

VI-788 – PREVISÃO DE VAZÕES DE REFERÊNCIAS MENSAIS BASEADO EM SÉRIES TEMPORAIS

Ricardo Aragão e Silva^(1,2), Ângelo Márcio Oliveira Sant'Anna⁽¹⁾, Mauricio Santana Lordelo⁽²⁾, Lidiane Mendes Kruschewsky Lordelo⁽³⁾

¹Serviço Geológico do Brasil - CPRM

²Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia - UFBA.

³Centro de Ciências Exatas. Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS.

⁴Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Ulysses Guimarães, 2862, Suçuarana, Centro Administrativo da Bahia – Salvador - BA - CEP: 41213-000 - Brasil - e-mail: ricardo.aragao@ufba.br

RESUMO

A implantação e monitoramento da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) vem demonstrando vantagem na gestão de recursos hídricos. As estações fluviométricas da RHNR podem apresentar uma curva-chave que representa a relação histórica entre cotas e vazões com confiabilidade nos dados obtidos. A confiabilidade dos dados é a premissa fundamental da RHN, ainda que ocorram preenchimento de falhas, problemas com sensores e/ou dificuldades operacionais em medições de campo.

O presente trabalho propõe uma modelagem por séries temporais para geração de vazões de rios oriundas da estação fluviométrica na bacia em Santa Maria da Vitória e comparando com a metodologia de cálculo da curva-chave de referência.

Os estudos realizados nessa estação resultaram no ajuste do modelo de séries temporais ARIMA (3,0,3) para uma série de dados de vazões mensais da bacia em Santa Maria da Vitória, que incorpora a sazonalidade temporal importante. O modelo apresentou um nível de estacionariedade satisfatória no teste de Dickey-Fuller ($D-F = -5.3257$; $p\text{-valor} = 0,01$) e os erros médio de estimação ($MAPE = 16,20$; $RMSE = 51,22$; $MAE = 35,53$; $ACF = 0.00374$; $AIC = -41,64$). Os valores previstos acompanharam o comportamento da série e obtiveram medidas de qualidade excelentes, com um intervalo de confiança (80% e 95%).

PALAVRAS-CHAVE: Vazões, Modelagem, Séries Temporais, Estatística Aplicada.

INTRODUÇÃO

A implantação e monitoramento da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) vem demonstrando vantagem na gestão de recursos hídricos. Em 2015, o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o *United States Geological Survey* (USGS) firmaram um termo de parceria para implantar a Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência (RHNR) em bacias nacionais de relevância estratégica, a fim de garantir a confiabilidade dos dados provenientes do monitoramento das estações, sejam fluviométricas, pluviométricas e climatológicas (RHNR, 2023). A RHNR possui uma significativa série histórica de dados, sendo os mais relevantes os que promovem geração de vazões brutas a partir de dados de medições de campo e de informações de cotas dos rios. A confiabilidade dos dados é a premissa fundamental da RHNR, ainda que ocorram preenchimento de falhas, problemas com sensores e/ou dificuldades operacionais em medições de campo.

As estações fluviométricas da RHNR podem apresentar uma curva-chave que representa a relação histórica entre cotas e vazões com confiabilidade nos dados obtidos. Esse monitoramento e comportamento dos dados de campo ao longo do tempo pode ser analisado através de modelagem por séries temporais, bem como a previsão de vazões (BAYER et al., 2012). Uma sequência de variáveis aleatórias indexadas no tempo e também a eventos é considerado um processo estocástico, por definição. Para cada conjunto de observações ao longo do tempo podemos denominá-lo por trajetória ou curva (PINTO et al., 2015). As vazões geradas podem



auxiliar na avaliação das curvas-chave da estação monitorada, aprimorando a metodologia utilizada pelos pesquisadores e o grau de confiabilidade dos dados disponibilizados para a sociedade (HYNDMAN, 2015). Os conflitos pelo uso dos recursos hídricos e, principalmente, os desastres naturais, têm um conhecido e doloroso histórico de recorrência. Séries históricas estatisticamente confiáveis promovem vazões de referência com boa acurácia, melhorando o dimensionamento de obras hidráulicas, assim como valores seguros para outorga e usos diversos da água, e garantindo sistemas de alerta hidrológicos confiáveis para a sociedade.

O presente trabalho propõe uma modelagem por séries temporais para geração de vazões de rios oriundas da estação fluviométrica na bacia em Santa Maria da Vitória e comparando com a metodologia de cálculo da curva-chave de referência.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada no presente trabalho foi resultado de dados do monitoramento hidrológico da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), operada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA). A validade das informações é ratificada com a publicação das séries históricas das estações no sistema hidroweb¹ da ANA, bem como com as curvas chaves aprovadas para cada estação, assim como através do sistema de geração de hidrotelemetria, bem como com os conhecimentos geomorfológicos da bacia hidrográfica.

Esse trabalho está em andamento tendo a vazão como uma informação muito importante. Como o SGB dispõe de um extraordinário banco de dados das estações, o projeto busca desenvolver um modelo de séries temporais para comparar com a metodologia adotada no SGB na geração de curvas chave cota x vazão. São definidas cinco estações fluviométricas na bacia de Santa Maria da Vitória por critérios técnicos com curvas chaves aprovadas, e que disponham, preferencialmente, de dados de cotas por sensores e por anotações locais feitas por observadores. Dados de telemetria foram utilizados. Após a seleção das estações, foi baixado o histórico operacional, observando a manutenção dos equipamentos, as interferências nas seções de medição e das réguas, a batimetria da estação, os períodos secos e úmidos e os dados de medição de vazão disponíveis. As medições de vazão foram coletadas por equipamentos acústicos conhecidos como Acoustic Doppler Current Profile (ADCPs) e analisadas, assim como, as extrapolações e a influência do fator humano. Após a avaliação das séries históricas das estações realizada a modelagem por séries temporais estabelecendo o modelo mais adequado e estatisticamente significativo.

Este trabalho apresenta a metodologia conforme o roteiro composto de 08 (oito) etapas: análise do dossiê, levantamento de cotas e medições de descarga, crítica das medições, análise da repartição dos pontos, traçado da curva-chave, extrapolação, tabela de calibragem e relatório final". Este roteiro é com base no "Manual on Stream Gauging, Vol. II: Computation of Discharge" publicado pela World Meteorological Organization (WMO, 2010). Os modelos de séries temporais desenvolvidos foram avaliados pelas métricas de erros de estimação e critério de seleção de modelos (AIC), pois estas métricas de qualidade auxiliam na escolha do melhor modelo de série temporal e, principalmente na avaliação da qualidade do ajuste.

A modelagem desenvolvida neste trabalho foi realizada em um banco de dados de medições realizadas em campo na estação hidrometeorológica de Santa Maria da Vitória no Estado da Bahia. Com período temporal de dados tem início em 19/02/1977 até a data de 01/12/2022.

RESULTADOS

A avaliação da dinâmica do fluxo de informações, a avaliação da acurácia da previsão de vazões é uma garantia da eficiência e eficácia de curvas chave ou de modelagens por séries temporais. Garantir a confiabilidade na previsão dentro dos intervalos de confiança para vazões de referência Q_{7,10}; Q₉₅ e Q₉₀ é mais uma ferramenta

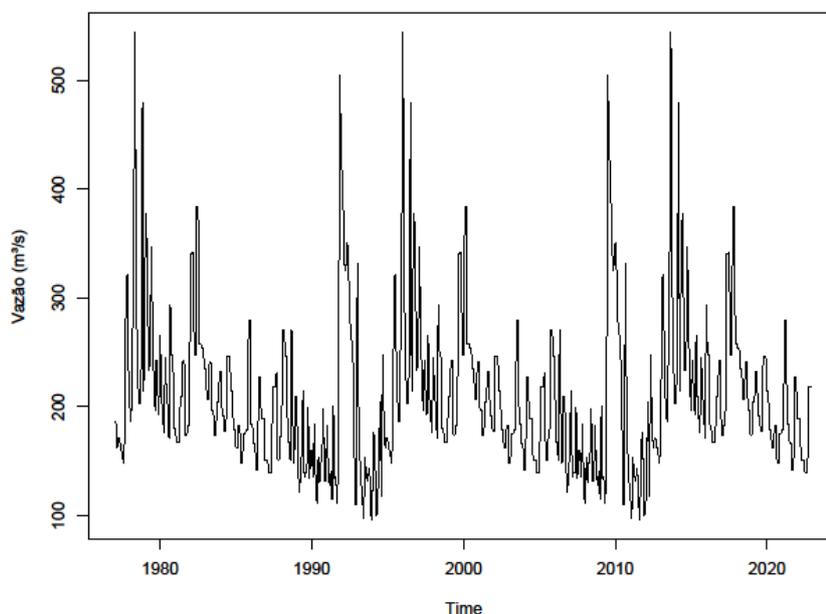
¹HidroWeb é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>

no gerenciamento de recursos hídricos, dimensionamento de estruturas e sistemas de alerta. Através da análise comparativa com curvas chaves do SGB aprovadas pela ANA, foi possível comprovar o bom ajuste na modelagem por séries temporais e, assim, fazer as previsões de vazões, sendo mais uma garantia da qualidade nas medições de campo.

Os testes estatísticos e as métricas de seleção de modelos auxiliou na escolha do melhor modelo para a série temporal após a modelagem das medições em campo ao longo do tempo e com eventos extremos. Como resultados esperado, os autores pretendem utilizar essa modelagem desenvolvida para gerar curvas chaves de referência nas estações fluviométricas da Rede Urucuia², visto que, esta Rede não possui registro de curvas chaves de referência de vazões. O desenvolvimento destes modelos pode indicar possíveis alterações de eventos hidrológicos que afetam a produção de alertas iniciais.

As vazões geradas pela modelagem com séries temporais para a estação de referência em Santa Maria da Vitória (1977-2022) - com dados brutos e consistidos tiveram boa acurácia em relação à curva chave de referência para a estação. A métrica do erro médio percentual (MAPE) foi 15,04 (1977-2022/dados brutos e consistidos) e 15,91 (1977-2014/dados consistidos). O mês de referência foi Fevereiro, estando os valores de previsão do modelo dentro da relação cota-vazão (curva chave) para este mês. Uma segunda aferição da modelagem foi para vazões de referência Q7,10, Q95 e Q90 calculadas através do sistema computacional de análises hidrológicas (SisCAH) com dados baixados pelo programa diretamente do hidroweb ANA. A série histórica foi de 1977-2014, com exclusão de 5% das falhas. As vazões das modelagens foram as vazões mínimas previstas, com exceção da vazão média de longa duração obtida diretamente da descrição estatística dos dados modelados. A Figura 1 ilustra o perfil das medições anuais realizadas em campo na estação hidrometeorológica de Santa Maria da Vitória no Estado da Bahia. E a Figura 2 apresenta o perfil das medições médias mensais realizadas em campo na estação hidrometeorológica de Santa Maria da Vitória no Estado da Bahia.

Vazões – Santa Maria da Vitória (1977–2022)



²Rede Urucuia - Rede Hidrometeorológica do Aquífero Urucuia (RHUrucuia). <https://www.sgb.gov.br/publique/Hidrologia/Monitoramento-Hidrologico-e-Hidrogeologico/Rede-Hidrometeorologica-do-Aquifero-Urucuia---RHUrucuia-6388.html>



Figura 1. Série Temporal das Vazões Anuais da Estação de Santa Maria da Vitória (1977-2022).
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

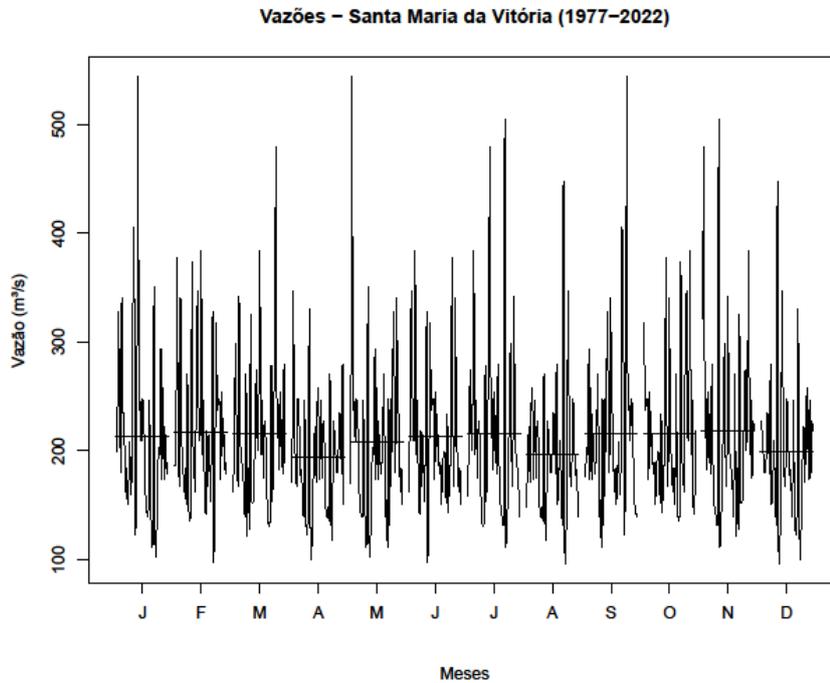


Figura 2. Série Temporal das Vazões Médias Mensais da Estação de Santa Maria da Vitória (1977-2022). Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

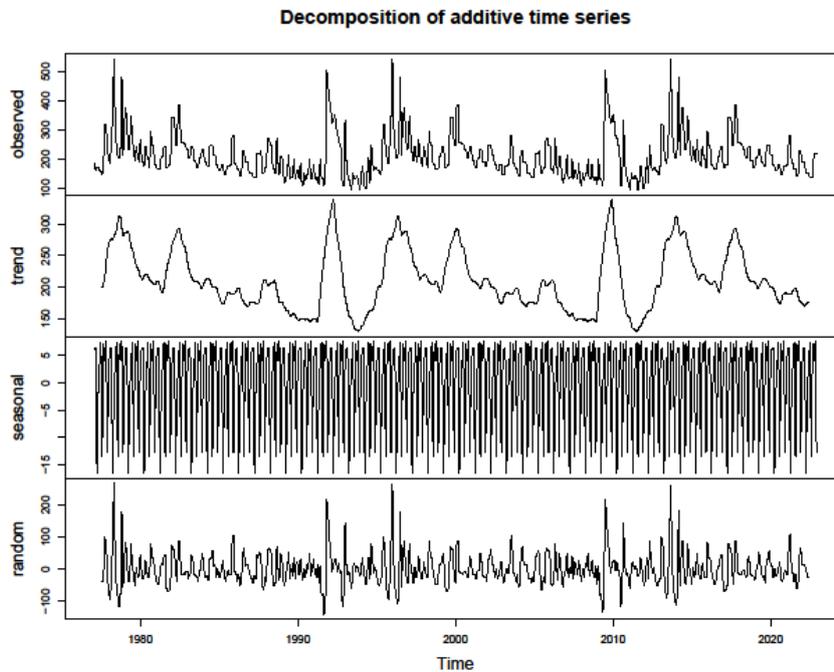


Figura 3. Gráfico da análise de decomposição aditiva da série temporal dos dados em componentes tendência, sazonalidade e aleatoriedade do modelo ARIMA (3,0,3). Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

A identificação dos componentes da série temporal como tendência, sazonalidade e aleatoriedade é feita a partir da decomposição da série, conforme os gráficos da Figura 3. Na Figura 3, nota-se que a série possui sazonalidade e uma ausência de tendência, verificando que além do comportamento intraanual não há evidências de acréscimo ou decréscimo sistemático da variável ao longo do tempo.

Para a estimação da série temporal pelo modelo de série temporal ARIMA dos dados de vazão são realizadas através da diferenciação conforme as seguintes etapas:

- Estimar filtros – AR, I e MA;
- Filtros dos componentes autorregressivos, de diferenciação e média móvel;
- Dividir a série em dados de treino (30%) e teste;
- N° de medições = 212 / Treino = 165 dados / Teste = 386 dados;

A série temporal para os dados de treino será chamada Q_treino, com frequência mensal (frequency = 12). A Figura 4 ilustra a série temporal anual com diferenciação, apresentando os períodos anuais de maior volatilidade temporal da vazão. A Tabela 1 apresenta a medidas de estatística descritiva das medições de vazões do período analisado.

A Figura 5 ilustra a presença dos outliers que foram identificados como AO1978.Nov, AO1993.Jan, AO1994.Aug, AO1996.Jul, AO2010.Sep, AO2012.Apr e AO2014.Mar. O teste de Box-Ljung: $B = 43.6$, com $0 < p\text{-value} < 0.01$, não detectou autocorrelação dos resíduos, e o teste de normalidade dos dados Shapiro-Wilk: $SW = 0.9532$, $0.001 < p\text{-value} < 0.01$, indica que os resíduos no modelo ARIMA apresenta normalidade.

Tabela 1. Estatísticas descritivas dos dados da série temporal de vazão da curva chave (m³/s)

Min	1° Quartil	Mediana	Média	3° Quartil	Máx
96,2	158,7	192,0	210,4	244,5	544,0

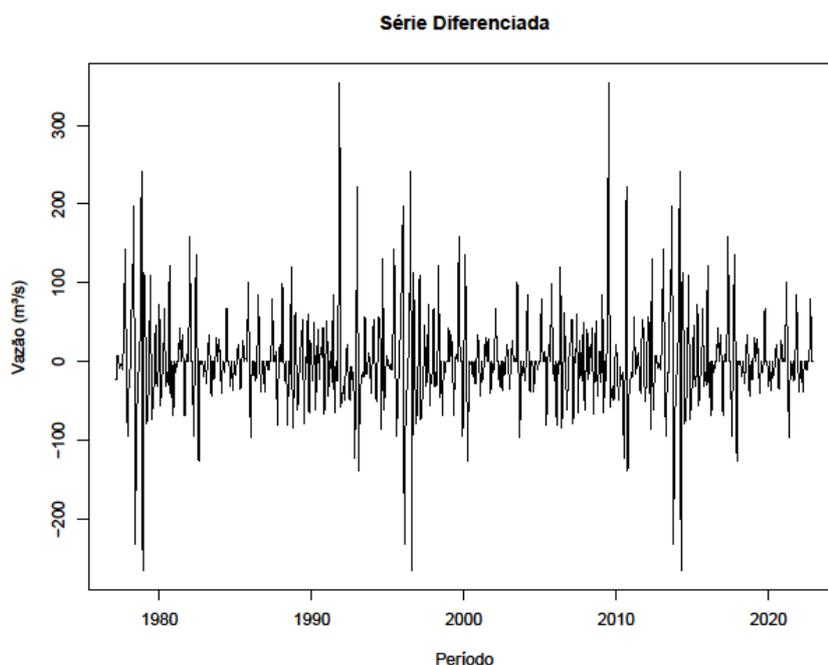




Figura 4. Gráfico de Diferenciação da Série Temporal das Vazões Anuais da Estação de Santa Maria da Vitória (1977-2022). Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

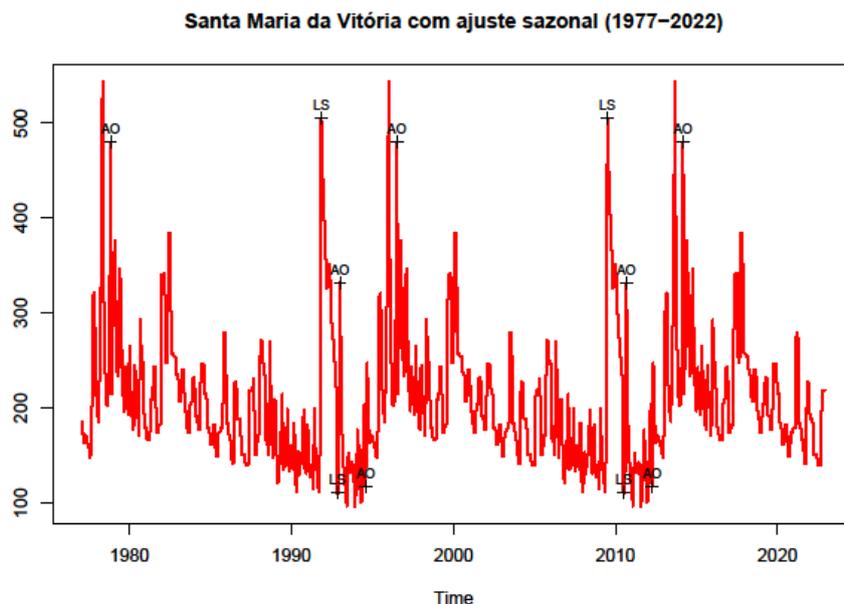


Figura 5. Gráfico de diagnóstico e detecção de outliers da Série Temporal das Vazões Anuais da Estação de Santa Maria da Vitória (1977-2022). Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Foram realizados a modelagem dos dados para determinar o melhor modelo de série temporal que melhor ajustado aos dados das vazões médias mensais da Estação em estudo. A escolha do melhor modelo é baseado na avaliação das métricas de desempenho de modelos de séries temporais. A Tabela 2 apresenta os valores das métricas de desempenho, destacando que o modelo ARIMA (3,0,3) apresentou melhores estimativas de resultados.

Tabela 2. Medições de vazão da curva chave oriundos da metodologia do SGB (SisCAH) e do modelo ARIMA desenvolvido.

Modelos Desenvolvidos	RMSE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
ARIMA (1,0,1)	52,22	-4,74	16,36	0,555	0,0027
ARIMA (1,0,2)	51,60	-4,34	16,22	0,555	0,0223
ARIMA (2,0,1)	52,60	-4,75	16,35	0,554	0,0039
ARIMA (2,0,2)	51,52	-4,33	16,13	0,552	0,0067
ARIMA (3,0,3)	51,22	-1,85	15,04	0,529	0,0157

Situação de Benchmark: curva-chave (relação cota x vazão - equação de potência) aprovada pela ANA, e observando os valores de cotas e vazões para fevereiro de 2023, a predição está adequada à curva para auxílio na gestão dos recursos hídricos (vazões mínimas e máximas, vazões de permanência Q7,10 e Q95, por exemplo). A Tabela 3 apresenta os valores de medição média de vazão da curva chave gerados pelo sistema cálculos de referência do SGB comparado à do modelo ARIMA (3,0,3) desenvolvido. A Figura 5 ilustra os valores reais ajustados da série e previsão das vazões médias mensais para um período de 6 meses à frente.

Tabela 3. Medições de vazão da curva chave oriundas da metodologia do SGB (SisCAH) e do modelo ARIMA desenvolvido.

	Sistema SisCAH	Modelo ARIMA (3,0,3)
Vazão Média de Longa Duração	202,25 m ³ /s	201,7 m ³ /s
Q7,10	120,36 m ³ /s	123,36 m ³ /s
Q95	130,27 m ³ /s	127,64 m ³ /s
Q90	139,12 m ³ /s	133,82 m ³ /s

Forecasts from ARIMA(3,0,3)(3,1,1)[12]

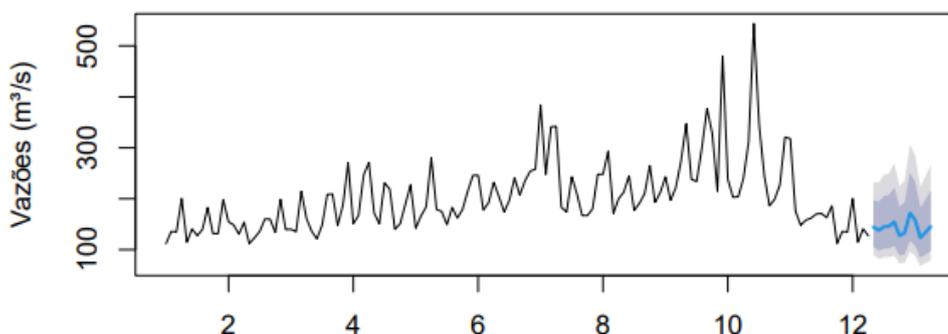


Figura 6. Valores reais ajustados da série e previsão das vazões médias mensais para um período de 6 meses à frente. Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Desenvolver e validar modelos hidrológicos preditivos para previsão de eventos extremos com séries temporais associados aos dados fluviométricas, pluviométricas e climatológicas provenientes das estações para servir como uma ferramenta de aferição da metodologia adotada pela Agência Nacional de Água e executada pelo Serviço Geológico do Brasil para o monitoramento das curvas chave e das vazões de referência.

A modelagem por séries temporais para geração de vazões de rios oriundas da estação fluviométrica na bacia em Santa Maria da Vitória desenvolvida neste trabalho permitiu realizar as previsões de vazões para aprimorar os sistemas de alerta, notadamente em cotas de atenção, alerta e inundação. Neste trabalho foi realizado o ajuste de um modelo de séries temporais ARIMA (3,0,3) para uma série de dados de vazões mensais da bacia em Santa Maria da Vitória. O modelo escolhido foi o ARIMA(3,0,3)(3,1,1), que é um modelo da classe ARIMA que incorpora a sazonalidade da série, característica temporal importante.

O modelo desenvolvido apresentou um nível de estacionariedade satisfatória no teste de Dickey-Fuller ($D-F = -5.3257$; p -valor = 0,01) e métricas adequadas dos erros médio de estimação (MAPE = 16,20; RMSE = 51,22; MAE = 35,53; ACF = 0.00374; AIC = -41,64). Portanto, o modelo ARIMA (3,0,3) obteve-se um bom ajuste, sendo modelada somente pela sua correlação serial, levando em consideração seus componentes sazonais, autorregressivos e de médias móveis.



De acordo com a fase de diagnóstico, o modelo ajustou-se bem aos dados, o que qualificou o mesmo para realizar previsões de vazões. As previsões foram feitas em um horizonte de 6 meses. Os valores previstos acompanharam o comportamento da série e obtiveram medidas de qualidade excelentes, com um intervalo de confiança (80% e 95%).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACOSTA, SM., OLIVEIRA, RMA., SANT'ANNA, AMO. Machine learning algorithms applied to intelligent tire manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, ahead-of-print, 2023. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2177734>
2. ACOSTA, SM., SANT'ANNA, AMO. Machine learning-based control charts for monitoring fraction nonconforming product in smart manufacturing. *International Journal of Quality and Reliability Management*, ahead-of-print, 1-35, 2022. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2021-0210>
3. BAYER, D. M; CASTRO, N. M. R.; BAYER, F.M. Modelagem e Previsão de Vazões Médias Mensais do Rio Potiribu Utilizando Modelos de Séries Temporais. In: *REVISTA BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS*, v. 17 n.2, pp. 229-239, 2012.
4. CHENG, CY. A novel approach of information visualization for machine operation states in industrial 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 563-573, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.024>
5. HE, Q., WANG, J. Statistical process monitoring as a big data analytics tool for smart manufacturing, *Journal of Process Control*, 67: 35-43. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procont.2017.06.012>
6. HUANG, W.; JONES, W. K.; YANG, Q. Field experiment study of transient stratified flow in a estuary. In: *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*, 129(10), pp. 1220-12236, 2003.
7. HYNDMAN, R. J. (2015). *Forecasting Functions for Time Series and Linear Models*. R package version 6.
8. KALGONDA, AA., KOSHTI, VV. *Exponentially Weighted Moving Average Control Chart*. London: Lambert Academic Publishing, 2013.
9. MORETTIN, P. A., TOLOI, C. M. *Análise de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blucher. 2004.
10. MUCHIRI, P., PINTELON, L. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion, *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517-3535, 2008. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>
11. PATIL, A., SONI, G., PRAKASH, A., KARWASRA, K. Maintenance strategy selection: a comprehensive review of current paradigms and solution approaches, *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(3),675-703. 2022. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2021-0105>
12. PINTO, W. P.; LIMA, G. B.; ZANETTI, J.B. Análise Comparativa de Modelos de Séries temporais para modelagem e previsão de regimes de vazões médias mensais do Rio Doce, Colatina – Espírito Santo. In: *CIÊNCIA E NATURA*, v. 37 n.4, 2015. *Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas da Universidade Federal de Santa Maria/RS*.
13. R. *R language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. ISBN 3-900051-07-0. 2022. Available at <http://www.r-project.org>.
14. RHNR. (2023). *Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência*. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/publique/Hidrologia/Monitoramento-Hidrologico-e-Hidrogeologico/Rede-Hidrometeorologica-Nacional-de-Referencia--RHNR-6589.html>>. Acessado em Janeiro 5, 2023.
15. WMO. *WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Manual on Stream Gauging. Vol. II: Computation of Discharge*, 2010.
16. WOHLGEMUTH, M., FRIES, CE., SANT'ANNA, AMO. GIGLIO, R. FETTERMANN DC. Assessment of the technical efficiency of Brazilian logistic operators using data envelopment analysis and one inflated beta regression, *Annals of Operations Research*, 286:703–717, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3105-7>
17. WUDHIKARN, R. Improving overall equipment cost loss adding cost of quality, *International Journal of Production Research*, 50(12), 3434-3449, 2012. <https://doi.org/10.1108/00207543.2011.587841>