

Regionalização das vazões mínimas, médias e máximas na bacia hidrográfica do rio

Itapicuru - BA

Regionalization of minimum, average and maximum flows in the Itapicuru River basin -

BA

Regionalización de caudales mínimos, medios y máximos en la cuenca del río

Itapicuru - BA

Recebido: 20/08/2020 | Revisado: 29/08/2020 | Aceito: 11/09/2020 | Publicado: 12/09/2020

Ytallo Rafaell Teixeira de Albuquerque

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5405-4181>

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

E-mail: ytallorafaell@yahoo.com.br

André Quintão de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5063-1762>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: andreqa@gmail.com

Ludmilson Abritta Mendes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8202-7623>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: ludmilsonmendes@yahoo.com.br

Marcus Aurélio Soares Cruz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3725-0882>

Universidade Federal de Sergipe, Brasil

E-mail: marcusascruz@gmail.com

Resumo

A pouca informação fluviométrica relacionada à inconsistência espaço-temporal de dados históricos, tem resultado em grande restrição para se representar a dinâmica dos recursos hídricos em estudos hidrológicos, principalmente das vazões. Uma alternativa muito utilizada em pesquisas de bacias hidrográficas, consiste na aplicação de regionalização de vazões que determina a sua disponibilidade hídrica, por meio dos dados de vazões. Neste sentido, este trabalho teve como principal objetivo regionalizar as vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos, médias de longa duração e mínimas com 7 dias de duração e período de

retorno de 10 anos na Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru, no Estado da Bahia. Utilizou-se como base de dados de entrada informações hidrológicas físico-climáticas e de relevo. Por meio da metodologia de agrupamento, determinou-se três regiões homogêneas da bacia hidrográfica com base nas variáveis explicativas: precipitação, evapotranspiração, relação precipitação-evapotranspiração, área e NDVI. Todas as variáveis apresentaram interação em pelo menos um modelo ajustado, com exceção da variável explicativa NDVI que se mostrou menos expressiva no desenvolvimento dos modelos de regionalização de vazões propostos, portanto não demonstraram impacto relevante em relação ao desempenho das demais variáveis. O produto deste trabalho é uma ferramenta útil na execução de serviços como a concessão de outorga de direito de uso de água e deve-se lembrar que caso ocorra a necessidade de se conhecer o valor da vazão nos locais onde já existam estações fluviométricas utilizadas para determinar das regiões homogêneas, os valores destas serão mais precisos do que as próprias equações geradas.

Palavras-chave: Análise multivariada; Análise de regressão; Outorga de direito de uso da água; Modelo hidrológico.

Abstract

The few fluviometric information related to the temporal-space inconsistency of available historical data, has resulted in great restriction to represent the dynamics of water resources in hydrological studies, mainly of flows. An alternative widely used in hydrographic basin researches is the application of regionalization of flows that determines their water availability, through flow data. In this case, this work had as main objective to regionalize the maximum flows associated with 10-year return periods, long-term and minimum averages with 7 days duration and 10-year return period in the Itapicuru River Basin, in the State of Bahia. Hydrological physico-climatic and relief information was used as the input database. Through the clustering methodology, this work determined three homogeneous regions of the hydrographic basin based on the explanatory variables: precipitation, evapotranspiration, precipitation-evapotranspiration ratio, area and NDVI. All variables showed interaction in at least one adjusted model, except for the explanatory variable NDVI, which was less expressive in the development of the proposed flow regionalization models, not showing a relevant impact in relation to the performance of the other variables. The product of this work is a useful tool in the execution of services such as the granting of the right to use water and it should be remembered that if there is necessary to know the value of the flow in places where there are already fluviometric stations used in determining of homogeneous regions, their values will be more accurate than the generated equations themselves.

Keywords: Multivariate analysis; Regression analysis; Granting of right to use water; Hydrological model.

Resumen

La poca información fluviométrica relacionada con la inconsistencia espacio-temporal de los datos históricos, ha resultado en una gran restricción para representar la dinámica de los recursos hídricos en los estudios hidrológicos, principalmente de caudales. Una alternativa muy utilizada en los levantamientos de cuencas hidrográficas es la aplicación de regionalización de caudales que determina su disponibilidad de agua, a través de datos de caudales. En este sentido, este trabajo tuvo como principal objetivo regionalizar los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10 años, promedios de largo plazo y mínimos con duración de 7 días y periodo de retorno de 10 años en la Cuenca del Río Itapicuru, en el Estado de Bahía. Se utilizó información hidrológica, físico-climática y de relieve como base de datos de entrada. A través de la metodología de agrupamiento, se determinaron tres regiones homogéneas de la cuenca hidrográfica con base en las variables explicativas: precipitación, evapotranspiración, razón precipitación-evapotranspiración, área y NDVI. Todas las variables mostraron interacción en al menos un modelo ajustado, a excepción de la variable explicativa NDVI, la cual fue menos expresiva en el desarrollo de los modelos de regionalización de flujo propuestos, por lo que no mostraron un impacto relevante en relación al desempeño de las otras variables. El producto de este trabajo es una herramienta útil en la ejecución de servicios como el otorgamiento de derechos de agua y conviene recordar que si existe la necesidad de conocer el valor del caudal en lugares donde ya existen estaciones fluviométricas utilizadas para determinar regiones homogéneas, sus valores serán más precisos que las propias ecuaciones generadas.

Palabras clave: Análisis multivariado; Análisis de regresión; Concesión de derechos de uso del agua; Modelo hidrológico.

1. Introdução

O Brasil possui a maior reserva hidrológica em água potável mundial, são cerca de 12% do total, porém, sua distribuição espacial não ocorre de forma uniforme. A bacia Amazônica por exemplo, detém aproximadamente 70% de todo o recurso hídrico do país (Ana, 2018) e uma baixa densidade demográfica. Portanto, uma adequada gestão e manejo dos recursos hídricos deve ser preconizado no restante do país, principalmente na região Nordeste, caracterizada por apresentar uma baixa disponibilidade hídrica natural. Com base nisso, o plano

de recursos hídricos deve assegurar a disponibilidade hídrica mínima necessária para atender os mais diversos usos da água existente em uma determinada bacia. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) estabelecida com base na Lei nº 9433/97 (Brasil, 1997), utiliza a outorga dos direitos de uso da água como um dos principais instrumentos para garantir a segurança hídrica de uma determinada bacia ou região.

Por isso, estabelecer os excedentes de vazões, conhecer o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas e evitar conflitos gerados pelos diversos usos, classificados em consuntivos (irrigação agrícola, abastecimento público e industrial) e não consuntivos, como os aproveitamentos hidrelétricos, é função primordial da gestão de recursos hídricos na distribuição adequada desses recursos (Pereira, 2012; Rego, 2013). Peça fundamental para o planejamento dos usos múltiplos das águas e ao mesmo tempo, um grande desafio para os gestores dos recursos hídricos (Pereira, 2012).

Para conceder a outorga dos direitos de uso da água, torna-se necessário, dentre outras caracterizações hidrológicas, quantificar as vazões a partir dos dados coletados em estações fluviométricas localizadas em seções específicas da hidrografia. Assim sendo, na intenção de quantificar as vazões em locais sem dados, com o propósito de reduzir as incertezas nos processos de caracterização e tomada de decisão, pode-se lançar mão da metodologia de regionalização de vazões, que se caracteriza por uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar os dados de uma variável dependente, como a vazão (Pessoa, 2015).

Uma das principais metodologias de regionalização de vazões envolve a implantação e operação de redes hidrométricas e caracterização geomorfológica das áreas hidrográficas, para posteriormente transferir as informações hidrológicas obtidas de uma região com dados para uma outra com ausência de dados, levando em consideração que as regiões tornam-se homogêneas quando às suas características são similares entre si (Nerc, 1975; Eletrobrás, 1985; Euclides, et al., 2001; Naghettini & Pinto, 2007; Pessoa, 2015).

De acordo com Souza (2009), dentre as informações essenciais para a quantificação de vazões utilizando metodologias de regionalização estão as vazões mínimas que estão diretamente relacionadas ao conhecimento da disponibilidade hídrica; vazões médias que se relacionam ao potencial de regularização da vazão do rio; e vazões máximas, que afetam diretamente a segurança da população e os empreendimentos econômicos no interior das bacias.

Diversos estudos de regionalização de vazões têm sido realizados, como o de Andrade et al., (2004), aplicado no Estado do Ceará, Lopes et al. (2016), aplicado no Paraná, Barbosa, et al., (2005) e Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de

Viçosa/Instituto Mineiro de Gestão das Águas (GPRH-UFV/IGAM) (2012), desenvolvido no Estados de Minas Gerais, dentre outros, desenvolvidos para fortalecer os estudos nessa área e auxiliar a gestão de recursos hídricos.

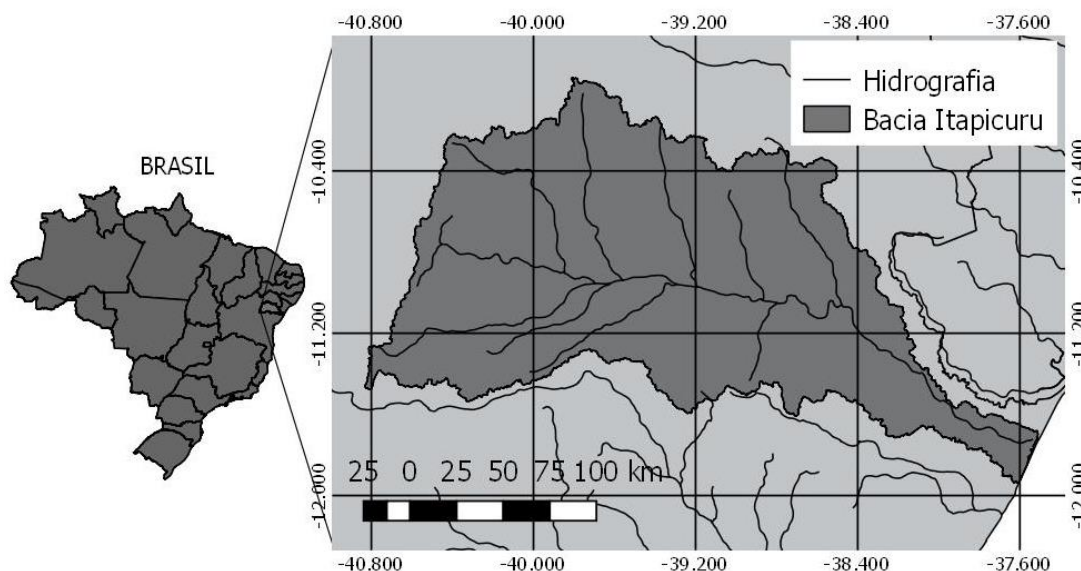
O objetivo deste trabalho é determinar as equações regionalizadas para estimativa das vazões mínimas, médias e máximas que melhor se ajustem às regiões homogêneas e as características físico-climáticas e de relevo na bacia hidrográfica do rio Itapicuru-BA.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru (BHRI) localiza-se nas latitudes 10° e 12°S e longitudes 41° e 37°W e inserida na porção nordeste do Estado da Bahia (Figura 1). Ocupa uma área de mais de 37 mil km² e abrange na sua totalidade 49 municípios. Na porção norte, é limitada pelas bacias dos rios Real e Vaza Barris, ao sul, com as bacias dos rios Paraguaçu e Inhambupe, oeste, pela bacia do rio São Francisco e, leste, pelo Oceano Atlântico (Purificação et al., 2016).

Figura 1. Mapa da Bacia do Rio Itapicuru.



Fonte: Autores.

De acordo com Purificação et al. (2016), o clima da bacia caracteriza-se como semiárido (de 7 a 8 meses secos) a úmido (subseco), com pluviosidade variando de 1000 mm/ano na serra

da Jacobina, a 1500 mm ano⁻¹ na região da costa e de menor pluviosidade na região central (400 a 600 mm ano⁻¹).

A geomorfologia da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru é marcada predominantemente por Pediplanos retocados ou funcionais, que se caracterizam pelos Tabuleiros interioranos com altitudes em torno de 500m e refletem interferências estruturais sobre o entalhamento dos canais. Além dos Pediplanos Cimeiros e Sertanejos, Serras e Maciços Residuais, bem como Tabuleiros e formas de dissecação e aplainamento embutidos, relacionado às porções da Bacia do Recôncavo (Radambrasil, 1983).

Os solos que predominam na bacia são as classes dos Planossolos, Latossolos e Argissolos, com ocorrência de Neossolos, Cambissolos, dentre outras classes (Radambrasil, 1983).

A vegetação da Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru é marcada, predominantemente, pela caatinga arbustiva, caatinga parque e campo rupestre, com ocorrências da Floresta Estacional, formações pioneiras com influência fluviomarinha e vegetação secundária de Mata Atlântica nas regiões dos Tabuleiros costeiros (RPGA, 2018; Radambrasil, 1983).

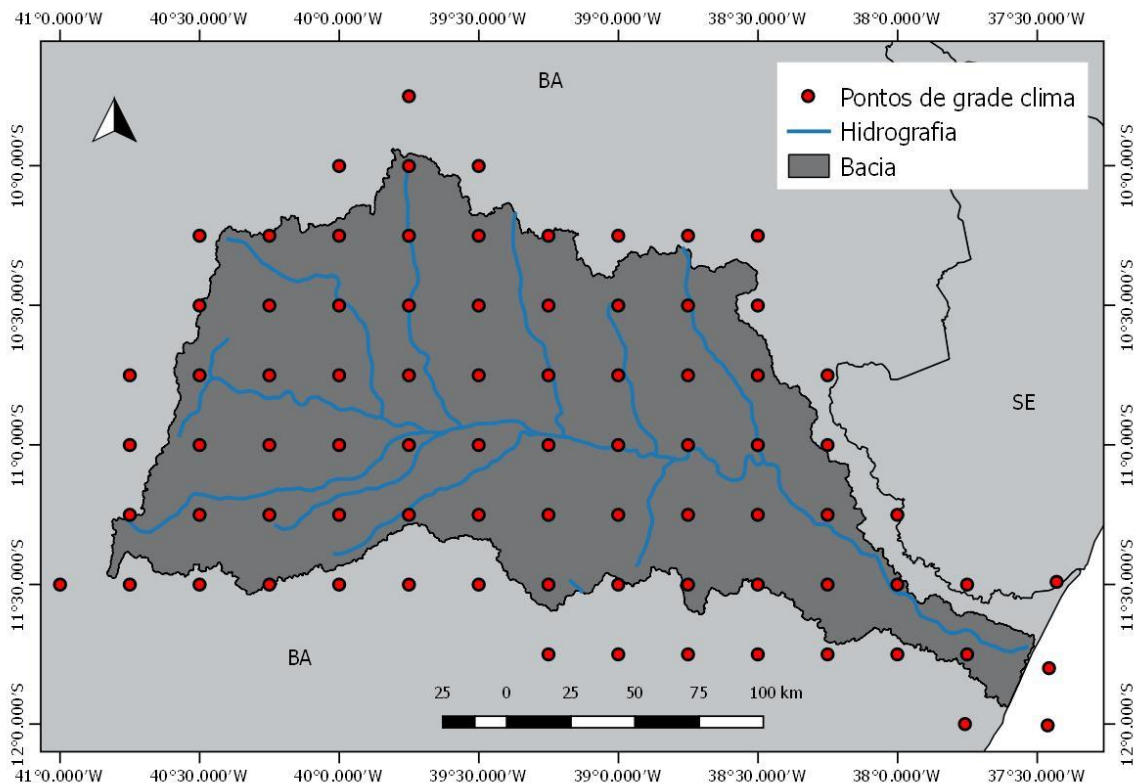
A geologia da bacia pode ser dividida em três segmentos, tais como: domínio das rochas do embasamento; domínio da bacia do recôncavo; e domínio das coberturas e depósitos recentes (Purificação et al., 2016).

O rio Itapicuru possui como principais afluentes os rios Itapicurú-mirim, Itapicurú Açú, rio do Peixe, rio Cariacá, e rio Quijingue. O rio principal, Itapicuru, nasce nos municípios de Miguel Calmon e Pindobaçú e desagua no município do Conde, no Oceano Atlântico (Purificação et al., 2016).

2.2 Base de dados climáticos e de relevo

Foram utilizados dados históricos (1980 a 2013) diários de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração potencial (ET₀) de 82 pontos de grade inseridos no contexto da bacia, todos em milímetros (Figura 2). A partir destes, a relação entre P e ET₀ também foi estimada. Posteriormente, os dados climáticos pontuais foram integrados para a escala anual. Os dados da série histórica foram obtidos a partir do estudo realizado por Xavier et al., (2015).

Figura 2. Distribuição espacial dos pontos de grade de dados climáticos, metodologia de Xavier et al. (2015), inseridas na BHRI.



Fonte: Autores.

Os dados de relevo (altitude) foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Com resolução espacial de 90 m e escala equivalente a 1:250.000 (Sreedevi, et al., 2009), estes dados estão disponíveis no site da Agência Espacial Americana (NASA).

2.3 Dados de sensoriamento remoto (SR)

Foi utilizado no estudo o Índice da Vegetação da Diferença Normalizada, IVDN, ou, NDVI, em inglês. Este índice realça o componente espectral da vegetação por meio da combinação das bandas espectrais do vermelho (V) e do infravermelho próximo (IVP) (Equação 1). Sendo mais sensíveis às variações da estrutura do dossel do que as bandas individuais do sensor, podendo variar de -1, áreas sem vegetação, a +1, áreas com vegetação (Embrapa, 2016).

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (1)$$

Em que,

V: banda espectrais do vermelho; e

IVP: banda espectral do infravermelho próximo.

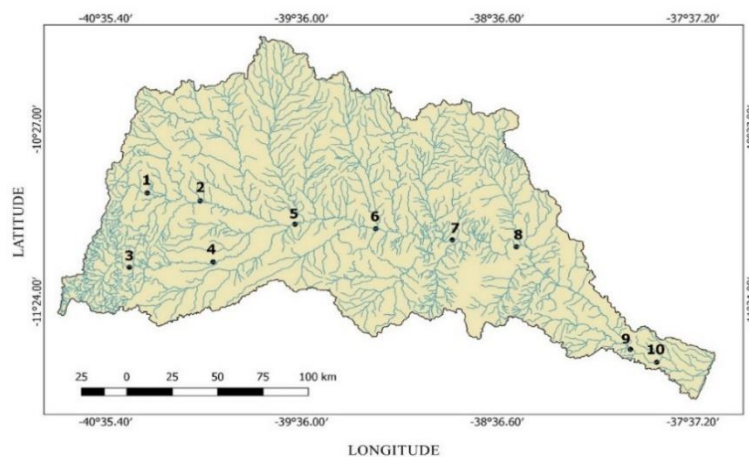
O índice está disponível em uma ferramenta gratuita desenvolvida pela Embrapa Informática Agropecuária, chamada Sistema de Análise Temporal da Vegetação (SATVeg). Este sistema se destina à observação e análise dos seus perfis temporais de NDVI, permitindo ao usuário observar o comportamento da vegetação na superfície terrestre ao longo do tempo (Embrapa, 2016).

As séries de dados NDVI foram baixadas da plataforma da EMBRAPA para cada um dos 82 pontos de grade climático inserido na bacia. As imagens obtidas são provenientes do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo dos satélites Terra e Aqua. Nestes, os NDVIs são disponibilizados em composições máximas de 16 dias, com resolução espacial de aproximadamente 250 m.

2.4 Dados fluviométricos

Adotaram-se as séries históricas de dez estações fluviométricas que possuem banco de dados de vazões disponíveis no sistema HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) (2018), localizadas no território da BHRI (Figura 3). Na Tabela 1 são apresentadas as informações das estações utilizadas no presente estudo.

Figura 3. Distribuição espacial dos 10 postos fluviométricos na BHRI (1-Pindobaçu, 2-Ponto Novo, 3-Jacobina, 4-Pedras Altas, 5-Queimadas, 6-Ambrósio, 7-Ponte Euclides da Cunha, 8-Cipó, 9-Fazenda Trianon, 10-Usina Altamira).



Fonte: Autores.

Tabela 1. Informações das estações fluviométricas adotadas para este estudo.

| Nome | Código | Rio | Responsável | Período | Latitude | Longitude |
|----------------|----------|---------------------|-------------|-------------|----------|-----------|
| Pindobaçu | 50330000 | Itapicuru-Açu | ANA | 1934 – 2010 | -10,8017 | -40,3800 |
| Ponto Novo | 50380000 | Itapicuru-Açu | ANA | 1968 – 2014 | -10,845 | -40,1128 |
| Jacobina | 50420000 | Itapicuru- Mirim | ANA | 1934 – 2014 | -11,2114 | -40,4703 |
| Pedras Altas | 50430000 | Itapicuru- Mirim | ANA | 1968 – 2014 | -11,1822 | -40,0467 |
| Queimadas | 50465000 | Itapicuru | ANA | 1934 – 2014 | -10,9733 | -39,6328 |
| Ambrósio | 50494000 | Itapicuru | ANA | 1984 – 2014 | -10,9981 | -39,2244 |
| Pte Euc. Cunha | 50520000 | Itapicuru | ANA | 1966 – 2014 | -11,0603 | -38,8372 |
| Cipó | 50540000 | Itapicuru | ANA | 1934 – 2014 | -11,0983 | -38,5131 |
| Fazen. Trianon | 50591000 | Itapicuru | ANA | 1989 – 2004 | -11,6636 | -37,9361 |
| Usina Altamira | 50595000 | Itapicuru | ANA | 1964 – 2014 | -11,7347 | -37,8033 |

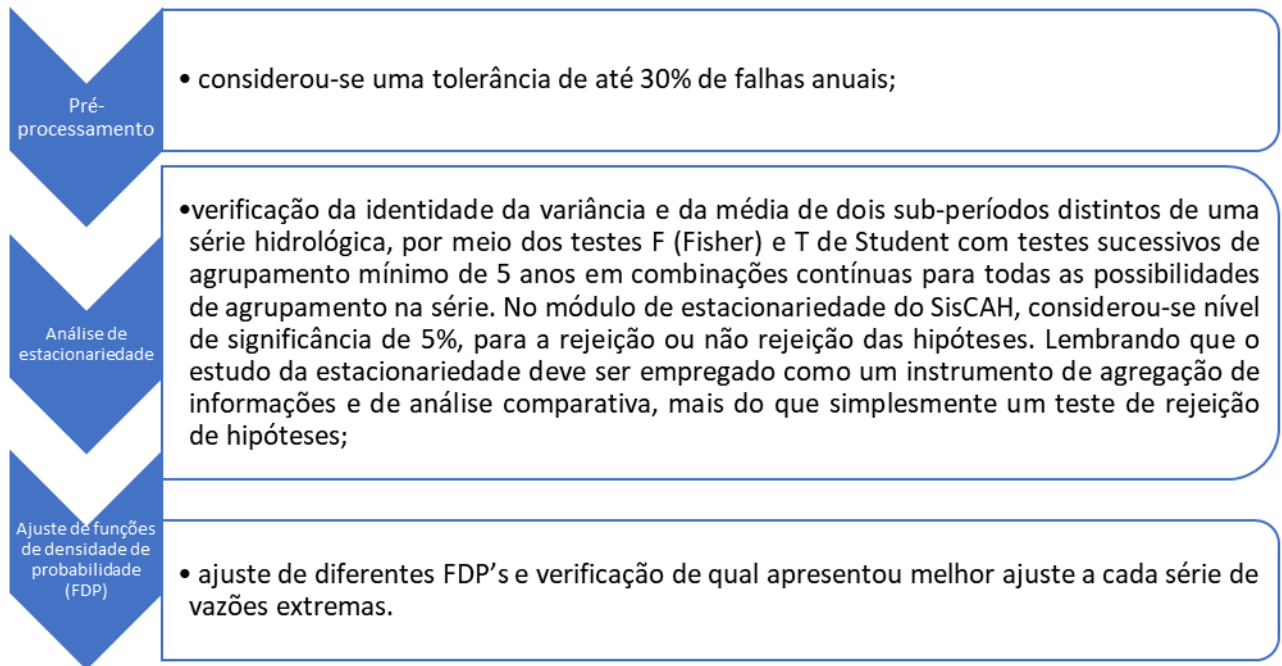
Fonte: Autores.

Vale ressaltar que a grande diferença entre os números de estações cadastradas e estações com dados disponíveis se deve ao fato de que muitas foram desativadas por diversos motivos, inconsistência na continuidade de vazões, influência de dragagens, entre outros problemas de operação das estações, reduzindo o número de estações para monitoramento dos rios na região da bacia hidrográfica.

Todas as estações disponíveis com dados de vazão diária possuíam período de funcionamento, com dados consistidos, superior a dez anos civis sem falhas na sua série. Os meses que apresentavam falhas superiores a 30% do período mensal foram retirados.

2.5 Estimativa das vazões

Para a obtenção e processamento das series históricas de vazão, foi usado o Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa – UFV (Souza, 2009), por meio do qual obtiveram-se os valores das vazões máximas, médias e mínimas, escolhendo-se para esta a $Q_{7,10}$ que é a vazão de sete dias de duração com dez anos de recorrência, em cada uma das estações fluviométricas. Foi utilizado o seguinte procedimento:



As vazões de referência regionalizadas neste estudo foram as vazões mínimas com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), vazões médias de longa duração (Q_{mld}) e vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos (Q_{max10}), todas em $m^3 s^{-1}$.

Foram estimados eventos associados ao determinado período de retorno (Equação 2), para as seguintes FDP's: Gumbel, Log-Normal tipo II, Log-Normal tipo III, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull, esta última utilizada para as vazões mínimas (Kite, 1988; Pruski; Silva; Koetz, 2006), considerando-se parâmetros como: erro padrão, média, variância, alfa (α), assimetria, beta (β), entre outros.

$$M = \mu + K * \sigma \quad (2)$$

Em que,

M: magnitude do evento estimado, associado ao período de retorno;

μ : média dos eventos;

K: fator de frequência; e

σ : desvio padrão dos eventos.

O fator de frequência (K) foi obtido conforme as funções de distribuição de frequência já mencionadas sendo que cada FDP possui uma equação para calcular o fator de frequência.

Para identificar a FDP com melhor ajuste em cada caso, foram calculados intervalos de confiança com 95% de probabilidade (Equação 3). Por este critério, considerou-se com melhor ajuste a FDP que possui menor erro padrão, ou seja, menor intervalo de confiança para a vazão estimada.

$$IC = -1,96 * \delta < M < 1,96 * \delta \quad (3)$$

Em que,

IC: intervalo de confiança com 95% de probabilidade; e

δ : erro padrão pertinente a cada função de probabilidade.

O intervalo de confiança (IC) varia em função do período de retorno, ou seja, a escolha da melhor FDP pode variar de acordo com o período de retorno adotado (Naguetini & Pinto, 2007).

Nas Tabela 2, 3 e 4 pode-se visualizar as vazões máximas, medias e mínimas, respectivamente, de cada estação, assim como a escolha da melhor distribuição de análise estatística.

Tabela 2. Valores da vazão máxima das estações fluviométricas e distribuição adotada.

| Nome da Estação | Código | Distribuição | Q _{máx10} (m ³ s ⁻¹) |
|-------------------------|----------|--------------|--|
| Pindobaçu | 50330000 | Gumbel | 123,04 |
| Ponto Novo | 50380000 | Lognormal 3 | 123,75 |
| Jacobina | 50420000 | Gumbel | 161,53 |
| Pedras Altas | 50430000 | Gumbel | 88,13 |
| Queimadas | 50465000 | Lognormal 3 | 393,41 |
| Ambrósio | 50494000 | Lognormal 3 | 607,57 |
| Ponte Euclídes da Cunha | 50520000 | Gumbel | 853,24 |
| Cipó | 50540000 | Lognormal 3 | 696,00 |
| Fazenda Trianon | 50591000 | Lognormal 3 | 604,02 |
| Usina Altamira | 50595000 | Lognormal 3 | 537,76 |

Fonte: Autores.

Tabela 3. Valores da vazão média das estações fluviométricas e distribuição adotada.

| Nome da Estação | Código | Qmld (m ³ s ⁻¹)* |
|-------------------------|----------|---|
| Pindobaçu | 50330000 | 2,8281 |
| Ponto Novo | 50380000 | 6,8327 |
| Jacobina | 50420000 | 2,5624 |
| Pedras Altas | 50430000 | 2,3924 |
| Queimadas | 50465000 | 13,7767 |
| Ambrósio | 50494000 | 13,8823 |
| Ponte Euclídes da Cunha | 50520000 | 18,8882 |
| Cipó | 50540000 | 17,6635 |
| Fazenda Trianon | 50591000 | 20,3581 |
| Usina Altamira | 50595000 | 26,4042 |

*Qmld: vazão média de longa duração. Fonte: Autores.

Tabela 4. Valores da vazão mínima das estações fluviométricas e distribuição adotada.

| Nome da Estação | Código | Distribuição | Q7,10 (m ³ s ⁻¹) |
|-------------------------|----------|--------------|---|
| Pindobaçu | 50330000 | Logpearson 3 | 0,03 |
| Ponto Novo | 50380000 | Logpearson 3 | 0,03 |
| Jacobina | 50420000 | Logpearson 3 | 0,00 |
| Pedras Altas | 50430000 | Logpearson 3 | 0,00 |
| Queimadas | 50465000 | Logpearson 3 | 0,04 |
| Ambrósio | 50494000 | Lognormal 3 | 0,00 |
| Ponte Euclídes da Cunha | 50520000 | Logpearson 3 | 0,00 |
| Cipó | 50540000 | Logpearson 3 | 0,53 |
| Fazenda Trianon | 50591000 | Logpearson 3 | 1,77 |
| Usina Altamira | 50595000 | Logpearson 3 | 1,72 |

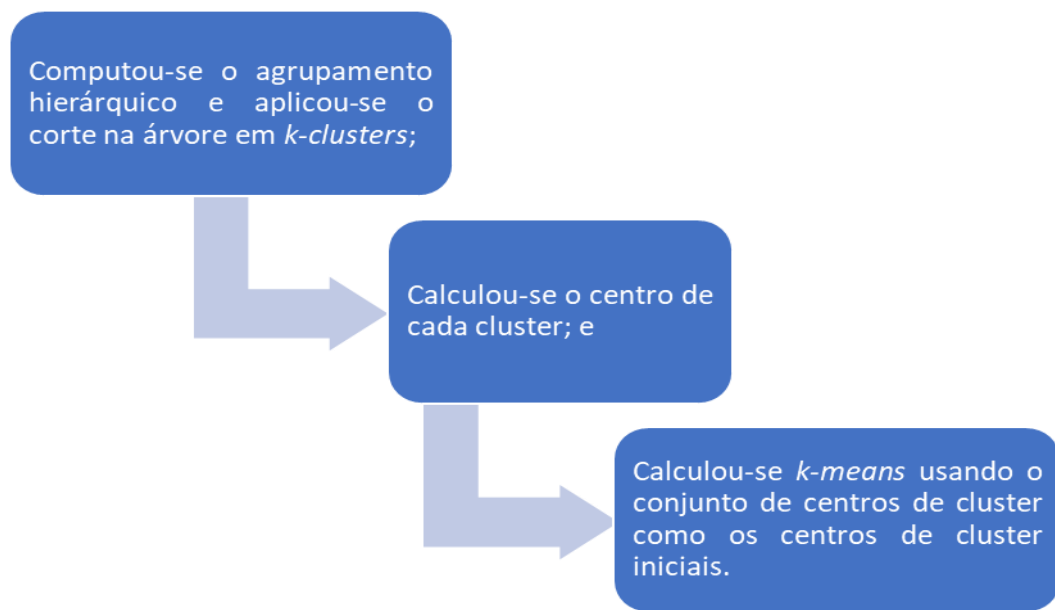
Fonte: Autores.

2.6 Definição das regiões homogêneas

A definição das regiões hidrológicamente homogêneas foi realizada com base na análise estatística multivariada de agrupamento. Foram considerados na análise de agrupamento os dados físicos climáticos da bacia para cada ponto de grade, altitude, precipitação pluvial, evapotranspiração potencial e a relação entre a chuva e a evapotranspiração.

Foram considerados os valores de NDVI para cada ponto de grade. Para a determinação das regiões hidrologicamente homogêneas, foi utilizado a combinação dos métodos de análise de agrupamento *clustering* hierárquico e *k-means*, uma aplicação fornecida usando ferramentas através do software R (R cores team, 2015). Esse processo é denominado clustering híbrido *k-means* hierárquico ou *hkmeans* (Galili, 2016).

O procedimento realizado foi dividido em:



Este método baseou-se no critério maior distância para fazer a segregação dos grupos, compostos por 82 pontos da grade de dados climáticos inseridos na bacia.

2.7 Variáveis explicativas ou independentes

As características fisiográficas quantificáveis, tal como a área de drenagem e altitude, precipitação total anual média, evapotranspiração total anual média, Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), foram as grandezas utilizadas como variáveis independentes ou explicativas na análise de regressão da variável dependente.

Neste trabalho as grandezas mencionadas foram todas calculadas para cada área de drenagem das sub-bacias selecionadas, através da utilização do Software de geoprocessamento (QGIS 2.18.14) com bases cartográficas (QGIS Development Team, 2019).

As coordenadas das estações acompanhadas dos dados fluviométricos foram obtidas a partir do cadastro/inventário obtido na plataforma HidroWeb (ANA, 2018).

Inicialmente as áreas de drenagem de cada estação foram obtidas limitando-se estas manualmente no QGIS, utilizando-se a hidrografia e a altimetria disponíveis em toda a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru na escala 1:250.000.

Os dados climáticos (precipitação e evapotranspiração) foram obtidos a partir do estudo desenvolvido por Xavier, et al., (2015).

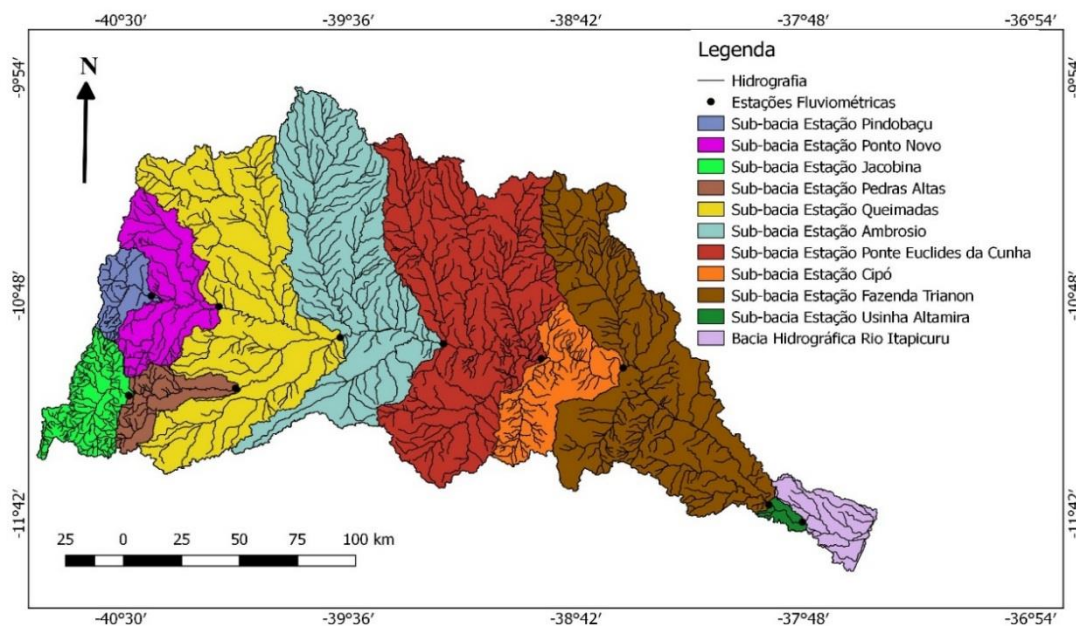
Os valores de altitude foram extraídos do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Com resolução espacial de 90 m e escala equivalente à 1:250.000 (Sreedevi et al., 2009).

As séries de dados NDVI foram baixadas da plataforma da Embrapa, disponível em seu *site*. As imagens obtidas são provenientes do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo dos satélites Terra e Aqua. Nestes, os valores NDVIs são disponibilizados em composições máximas de 16 dias, com resolução espacial de aproximadamente 250m.

2.8 Estações fluviométricas

Na Figura 4, pode-se visualizar a Bacia Hidrográfica do Rio Itapicuru e as dez Sub-bacias que compõem a área de estudo. Vale ressaltar que as bacias à montante se sobrepõem nas bacias à jusante, percebendo maior área na bacia mais à jusante.

Figura 4. Área da bacia hidrográfica do rio Itapicuru e as dez Sub-bacias que a envolve.



Fonte: Autores.

2.9 Ajuste dos modelos

Os modelos de predição de vazão foram ajustados a partir da escolha dos melhores subconjuntos de variáveis explicativas, através da função *regsubsets* e pelo algoritmo *exhaustive* presente no pacote “leaps” do software R. Ao invés de listar todas as possíveis regressões com as 11 variáveis candidatas a preditoras, a função *regsubsets* lista os k-melhores modelos, segundo o Critério de Informação Bayesiana (BIC), método este que exclui parâmetros nos modelos, procurando alcançar o modelo mais parcimonioso possível para subgrupos de preditoras de todos os tamanhos (desde uma até onze variáveis explicativas) utilizado conjuntamente com a menor soma do quadrado da soma (s^2). Além de mostrar as melhores regressões, a função também retorna os valores mínimos de BIC e s^2 , e do coeficiente de determinação (r^2) ajustado para cada regressão. Essas foram utilizadas como critérios de seleção dos modelos, pois é desejado modelo com o menor valor de BIC e de s^2 e r^2 ajustado próximo da unidade, pois quanto este for mais próximo da unidade, tanto melhor será a validade da regressão, associadas à menor quantidade de parâmetros por modelo (Amaral et al., 2009). Esses parâmetros lidam com a seleção de modelos, no caso o Critério de Informação Bayesiano (BIC) penaliza a complexidade extra, o que significa que a inclusão de uma variável extra independente deve melhorar o modelo o suficiente para justificar sua inclusão (Reis, 2005).

Posteriormente, parte-se para a escolha das melhores variáveis explicativas para cada tipo de vazão analisada, os coeficientes dos modelos foram avaliados com uso do teste t de Student, a 1%, 5% e, em alguns casos, 0,1% de probabilidade (Amaral et al., 2009).

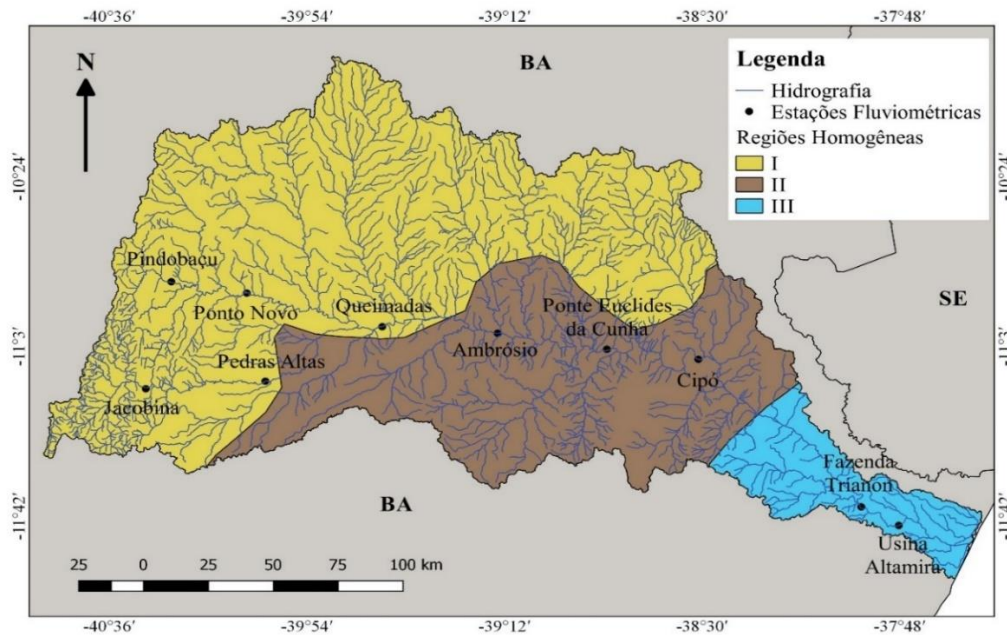
3. Resultados e Discussão

3.1 Regiões hidrologicamente homogêneas

A bacia foi dividida em três regiões homogêneas, baseando-se na similaridade das características de relevo e clima para cada região homogênea por meio da análise estatística multivariada de agrupamento *hkmeans*, identificando-as para as vazões máxima, mínima e média.

A Figura 5 apresenta as regiões homogêneas e as suas respectivas estações fluviométricas para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru.

Figura 5. Regiões homogêneas e as suas respectivas estações fluviométricas para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru.



Fonte: Autores.

Estudo realizado por Mestrinho (2008) na bacia do rio Itapicuru, determina que a dinâmica das condições hidrológicas delinea a divisão da bacia em Ambientes Hidrológicos (AH), onde a influência de vários fatores, tais como: precipitação, evapotranspiração, radiação solar, relevo, geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal e uso do solo, ações antrópicas sobre o sistema fluvial caracterizam a separação da bacia hidrográfica em regiões homogêneas.

De acordo com a Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI) (2006) a bacia hidrográfica do rio Itapicuru apresenta o predomínio do clima úmido a subúmido no litoral, diminuindo gradativamente a pluviosidade e índice de umidade na medida que se interioriza na bacia, corroborando à distinção de várias regiões por faixas climáticas.

Conforme determinado em estudos por Mestrinho (2008) e Lima (2017), a região I, que compreende a porção mais elevada da bacia e apresenta cinco estações fluviométricas, possui maior pluviometria e tipos de solo e vegetação que ajudam na retenção de água promovendo o aumento das vazões específicas que permanecem por mais tempo, mesmo que ocorra alguma intermitência no escoamento; a região II, que compreende a porção média da bacia e apresenta três estações fluviométricas, aponta uma área mais seca; e a região III, que compreende a porção costeira da bacia e apresenta duas estações fluviométricas com elevados índices pluviométricos do clima semiúmidos e aporte dos sistemas aquífero influenciando no escoamento superficial são evidenciados como os principais parâmetros na determinação das regiões homogêneas.

As estimativas de equações de regionalização de vazão foram realizadas para a bacia do rio Itapicuru como um todo com base nas dez estações fluviométricas e para região homogênea I, com base nas suas cinco estações de medição de vazão. Em contrapartida, as regiões II e III tornaram-se inviáveis estaticamente para as estimativas de equações de regionalização de vazão.

Esse fator é caracterizado por Baena et al. (2004) que ressalta a deficiência de estações fluviométricas (insuficiência de dados fluviométricos e/ou distribuição geográfica das estações) para uma região, como no caso das regiões II e III, que impossibilita o ajuste das equações de regressão múltipla.

3.2 Estacionariedade

As vazões máximas (Q_{max10}), médias (Q_{mld}) e mínimas ($Q_{7,10}$) foram as variáveis regionalizadas neste trabalho. Foram utilizadas séries de dados consistidos. Desta forma, todos os dados possíveis foram coletados da Plataforma HidroWeb (Ana, 2018) e pré-selecionadas com mais de dez anos de vazão fluvial. Utilizou-se o *Software R* para realizar a análise de regressão linear e correlação das equações da bacia hidrográfica do rio Itapicuru através das variáveis independentes (grandezas físico-climáticas e vegetação) quantificáveis.

As estações fluviométricas analisadas obtiveram resultados satisfatórios nos testes de estacionariedade de médias e de variâncias da vazão, por meio do teste T (para as médias) e o teste F (para as variâncias), a 5% de significância para aceitar a hipótese nula de que a série é homogênea, ou seja, que não há tendência contra a hipótese alternativa de existência de tendência. Neste caso, foram considerados apenas resultados dos testes unilaterais, por considerar que a avaliação de outros limites apenas agregaria informações para análise de sensibilidade da problemática.

Ressalta-se que as séries utilizadas para calibração apresentaram hipóteses aceitas, ou seja, estacionárias em relação às séries de base atual, sem registros de mudanças na curva-chave das estações fluviométricas, confirmando que os dados dos mesmos, mostraram-se satisfatórios aos tamanhos das séries apresentadas por cada estação para as vazões máximas, médias e mínimas, resultando em qualidade suficiente para as etapas subsequentes.

Tal ocorrido é caracterizado em Latuf (2011), onde a verificação de estacionariedade é realizada com o objetivo da identificação de possíveis mudanças de tendências cujos resultados demonstrados como estacionários, expressa que não há mudanças estatisticamente

significativas, ao nível de 5% de probabilidade pelos testes T e F, para as vazões, dando início, desta maneira, às etapas de processamento de dados.

Nos casos de rejeição no teste, foram avaliados os padrões e tendências, verificando-se o ponto de quebra, como o período que melhor demarca a diferença de estacionariedade de acordo com a comparação do desvio padrão dos períodos contrastantes.

De acordo com Vasco (2015), em seus resultados, associa a não-estacionariedade em séries de vazão, a fatos, principalmente, antrópicos e de variabilidade climática interdecadal, como, por exemplo, as mudanças climáticas ocasionadas pelo uso de solo.

Em estudo realizado por com Vasconcelos et al. (2013) os bons resultados para os testes de estacionariedade de vazão trazem uma confiabilidade adicional para o preenchimento de falhas, onde a rejeição em hipóteses de estacionariedade proposta por meio de quebra da estacionariedade não se apresente como um impedidor mandatório frente à confiança em resultados de trabalhos realizados, a fim de servir como um critério adicional ao apoio ao preenchimento de falhas.

3.3 Modelos de regionalização de vazões

A Equação Linear Múltipla (4) foi empregada para determinar os resultados dos modelos de regressão deste trabalho.

$$Q = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n \quad (4)$$

Em que,

Q: vazão característica de interesse, em $m^3 s^{-1}$;

β_i : coeficientes variáveis independentes; e

X_i : variáveis independentes consideradas.

Os resultados para os modelos de regionalização de vazões serão descritos separadamente entre as vazões máximas, médias e mínimas.

Em todos os modelos, analisou-se o menor valor de Bayesian Information Criterion (BIC) em conjunto com análise da menor soma do quadrado residual (s^2) do modelo. Os coeficientes de determinação (r^2) encontrados possuem os melhores valores em relação aos parâmetros estatísticos BIC e s^2 . Para todas as regiões (Tabela 5, 6, 7, 8, 9 e 10), selecionou-se o modelo que satisfizesse essas premissas, que em relação ao ajuste linear, apresentam um bom ajuste.

3.3.1 Modelo de regionalização de vazões máximas

A Tabela 5 mostra o resultado obtido através da seleção do algoritmo “exhaustive” no software R para o ajuste da equação de regionalização para a vazão máxima ($Q_{m\acute{a}x10}$), onde demonstra o melhor modelo ajustado de acordo com os parâmetros estatísticos.

Tabela 5. Modelo de Regressão para a $Q_{m\acute{a}x10}$ para todas as regiões.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|--------------------------|------------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | -2,836e+05 | 6,715e+04 | -4,224 | 0,013434 | 0,05 |
| Pmed* | -3,933e+02 | 9,567e+01 | -4,111 | 0,014719 | 0,05 |
| ET0med* | +1,787e+02 | 4,039e+01 | +4,424 | 0,011477 | 0,05 |
| ET0mín* | -8,737e+00 | 9,476e-01 | -9,221 | 0,000769 | 0,001 |
| P ET0max ⁻¹ * | -2,684e+03 | 5,712e+02 | -4,700 | 0,009311 | 0,01 |
| P ET0méd ⁻¹ * | +6,593e+05 | 1,610e+05 | +4,096 | 0,014897 | 0,05 |

*Pmed = precipitação média; *ET0med = evapotranspiração média; *ET0min = evapotranspiração mínima; *P ET0max-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração máxima; *P ET0med-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração média. Fonte: Autores.

De acordo com Amaral et al. (2009), a escolha do melhor modelo de regressão ajustado deve ser realizada considerando-se o menor número possível de variáveis explicativas, baseados nos melhores métodos de previsão. Este trabalho utilizou o Critério de Informação Bayesiana, a soma do quadrado residual e o coeficiente de determinação. Depois de os modelos serem ajustados, a significância dos seus respectivos coeficientes foi avaliada a partir do teste t de Student. Ao realizar a análise de significância dos coeficientes dos modelos ajustados para a vazão máxima para toda a bacia do rio Itapicuru, foi escolhido o modelo com cinco variáveis explicativas (precipitação média, evapotranspiração média e mínima, máximo da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial). Os coeficientes do modelo com menor quantidade de variáveis explicativas não foram significativos ao nível de 0,1%, 1% e 5% de probabilidade.

Portanto, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, o ajuste com as cinco variáveis preditivas listadas na Tabela 5 apresentou o melhor resultado estatístico ($r^2 = 0,98$, $s^2 = 0,05$ e $BIC = -35,45$), onde foi possível obter a seguinte Equação (5):

$$Q_{max10} = 283.600 + P_{med} * (-393,300) + ET0min * (178,700) + ET0min * (-8,737) \quad (5) \\ + P ET0max^{-1} * (-2.684) + P ET0med^{-1} * (659.300)$$

Em que,

Q_{max10} : vazão máxima associada a períodos de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

P_{med} : precipitação média, em mm;

$ET0med$: evapotranspiração média, em mm;

$ET0min$: evapotranspiração mínima, em mm;

$P ET0max^{-1}$: relação entre precipitação e a evapotranspiração máxima, adimensional;

$PET0med^{-1}$: relação entre precipitação e a evapotranspiração média, adimensional.

De forma análoga aos resultados da regionalização de toda a bacia, os resultados obtidos através da seleção do algoritmo “exhaustive” no software R para o ajuste da equação de regionalização para a vazão máxima ($Q_{máx10}$) para a região homogênea I são apresentados na Tabela 6. O modelo também foi ajustado com o menor valor de Bayesian Information Criterion (BIC), menor valor da soma do quadrado residual (s^2) e com o coeficiente de determinação (r^2) mais próximo da unidade.

Tabela 6. Modelo de Regressão para a $Q_{máx10}$ para a região I.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|-------------|-----------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | 66,924764 | 25,130585 | 2,663 | 0.07614 | 0,01 |
| Área* | 0,027272 | 0,004464 | 6,109 | 0.00881 | 0,01 |

*A = Área da região. Fonte: Autores.

Ao realizar a análise de significância dos coeficientes dos modelos ajustados para a vazão máxima para a região homogênea I da bacia do rio Itapicuru, foi escolhido o modelo com uma variável explicativa, a área. O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Portanto, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, o ajuste encontrado na Tabela 6 apresentou o melhor resultado estatístico com $r^2 = 0,91$, $s^2 = 0,16$ e $BIC = -9,77$, onde foi possível obter a seguinte Equação (6):

$$Q_{max10} = 66,9250 + A * (0,0273) \quad (6)$$

Em que,

Q_{max10} : vazão máxima associada a períodos de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

A: área da região, em km^2 .

Através da análise das equações obtidas para a regionalização das vazões máximas, os ajustes para a toda a região da bacia e para a região homogênea I apresentaram os melhores modelos restritivos para cada área, evidenciados pelos coeficientes de correlação acima de 0,85 (85%). Pelas Tabelas 5 e 6 observou-se que as significâncias de t foram satisfatórias. Assim sendo, em função dos testes estatísticos aplicados, obtiveram-se as melhores equações para se estimar as vazões máxima para as regiões.

Pode-se observar que a região correspondente à região homogênea I situa-se na área de nascente, apresentando elevada altitude, em direção à parte central da bacia hidrográfica, sendo a mesma representativa das regiões próximas a serra de Jacobina (Purificação et al., 2016; Silva & Fontes, 2017). É na região I que se encontra a nascente do curso d'água do rio Itapicuru. Esses fatores que caracterizam uma boa homogeneidade de regiões podem confirmar a teoria que uma variável pode apresentar maior peso e possuir significância suficiente em relação às demais variáveis não inseridas no modelo.

Já a região definida pela totalidade da bacia, abrange toda a área que recebe a influência de três variações climáticas (zona tropical, a zona seca e a zona subtropical úmida) de acordo com a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013). Essa ampla variação de climática e de relevo pode ter interferido no ajuste de mais variáveis explicativas no modelo.

Para a totalidade da bacia hidrográfica do rio Itapicuru obteve-se uma quantidade de cinco variáveis (precipitação média, evapotranspiração média, evapotranspiração mínima, máximo da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial) e para a região homogênea I, apenas uma (área).

É relevante ressaltar que a variável NDVI não apareceu na composição de nenhum modelo de regionalização de vazões máximas, evidenciando peso insatisfatório para o ajuste estatístico das equações, resultando coeficientes de correlação inferiores aos obtidos nos modelos selecionados.

Apesar de os resultados apresentarem uma boa correlação, em relação ao caso do modelo da região homogênea I, onde obteve-se um bom ajuste com apenas uma variável explicativa, a literatura em geral Tucci (2002, 2012), Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) (2002) entre outros, aponta que o ajuste de modelos pode ser melhorado com a inserção de uma outra variável explicativa.

3.3.2 Modelo de regionalização de vazões médias

Assim como ocorrido para a vazão máxima para toda a bacia do rio Itapicuru, o melhor ajuste do modelo de regressão encontrado para a vazão média para toda a bacia do rio Itapicuru (Tabela 7) também apresentou a quantidade de cinco variáveis explicativas, porém, diferenciadas, tais como: precipitação máxima, média e mínima, evapotranspiração média e a média da relação entre precipitação e a evapotranspiração potencial. Os coeficientes do modelo com menos variáveis explicativas não foram significativos ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 7. Modelo de Regressão para a Q_{mld} para todas as regiões.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|--------------------------|------------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | 1,202e+04 | 4,166e+03 | 2,886 | 0,0447 | 0,05 |
| Pmax* | 9,182e-02 | 2,250e-02 | 4,081 | 0,0151 | 0,05 |
| Pmed* | 1,723e+01 | 5,908e+00 | 2,916 | 0,0434 | 0,05 |
| Pmin* | 7,929e-02 | 2,356e-02 | 3,365 | 0,0282 | 0,05 |
| ET0med* | -7,134e+00 | 2,487e+00 | -2,869 | 0,0455 | 0,05 |
| P ET0med ⁻¹ * | -2,931e+04 | 9,965e+03 | -2,941 | 0,0423 | 0,05 |

*Pmax = precipitação máxima; *Pmed = precipitação média; *Pmin = precipitação mínima; *ET0med = evapotranspiração média; *P ET0med-1 = relação entre precipitação e a evapotranspiração média.
 Fonte: Autores.

O modelo foi ajustado com $r^2 = 0,98$, $s_2 = 0,07$ e $BIC = -30,05$ para a vazão média (Q_{mld}), tendo em vista a obtenção de um modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (7):

$$Q_{mld} = 12.020 + Pmax * (0,092) + Pmed * (17,230) + Pmin * (0,079) + ET0med * (-7,134) + P ET0med^{-1} * (-29.310) \quad (7)$$

Em que,

Q_{mld} : vazão média de longa duração, em $m^3 s^{-1}$;

Pmax: precipitação máxima, em mm;

Pmed: precipitação média, em mm;

Pmin: precipitação mínima, em mm;

ET0med: evapotranspiração média, em mm;

PET0med⁻¹: relação entre precipitação e a evapotranspiração média, adimensional.

Assim como ocorrido para a vazão máxima para a região homogênea I da bacia do rio Itapicuru, o melhor ajuste do modelo de regressão encontrado para a vazão média da região homogênea I da bacia hidrográfica do rio Itapicuru (Tabela 8) também apresentou uma variável explicativa, porém, diferenciada na escolha da variável explicativa, sendo, portanto, ajustada com a evapotranspiração máxima. O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 8. Modelo de Regressão para a Q_{mld} para a região I.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|-------------|-----------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | -333,1328 | 49,0451 | -6,7920 | 0,00014 | 0,001 |
| ET0max* | 0,1999 | 0,0284 | 7,0500 | 0,00011 | 0,001 |

*ET0max = evapotranspiração máxima. Fonte: Autores.

O modelo foi ajustado com o menor Bayesian Information Criterion (BIC), menor valor da soma do quadrado residual (s^2) e com o coeficiente de determinação (r^2) mais próximo da unidade para a equação de regionalização da vazão média (Q_{mld}). O mesmo apresentou $r^2 = 0,85$, $s^2 = 0,19$ e $BIC = -10,37$, tendo em vista que se queria obter um modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (8):

$$Q_{mld} = -333,1328 + ET0max * (0,1999) \quad (8)$$

Em que,

Q_{mld} : vazão média de longa duração, em $m^3 s^{-1}$;

ET0max: evapotranspiração máxima, em mm.

De acordo com o resultado apresentado para o modelo de regressão para toda a bacia do rio Itapicuru, observou-se que para a situação analisada, o valor do r^2 apresentou-se excelente, obtendo-se 0,98 para a Q_{mld} . Este resultado assemelha-se com o obtido pelo Governo de Santa Catarina (2006), onde a obtenção de elevados coeficiente de determinação permitem estimar a vazão média de longo termo com boa precisão, sem resultar em desvios.

Destaca-se que a variável NDVI mostrou-se insatisfatória para desempenho estatístico, evidenciados pelos coeficientes de correlação inferiores aos obtidos nos modelos selecionados,

demonstrando, portanto, o baixo fator de impacto dessa variável no processo de modelagem estatística referida às vazões médias na bacia hidrográfica do rio Itapicuru.

Com relação ao modelo de vazões média para a região homogênea I, o coeficiente não foi tão bom quanto os demais, apresentando o valor de 0,85. No entanto, este resultado assemelha-se com o obtido por Pruski et al. (2012) ao se utilizar apenas a área de drenagem como variável explicativa e aponta que o ajuste poderia ser melhorado com a utilização de outra variável.

Vale ressaltar que a composição dos modelos de vazões máximas e dos modelos de vazões médias, apresentaram-se semelhantes, com a mesma quantidade de variáveis compondo as suas equações. Isso pode ser caracterizado pela acurácia da homogeneização das regiões que se mostraram fiéis à regressão.

3.3.3 Modelo de regionalização de vazões mínimas

Em relação à vazão mínima para toda a bacia do rio Itapicuru, obedecendo a premissa de Amaral et al. (2009), em que a escolha do melhor modelo de regressão ajustado deve ser realizada considerando-se o menor número possível de variáveis explicativas, dessa forma, para a regionalização da vazão mínima para toda a bacia hidrográfica, apresentou-se os melhores resultados estatísticos com apenas um parâmetros (Precipitação máxima), demonstrado na Tabela 9, com valores de $r^2 = 0,90$, $s^2 = 0,33$ e $BIC = -28,28$, tendo em vista a finalidade de obtenção do modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (9). O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 9. Modelo de Regressão para a $Q_{7,10}$ para todas as regiões.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|-------------|-----------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | -1,780232 | 0,1685595 | -10,56 | 5.64e-06 | 0,001 |
| Pmax | 0,002457 | 0,0001807 | 13,60 | 8.22e-07 | 0,001 |

*Pmax = precipitação máxima. Fonte: Autores.

$$Q_{7,10} = -1,7802 + Pmax * (0,0025) \quad (9)$$

Em que,

$Q_{7,10}$: vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

Pmax: precipitação máxima, em mm.

Em relação à vazão mínima para a região homogênea I da bacia hidrográfica do rio Itapicuru, a mesma apresentou os melhores resultados estatísticos com apenas dois parâmetros, tais como: evapotranspiração máxima e média, demonstrados na Tabela 10, com valores de $r^2 = 0,99$, $s^2 = 0,31$ e $BIC = -47,68$, tendo em vista a finalidade de obtenção do modelo mais parcimonioso, onde foi possível obter a seguinte Equação (10). O coeficiente do modelo encontrado foi significativo ao nível de 0,1% de probabilidade.

Tabela 10. Modelo de Regressão para a $Q_{7,10}$ para a região I.

| Coeficiente | Estimado | Desvio padrão | Valor de t | Pr(> t) | Nív. Significância |
|-------------|------------|---------------|------------|----------|--------------------|
| Intercepto | -2,189e+00 | 9,976e-03 | -219,5 | 2,08e-05 | 0,001 |
| ET0max* | 3,945e-04 | 3,486e-06 | 113,2 | 7,81e-05 | 0,001 |
| ET0med | 9,225e-04 | 7,451e-06 | 123,8 | 6,52e-05 | 0,001 |

*ET0max = evapotranspiração máxima; ET0med = evapotranspiração média. Fonte: Autores.

$$Q_{7,10} = -2,189000 + ET0max * (0,000395) + ET0med * (0,000923) \quad (10)$$

Em que,

$Q_{7,10}$: vazão mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos, em $m^3 s^{-1}$;

ET0max: evapotranspiração máxima, em mm;

ET0med: evapotranspiração média, em mm.

O modelo ajustado para a vazão mínima ($Q_{7,10}$) neste trabalho obteve maior desempenho extraíndo-se apenas a variável explicativa precipitação máxima para toda a região da bacia do rio Itapicuru e as variáveis evapotranspiração máxima e evapotranspiração média para a região homogênea I apresentando maior êxito preditivo por delimitação de área, ou seja, distinção de modelos pela seleção de variáveis diferenciadas por cada região homogênea. As demais variáveis, associadas ou não, inclusive o NDVI, apresentaram desempenho estatístico inferiores, evidenciando, portanto, baixo fator de impacto dessas variáveis no processo de modelagem estatística referida à vazão nas regiões na bacia hidrográfica proposta.

No trabalho de Chaves et al. (2002) a bacia do rio Itapicuru foi regionalizada pelo Método proposto por Chaves, onde se desenvolveu uma metodologia de interpolação e extrapolação de vazões mínimas a qual apresentaram soluções que dependiam da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos, sendo a variável utilizada para a estimativa das vazões nas seções de interesse a área de drenagem,

evidenciando o seu melhor modelo com apenas uma variável preditiva. Contudo, esse método apresentou limitações que contribuíram para a menor precisão observada nos seus resultados.

A limitação obtida no trabalho de Chaves et al. (2002) não foi atribuída ao fato de que o modelo apresentou apenas uma variável preditiva, mas, sim, em função do limitado número de graus de liberdade disponível naquele trabalho, ocorrendo diferentemente neste.

Veiga et al. (2011) abordam em seu trabalho um método mais avançando que o Método proposto por Chaves, denominado Método Chaves Modificado que é consistido na inserção da variável precipitação média no método proposto por Chaves et al. (2002), sendo a vazão obtida na seção de interesse proporcional ao volume precipitado nas áreas analisadas. Desse modo, o modelo do então método passaria a apresentar duas variáveis preditivas, sinalizando uma possível melhoria na sua metodologia anterior.

No trabalho desenvolvido por Virões (2013) foi regionalizada a vazão mínima para a bacia do rio Itapicuru em função das variáveis explicativas: área de drenagem e precipitação média anual destas áreas, as mesmas variáveis abordadas pelo Método Chaves Modificado. Em seu caso, recomendou o uso da equação regional restrito à área delimitada, definida em suas regiões homogêneas, e para estimativas que não requeressem muita precisão. Isso é devido à insuficiência de dados disponíveis e representativos na região de aplicação, em contrapartida, este trabalho utilizou uma metodologia proposta por Xavier et al. (2015) associada ao SIG que abordou a inserção de um total de onze variáveis explicativas, ampliando a abrangência preditiva.

Corroborando aos resultados de regionalização de vazões mínimas encontrados neste trabalho, cabe destacar que o maior ou menor número de variáveis não sinaliza uma melhoria no ajuste do modelo, todavia, uma variável em si ou associada a outras pode definir o maior peso na regressão e, usualmente, embutir as informações referentes às outras variáveis físicas. Portanto, quando as demais variáveis não apresentam significância, provavelmente a variável selecionada já teria explicado a variabilidade, devido a correlação existente entre as mesmas.

3.3.4 Modelo de regionalização de vazões para as regiões homogêneas II e III

Percebeu-se que a quantidade de dados de estações fluviométricas das regiões II e III apresentaram-se de forma, estatisticamente, insuficientes, visto que cada uma apresentou, respectivamente, apenas três e duas estações fluviométricas, contidas em suas áreas, procedendo à não estimação dos parâmetros existentes.

Esse fator já mencionado é caracterizado por Baena et al. (2004) como uma deficiência de estações fluviométricas, tanto na insuficiência de dados fluviométricos quanto na distribuição geográfica das estações para uma dada região, o que impossibilita o ajuste das equações de regressão múltipla.

Acredita-se que a continuidade de áreas tão extensas, assim como definidas neste trabalho, seja em decorrência da baixa densidade de postos fluviométricos distribuídos ao longo da bacia hidrográfica do rio Itapicuru. Para Andrade et al. (2004) tal fato limita a identificação das regiões hidrológicas homogêneas com uma maior acuracidade.

4. Conclusões

O estudo de regionalização de vazões mostrou-se um importante instrumento para o planejamento dos recursos hídricos na estimativa de dados de vazão em regiões onde se necessita de informações com agilidade, qualidade e custos adequados, tanto para estimar demanda nos seus diversos usos, como também, ter utilidade em processos de outorga de água.

Este trabalho constitui-se como uma ferramenta que incentiva o uso racional e sustentável dos recursos hídricos, de maneira que atinge o objetivo de facilidade na sua aplicação e difunde o seu uso.

Os modelos de vazões mínimas propostos neste estudo apresentam-se com desempenho superiores ao de Chaves et al. (2002) e Virões (2013) para a bacia hidrográfica do rio Itapicuru. Essa melhoria pode ser explicada pelo fato que o modelo proposto utiliza dados mais recentes, uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e maior quantidade de variáveis explicativas, ocasionando maior dinâmica preditiva.

Este trabalho abrangeu a regionalização das vazões máximas, médias e mínimas. Para as máximas e médias abordaram-se, respectivamente, as vazões máximas associadas a períodos de retorno de 10 anos e as vazões médias de longa duração, tornando este trabalho pioneiro na aplicação desta metodologia na bacia hidrográfica do rio Itapicuru – BA, o que sem dúvida, potencializou o melhor desempenho do mesmo.

Os modelos propostos apresentaram maior interação com as variáveis independentes escolhidas, uma vez que cada equação de regionalização foi ajustada estatisticamente com as variáveis que melhor tivessem representação física e de predição com valores mais seguros que as demais variáveis analisadas não inseridas nos ajustes.

A variável explicativa NDVI mostrou-se menos expressiva no desenvolvimento dos modelos de regionalização de vazões propostos, não demonstrando impacto relevante em relação ao desempenho das demais variáveis.

Os resultados deste trabalho demonstraram que a maior quantidade variáveis explicativas não significa melhor representação de modelo matemático. Em todas as análises de regressões feitas observaram-se resultados satisfatórios, vistos os coeficientes estatísticos obtidos.

Esta pesquisa é considerada não estanque ao longo do tempo, devido às mudanças constantes que sofrem os cursos d'água, principalmente pela intervenção antrópica. Desta forma, implica dizer que é inevitável haver a manutenção dos estudos de regionalização, não desconsiderando a necessidade de implantação de postos climáticos e fluviométricos ao longo da bacia hidrográfica, sendo inexorável a atualização e a conservação de rede hidrometeorológicas, que é base de sustentação deste tipo de estudo.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Em adição, agradece-se ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Sergipe pela estrutura física e oportunidade.

Referências

Agência Nacional de Águas – ANA. (2018). *Portal SNIRH*. Recuperado de <http://portalsnirh.ana.gov.br>

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). *Köppen's climate classification map for Brazil*. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.

Amaral, G. D., Silva, V. L., & Reis, E. A. (2009). *Análise de Regressão Linear no Pacote R*. Relatório Técnico. Universidade Federal de Minas Gerais.

Andrade, E. M., Porto, M. M., Costa, R. N. T., Meireiles, M., & C. Neto, J. A. (2004). Regionalização de modelos de vazões médias de longo período para o Estado do Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, 35(0), 139 - 148.

Baena, L. G. N., Silva, D. D., Pruski, F. F., & Calijuri, M. L. (2004). Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Engenharia na Agricultura*, Jaboticabal, 24(3), 612-624.

Barbosa, S. E. S., Barbosa Júnior, A. R., Silva, G. Q., Ccampos, E. N. B., & Rodrigues, V. 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. *Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 10(1), 64-71.

Brasil. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. I da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília.

Chaves, H. M. L., Rosa, J. W. C., Vadas, R. G., & Oliveira, R. V. T. (2002). Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(3) 43-51.

CPRM: *Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*. (2002). *Relatório síntese do trabalho de regionalização de vazões da sub-bacia 59*. São Paulo. Recuperado de www.cprm.gov.br/rehi/regionalizacao/sint_reg59.pdf.

Eletrobrás: Centrais Elétricas Brasileiras. (1985). *Metodologia para regionalização de vazões*. Rio de Janeiro, v. 2.

Embrapa Informática Agropecuária. (2016). *Sistema de análise temporal da vegetação: SATVeg*. Campinas.

Euclides, H. P., Ferreira, P. A., Rubert, O. A., & Santos, R. M. (2001). Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(2), 81-105.

Galili, T. (2016). *Hybrid hierarchical k-means clustering for optimizing clustering outputs – Unsupervised Machine Learning*. Recuperado de <https://www.r-bloggers.com>.

GPRH - Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos da UFV, IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. (2012). *Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: IGAM. 415p.

Kite, G. W. (1988) *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. 5. ed. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications. 257p.

Latuf, M. O. (2011). *Modelagem hidrológica aplicada ao planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio acre*. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente – SP.

Lima, K. C. (2017). *O holoceno superior na bacia do rio Itapicuru (Bahia/Brasil): proposição de cenário para o baixo curso e planície costeira*. Tese de doutorado (Análise Ambiental e Dinâmica Territorial). Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP.

Lopes, T. R., 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), 188-201.

Mestrinho, S. S. P. (2008). Diagnóstico ambiental associado à qualidade dos Recursos hídricos na bacia do rio Itapicuru, estado da Bahia, BRASIL. In: *XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 1-20.

Naghetini, M., & Pinto, E. J. A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Serviço Geológico do Brasil. Belo Horizonte: CPRM.

Nerc. (1975). *Flood studied report*. London, 1975, 1-50.

Pereira, L. A. (2012). *Regionalização de vazões de permanência aplicada na região hidrográfica do Uruguai utilizando o programa SisCoRV*. Monografia (Engenharia Ambiental), Curso de Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

Pessoa, F. C. L. (2015). *Desenvolvimento de Metodologia para Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões na Amazônia Legal*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, Universidade Federal do Pará – UFP, Belém.

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

Pruski, F. F., Silva, D. D., & Koetz, M. (2006). *Estudo da vazão em cursos d'água. Viçosa: Engenharia na Agricultura*. Caderno didático: 43. Associação de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 151 p.

Purificação, C. G. C., Soares, R. S., Jesus, M. H., Salles, L. Q., & Gonçalves, T. S. (2016). Hidrogeologia da bacia hidrográfica do rio Itapicurú – BA, como subsidio para o plano diretor de bacias. *XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Campinas – SP.

QGIS Development Team. (2019). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. Recuperado de <http://qgis.osgeo.org>.

R Core Team R. (2015). *A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de <http://www.R-project.org>.

Radambrasil, Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. (1983) *Projeto RADAMBRASIL. Folha SC. 24/25 Aracaju/Recife: Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra*. Rio de Janeiro, 624p.

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

Reis Jr., D. S. (2005). *Flood frequency analysis employing bayesian regional regression and imperfect historical information*. Tese (Ph. D. thesis) - Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, New York.

RPGA da Bacia do Rio Itapicurú. (2018). *Programa Monitora: Programa de Monitoramento das Águas do Estado da Bahia*. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Sreedevi, P. D., et al. (2009). Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. *Journal Geological Society of India*, 73(4), 543-552.

Silva, E. S., & Fontes, A. S. (2017). Importância ecológica do comportamento hídrico do rio Itapicuru no semiárido baiano. *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH*, Florianópolis – SC.

Souza, H. T. (2009). *Sistema computacional para regionalização de Vazões*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 86p.

Tucci, C. E. M. (2002). *Regionalização de vazões*. Porto Alegre: Universidade/UFRGS.

Tucci, C. E. M., et al. (2012). *Hidrologia: ciência e aplicação*. (4a ed.), Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

Vasco, A. N. (2015). *Indicadores de Alteração Hidrológica: o declínio das vazões no baixo rio São Francisco*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE.

Vasconcelos, V. V., Martins Junior, P. P., & Hadad, R. M. (2013). Quantificação de Componentes de Vazão por Meio de Filtros Recursivos: estudo de caso para a Bacia do Rio Paracatu (SF-7), Brasil. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, 13, 3-24.

Veiga, A. M., Melo, D. C. R., Marcuzzo, F. F. N., & Cardoso, M. R. D. (2011). Métodos de regionalização de vazões em cotas baixas de referência para o rio Teles Pires na bacia amazônica. *XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH*, Maceió – AL.

Virões, M. V. (2013). *Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras: estudo da vazão de 95% de permanência da sub-bacia 50 – Bacias dos rios Itapicuru, Vaza Barris, Real, Inhambupe, Pojuca, Sergipe, Japaratuba, Subaúma e Jacuípe*. Recife: CPRM.

Xavier, A. C., King, C. W., & Scanlon, B. R. (2016). Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, 36, 2644–2659.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Ytallo Rafaell Teixeira de Albuquerque – 45%

André Quintão de Almeida – 35%

Ludmilson Abritta Mendes – 10%

Marcus Aurélio Soares Cruz – 10%