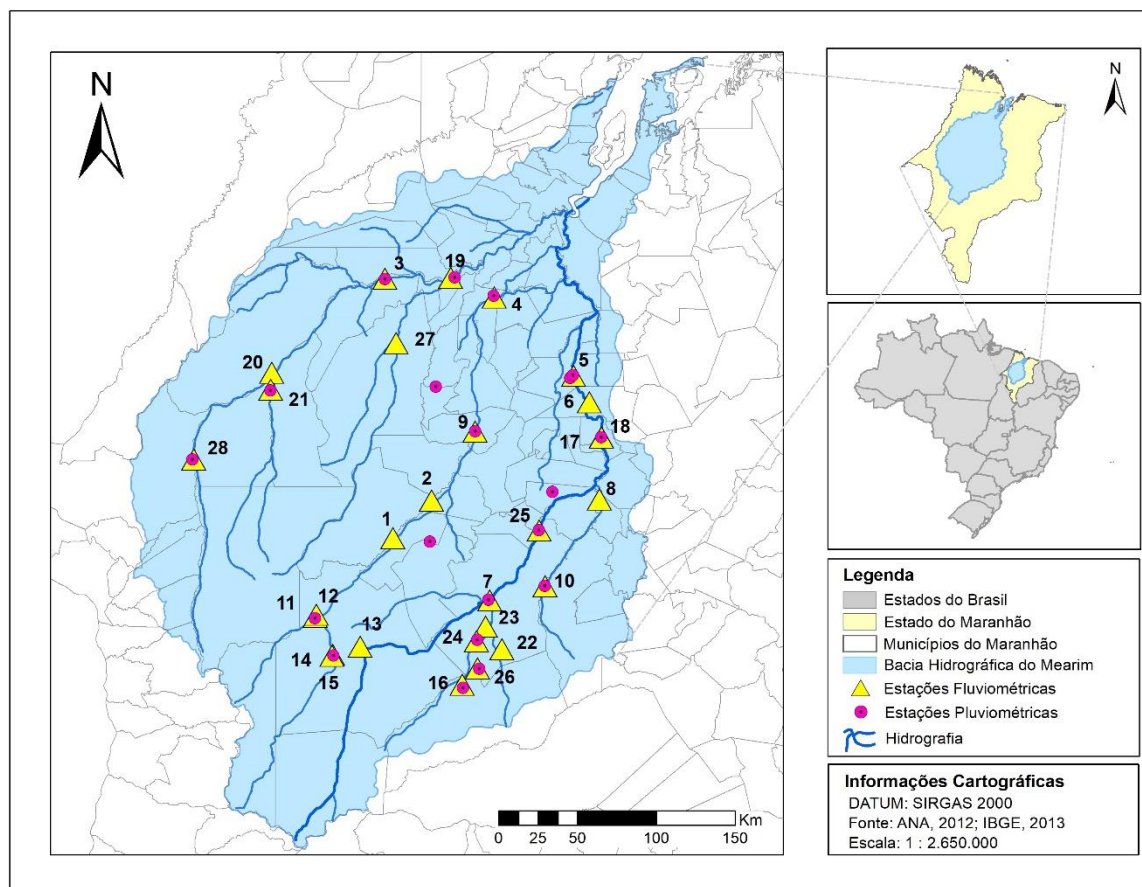
As vazões mínimas caracterizam a disponibilidade hídrica natural da bacia hidrográfica (Smakhtin, 2001), e são variáveis imprescindíveis para a concessão de uso da água e diluição de efluentes, fatores que influenciam o manejo de conflitos através do uso em situações de escassez (Granemann *et al.*, 2018). Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e aplicar modelos de regionalização de vazões mínimas de referência Q_{90} na bacia hidrográfica do Rio Mearim, visando contribuir no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos da maior bacia do Estado do Maranhão. Use o parágrafo como modelo

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Mearim está localizada no Estado do Maranhão e corresponde a 29,84% da área total do estado (Figura 1), o que a coloca como a maior bacia maranhense (Nugeo, 2009). Segundo a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba – CODEVASF (2018), a bacia do rio Mearim abrange 84 municípios, dos quais 50 totalmente inseridos, e 34 parcialmente inseridos nos limites da bacia.

Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio Mearim.



Fonte: Autores.

A bacia hidrográfica do rio Mearim divide-se em três trechos, Alto, Médio e Baixo Mearim, abrangendo uma área de 98.289,05 km². O rio que dá nome à bacia, Mearim, possui extensão de 742 km, e tem como principais tributários os rios Corda e Flores, pela margem direita, e os rios Pindaré e Grajaú, pela margem esquerda (CODEVASF, 2019). Segundo

Zanandrea et al., (2017), a vazão média total na foz do Mearim é de 557 m³/s, e os totais precipitados anuais chegam a 1900 mm no período chuvoso, que se estende de janeiro a junho.

2.2. Dados utilizados no estudo

No presente estudo foram utilizados dados consistidos de 28 estações fluviométricas e de 28 estações pluviométricas disponíveis na rede hidrometeorológica do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). Na Figura 1 pode ser observada a espacialização de todas as estações utilizadas na pesquisa.

Na Tabela 1 são apresentadas as informações de cada uma das estações fluviométricas utilizadas no estudo, como identificação (ID), código e o nome das estações, bem como os valores das variáveis área de drenagem - A (Km²), precipitação anual média - PAM (mm) e precipitação mensal média - PMM (mm), como características físico-climáticas de cada bacia hidrográfica (estações fluviométricas) utilizada no estudo, as quais explicam o comportamento da vazão de referência Q₉₀ (m³/s).

Tabela 1. Características físico-climáticas das sub-bacias hidrográficas do Rio Mearim.

ID	Código	Estações	Q ₉₀	A (km ²)	PAM (mm)	PMM (mm)	Período
1	33333000	Itaipava do Grajaú	3,39	11400	1157,1	321	2003-2014
2	33360000	Madail	10	12900	1157,1	321	1970-1978
3	33080000	Alto Alegre	28,9	23400	1580,5	131,7	1999-2014
4	33380000	Aratoí Grande	6,64	20300	1653,6	356	1970-2014
5	33290000	Bacabal	42,3	25500	1820,1	353	1975-2014
6	33286000	São Luiz Gonzaga	39,8	25200	1672,7	326	1989-2014
7	33250000	Barra do Corda	37,6	13200	909	287	1964-2014
8	33273000	Joselândia	4,2	5900	1943,9	338	2000-2014
9	33365000	Fazenda Sabesa	3,34	17200	1531	127,6	1999-2014

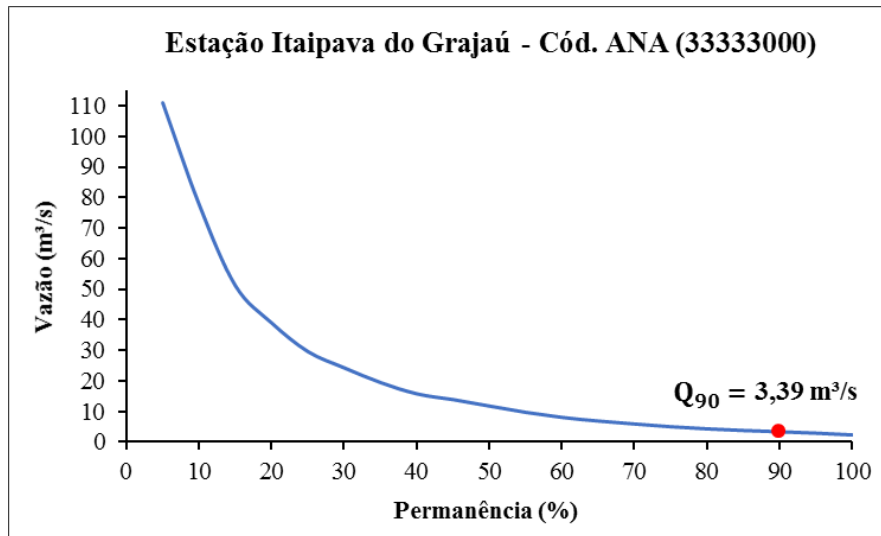
10	33270000	Flores	0,34	1320	1243,2	362	1971-2014
11	33330000	Fortaleza	1,24	3590	1123,3	93,1	1979-2014
12	33340000	Gado Bravo	2,9	3790	1123,3	93,1	1970-1979
13	33205000	Fazenda Remanso	13,5	3730	1263	290	1979-2014
14	33320000	Grajau	6,82	4510	1263	290	1965-1982
15	33321000	Grajau II	3,29	4510	1263	290	1978-2014
16	33212000	Papagaio	1,38	93,4	1194	101	2004-2014
17	33638000	Pedras	0,25	1010	1504,6	351	1979-2014
18	33281000	Pedreiras II	40,9	24000	1504,6	351	1978-2014
19	33190000	Pindaré-Mirim	27,5	35400	1882,8	158,8	1971-2014
20	33070000	Fazenda Varig	16,1	10400	1404,2	117,4	2004-2014
21	33075000	Ponte BR-222	0,68	4750	1404,2	117,4	1979-2014
22	33222000	Fazenda Ourives	3,17	876	1078,4	365	2004-2014
23	33220000	Rio Corda	18,9	4560	1078,4	365	1971-1979
24	33215000	Rio Corda II	16,7	3000	1078,4	365	1981-2014
25	33260000	Santa Vitória	36,9	15400	1261	365	1972-2014
26	33214000	São Carlos	3,68	523	1011,3	84,3	2003-2014
27	33170000	Esperantina	2,1	5930	1867	281	1972-2014
28	33025000	Vale do Pindaré	2,61	5480	1257	112,1	1979-2014

Fonte: HidroWeb (ANA, 2019); Autores.

As precipitações anuais e mensais médias foram quantificadas por intermédio das séries históricas de cada uma das estações pluviométricas obtidas no sistema de informações (HidroWeb) da Agência Nacional de Águas – ANA, igualmente a área de drenagem, a qual pode ser obtida juntamente com as informações das estações fluviométricas.

As vazões mínimas de referência $Q_{90\%}$ utilizadas nesta pesquisa foram quantificadas por meio do traçado da curva de permanência de vazão de cada posto fluviométrico da bacia hidrográfica do Rio Mearim. A curva de permanência da estação fluviométrica Itaipava do Grajaú (Cód. ANA 33333000) foi traçada a fim de exemplificar a metodologia de identificação da $Q_{90\%}$ (Figura 2).

Figura 2. Curva de permanência de vazão.



2.3 Desenvolvimento do modelo de regionalização da vazão mínima de referência Q_{90}

O modelo de regionalização foi desenvolvido por intermédio da utilização do Método Tradicional (MT), o qual faz uso da análise de regressão múltipla (ELETROBRÁS, 1985). O Método Tradicional é um dos mais utilizados no Brasil para regionalização de vazões, e consiste no ajuste das regressões múltiplas entre a vazão e as características físicas e climáticas das bacias hidrográficas para cada região hidrologicamente homogênea (GONÇALVES *et al.*, 2018; BAZZO *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2010). Nesta pesquisa, a vazão mínima de referência Q_{90} (variável dependente) é analisada em função das variáveis explicativas da ocorrência da vazão, que são Área de drenagem (A), Precipitações médias Anuais (PAM) e Precipitações médias Mensais (PMM).

Para equacionar a relação entre a variável dependente e as variáveis explicativas, utilizou-se os métodos de regressão linear múltipla (Equação 1) e de regressão não linear múltipla (Equação 2) proposto por Hair *et al.* (2005).

$$Y = \beta_1 + \beta_2.X_2 + \dots + \beta_i.X_i + \epsilon \quad (1)$$

$$Y = \beta_1.X_2^{\beta_2} \dots X_i^{\beta_i} + \epsilon \quad (2)$$

em que Y é a variável dependente ou prevista, X_1, X_2, \dots, X_i são as variáveis independentes ou explicativas, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$ são os coeficientes de regressão e ϵ denota os erros da regressão. Os valores de $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i$ foram determinados pelo método dos mínimos quadrados, por intermédio de planilha eletrônica.

2.4 Parâmetros de validação do modelo regional

Na validação dos modelos regionais foram utilizados os seguintes parâmetros: o coeficiente de correlação de Pearson (r), o coeficiente de determinação múltipla (R^2) e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash), assim como, os Índices de desempenho RMSE e BIAS, e os Índices de concordância (D) e de desempenho ou confiança (c).

2.4.1 Coeficiente de correlação de Pearson (r)

O coeficiente de correlação de Pearson (r) consiste em uma medida de associação linear entre variáveis, apontando a direção e o grau desta relação (FILHO; JÚNIOR, 2009). A matriz de correlação é construída a partir do cálculo dos coeficientes de correlação simples entre as variáveis do modelo. A correlação entre duas variáveis X_1 e X_2 é determinada pelo coeficiente de regressão simples r , definido pela Equação 3:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n X_{1,i} \cdot X_{2,i} - \sum_{i=1}^n X_{1,i} \cdot \sum_{i=1}^n X_{2,i}}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n X_{1,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_{1,i} \right)^2 \right] \cdot \left[n \sum_{i=1}^n X_{2,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_{2,i} \right)^2 \right]}} \quad (3)$$

O coeficiente r varia de -1 a 1. Quando r é positivo, indica uma tendência de crescimento conjunto de X_1 e X_2 . Quando r é negativo, maiores valores de X_1 são associados a menores valores de X_2 . Quanto mais próximo da unidade, melhor a correlação entre X_1 e X_2 .

2.4.2 Coeficiente de determinação múltipla (R^2)

O coeficiente de determinação múltipla (R^2) é uma medida adimensional da associação linear entre as variáveis. Ele é definido pela seguinte relação – Equação 4 - (NAGHETTINI e PINTO, 2007):

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQT} = \frac{\left[\hat{\beta} \right] [X]^T [Y] - n\bar{Y}^2}{[Y]^T [Y] - n\bar{Y}^2} \quad (4)$$

em que n é o número de observações, Y é a matriz da variável dependente, X é a matriz das variáveis independentes, β é a matriz dos coeficientes de regressão e \bar{Y} é a média da variável dependente.

O coeficiente de determinação múltipla varia entre 0 e 1, e expressa a proporção da variância que é explicada pelo modelo de regressão.

2.4.3 Coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash)

A estatística do coeficiente de Nash (Equação 5) compara a redução do desvio quadrático do erro do modelo com o desvio quadrático do modelo alternativo de prever sempre a média dos valores (Nash & Sutcliffe, 1970).

$$NASH = 1 - \frac{\sum (Y_{obs}(t) - Y_{cal}(t))^2}{\sum (Y_{obs}(t) - \bar{Y}_{obs}(t))^2} \quad (5)$$

em que Y_{obs} é a vazão observada, Y_{cal} é a vazão simulada pelo modelo e \bar{Y}_{obs} é a média das vazões observadas.

2.4.4 Índices de desempenho RMSE e BIAS

Outros critérios sugeridos para avaliação do desempenho do método são: a raiz quadrada da média dos erros quadráticos (*The Root Mean Square Error* – RMSE) e o erro médio absoluto (BIAS), respectivamente dados pelas equações (6) e (7).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \hat{q}_i)^2} \quad (6)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - \hat{q}_i) \quad (7)$$

nas quais n é o número de observações, q_i e \hat{q}_i são, respectivamente, as vazões observadas e as vazões simuladas.

O RMSE é usado para estimar a qualidade de um modelo, apontando diferenças entre os valores previstos por um modelo e os valores observados, sendo sempre não negativo e, quanto mais próximo de 0, mais perfeito o ajuste. Também com a finalidade de validar ajustes de modelos de regionalização, o erro médio absoluto (BIAS) assinala a média do afastamento entre todos os valores simulados e os observados, de modo que um valor menor nesse índice significa uma melhor qualidade de ajuste no modelo. Ou seja, é o valor médio dos desvios dos valores simulados em relação aos valores observados, de forma que quanto maior o BIAS, maior o erro.

2.4.5 Índices de concordância (D) e de desempenho ou confiança (c)

Para avaliar o desempenho dos modelos regionais foram usados o índice de Willmott *et. al.* (1985) e o índice de confiança (c), expressos pelas equações 8 e 9, respectivamente.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ei} - Y_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (|Y_{ei} - \bar{Y}_o| + |Y_{oi} - \bar{Y}_o|)^2} \right] \quad (8)$$

$$C = r.D \quad (9)$$

em que “r” é o coeficiente de Pearson, Y_{ei} é o i-ésimo valor previsto ou estimado, Y_{oi} é o i-ésimo valor observado e \bar{Y}_o é a média dos valores observados.

O valor do índice de desempenho “c” foi interpretado conforme Camargo e Sentelhas (1997), cujo o sistema de classificação aplicado é evidente na Tabela 2.

Tabela 2. Critérios de interpretação do índice de desempenho “c”.

Índice de desempenho “c”	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo & Sentelhas (1997)

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 3 é exibida uma estatística descritiva da vazão mínima de referência (Q_{90}), da mesma maneira que para as variáveis explicativas da ocorrência da vazão: Área de drenagem (A), Precipitações médias Anuais (PAM) e Precipitações médias Mensais (PMM).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos das variáveis utilizadas no estudo.

Variáveis	Média	Mediana	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Q₉₀ (m³/s)	13,40	5,42	14,60	0,25	42,30
A (km²)	10.281,16	5.690	9.553,41	93,40	35.400
PAM (mm)	1.365,34	1.263	287,84	909	1.943,9
PMM (mm)	254,05	290	110,27	84,30	365

A estatística descritiva foi realizada para verificar o comportamento do regime da vazão mínima de referência Q₉₀ na bacia do Rio Mearim, em que observa-se uma vazão média de 13,40 m³/s, mínima de 0,25 m³/s e máxima de 42,30 m³/s, bem como áreas de drenagem que variam de 93,40 km² a 35.400 km², variável que apresentou o maior desvio padrão. Quanto a precipitação, a bacia apresentou em média uma precipitação anual de 1.365,34 mm, sendo a menor PAM igual a 909 mm e a maior de q.943,9 mm.

Na Tabela 4 é apresentada a matriz de correlação entre a variável dependente (vazão Q₉₀) e as variáveis independentes (área de drenagem, precipitação anual média e precipitação mensal média).

Tabela 4. Matriz de correlação entre as variáveis utilizadas no estudo.

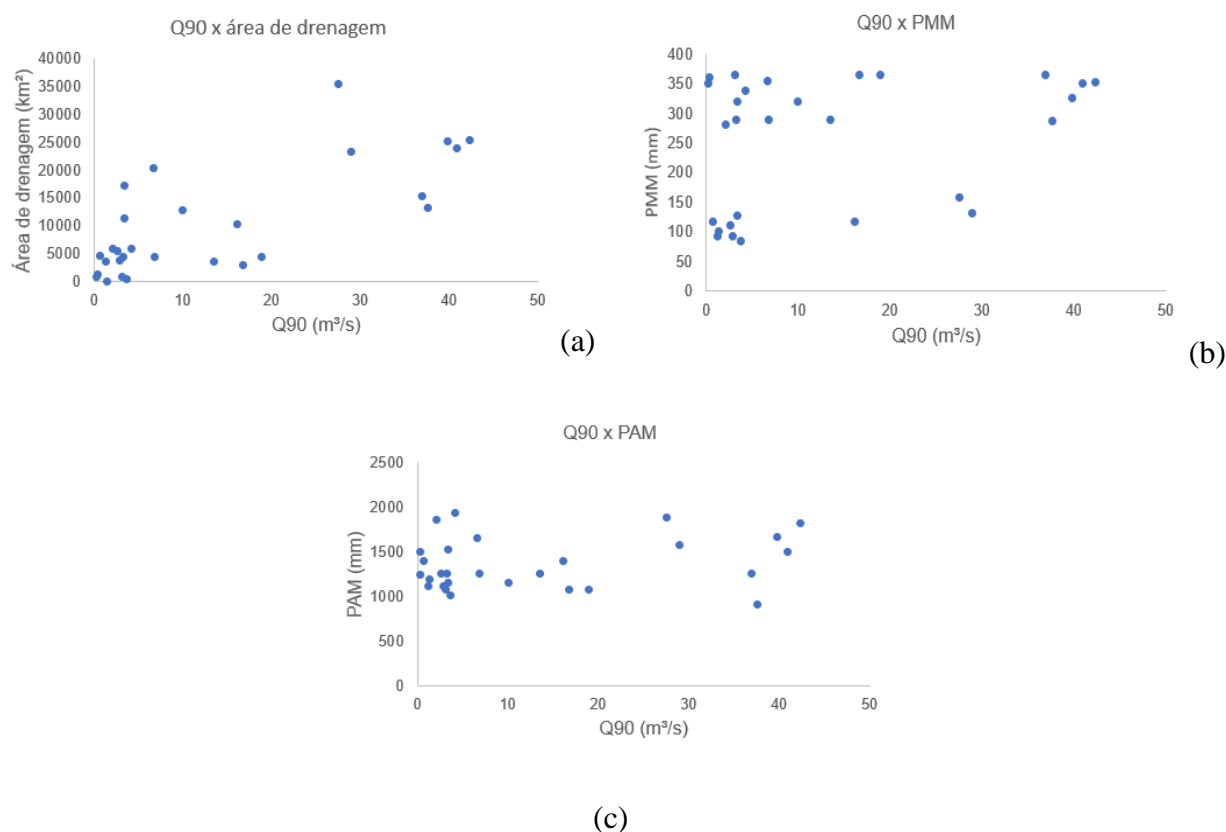
	Q ₉₀ (m ³ /s)	A (km ²)	PAM (mm)	PMM (mm)
Q₉₀ (m³/s)	1			
A (km²)	0,73	1		
PAM (mm)	0,21	0,57	1	
PMM (mm)	0,29	0,08	0,10	1

Analisando na Tabela 4, a variável vazão (dependente) em relação às variáveis independentes (A, PAM e PMM), observa-se uma dependência linear forte entre a vazão e a área de drenagem, uma vez que resultou em um coeficiente de correlação de Pearson (r) superior a 0,70, como recomendado na pesquisa de Cunha *et. al.* (2013). Isso indica que a área de drenagem, possivelmente, é a variável mais significativa entre as variáveis

independentes. Pessoa *et. al.*, (2011) e Silva *et. al.*, (2015) definiram a variável área de drenagem como a mais significativa para os modelos de regionalização de curvas de permanência de vazões por meio do coeficiente de correlação. Os mesmos resultados foram encontrados nos estudos de Maciel *et al.*, 2019, Lopes *et al.*, 2017, Dos Reis *et al.*, 2013, que regionalizaram vazões de referência Q_{90} ou Q_{95} , e concluíram que a área de drenagem é a variável mais expressiva na representação dessas vazões mínimas.

A dependência linear forte entre as variáveis vazão e área de drenagem pode ser conferida nos gráficos de dispersão apresentados na Figura 3.

Figura 3. Gráficos de dispersão entre a Q_{90} e as características físico-climáticas.



Em contrapartida, ao analisar somente as correlações entre as variáveis independentes (Tabela 4), verificou-se que não ocorreu multi-colinearidade entre as variáveis explicativas, uma vez que os valores encontrados foram inferiores a 0,85, valor recomendado por Naghettini e Pinto (2007). Em vista disso, todas as variáveis independentes foram testadas no desenvolvimento dos modelos regionais.

3.1 Modelos regionais da vazão mínima Q_{90}

Quanto às equações de regionalização, as mesmas foram desenvolvidas por intermédio de regressão múltipla, em que a vazão mínima Q_{90} foi relacionada às características físico-climáticas (área de drenagem, precipitação anual média e precipitação mensal média) da bacia hidrográfica do Rio Mearim.

As equações 10, 11, 12, 13, 14 e 15, apresentadas na Tabela 5, foram os modelos regionais da vazão mínima de referência Q_{90} testados para a bacia do Rio Mearim.

Para fins de validação dos modelos de regionalização da vazão mínima de referência Q_{90} , foram adotados nesta análise o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH), a raiz do erro quadrático médio - RMSE (The Root Mean Square Erro) e o erro médio absoluto (BIAS). Da mesma maneira que o desempenho dos modelos foram avaliados por meio do índice de concordância (d) de Willmott *et. al.* (1985) e o índice de desempenho “c”. O resumo dos resultados dos critérios utilizados para avaliar o desempenho dos modelos regionais é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Resumo dos critérios utilizados na avaliação do desempenho dos modelos regionais para a bacia do Rio Mearim.

Modelos regionais	Eq.	R^2	NASH	RMSE	BIAS	d	c
$Q_{90} = 1,884 + 0,0011.A$	10	0,54	0,54	2,07	0,01	0,82	0,60
$Q_{90} = 0,0083.A^{-0,757}$	11	0,41	0,31	2,51	5,74	0,64	0,41
$Q_{90} = 20,730+0,0014.A-0,016.PAM$	12	0,61	0,61	1,92	0,01	0,86	0,67
$Q_{90} = 18160,25.A^{0,912}.PAM^{-2,215}$	13	0,47	0,33	2,49	5,40	0,66	0,45
$Q_{90} = -5,815+0,0011.A+0,032.PMM$	14	0,59	0,59	1,95	0,01	0,85	0,66
$Q_{90} = 0,0043.A^{0,743}.PMM^{0,144}$	15	0,41	0,33	2,48	5,75	0,66	0,42

Com base no resultado apresentado para o coeficiente R^2 , o modelo que obteve melhor desempenho foi o que utilizou como variáveis explicativas a área de drenagem e a precipitação anual média (Equação 12). O mesmo é um modelo linear, o qual atingiu um valor R^2 superior a 0,60. Em vista disso, este modelo pode ser considerado aceitável para

simulação da vazão Q_{90} na bacia do Rio Mearim uma vez que, segundo Collischonn (2001), se o valor de R^2 estiver entre 0,36 e 0,75 o desempenho do modelo é aceitável e, superior a 0,75, muito bom.

Bazzo *et. al.* (2017) estudaram a regionalização da vazão $Q_{95\%}$ para a bacia do Rio Taquari-Antas (RS) por meio do método tradicional e obtiveram um R^2 de 0,90. Apesar de o coeficiente encontrado ter um valor bastante significativo, os autores destacam que para assegurar a confiabilidade do modelo encontrado há a necessidade de incluir mais índices estatísticos, como o RMSE e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH).

O coeficiente de NASH, bem como os erros RMSE e BIAS, foram utilizados para validar e identificar o melhor modelo de regional da vazão mínima Q_{90} para a bacia do Rio Mearim. Considerando os resultados da Tabela 5, pode-se dizer que o modelo regional linear que utilizou as variáveis área de drenagem e PAM (Equação 12) foi o que apresentou melhores resultados, como um valor de NASH superior a 0,60, e os menores erros RMSE e BIAS, 1,92 e 0,01, respectivamente, confirmando o resultado obtido na análise do coeficiente R^2 .

Desta forma, o modelo de regional linear com as variáveis A e PAM (Equação 12) apresentou um ajuste julgado como bom para satisfatório, uma vez que, segundo o estudo de Moriasi *et. al.* (2007), valor de NASH superiores a 0,50 e inferior ou igual a 0,75 a qualidade do ajuste do modelo é considerada de boa a satisfatória. Barros *et. al.* (2019) utilizaram o coeficiente NASH para avaliar o desempenho dos modelos de regionalização da vazão mínima $Q_{95\%}$ na Amazônia Legal e os valores médios de NASH quantificados também foram superiores a 0,60.

Em um estudo de regionalização de vazões para o médio e alto Rio Teles Pires (MT), Uliana *et. al.* (2016) obteve um valor de RMSE igual a 50,12 ao utilizar no estudo o modelo de regressão linear para a $Q_{95\%}$, concluindo que o mesmo não era o mais adequado ao caso estudado e recomendando o uso do modelo de regressão potencial, o qual obteve um RMSE igual a 17,12. Em contrapartida, Bork (2018), em seu estudo de regionalização das vazões mínimas Q_{90} para o Estado do Rio Grande do Sul, obteve um erro médio absoluto (BIAS) variando de 3,74 a 24,14. Já Cunha *et. al.* (2013) obtiveram valores de BIAS que foram de 0,52 a 0,80 em suas análises, tendo consistido em um índice fundamental na constatação do melhor modelo a ser utilizado.

Com a finalidade de obter uma maior confiabilidade na validação do modelo regional, determinou-se o índice de desempenho ou de confiança (c), desenvolvido por Camargo e Sentelhas (1997), o qual é obtido por meio do produto entre o coeficiente de correlação de

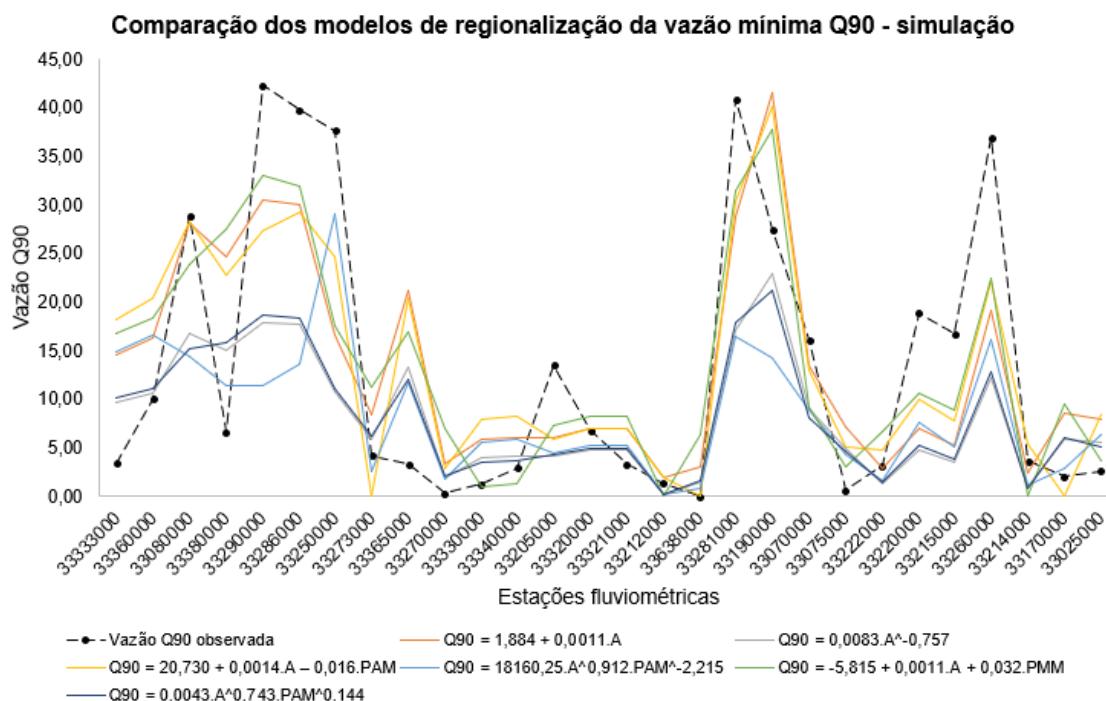
Pearson (r) e o índice de exatidão de Willmott (d). Na Tabela 5, o maior valor observado para o índice c é de 0,67, o que indica que o modelo regional linear com variáveis explicativas A e PAM é classificado como um bom ajuste.

Amorim *et. al.* (2010) avaliaram o desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica, e obtiveram índices de confiança que variaram entre 0,33 e 0,74. Por outro lado, Andrade *et. al.* (2016) obtiveram valores de “c” que foram de 0,60 a 0,64.

Portanto, como consequência dos resultados encontrados na validação dos modelos regionais, mostrados na Tabela 5, o modelo de regionalização linear da vazão mínima de referência Q_{90} em função da área de drenagem e a precipitação anual média ($Q_{90} = 20,730 + 0,0014.A - 0,016.PAM$) é o mais recomendado para estimar a vazão Q_{90} dentro dos limites da bacia hidrográfica do Rio Mearim.

Na Figura 4 é apresentado o gráfico comparativo entre as vazões observadas em cada posto fluviométrico e as vazões estimadas por todos os modelos de regionalização propostos nesta pesquisa.

Figura 4. Gráfico comparativo do desempenho dos modelos de regionalização da vazão mínima Q_{90} .



Analisando o gráfico comparativo da Figura 4, nota-se que o modelo de regionalização da vazão mínima Q_{90} (Equação 12), mesmo apresentando melhores resultados na validação

como menores erros RMSE e BIAS, e maiores coeficientes de determinação R^2 , NASH e índice de desempenho c, ainda precisa ser melhorado, uma vez que para algumas estações os erros na simulação foram considerados elevados. Esse problema poderá ser minimizado com aplicação de técnicas que permitam a identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, resultando em duas ou mais regiões com comportamentos semelhantes dentro da bacia do rio Mearim.

Verificou-se também que alguns postos fluviométricos apresentam traçados das curvas de permanência de vazão diferentes da grande maioria das estações, como pode ser visto nas estações Papagaio (Cód. ANA 33212000), Rio Corda I (Cód. ANA 33220000), Rio Corda II (Cód. ANA 33215000) e São Carlos (Cód. ANA 33214000). Esse comportamento pode influenciar negativamente no modelo regional. Por tanto, recomenda-se para trabalhos futuros desenvolver modelos de regionalização da Q_{90} para a bacia do Rio Mearim sem a utilização dos dados dessas estações, a fim de verificar se os erros e os parâmetros de desempenho apresentarão resultados bem mais satisfatórios.

4. Considerações Finais

Este estudo aplicou uma metodologia existente de regionalização de vazões para a região da Bacia Hidrográfica do Rio Mearim, no Estado do Maranhão.

O modelo regional da vazão mínima de referência Q_{90} revela-se adequado para a bacia hidrográfica do Rio Mearim, sendo indicado o seu uso, uma vez que o estudo mostrou a eficiência do modelo, apresentando bons resultados nos testes de desempenho realizados.

Dessa forma, o resultado da pesquisa é útil na gestão e planejamento dos recursos hídricos no estado do Maranhão, particularmente, na bacia hidrográfica do Rio Mearim. Do mesmo modo que contribui, como uma ferramenta de gestão, no processo de outorga de uso da água, visto que o modelo de regionalização permite estimar a vazão mínima de referência Q_{90} . Sugere-se regionalizar a Q_{90} por meio de outros métodos a fim de se verificar se os resultados são semelhantes aos encontrados pelo Método Tradicional, além de inserir outras variáveis explicativas no modelo de regionalização.

Ressalta-se também a importância em realizar estudos semelhantes nas demais bacias hidrográficas do Maranhão, uma vez que essa região carece de trabalhos científicos.

Referências

- Amorim, R. S. S.; Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Matos A. T. (2010). Avaliação do desempenho dos modelos de predição da erosão hídrica USLE, RUSLE e WEPP para diferentes condições edafoclimáticas do Brasil. *Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 30 (6), 1046-1049.
- Andrade, A. D.; Miranda, W. L.; Carvalho L. G.; Figueiredo, P. H. F.; Silva, T. B. S. (2016). Desempenho de métodos de cálculo do coeficiente de tanque para estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Irriga, Botucatu*, 21 (1), 119-130, 2016.
- Barbosa, S. E. D. S., Barbosa Júnior, A. R., Silva, G. Q. D., Campos, E. N. B., & Rodrigues, V. D. C. (2005). Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para a Bacia do Rio do Carmo, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10(1), 64-71.
- Barros, C. G. D.; Blanco, C. J. C.; Pessoa, F. C. L.; Gomes, E. P.; Santana, L. R. (2019). Regionalização da $Q_{95\%}$ na Amazônia. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 12 (1), 1-13.
- Bazzo, K. R.; Guedes, H. A. S.; Castro, A. S.; Siqueira, T. M.; Gandra, C. F. (2017). Regionalização da vazão Q_{95} : comparação de métodos para a bacia hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS. *Revista Ambiente & Água, Taubaté, SP*, 12 (5), 855-870.
- Beskow, S., Mello, C. R. D., Faria, L. C., Simões, M. C., Caldeira, T. L., & Nunes, G. S. (2014). Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(7), 748-754.
- Beskow, S., Timm, L. C., Tavares, V. E. Q., Caldeira, T. L., & Aquino, L. S. (2016). Potential of the LASH model for water resources management in data-scarce basins: a case study of the Fragata River basin, southern Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14), 2567-2578.
- Bork, C. K. (2018). *Regionalização de vazões mínimas para o Estado do Rio Grande do Sul*. Pelotas: UFP. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Camargo, A.P.; Sentelhas, P. C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5, 89-97.

Cecílio, R. A., Zanetti, S. S., Gasparini, K. A. C., & Catrinck, C. N. (2018). Avaliação de métodos para regionalização das vazões mínimas e médias na bacia do rio Itapemirim. *Revista Scientia Agraria*, 19(2), 122-132.

CODEVASF (2019) – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. *Plano Nascente Mearim: plano de preservação e recuperação de nascentes da bacia hidrográfica do rio Mearim* / Organizadores, Leila Lopes da Mota Alves Porto, Eduardo Jorge de Oliveira Motta, Camilo Cavalcante de Souza. – Brasília: Codevasf, 2019.188 p.

CODEVASF (2018) – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. *Bacia Hidrográfica do Rio Mearim*. Acesso em 08 de setembro de 2018, em <http://www2.codevasf.gov.br/area-de-atuacao/bacia-hidrografica/mearim>.

Costa, A. S.; Cariello, B. L.; Blanco, C. J. C.; Pessoa, F. C. L. (2012). Regionalização de curvas de permanência de vazão de regiões hidrográficas do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27, (4), 413-422.

Cunha, P. C. R.; Nascimento, J. L.; Silveira, P. M.; Alves Júnior, J. (2013). Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência. *Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia*, 43 (2), 114-122.

dos Reis, J. A. T., Caiado, M. A. C., Barbosa, J. F., Moscon, M., & Mendonça, A. S. F. (2013). Análise regional de vazão mínima de referência na Região Centro-Sul do Estado do Espírito Santo. *Revista CIATEC–UPF*, 5(2), 1-11.

ELETRONBRAS (1985). *Metodologia para Regionalização de Vazões*. Rio de Janeiro.

Filho, D. B. F.; Júnior, J. A. S. (2009). Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18 (1).

Gasques, A. C. F.; Neves, G. L.; Santos, J. D.; Mauad, F. F.; Okawa, C. M. P (2018). Regionalização de vazões mínimas: breve revisão teórica. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil - REEC*, 14 (2),.60-70.

Granemann, A. R. B., Mine, M. R. M., & Kaviski, E. (2018). Frequency analysis of minimum flows. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH*, 23.

Gonçalves, C. J., de Oliveira, A. C. M., de Oliveira, J. R. S., & Ribeiro, R. B. (2018). Estudo de Regionalização de Vazões para a bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. *Sustentare*, 2(2), 97-114.

Hair, J. F.; Tatham, R. L.; Black, W. C. (2005). *Análise de Regressão Múltipla*; trad. Schelup, A. e Chaves, A. 5. ed. Porto Alegre: Bookman.

Li, M., Shao, Q., Zhang, L., & Chiew, F. H. (2010). A new regionalization approach and its application to predict flow duration curve in ungauged basins. *Journal of Hydrology*, 389(1-2), 137-145.

Lopes, T. R., do Prado, G., Zolin, C. A., Paulino, J., & Antoniel, L. S. (2016). Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Ivaí-PR. *Irriga*, 21(1), 188-188.

Lopes, T. R., Zolin, C. A., Prado, G. D., Paulino, J., & Almeida, F. T. D. (2017). Regionalization of maximum and minimum flow in the Teles Pires basin, Brazil. *Engenharia Agrícola*, 37(1), 54-63.

Maranhão (2011). *Decreto nº 27.845, de 18 de novembro de 2011*. Regulamenta a Lei nº 8.149, de 15 de junho de 2004, que institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos, com relação às águas superficiais, e dá outras providências. *Diário Oficial [do] Estado do Maranhão*, São Luís, 18 nov. 2011.

Melati, M. D., & Marcuzzo, F. F. N. (2016). Regressões simples e robusta na regionalização da vazão Q95 na Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas. *Ciência e Natura*, v. 38, p. 722–739.

Naghettini, M.; Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Superintendência Regional de Belo Horizonte, 552.

NUGEO (2009). Núcleo Geoambiental da Universidade Estadual do Maranhão. **Regiões Hidrográficas do Maranhão**. Acesso em 08 de setembro de 2018, em http://www.nugeo.uema.br/?page_id=233.

Pessoa, F. C. L.; Blanco, C. J. C.; Martins, J. R. (2011). Regionalização de curvas de permanência de vazões da região da Calha Norte no Estado do Pará. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 16, (2), 65-74.

Piol, M. V. A., Reis, J. A. T. D., Caiado, M. A. C., & Mendonça, A. S. F. (2019). Performance evaluation of flow duration curves regionalization methods. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24.

PNLA (2018). *Portal Nacional de Licenciamento Ambiental*. Acesso em 07 de novembro de 2019, em <http://pnla.mma.gov.br/images/2018/08/Procedimentos-de-Licencamento-Ambiental-MARANH%C3%83O-MA.pdf>.

Pruski, F. F., de Araújo Nunes, A., Rego, F. S., & de Souza, M. F. (2012). Extrapolação de equações de regionalização de vazões mínimas: Alternativas para atenuar os riscos. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, 1(1), 51-59.

Silva, B. M. B.; Silva, D. D.; Moreira, M. C. (2015). Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do Rio Paraopeba. *Revista Ambiente & Água, Taubaté*, 10 (3), 624-634.

Silva, R. S.; Blanco, C. J. C.; Pessoa, F. C. L. (2019). Alternative for regionalization of flow duration curves. *Journal of Applied Engineering and Research*, 1-9.

Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of hydrology*, 240(3-4), 147-186.

Swain , J. B., & Patra, K. C. (2017). Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *Journal of Hydrology*, 554, 420-433.

Tutti, C. E. M. (2002). *Regionalização de vazões*. Porto Alegre, Ed. ABRH/UFRGS.

Uliana, E. M.; Souza, L. G. S.; Silva, D. D.; Souza, A. P.; Almeida, F. T.; Araújo, H. B. (2016). Regionalização de vazões para o médio e alto Rio Teles Pieres - MT. *Revista de Ciências Agrárias*, 59 (4), 333-338.

Zanandrea, F., Michel, G. P., & Munoz Espinosa, H. R. (2017). Análise de frequência de volumes, durações e picos de inundações na Bacia do Rio Mearim-MA. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (22.: Florianópolis, 2017). Anais [recurso eletrônico].*[Porto Alegre: ABRH, 2017].

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Frederico Wagner Pereira Jansen de Mello – 60%

Francisco Carlos Lira Pessoa – 30%

Laila Rover Santana – 10%