



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Regionalização de Vazões a partir de Parâmetros Morfométricos da Bacia Hidrográfica do Rio Grande – Bahia

Fabricio Ribeiro Garcia¹, Sival Ribeiro de Sena², Yvonilde Dantas Pinto Medeiros³, Andrea de Sousa Fontes⁴

¹ Doutorando Universidade Federal do Rio de Janeiro, fabricio.garcia@coc.ufrj.br

² Doutorando Universidade Federal do Sul da Bahia, sivsennarb@gmail.com

³ Docente Universidade Federal da Bahia, yvonilde.medeiros@gmail.com

⁴ Docente Universidade Federal da Bahia, asfontes@gmail.com

Artigo recebido em 07/03/2023 e aceito em 24/04/2023

RESUMO

A escassez de dados de monitoramento fluviométrico é um grande desafio na gestão dos recursos hídricos é de fundamental importância conhecer o comportamento dos rios para fins de planejamento de atividades humanas. A região da bacia hidrográfica do rio do Grande/Ba destaca-se como uma grande produtora agrícola, além de apresentar um elevado crescimento demográfico e econômico, assim apresentando um intensivo uso da água. A regionalização é uma importante técnica para se estimar vazões em regiões desprovidas de dados, neste sentido, o presente artigo teve como objetivo avaliar um conjunto de características físicas das sub-bacias do rio Grande/Ba para a obtenção de um modelo de regionalização de vazões. Para tanto, utilizou-se informações oito estações fluviométricas da região disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), e considerando-as como exutórios das sub-bacias, analisou-se as características físicas a área de drenagem da bacia (A), comprimento do rio principal (L), declividade média do rio principal (S), densidade de drenagem (D), desnível (H) e perímetro (P). A partir do método de regressão avaliou-se o grau de correlação de cada conjunto de características físicas com o conjunto de vazões das estações. Os resultados mostraram que as variáveis de área de drenagem da bacia e perímetro foram características físicas que melhor descrevem a relação de com as vazões, assim compondo o modelo final. A avaliação para estimativas de vazões apresentou um coeficiente de determinação de 0,94, erro médio de 11,32, e a análise global apresentou coeficiente Nash-Sutcliffe de 0,87.

Palavras-chave: Estimativa de Vazões, Regressão Múltipla, Modelo Digital de Terreno.

Regionalization of Flows based on Morphometric Parameters of the Rio Grande – Bahia Hydrographic Basin

ABSTRACT

A escassez de dados de monitoramento fluviométrico é um grande desafio na gestão dos recursos hídricos é de fundamental importância conhecer o comportamento dos rios para fins de planejamento de atividades humanas. A região da bacia hidrográfica do rio do Grande/Ba destaca-se como uma grande produtora agrícola, além de apresentar um elevado crescimento demográfico e econômico, assim apresentando um intensivo uso da água. A regionalização é uma importante técnica para se estimar vazões em regiões desprovidas de dados, neste sentido, o presente artigo teve como objetivo avaliar um conjunto de características físicas das sub-bacias do rio Grande/Ba para a obtenção de um modelo de regionalização de vazões. Para tanto, utilizou-se informações oito estações fluviométricas da região disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), e considerando-as como exutórios das sub-bacias, analisou-se as características físicas a área de drenagem da bacia (A), comprimento do rio principal (L), declividade média do rio principal (S), densidade de drenagem (D), desnível (H) e perímetro (P). A partir do método de regressão avaliou-se o grau de correlação de cada conjunto de características físicas com o conjunto de vazões das estações. Os resultados mostraram que as variáveis de área de drenagem da bacia e perímetro foram características físicas que melhor descrevem a relação de com as vazões, assim compondo o modelo final. A avaliação para estimativas de vazões apresentou um coeficiente de determinação de 0.94, erro médio de 11.32, e a análise global apresentou coeficiente Nash-Sutcliffe de 0.87.

Keywords: Flow Estimation, Multiple Regression, Digital Terrain Model.

Introdução

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) instituída pela lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997- a qual regulamenta o artigo 21 Constituição Federal- institui o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Dos fundamentos e objetivos desta lei destaca-se a ênfase da gestão dos recursos hídricos de forma descentralizada e participativa por todos os usuários e comunidades, promovendo o uso múltiplos da água de forma sustentável. Neste sentido, a medição contínua de vazões é crucial em muitas aplicações de planejamento e gestão de recursos hídricos. Essas informações são críticas para avaliar as decisões operacionais e de gestão em todos os setores, incluindo energia hidrelétrica, agricultura, abastecimento de água e ecossistemas associados (J Panthi, et. al, 2021).

O monitoramento hidrológico é a forma ideal de determinar vazões em cursos d'água. Porém as bacias hidrográficas brasileiras possuem um escasso monitoramento fluviométrico, assim comprometendo as estimativas de vazões para o gerenciamento dos recursos hídricos. Esta escassez de dados resulta em menos oportunidades de validação dos modelos hidrológicos usados e, portanto, há oportunidades limitadas para demonstrar que um determinado modelo específico do local é capaz de fazer previsões precisas (Flatley et al., 2022).

A falta de dados hidrológicos adequados é causada por uma diversas de razões, como por exemplo, baixa densidade de estações hidrométricas, avaria e falta de equipamentos de medição, mão de obra treinada inadequada, vandalização de instrumentos de medição, locais inacessíveis etc. (Fasipe e Izinyon, 2021). Assim a escassez e a qualidade dos dados são citadas como os principais desafios que afetam a quantificação da incerteza nas previsões de vazão (Anandharuban et al., 2023).

Diante das incertezas ou ausências de dados de medições de vazões, uma das soluções pode ser a utilização das técnicas de regionalização de vazões. Um grupo de bacias hidrográficas comparáveis em termos de mecanismo de geração de vazões estabelece uma região homogênea e o processo para identificar uma região hidrologicamente homogênea é conhecido como regionalização (Kebebew e Awass, 2022). Os métodos de regionalização avaliam as informações hidrológicas disponíveis em um determinado local para então estimar valores em locais sem dados.

As transferências de parâmetros, ou regionalização pode ser no tempo, no espaço ou ambos (Fasipe e Izinyon, 2021). A abordagem de regionalização no espaço (simulando em locais em que não há medições) incluem métodos como similaridade física, proximidade espacial ou regressão (que identifica a relação entre parâmetros hidrológicos e características de bacias hidrográficas) (Baena et al., 2004; Maciel et al. 2019; Asurza-éliz e Lavado-Casimiro, 2020; Guo et al., 2021; Flatley et al., 2022).

Uma abordagem comum é usar regressões para extrapolar parâmetros calibrados das propriedades da bacia hidrográfica (Quintero e Zanchetta, 2022). A regressão é um processo de obtenção de correlação entre variáveis dependentes e independentes (Chowdhury et al., 2022). Os métodos de regressão podem encontrar a direção e a magnitude das relações entre um conjunto de variáveis preditoras e características evidências disponíveis a partir de observações anteriores (Azadeh Atabatia et al., 2022). Para desenvolver um modelo de previsão de vazões utilizou-se a abordagem do método de regressão linear múltipla. Chowdhury et al., 2022, a Regressão Linear Múltipla (MLR) é uma técnica estatística popular para descobrir a relação entre variáveis preditoras e variáveis de resposta. As diferenças entre as abordagens estão no tipo de informação que é transferida.

As características físicas da bacia hidrográfica desempenham um papel significativo na resposta hidrológica da bacia hidrográfica (Fasipe e Izinyon, 2021). Assim, para utilização dos métodos de regionalização pode-se utilizar diversas características fisiográficas como declividade, área de drenagem, comprimento do curso principal, fator de forma, índice de compacidade, densidade de drenagem, tipos de cobertura da área, índice de precipitação, entre outros.

A regionalização tem como foco a transposição de dados hidrológicos de uma bacia hidrográfica para uma outra região, e têm sido aplicada em diversos estudos no Mundo envolvendo análises de relações estatísticas entre as propriedades observáveis da bacia hidrográfica e as características das descargas de cheias (Flatley et al., 2022), previsão de vazão usando modelos de aprendizado de máquina (Rajat et al., 2023); regressão linear sobre as características hidrológicas das bacias (Irina et al 2023); e transferência de escalas temporais para dois períodos distintos (Afshin et al., 2021).

Os estados brasileiros adotam diferentes vazões para outorga de uso, levando em consideração a realidade local e as características hidrológicas e climáticas de cada localidade. O estado da Bahia adota a como vazão mínima de referência de planejamento dos recursos hídricos a Q_{90} - o que significa que o fluxo está presente 90% do tempo, enquanto nos outros 10% do tempo o fluxo não é atendido. Assim, tendo em vista a importância de necessidade de regionalização de vazões para o planejamento dos recursos hídricos, o trabalho tem como objetivo avaliar os parâmetros morfométricos das sub-bacias hidrográficas do Rio Grande/ Ba, e entender quais dos parâmetros são capazes de explicar da melhor forma a relação com vazões- e então propor um modelo determinístico de regionalização de vazões mínimas de referência Q_{90} .

Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido para a região oeste da Bahia, sendo utilizado dados de fluviométricos medidos em solo a partir do banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), a partir dos quais foram determinadas a vazões

mínimas de referência Q_{90} de cada posto; utilizou-se ainda o modelo digital de terreno SRTM com células de resolução espacial de 1 arco-segundo (30 m), através do qual obteve-se as áreas de contribuição para cada posto, bem como determinou-se os parâmetros morfométricos destas. Correlacionou-se individualmente os conjuntos dos parâmetros morfométricos com o conjunto de vazões, então definindo os melhores ajustes para a construção do modelo de regressão linear múltipla. Sendo todas as etapas citadas detalhadas nos tópicos subsequentes.

Área de estudo

A área de estudos compreende a bacia hidrográfica do rio Grande/Ba, localizada na margem esquerda do Rio São Francisco, na região oeste do estado da Bahia, sendo esta predominantemente inserida na região de bioma de cerrado, e possuindo uma área de 78.155,38 km², apresentando uma grande diversidade de características espaciais e temporais das usos. A bacia hidrográfica do Rio Grande é composta pelas sub-bacias rio Grande, e a sub-bacia do rio Preto, sendo o principal afluente (Figura 1).

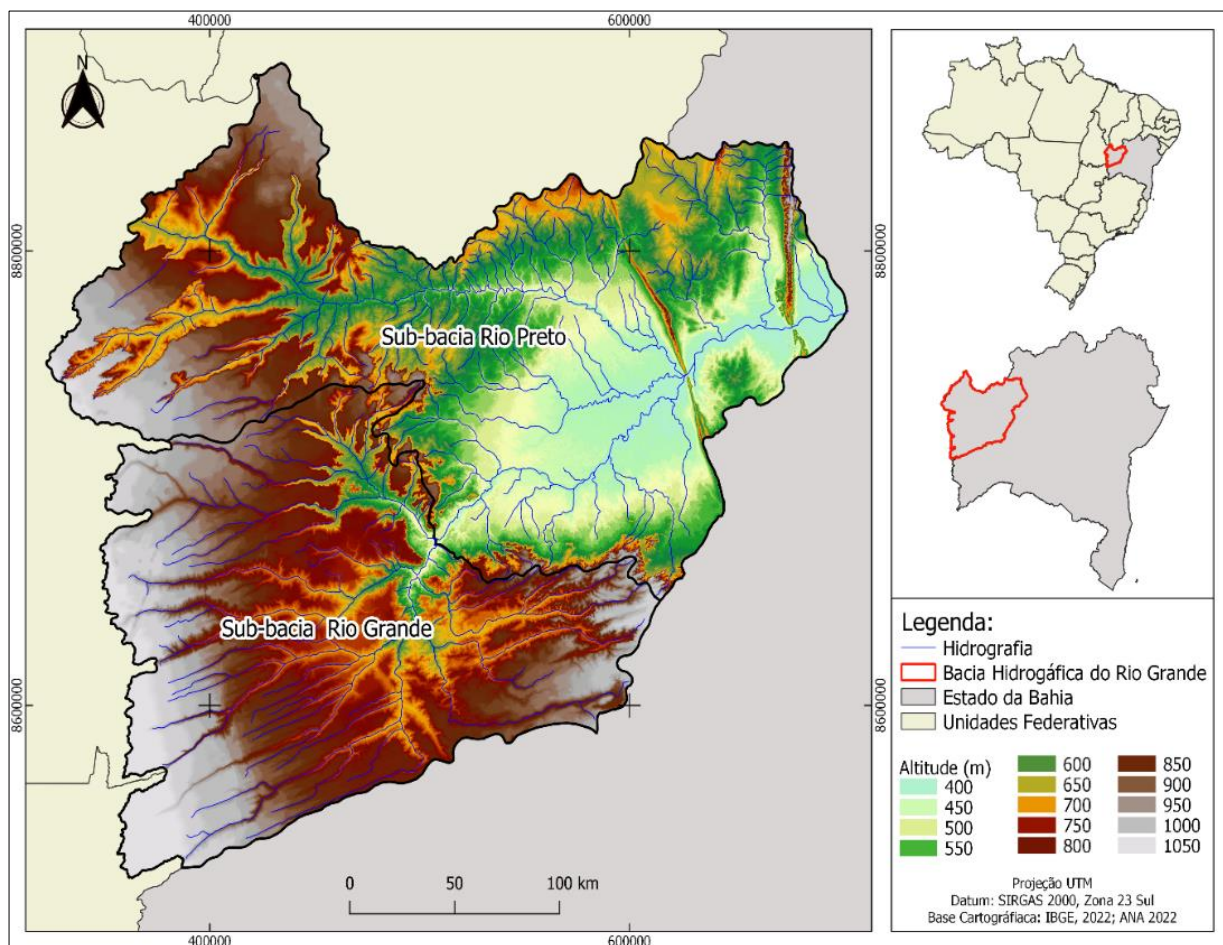


Figura 1: Bacia Hidrográfica do rio Grande, Oeste da Bahia.

A região foi escolhida por se destacar como uma grande produtora agrícola, sendo em sua maior parte em atividades relacionadas à produção de grãos como soja, milho e algodão, além de apresentar um elevado crescimento demográfico e econômico (Leivas et al., 2020; Santos, 2021), assim apresentando um intensivo uso da água.

A coleta dos dados foi feita através de download no sítio eletrônico do Sistema de Informações Hidrológicas (Hidroweb) da Agência Nacional de Águas (ANA). Foram selecionados oito postos de dados fluviométricas com período compreendido entre 08/1941 e 12/2021, apresentados na Tabela 1, totalizando 5085 registros.

Dados de Séries Históricas de Vazões

Tabela 1 : Estações fluviométricas utilizadas

ID	Nome da estação	Código	Latitude	Longitude	Período
1	Formosa Do Rio Preto	46790000	-11.0514	-45.1969	08/1938- 12/2021
2	Fazenda Porto Limpo	46870000	-11.2356	-45.1969	02/1977- 12/2018
3	Nova Vida	46590000	-11.8561	-45.1225	04/1977- 12/2021
4	Fazenda Redenção	46543000	-12.1358	-45.1033	02/1977- 12/2018
5	Derocal	46455000	-12.4106	-45.1222	01/1977-12/2021
6	Fazenda Coqueiro	46490000	-12.4044	-44.9531	04/1977- 12/2021
7	Taguá	46650000	-11.7208	-44.5022	04/1977- 12/2021
8	São Sebastião	46610000	-11.9794	-44.8772	02/1977- 12/2021

A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dos oito postos fluviométricos utilizados.

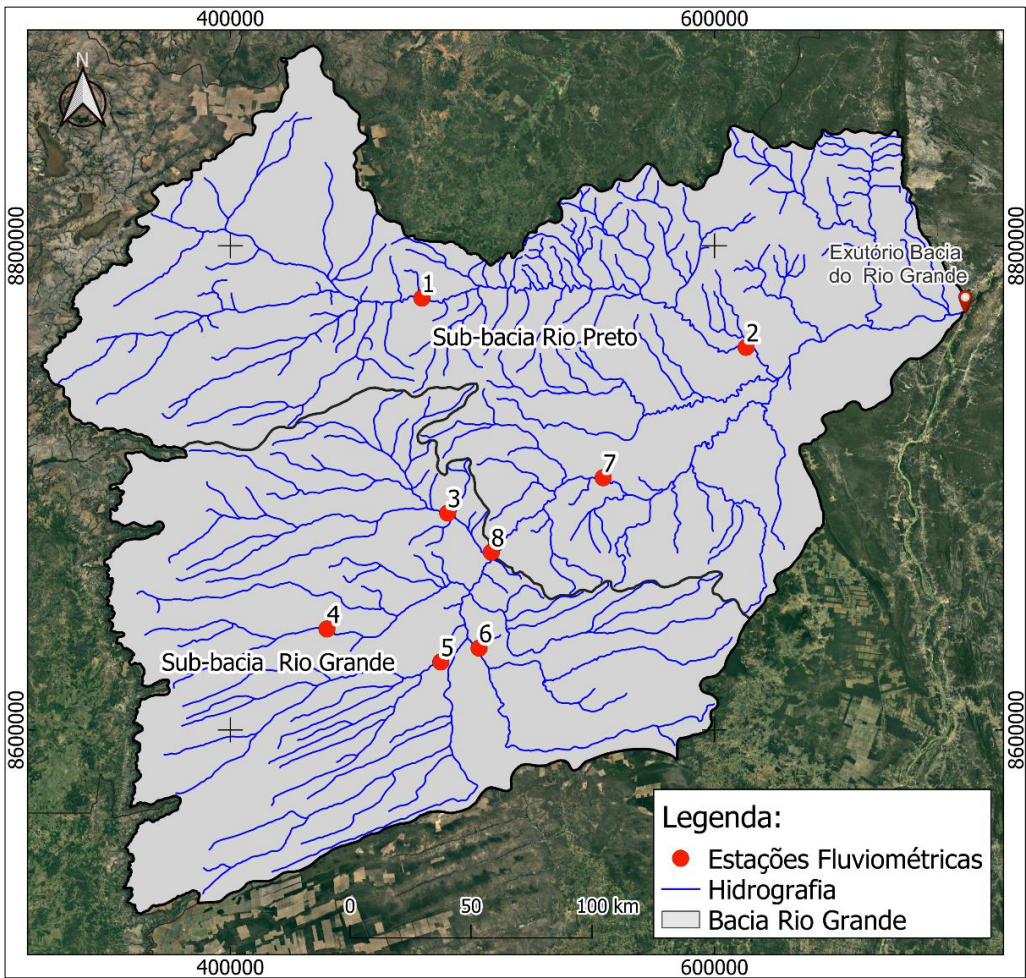


Figura 2: Distribuição espacial das estações fluviométricas na bacia do rio Grande.

De posse dos dados de séries históricas de vazões foram selecionadas aquelas com mais de 30 anos de registros e ainda descartando-se aquelas com mais de 10 % de falhas nos registros. Destaca-se que para não se criar tendências de valores, não foi realizado o preenchimento de falhas das séries.

Após a seleção das estações determinou-se a curva de permanência para cada estação fluviométrica selecionada. A curva permanência foi definida a partir da série de dados diários, de onde foram então obtidos os valores das vazões mínimas de referência Q_{90} para cada estação fluviométrica.

Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação (MDE) é uma importante fonte de dados para várias aplicações na topografia, geomorfologia, estudos de cobertura vegetal, avaliação tsunami, hidrologia, morfometria e estudos urbanos

(Hidayatulloh et al., 2022). Os MDEs podem ser obtidos por diferentes técnicas, sendo algumas das mais frequentemente utilizadas como os oriundos por interferometria por radar de abertura sintética, detalhados a seguir.

O radar de abertura sintética interferométrico, abreviado InSAR, é uma técnica de radar que usa duas ou mais imagens de radar de abertura sintética (SAR) para gerar mapas de deformação da superfície, usando diferenças na fase das ondas que retornam ao satélite ou aeronave. A técnica de interferometria de SAR tem a capacidade de detectar alterações que ocorrem entre as aquisições (Ho Tong Minh e Ngo, 2022).

A interferometria SAR usa duas imagens SAR co-registradas adquiridas de órbitas próximas (Figura 3). O interferograma- ou seja, a diferença de fase entre o momento de registro das duas imagens SAR- está relacionado à posição 3D de cada alvo no solo (Marinez-Barbáchano, 2022).

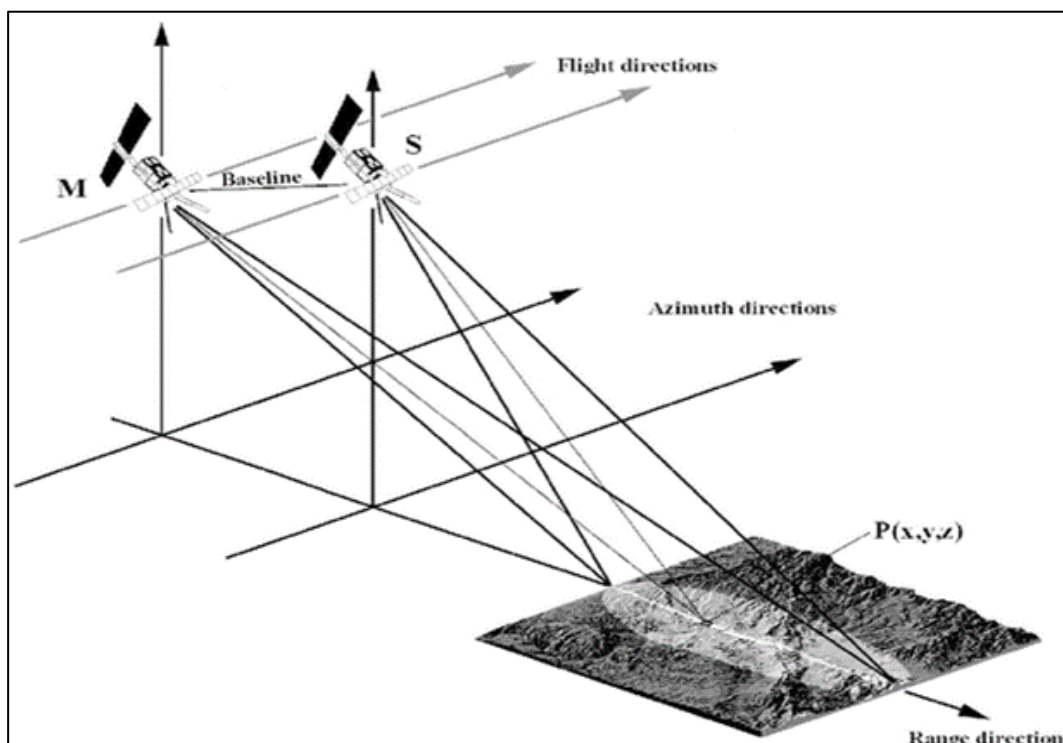


Figura 3: Geometria do modelo InSAR
Fonte: Crossetto et al., (2003).

Os interferogramas podem ser usados para produzir mapas digitais de elevação usando o efeito estereoscópico causado por pequenas diferenças na posição de observação entre as duas imagens.

O modelo digital de terreno SRTM (SRTM) baseia-se no princípio de interferometria SAR (InSAR), a qual usa medidas de diferença de fase derivadas de duas imagens de radar adquiridas

com uma pequena proporção de base-para-altura para medir a topografia (Orlando et al., 2022).

O modelo digital de terreno Shuttle Radar Topography Mission de 1 arco de segundo-resolução de 30 m- foi gerado a partir de dados interferométricos do radar de imagem espacial da bandas X e C adquiridos durante a missão SRTM em 2000 (Orlando et al., 2022).

O produto de 1 arco de segundo usou interferometria de passagem única, ou seja, adquiriu dois sinais ao mesmo tempo usando na mesma plataforma duas antenas de radares diferentes (USGS, 2018).

Características Morfométricas da Bacia

Diversos estudos já foram desenvolvidos sobre a qualidade do SRTM (Pham (2018); Orlandi et al, (2019); Machado et al, (2019); Santos, et al, (2020); Ariza-López, e Reinoso-Gordo (2021); Zhao (2021). Para o modelo digital de elevação utilizou-se o Shuttle Radar Topography Mission com células de resolução espacial de 1 arco-segundo (30 metros), disponibilizado em

formato GeoTIFF (.tif) e adquirido gratuitamente através do projeto TOPODATA a partir do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), disponibilizados em formato Geotiff.

A imagens foram pré-processadas no software QGIS, na sua versão 3.10.7, inicialmente passando por criação de mosaico, posteriormente o recorte da área e remoção dos pixels negativos e vazios.

A partir da localização das estações, adotou-se estas como sendo exutórios de sub-bacias, assim, a partir das cotas de nível, realizou-se a vetorização das áreas de contribuição para cada ponto (Figura 4).

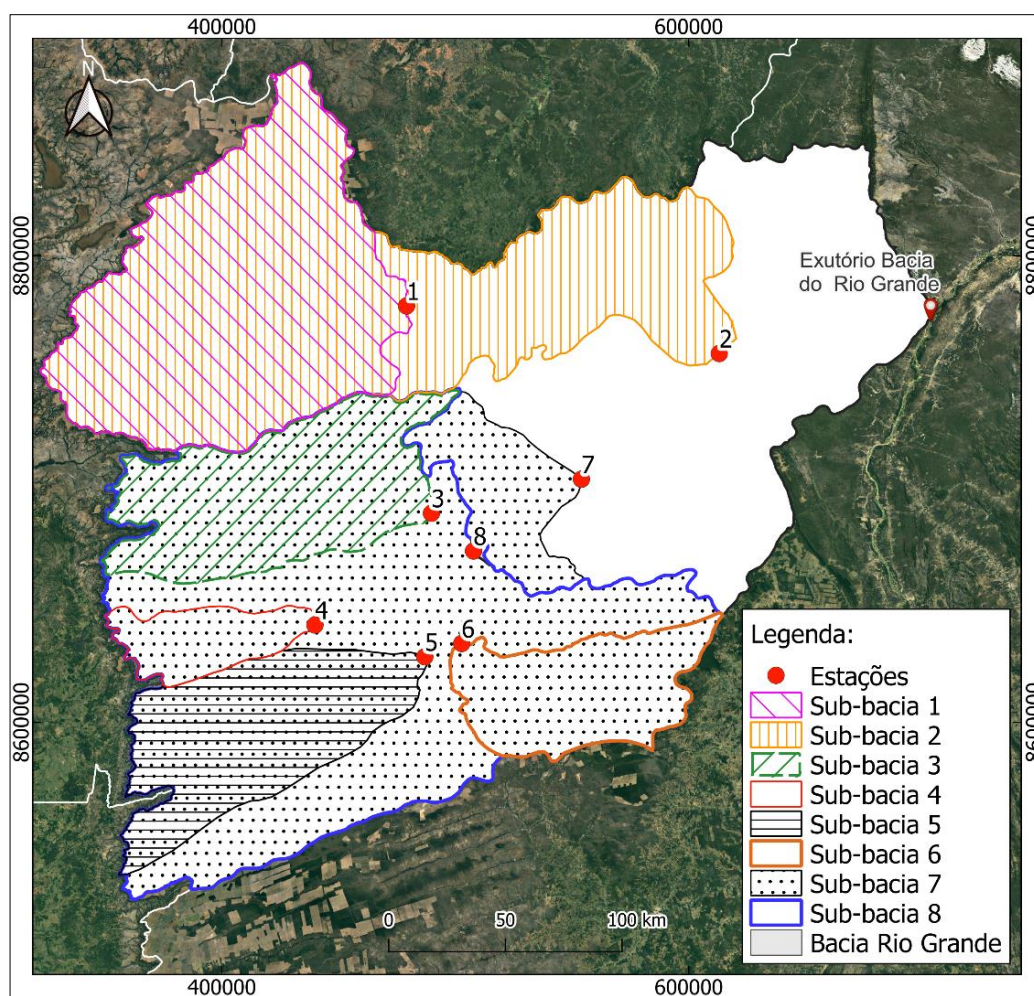


Figura 4: Divisão sub-bacias analisadas na bacia do rio Grande.

De posse da delimitação da área de contribuição determinou-se as características físicas utilizadas na elaboração do modelo de regionalização. Para a definição dos parâmetros morfométricos das sub-bacias seguiu-se a metodologia apresentada em Baena et al. (2004) e Tucci (2017) na qual traz a recomendação das seguintes variáveis físicas:

- ✓ Área de drenagem da bacia (A);
- ✓ Comprimento do rio principal (L);
- ✓ Declividade média do rio principal (S);
- ✓ Densidade de drenagem (D);
- ✓ Desnível (H);
- ✓ Perímetro (P).

Modelo de Estimativa de Vazões

A análise de regressão consiste em uma técnica que visa associar uma variável dependente (y) com uma ou mais variáveis independentes (x1, ..., xn). Considerando que exista um relacionamento funcional entre os valores (y) e (x1, ..., xn), essa função deverá explicar parcela significativa da variação de (y) com (x1, ..., xn) (Naghetini e Pinto, 2007; Barreto et al, 2016).

Nesse sentido, os conjuntos das variáveis de vazões mínimas de referências Q90 e as séries de dados das características físicas foram correlacionadas inicialmente a partir de análise de regressão simples, a qual admitindo-se ser uma reta a linha teórica de regressão, a função entre (x) e (y) pode ser representada na forma da Equação 01.

$$Y = \alpha + \beta.X + \varepsilon \quad \text{Equação (01)}$$

Onde:

- ✓ Y - variável dependente;
- ✓ X - variável independente;
- ✓ α e β - coeficientes do modelo e
- ✓ ε - resíduos da regressão.

Os coeficientes α e β são estimados a partir dos dados observados, assim obtendo uma reta estimada na forma da Equação 02:

$$y_i = a + b.x_i \quad \text{Equação (02)}$$

Onde:

- ✓ a - estimativa do coeficiente α ;
- ✓ b - estimativa do coeficiente β ;
- ✓ yi - valor observado da variável dependente;
- ✓ xi - valor observado da variável independente.

A partir dos resultados das regressões simples avaliou-se os coeficiente de determinação, o qual pode ser entendido como sendo o grau de eficiente do modelo, assim denotando o quanto a variável dependente y é explicada pelo modelo de regressão. Dessa forma, os parâmetros físicos com os melhores resultados foram analisados em conjunto através da regressão múltipla.

Como referido anteriormente, a regressão múltipla estuda-se o comportamento de uma variável dependente (y) em função de duas ou mais variáveis independentes (x1, ..., xn). Assim, do mesmo modo que na regressão simples, os conjuntos das variáveis de vazões mínimas de referências Q90 foram correlacionadas com as séries de dados das características físicas, porém

agora apenas com os parâmetros de maior correlação.

A regressão múltipla, a qual, admitindo ser uma reta a linha teórica de regressão a função entre (X) e (Y) pode ser representada pela Equação 03 a seguir.

$$Y = \beta_0 + \beta_1.X_1 + \dots + \beta_p.X_p + \varepsilon \quad \text{Equação (03)}$$

Onde:

- ✓ Y - variável dependente;
- ✓ X1, X2, ..., Xp - variáveis independentes;
- ✓ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$ - coeficientes de regressão.
- ✓ ε - resíduos da regressão.

A partir de um conjunto de n valores da variável Y, associados às n observações correspondentes das P variáveis independentes, a solução é dada por um sistema de equações representado pela matriz, Equação 04:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,p} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & X_{n,p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad \text{Equação (04)}$$

ou em notação matricial:

$$[Y] = [X].[\beta]$$

Onde:

- ✓ [Y] - vetor das observações da variável dependente;
- ✓ [X] - matriz das observações das variáveis independentes;
- ✓ $[\beta]$ - vetor com os coeficientes da regressão.

Para verificar o ajuste do modelo aos dados observados utilizou-se a avaliação do erro relativo (ER), bem como os resíduos entre o valor obtido a partir da série histórica de vazões observadas e o conjunto de vazões estimadas.

Além disso analisou-se a coeficiente de Nash- Sutcliffe (Nash) para validar o desempenho do modelo de regionalização. O coeficiente busca comparar a redução do desvio quadrático do erro do modelo com desvio quadrático do modelo alternativo, conforme Equação 5.

$$Nash = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum(Q_{obs} - Q_{med})^2} \quad \text{Equação (05)}$$

Onde:

- ✓ Qobs – vazões observadas;
- ✓ Qcal – vazões calculadas;
- ✓ Qmed – média das vazões calculadas.

Resultados e discussão

1.1 Obtenção das Vazões de Permanência

De acordo com os procedimentos descritos anteriormente, foram desenvolvidas as curvas de permanência de vazões das estações fluviométricas para as oito sub-bacias hidrográficas definidas, como apresentado na figura 5 a seguir.

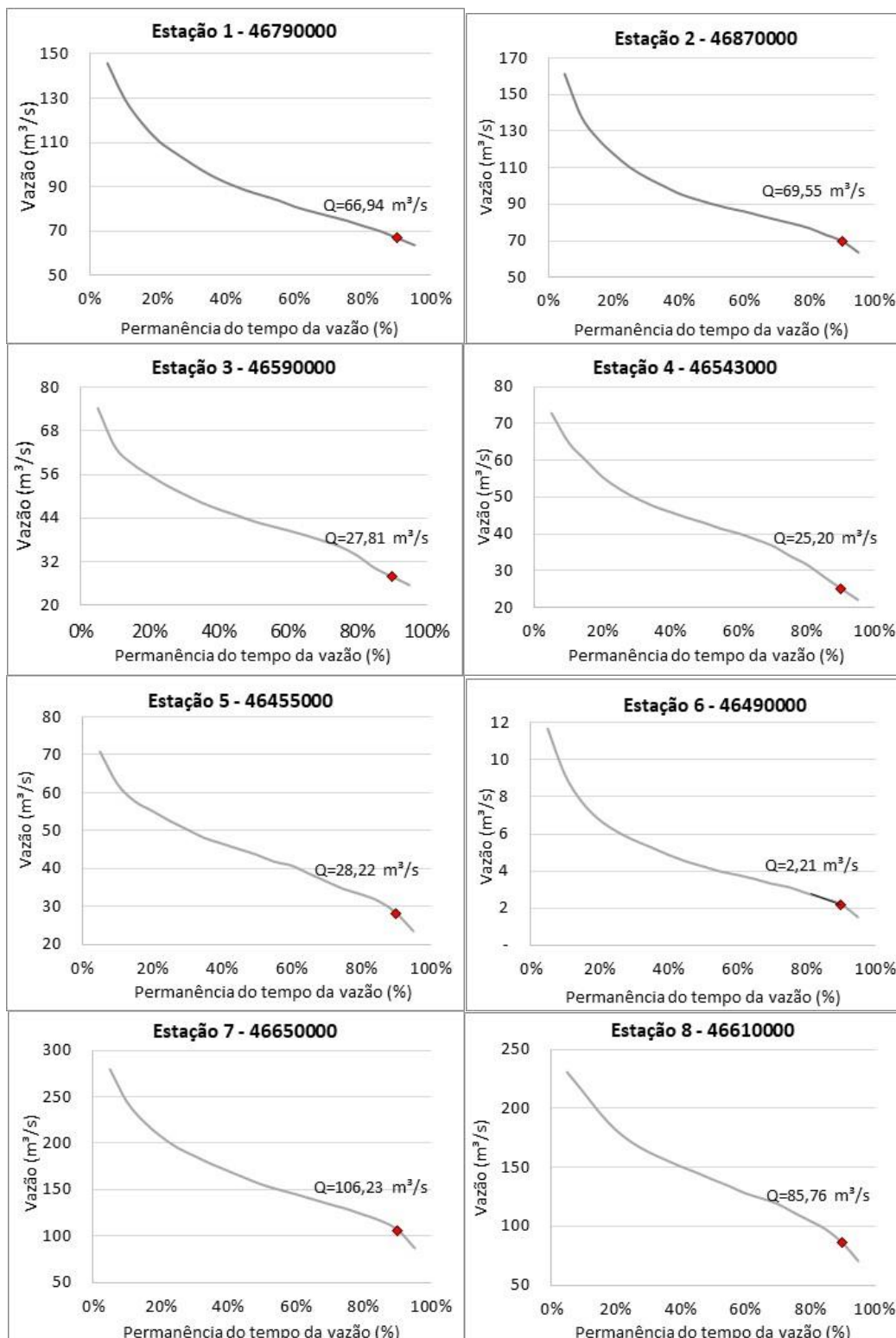


Figura 5: Curva de permanência de vazões diárias das estações selecionadas.

Observa-se que os rios pertencentes à bacia do rio Grande apresentam um comportamento característico, uma vez que a curva de permanência representa uma relação típica de distribuição das vazões.

As maiores vazões Q_{90} foram obtidos para as estações que estão localizadas nos cursos principais dos rios, sendo as estações 1 e 2 localizadas no curso principal do rio Preto, enquanto as estações 7 e 8 localizadas no curso principal do rio Grande. De forma inversa, as menores vazões foram obtidas para as estações 3,

4, 5 e 6, as quais estão localizadas nos afluentes do rio Grande. Assim, o valor da vazão Q_{90} aumenta à medida que o ponto monitorado no rio se distancia da nascente deste rio e se aproxima de seu exutório.

1.2 Variáveis para Regionalização

As variáveis físicas analisadas estão na Tabela 2, na são apresentadas a área de drenagem da bacia (A), comprimento do rio principal (L), densidade de drenagem (D), declividade média do rio principal (S) e desnível (H).

Tabela 2 : Características morfométricas das sub-bacias do rio Grande

Sub-bacia	Área (km ²)	Comprimento rio principal (km)	Drenagem (Dd) (m/km)	Declividade do rio principal (S) (m/m)	Desnível (H(m))	Perímetro (P(km))
1	14859.90	171.97	81.56	0.00000000102	405.57	602.37
2	22664.46	350.09	106.39	0.00000000024	475.22	996.30
3	7739.11	130.76	106.26	0.00000000169	387.53	505.58
4	1962.16	60.11	88.35	0.00000000450	115.97	237.44
5	6688.87	133.01	103.83	0.00000000162	335.91	439.88
6	4485.65	144.68	73.88	0.00000000149	337.76	342.30
7	36385.47	276.49	104.22	0.00000000038	401.12	1141.22
8	33279.55	217.08	103.21	0.00000000059	390.34	1089.66

Observa-se que as sub-bacias 2, 7, e 8 apresentaram os maiores valores de áreas, perímetro e comprimento do rio principal.

Determinação do Modelo de Regionalização

As vazões mínimas de referência Q_{90} , determinadas anteriormente foram correlacionados com os resultados das variáveis físicas. De acordo com a classificação apresentada em Devore (2006), resultados de coeficiente compreendidos entre 0.70 e 0.89 possuem uma correlação forte, resultados compreendidos entre 0.40 e 0.69 possuem correlação moderada, enquanto resultados compreendidos entre 0.20 e 0.39 possuem uma correlação fraca.

Os resultados das regressões mostraram que as variáveis de área de drenagem (A) e

Perímetro da bacia (P) explicam de forma satisfatório a variável dependente de vazão, sendo obtido os coeficientes de determinação R^2 igual a aproximadamente 0.87 (Figura 6a) e 0.85 (Figura 6f), respectivamente.

As variáveis de comprimento do rio principal (L) e declividade (S) apresentaram resultados com coeficientes de determinação R^2 igual a aproximadamente 0.58 (Figura 6b) e 0.53 (Figura 6d).

Já as variáveis de densidade de drenagem (Dd) e desnível (H) não apresentaram resultados satisfatórios que possam explicar a variável dependente de vazão, sendo obtido os coeficientes de determinação R^2 igual a aproximadamente 0.22 (Figura 6c) e 0.32 (Figura 6e).

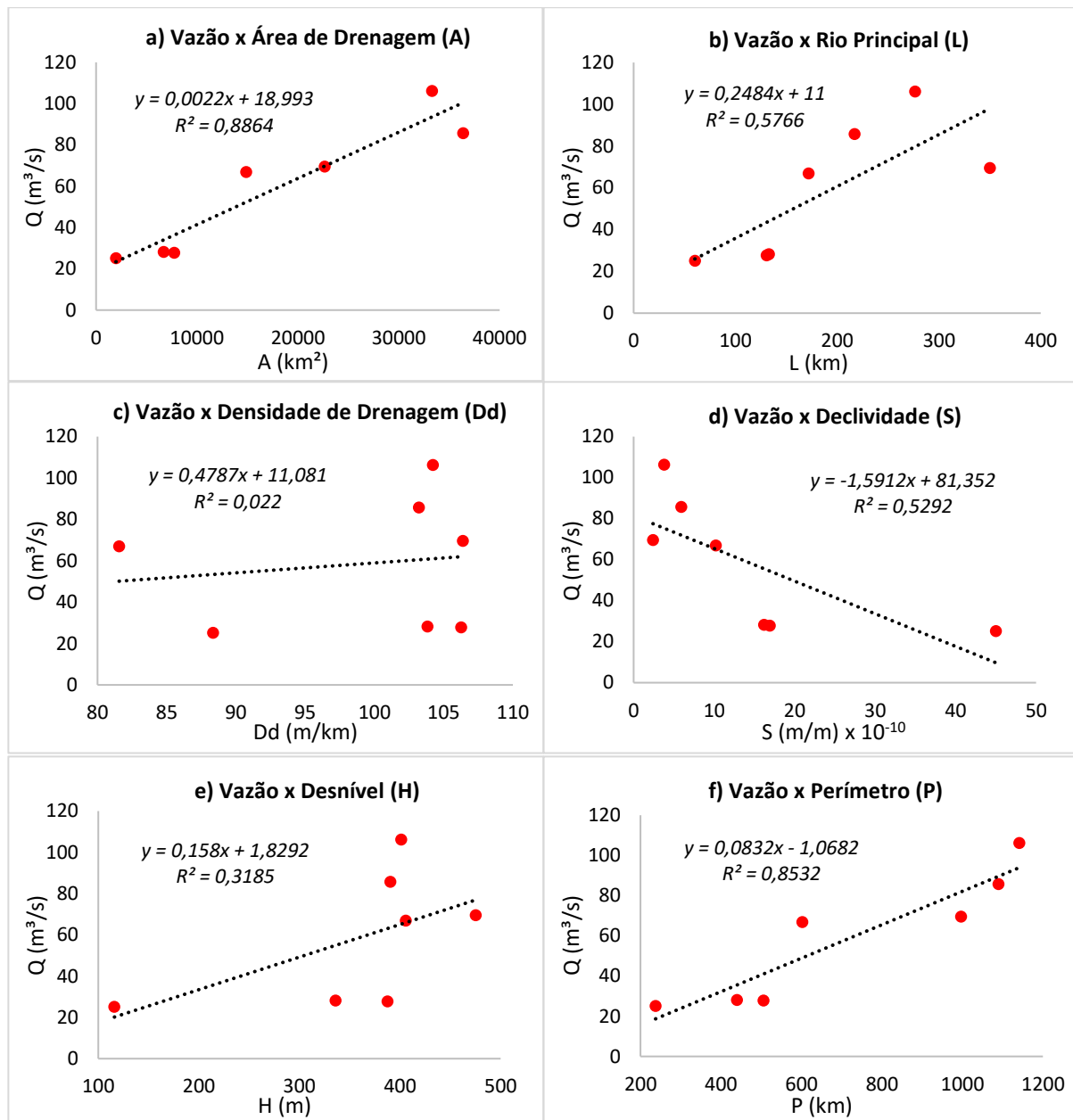


Figura 6: Ajustes das características morfométricas e as vazões de permanência Q_{90}

Estudo realizado por Maciel et al. (2019) chegou à combinação das variáveis explicativas de área (A), comprimento do rio principal (L) e declividade (S) como sendo o melhor modelo de regionalização. Baena et al. (2004) chegou à combinação das variáveis explicativas de área (A), comprimento do rio principal (L) e perímetro da bacia (P) as variáveis que melhor explicam as vazões.

Para construção do modelo final foram analisados os melhores ajustes estatísticos, sendo estes a variável dependente de vazão combinadas com as variáveis de área de drenagem e comprimento do rio principal. Assim, o modelo final para de determinação vazão mínima de permanência Q_{90} será uma função das duas variáveis independentes área de drenagem (A) e

comprimento do rio principal (L), sendo representada de forma genérica pela Equação 06:

$$Q_{90} = \beta_0 + \beta_1 \cdot A + \beta_2 \cdot L \quad \text{Equação (06)}$$

Sendo a matriz das observações das variáveis independentes composta pelo conjunto das áreas de drenagem e dos comprimentos dos rios principais de cada sub-bacia, como apresentado anteriormente na Tabela 3, e para um nível de confiança de 95%, obteve-se a solução para β_0 , β_1 , β_2 igual a 12,0, 0.0033 e -0.07, respectivamente, assim o modelo para estimativa de vazão adota a forma apresentada na Equação 07.

$$Q_{\text{est}} = 12,0 + 0.0033 \cdot A - 0.07 \cdot L \quad \text{Equação (07)}$$

Com um coeficiente de determinação de 0.94 e um erro médio de 11,32. Desta forma, a solução da análise conjunta das variáveis independentes em questão apresentou uma correlação forte, e ainda que a determinação da variável dependente está contida em um intervalo médio igual $Q90 \pm 11,32$.

Adicionalmente para verificar o ajuste do modelo avaliou-se a dispersão dos resíduos e o erro relativo (ER) entre as séries de dados de vazões observadas ($Q90_{obs}$) e as vazões estimadas ($Q90_{est}$), Tabela 3.

Tabela 3 : Resíduos e Erros obtidos entre as vazões de referência Q90

Sub-bacia	Q_{Obs}	Q_{Calc}	Resíduos	Erro (%)
1	66,94	49.00	17.94	-26.80
2	69,55	61.59	7.96	-11.44
3	27,81	31.44	-3.63	13.05
4	25,20	19.05	6.15	-24.40
5	28022	28.43	-0.20	0.72
6	2,21	21.77	-19.56	885.84
7	106.23	97.53	8.70	-8.19
8	85.76	103.11	-17.35	20.24

Da tabela observa-se valores de resíduos compreendidos entre os extremos de -19,56 e 17,94, sendo que dos oito valores observou-se quatro superestimação e quatro subestimação, sendo para a sub-bacia 5 este valor foi muito próximo de zero. Quanto aos valores dos erros observados, exceto pelo resultado da sub-bacia 6,

nota-se valores abaixo de 30% de diferença entre os valores observados e os estimados pelo modelo.

Por fim realizou-se a análise global, onde verificou-se o ajustes dos dados de vazões observadas e vazões calculadas através do coeficiente de Nash- Sutcliffe, onde obteve-se NS igual a 0,87, apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 : Análise global da eficiência do modelo de estimativa de vazões

Sub-bacia	Q_{obs}	Q_{cal}	$(Q_{obs} - Q_{cal})^2$	$(Q_{obs} - Q_{med})^2$
1	66,94	49,00	321,84	238,70
2	69,55	61,59	63,36	326,16
3	27,81	31,44	13,18	560,74
4	25,20	19,05	37,82	691,16
5	28,22	28,43	0,04	541,49
7	106,23	97,53	75,69	2996,47
8	85,76	103,11	301,02	1174,43
Somatório			812,96	6236,89
Coeficiente de Nash				0,87

O modelo de regionalização de vazões encontrado mostrou-se satisfatório na estimativa de vazões, uma vez que na regressão múltipla alcançou-se índice de determinação de 0.94 e coeficiente de Nash 0.87.

Maciel et al. (2019) determinou um modelo linear para a determinação da vazão mínima de referência Q_{95} , na forma $Q_{95} = 0,98687 + 6,7986.10^{-6}. A - 0,015132.L - 0,0094447.S$, chegando a um r^2 de aproximadamente 1,0, com um erro próximo à $5,2652^{-15}$. Baena et al. (2004) determinou quatro formatos de modelos para regiões distintas. Sendo estes apresentando um r^2 de aproximadamente 0,99.

Importante destaca-se ainda o comportamento discrepante apresentado pela estação 6 (Fazenda Coqueiro), a qual apresenta uma área de drenagem considerável, porém apresentou vazão média da ordem de onze vezes menor (2,21 m^3/s) que a menor vazão subsequente (25,20 m^3/s). O erro obtido entre a vazão estimada e as vazão observada foi de aproximadamente 885,84%, nesse sentido, a estação foi excluída e o modelo sendo redefinido.

Cabe ressaltar que os regimes de vazões atuais podem não apresentar a o mesmo comportamento para o início (1977) e fim (2021) das séries, pois região do oeste baiano passou por

um acelerado processo de expansão agrícola, sendo essa iniciada por volta do início da década de 1990, ao ponto de ser atualmente considerada um dos polos agrícolas do país. A região do oeste da Bahia está passando por um elevado crescimento agrícola, sendo que em toda a região, a porcentagem de cobertura de vegetação natural foi de 90% em 1990 para 60% em 2015 (Pimenta et al., 2021).

Dados do MapBiomias mostram que a região da bacia do rio Grande apresentou uma perda de área das classes de “Formação Campestre” e “Formação Savânica” de 71,25% e 99,15%, respectivamente, entre os anos de 1985 e 2021. Por outro lado, a região teve um ganho de, aproximadamente, 125,95% da classe de “Soja” (Figura 7).

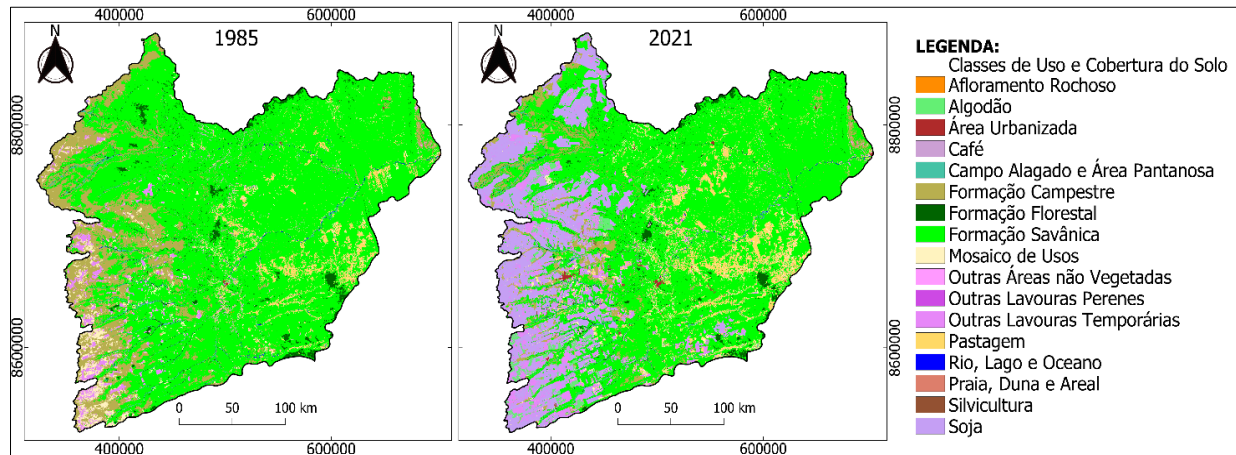


Figura 7: Uso e cobertura do solo na bacia do rio Grande/Ba para os anos de 1985 e 2021.

Porém toda essa dinâmica alterou as características de usos e coberturas do solo, assim causando diversos impactos à bacia hidrográfica. As formações florestais apresentam um papel importante na manutenção do clima, têm influência na emissão e retenção de gases, na evapotranspiração, no fornecimento de vapor d’água (Muniz et al., 2022).

O desmatamento ocasionado pela alteração do uso e cobertura do solo está associado principalmente a atividades agrícolas, porém resulta em impactos ambientais, sociais e econômicos (Bitencourt et al., 2020).

Toda a demanda de recursos hídricos dessa região, assim como os potenciais conflitos e impactos relacionados, incidem sobre o extenso manancial do Sistema Aquífero Urucua, pois é sua principal área de recarga. Todo o sistema tem importância fundamental na manutenção das vazões dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco (Gaspar, 2006).

O Sistema Aquífero Urucua é constituído por um conjunto de aquíferos que recobre uma grande parte da área de estudo (Figura 8).

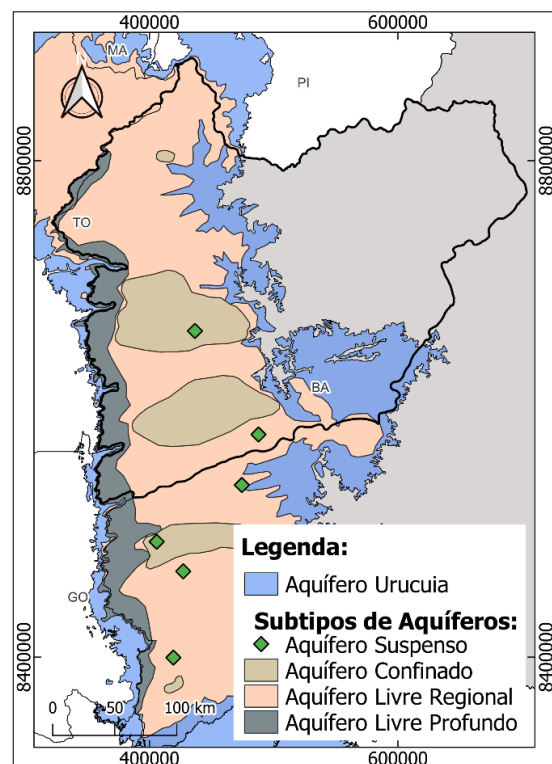


Figura 8: Uso e cobertura do solo na bacia do.

O Sistema Aquífero Urucua é dividido em quatro subsistemas, com características hidráulicas e físicas contrastantes coeficiente de armazenamento, transmissividade e escoamento de base (Gaspar, 2006), sendo eles:

✓ **Aquífero livre regional** – é o subsistema que ocupa a maior área na bacia. O fluxo de base desse subtipo de aquífero mantém a perenidade e a elevada vazão específica da rede de drenagem superficial, que, por sua vez, contribui para a regularização da vazão do rio São Francisco, principalmente na época de secas na bacia, que ocorre de forma simultânea em toda a área do alto, médio e submédio curso da bacia.

✓ **Aquífero suspenso local** – Esse subsistema é responsável pela manutenção de lagoas rasas e amplas, além de terras úmidas, principalmente nas cabeceiras das principais drenagens no extremo oeste da bacia. Esse subsistema é o mais sensível à exploração e ao uso intensivo dos solos para plantio irrigado e até de sequeiro.

✓ **Aquífero semiconfinado** – A condição de artesianismo desse subsistema de aquífero é controlada por níveis material silicoso em profundidade. O nível potenciométrico nesse subtipo de aquífero é bastante variável.

✓ **Aquífero livre profundo** – O contexto desse subsistema é vinculado ao extremo oeste da área de ocorrência do Aquífero Urucuia, distribuído a oeste do eixo divisor de fluxo regional.

Quando à formação geológica, a bacia do rio Grande é constituída por uma diversidade de formações (figura 9), sendo a predominância das formações denominadas:

✓ **Urucuia** – predomínio de sedimentos arenosos de deposição continental, lacustre, fluvial ou eólico (arenitos). Predomínio de sedimentos quartzo-arenosos, geralmente portadores de alta densidade de fraturas, com bom potencial armazenador de água; Manto de alteração bastante poroso, permeável, favorável à recarga das águas subterrâneas; Bacias sedimentares de muito alto a alto potencial hidrogeológico para o armazenamento de água subterrânea, em função da razoável espessura de sedimentos e da alta porosidade/permeabilidade de boa parte das litologias que a compõem, o que permite a exploração de vazões significativas.

✓ **Depósitos Detrito-Lateríticos** – predomínio de sedimentos arenosos de deposição Depósitos detrito-lateríticos provenientes de processos de lateritização em rochas de composições diversas sem a presença de crosta. Apresentam rochas pouco a moderadamente

fraturadas; áreas planas favorecendo a recarga dos aquíferos.

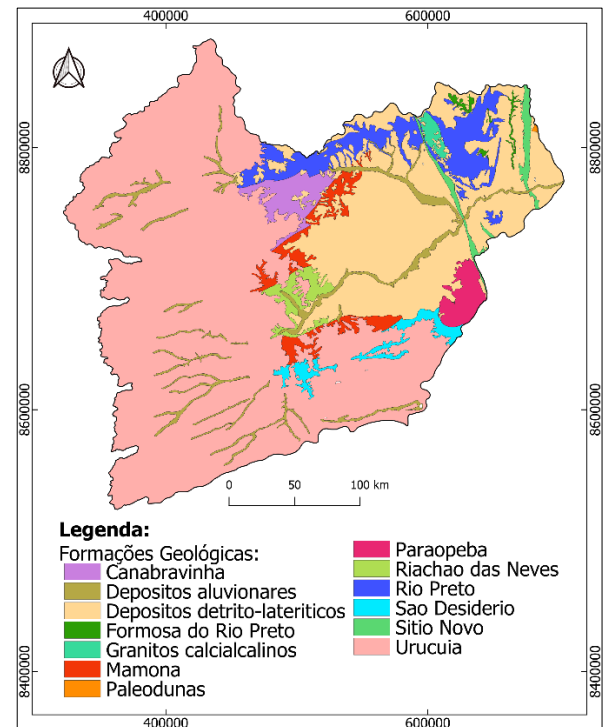


Figura 9: Uso e cobertura do solo na bacia do.

Nota-se uma diversidade de formações geológicas e estruturas dos aquíferos, assim é importante realizar estudos mais aprofundado para o entendimento das variáveis de recarga dos aquíferos e geração de escoamento superficial.

Conclusões

As variáveis independentes de área de drenagem (Ad) e o comprimento do curso d'água principal (L) caracterizaram-se como as variáveis mais expressivas para a representação das vazões de permanência Q90. Já as variáveis independentes densidade de drenagem (Dd), declividade (S), desnível (H) e perímetro (P) não foram capazes de caracterizar as vazões de permanência de forma satisfatória.

A escassez de estações e de dados fluviométricos na bacia em estudo foi suprida pela regionalização de vazões, no intuito de obter a informação hidrológica em locais sem medição. Assim, este estudo possibilitou a regionalização da vazão Q90 para todas as sub-bacias, contudo, deve-se ressaltar que esta abordagem não substitui a necessidade de se ter uma densa rede fluviométrica.

A disponibilidade de dados de vazões é crucial para a gestão dos recursos hídricos. Por isso, mesmo levando-se em conta suas limitações

de representatividade, a regionalização de vazões tem grande importância para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, além de fornecer subsídios para o estudo associadas na disponibilidade de água.

Referências

- Afshin Jahanshahi, Lieke A. Melsen, Sopan D. Patil, Erfan Goharian. Comparing spatial and temporal scales of hydrologic model parameter transfer: A guide to four climates of Iran, *Journal of Hydrology*, Volume 603, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127099>
- Anandharuban Panchanathan, Ali Torabi Haghighi & Mourad Oussalah. A multi-criteria approach for improving streamflow prediction in a rapidly urbanizing data scarce catchment. Mar 2023
- International Journal of River Basin Management Latest Articles. <https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2188597>
- Asurza-Véliz, F.A.; Lavado-Casimiro, W.S., 2020. Regional Parameter Estimation of the SWAT Model: Methodology and Application to River Basins in the Peruvian Pacific Drainage. *Water*, V. 12, p.3198. <https://doi.org/10.3390/w12113198>.
- Azadeh Atabatia; Hamed Adabb; Ghasem Zolfagharia; Mahdi Nasrabadia, 2022. Modeling groundwater nitrate concentrations using spatial and non-spatial regression models in a semi-arid environment. *Water Science and Engineering*. V 15, Issue 3. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.05.002>
- Baena, Luiz Gustavo Nascentes ; SILVA, Demetrius David da ; Pruski, Fernando Falco ; Calijuri, Maria Lúcia . Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do Rio Paraíba do Sul. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, SP, v. 24, n.2, p. 612-624, 2004.<https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>
- Barreto, V. C. S. ; Batistela, G. C. ; Gaiotto, M. R.; Simões, D. . Regressão linear múltipla aplicada ao preço do leite. C. Q. D. - Revista Eletrônica Paulista de Matemática, v. 7, p. 109-118, 2016. Doi:10.21167/cqdvol7ermac201623169664vcsbgcbmrgds109118
- Bitencourt, E. B. E; Reis, L. M. Dos; Loureiro, G. E., 2020. Análise temporal do desmatamento na Bacia Hidrográfica do Rio Sororó – região de integração de Carajás, PA. *Revista Geoaraguaia, Barra do Garças -Mt*, v. 1, n. 10, p. 89-106, jun. Disponível em< <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7825/20010105>>; Acesso: 29 jun. 2023.
- Chowdhury, Y. Lin, B. Liaw e L. Kerby, 2022. Evaluation of Tree Based Regression over Multiple Linear Regression for Non-normally Distributed Data in Battery Performance. 2022 International Conference on Intelligent Data Science Technologies and Applications (IDSTA), 2022, p. 17-25. doi: 10.1109/idsta55301.2022.9923169.
- Crosetto, M. & Castillo, Manuel & Arbiol, Roman. Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003. 69. 775-783. doi: <https://doi.org/10.14358/PERS.69.7.775>.
- Devore, J. L. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências São Paulo, SP: Thomson Pioneira, 2006. 706 p.
- Fasipe, O.A., Izinyon, O.C. Exponent determination in a poorly gauged basin system in Nigeria based on flow characteristics investigation and regionalization method. *SN Appl. Sci.* 3, 319 (2021).<https://doi.org/10.1007/s42452-021-04302-3>
- Flatley, A.; Rutherford, I. 2022. Comparison of Regionalisation Techniques for Peak Streamflow Estimation in Small Catchments in the Pilbara, Australia. *Hydrology* , V. 9, p. 165. <https://doi.org/10.3390/hydrology9100165>.
- Guo Y., Zhang Y., Zhang L., Wang Z. Regionalization of hydrological modeling for predicting streamflow in ungauged catchments: A comprehensive review *WIREs Water*, 8 (1) (2021), Article e1487, <https://doi.org/10.1002/wat2.1487>
- Hidayatulloh, A.; Chaabani, A.; Zhang, L.; Elhag, M. 2022. DEM Study on Hydrological Response in Makkah City, Saudi Arabia. *Sustainability*, v. 14, p.13369. <https://doi.org/10.3390/su142013369>
- Ho Tong Minh, D.; Ngo, Y.-N. Interferometria SAR compactada na era do Big Data. *Sensor remoto* 2022 , 14 , 390. <https://doi.org/10.3390/rs14020390>
- Irina Georgievová, Martin Hanel, Petr Pavlík, Adam Vizina, Streamflow simulation in poorly gauged basins with regionalised assimilation using Kalman filter, *Journal of Hydrology*, Volume 620, 2023,<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129373>.

- Kebebew A.S., Awass. A.A., 2022. Regionalization of catchments for flood frequency analysis for data scarce Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. *J. Hydrol.*, Volume 43. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101187>
- Leivas, J. F.; Teixeira, A. H. de C. ; Takemura C. M.; Garçon, E. A. M. . Indicadores agrometeorológicos espectrais em áreas irrigadas no Oeste da Bahia. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 4, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n1-065>.
- Marinez-Barbáchano, Rubén. (2022). Estimación de la deformación superficial de las laderas del volcán Turrialba (Costa Rica) después de una erupción mediante interferometría diferencial de imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel-1A. *Revista Geográfica de América Central*, (68), 79-102. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.3>
- Maciel, A. L.; Vieira, E. ; Mor, R. C. M. ; Vasques, A. C. . Regionalização E Espacialização de Vazões de Permanência: Estudo Aplicado na Bacia Rio Piracicaba-MG. *Revista Brasileira de Climatologia*, V. 24, P. 114-133, 2019. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v24i0.58420>
- Muniz, B. R. B., Xavier, J. A., Kanieski, M. R., Campos, C. G. C., Henkes, J. A., 2022. Impactos das Mudanças Climáticas nas Florestas Tropicais. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, V.11, P. 65-82. <https://doi.org/10.59306/rgsa.v11e2202265-82>
- Naghattini, M.; Pinto, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- Orlando, Francisco Cristiano; Bias, Edilson de Souza; JUNIOR, Abimael Cereda. SRTM: Para uma melhor Utilização - Conhecendo um pouco mais da qualidade planialtimétrica, da influência da resolução espacial e dos modelos de superfície equipotenciais de referência. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 2, p. 1153-1168, 2022. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p1153-1168>.
- Panthi, Jeeban, S.M.Asce; Rocky Talchabhadel; Ganesh R. Ghimire; Sanjib Sharma; Piyush Dahal; Rupesh Baniya; Thomas Boving; Soni M. Pradhanang; Binod Parajuli. 2021. Hydrologic Regionalization under Data Scarcity: Implications for Streamflow Prediction. *Journal of Hydrologic Engineering*. V. 26 Issue 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002121](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002121)
- Pimenta, F.M.; Speroto, A.T.; Costa, M.H.; Dionizio, E.A. 2021. Historical Changes in Land Use and Suitability for Future Agriculture Expansion in Western Bahia, Brazil. *Remote Sens*. V.13, 1088. <https://doi.org/10.3390/rs13061088>
- Quintero, F., Zanchetta, André.; Nicolás Velásquez; Ricardo Mantilla; Witold Krajewski; 2022. Identification and Regionalization of Streamflow Routing Parameters Using Machine Learning for the HLM Hydrological Model in Iowa. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. First Published: 26. Volume 14, Edição 7. <https://doi.org/10.1029/2021MS002855>
- Rajat Kr Sharma, Sudhanshu Kumar, D. Padmalal & Arka Roy (2023) Streamflow prediction using machine learning models in selected rivers of Southern India, *International Journal of River Basin management*.<http://doi.org/10.1080/15715124.2023.2196635>
- Santos, Suelí Almeida dos O Avanço da Urbanização no Oeste Baiano: novos núcleos de povoamento *Revista Cerrados*. vol. 19, núm. 1, 2021. Universidade Estadual de Montes Claros, Brasil. Doi: <https://doi.org/rc24482692202110%20>
- Zhao, L.; Zhou, W.; Peng, Y.; Hu, Y.; Ma, T.; Xie, Y.; Wang, L.; Liu, J.; Liu, Z. 2021. A new AG-AGB estimation model based on MODIS and SRTM data in Qinghai Province, China. *Ecological Indicator*, 133, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108378>