

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

PREVISÃO DE VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JAGUARI -RS UTILIZANDO MODELOS ESTOCÁSTICOS

Gustavo Schefelbanis Araujo¹; Gabriel Sulzbach Pereira¹; Yamila Soledad Chicherit¹; Eliane Fischborn¹; Rodrigo Della Pace¹, Daniel Gustavo Allasia Piccilli²

Abstract: Floods are among the most impactful natural disasters, with a tendency to increase in both frequency and intensity due to climate change and anthropogenic activities. In this context, streamflow forecasting becomes an essential tool for watershed planning and management. This study aimed to apply stochastic models to forecast streamflow in the Jaguari River Watershed (BHRJ), located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. The Box–Jenkins methodology was employed for time series modeling using historical streamflow data from 1970 to 2020, obtained from the fluviometric station 76440000 (Jaguari-RS). The series was divided into calibration (1970–2015) and validation (2015–2020) periods. Initially, ARIMA models were tested; however, they did not show satisfactory performance in the residual autocorrelation tests. Subsequently, SARIMA models with seasonal components were evaluated, and the SARIMA (1,0,1)(1,0,1) model presented the best performance, with an AIC value of 5958.61 and a Ljung–Box test p-value of 0.8519, indicating no significant autocorrelation in the residuals. The 36-month forecast showed strong agreement with observed data, confirming the robustness of the model. It is concluded that stochastic modeling with SARIMA is an effective tool for streamflow forecasting and can support water management actions and extreme event mitigation. Future studies will include exogenous variables to improve forecast accuracy.

Resumo: As inundações estão entre os desastres naturais mais impactantes, com tendência de aumento em frequência e intensidade devido às mudanças climáticas e à ação antrópica. Neste contexto, a previsão de vazão torna-se uma ferramenta essencial para o planejamento e a gestão de bacias hidrográficas. Este estudo teve como objetivo aplicar modelos estocásticos para previsão de vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari (BHRJ), localizada no estado do Rio Grande do Sul. Utilizou-se a metodologia Box-Jenkins para a modelagem de séries temporais com dados históricos de vazão compreendidos entre 1970 e 2020, obtidos na estação fluviométrica 76440000 (Jaguari-RS). A série foi dividida em períodos de calibração (1970–2015) e validação (2015–2020). Inicialmente, foram testados modelos ARIMA, os quais não apresentaram desempenho satisfatório nos testes de autocorrelação dos resíduos. Em seguida, foram avaliados modelos SARIMA com componentes sazonais, sendo que o modelo SARIMA (1,0,1) (1,0,1) apresentou os melhores resultados, com valor de AIC igual a 5958,61 e p-valor de 0,8519 no teste de Ljung-Box, indicando ausência de autocorrelação nos resíduos. A previsão para 36 meses demonstrou forte aderência aos dados observados, validando a robustez do modelo. Conclui-se que a modelagem estocástica com SARIMA é uma ferramenta eficaz para previsão de vazões, podendo apoiar ações de gestão hídrica e mitigação de eventos extremos. Estudos futuros incluirão variáveis exógenas para melhorar a acurácia das previsões.

Palavras-Chave – Modelagem estocástica; previsão hidrológica; séries temporais.

1) Universidade Federal de Santa Maria: Gustavo.esa@hotmail.com, gabrielpereirars@gmail.com, eliane.fischborn@acad.ufsm.br.

2) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental Universidade Federal de Santa Maria: dallasia@gmail.com

INTRODUÇÃO

As inundações são consideradas o desastre natural de maior gravidade no mundo, devido aos seus impactos diretos, como a perda de vidas humanas se caracterizando pelo elevado número de óbitos durante esses eventos (Hirabayashi et al., 2013; Noji, 1991). De maneira indireta, as inundações causam danos econômicos prolongados, uma vez que a recuperação da infraestrutura danificada pode afetar a economia por vários anos, além de aumentar a vulnerabilidade social (Rufat et al., 2015) e gerar ecoansiedade nas populações afetadas (Valadão; Guanãbens, 2025).

Diversos estudos científicos indicam uma tendência crescente na frequência e intensidade das inundações (Blöschl, 2022; Calvin et al., 2023; Hirabayashi et al., 2013; Kvočka et al., 2016), tornando assim, esses eventos mais recorrentes e cada vez mais devastadores quanto a seus impactos. Embora as inundações sejam classificadas como desastres naturais, esses eventos são amplamente influenciados por atividades antrópicas, como a alteração no uso e ocupação do solo, obras hidráulicas subdimensionadas e a urbanização desordenada (Blöschl, 2022). Devido a esses fatores, o Brasil se configura como um país onde é fundamental investir em estratégias eficazes para mitigar os danos causados pelas inundações, uma vez que esses eventos continuarão impactando o cotidiano da população brasileira.

Para mitigar os efeitos das inundações, desde a década de 1970 a modelagem hidrológica vem se aperfeiçoando (Teng et al., 2017), esta modelagem tem dois tipos principais sendo a modelagem física, baseada no processo físico e a empírica, baseada em dados. Modelos empíricos, ou também chamados de estocásticos, que tem algumas vantagens sobre a modelagem física como a velocidade de processamento e a necessidade de menos dados quando comparados a modelos de base física. Com este tipo de modelagem é possível prever as características futuras a partir de séries temporais um adequado grau de precisão (Formigoni Carvalho Walter et al., 2013), estas previsões proporcionaram aos tomadores de decisão e aos governantes a possibilidade de antecipar e planejar futuras ações dirigidas a setores de atividades socioeconômicas e à sociedade como um todo. Sendo assim, o objetivo desse estudo é a obtenção de um modelo estocástico gerador para poder prever a vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari (BHRJ), localizado no estado do Rio grande do Sul, a partir de séries históricas de vazão utilizando a metodologia proposta por Box e Jenkins 1970 (Box Jenkins, 2016).

METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

Bacia Hidrográfica do Rio Jaguari-RS

A BHRJ, está localizada no planalto central sul-rio-grandense, é uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. Banha 8 cidades gaúchas sendo as principais Santiago e Jaguari, a base da economia da bacia se dá nas atividades agrícolas e pecuárias, as principais culturas produzidas na bacia são soja, milho, trigo e cana de açúcar. As análises estocásticas foram realizadas através de dados obtidos no portal Hidroweb. As séries históricas com dados de vazões são proveniente da estação fluviométrica 76440000, localizada no município de Jaguari-RS.

Metodologia

A metodologia proposta por Box e Jenkins (1970), amplamente reconhecida na modelagem de séries temporais, é estruturada em três etapas fundamentais: identificação, estimação e aplicação. Após a aquisição dos dados, a primeira fase da metodologia envolve uma análise preliminar das funções de correlação, ACF (Função de Correlação Autocumulada) e PACF (Função de Correlação Parcial), que são utilizadas para a identificação inicial dos parâmetros p e q dos modelos ARIMA.

Em seguida, é realizada a estimação do modelo, com a aplicação de diagnósticos rigorosos para avaliar sua adequação. O teste de ACF e PACF é aplicado aos resíduos do modelo para verificar se os mesmos se comportam como um processo de ruído branco — um indicativo de que o modelo capturou adequadamente a estrutura temporal dos dados. Complementarmente, o teste de Ljung-Box é empregado para avaliar a ausência de autocorrelação significativa nos resíduos, confirmando a adequação do modelo. Por fim, caso os resíduos atendam aos critérios de ruído branco, o modelo é considerado adequado, e as previsões são geradas com base nos parâmetros estimados. Este processo visa garantir a robustez e a precisão do modelo, proporcionando previsões confiáveis para a série temporal em questão.

Modelos ARIMA

Modelo Autorregressivo Integrado de Média Móvel – *Autorregressive Integrated Moving Average (ARIMA)*, proposto por Box e Jenkins na década de 1970 e tem origem nos modelos autorregressivos (AR), médias móveis (MA) e da combinação dos modelos AR e MA (ARMA) (Walter et, Al. 2013). O modelo ARIMA (p,d,q) onde p,d,q determinam a ordem do modelo, representa o comportamento não estacionário homogêneo de uma série temporal e segue a Equação 1.

Equação 1: Modelo ARIMA (p,d,q).

$$E(q)\Delta^d y(k) = C(q)\varepsilon(k) \quad (1)$$

Onde: Eq é o polinômio autoregressivo estacionário de grau p, C(q) é o polinômio média móvel investível de grau q, e d é o número de vezes que a série é diferenciada.

Este modelo é capaz de modelar satisfatoriamente séries temporais estacionárias, quanto séries não estacionárias, desde que não possuam um comportamento explosivo. (Walter et, Al. 2013). Além do modelo ARIMA, quando na série há características de sazonalidade na série Box e Jenkins generalizaram o modelo ARIMA para adicionar sazonalidade chamando o modelo de SARIMA ou também chamado de ARIMA multiplicativo. No caso da existência da componente sazonalidade de período “s”, o modelo SARIMA é descrito pela Equação 2.

Equação 2: Modelo SARIMA (p,d,r) x(P,D,R).

$$E(q)^s \phi(q) \Delta^d \Delta^D y(k) = C(q)^s \theta(q) \varepsilon(k) \quad (2)$$

Onde: $\Delta^d \Delta^D y(k)$ corresponde a série após o ajuste pela diferença sazonal e diferença simples, $E(q)^s$ e $C(q)^s$ são polinômios AR e MA sazonais de graus P e Q respectivamente, $\phi(q)$ e $\theta(q)$ são polinômio AR e MA não sazonal de graus p e q, respectivamente.

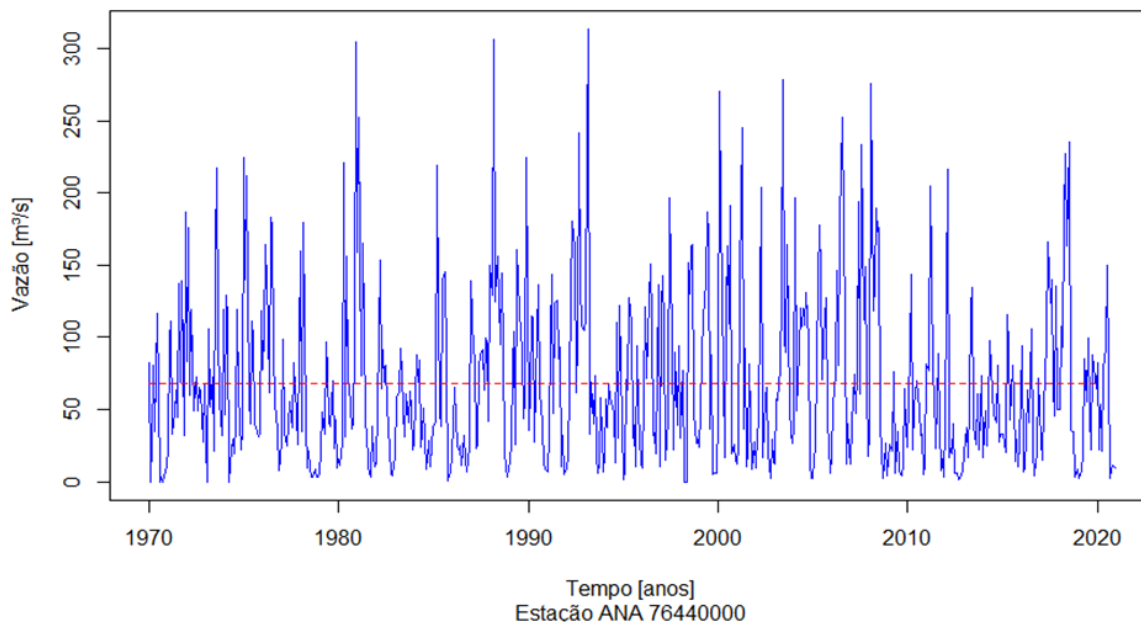
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Estatística Básica da BHRJ

A série temporal analisada tem dados desde janeiro de 1970 até dezembro de 2020, totalizando assim 50 anos de dados, um aspecto relevante observado nos dados coletados é que a série temporal estava completa, sem falhas, pulando assim a etapa de preenchimento de falhas. Na Figura 1 podemos observar o comportamento das vazões médias mensais na BHRJ no período de 1970-2020, a vazão média anual na bacia foi de aproximadamente 68 m³/s sendo representada pela linha vermelha no gráfico.

Figura 1: Vazões médias Mensais na Bacia do Rio Jaguari-RS, 1970-2020.

Vazões Médias Mensais Bacia do Rio Jaguari-RS, 1970-2020

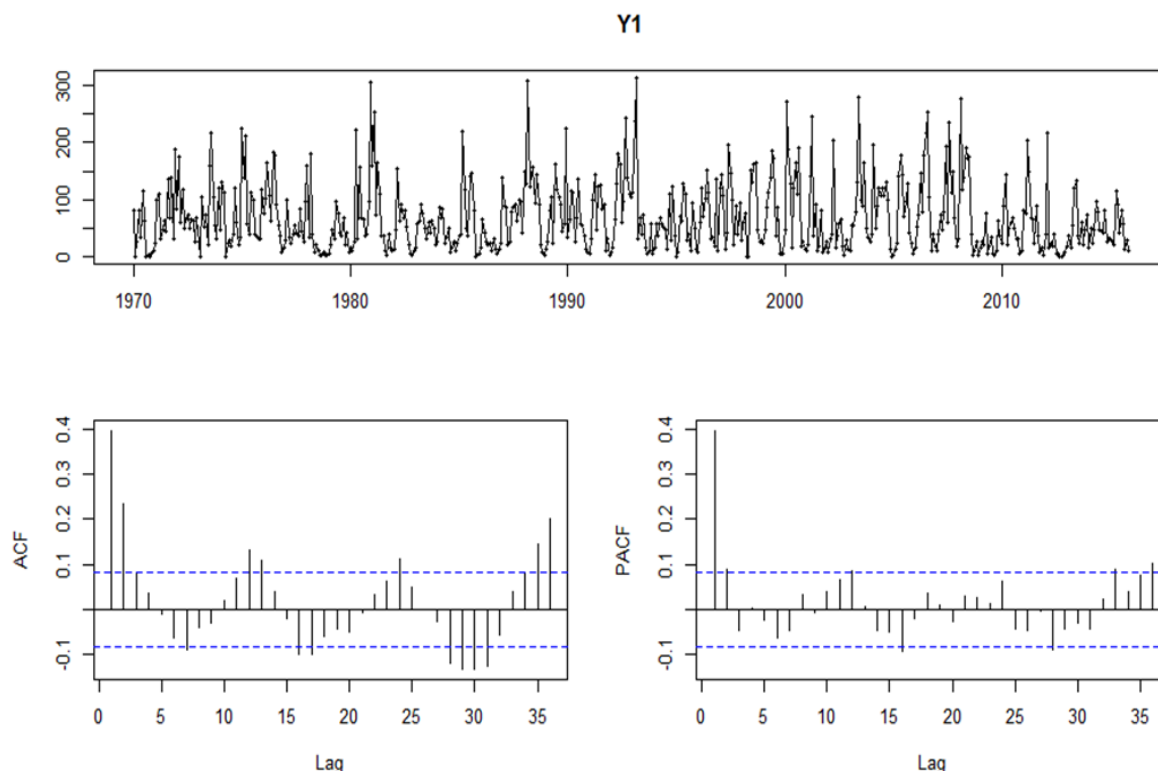


Fonte: Autor (2025)

Como dito anteriormente para construção de um modelo via metodologia Box-Jenkins, são necessárias 3 etapas, identificação, estimação e aplicação. Na etapa de identificação foi separada a série temporal em duas partes sendo a primeira com dados de janeiro de 1970 até novembro de 2015 e a segunda parte de dezembro de 2015 até dezembro de 2020. A análise da ACF e PACF da série temporal para estabelecer um valor inicial para os coeficientes (p,d,q) dos modelos ARIMA e SARIMA.

Na Figura 2 é possível observar a série temporal junto com as funções ACF e PACF que foram aplicadas na diferença da série e partir da análise feita pelos gráficos da Figura 2, foi possível observar que na função ACF acontece uma mistura de curvas exponenciais e ondas senoides amortecidas e na função PACF observasse um pico no LAG 1 e 2, com isso um primeiro valor para os coeficientes p e q seriam 2 e 0 respectivamente. Outro aspecto importante de se salientar é que pela função ACF foi possível observar uma sazonalidade na série temporal, dando indícios que haveria um modelo SARIMA que fosse possível fazer a previsão dos dados.

Figura 2: Série temporal e funções ACF e PACF.



Dando prosseguimento na metodologia Box-Jenkins, utilizando ARIMA (p,d,q) foram analisadas sete variáveis de modelos ARIMA (p,d,q), porém nem um dos modelos passaram no teste da ACF, pois todos ultrapassaram a banda de Bartlett em algum dos lag, indicando assim que há uma correlação com dados antecessores, influenciando diretamente na acurácia do modelo, sendo assim não sendo possível de fazer previsões.

Tabela 2: Modelos ARIMA (p,d,q) testados.

Modelo	Coefficientes (p, d, q)
ARIMA	2,1,1
ARIMA	2,2,2
ARIMA	1,0,0
ARIMA	1,0,1
ARIMA	1,1,1
ARIMA	1,2,1

Como esperado após a verificação de sazonalidade na série temporal, o modelo SARIMA (p,d,r)x(P,D,R) obteve um modelo que foi possível executar a metodologia Box-Jenkins até o final, sendo possível fazer previsões, foram analisados 4 modelos com diferentes coeficientes, sendo que destes modelos 2 foram aprovaram nos testes de FAC e teste de Ljung-box, na Tabela 3 é possível observar os modelos SARIMA e em negrito os modelos SARIMA aprovados nos teste da FAC e o teste de Ljung-box.

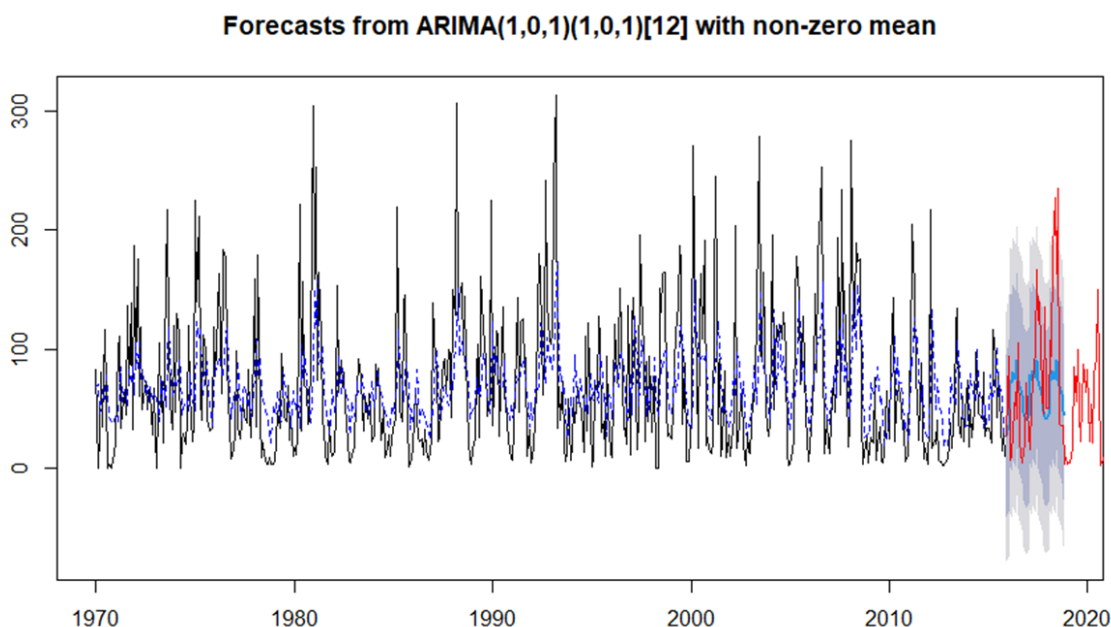
Tabela 3: Modelos SARIMA (p, d, r) x (P, D, R) analisados.

Modelo	Coefficientes
SARIMA (p, d, r) x (P, D, R)	(2,0,0) x (1,0,0)
SARIMA (p, d, r) x (P, D, R)	(1,0,0) x (1,0,0)
SARIMA (p, d, r) x (P, D, R)	(1,0,1) x (1,0,1)
SARIMA (p, d, r) x (P, D, R)	(1,0,1) x (1,0,2)

Quando comparamos os 2 modelos observamos que, o modelo SARIMA (1,0,1)X(1,0,1) obteve resultados superiores ao modelo SARIMA (1,0,1)X(1,0,2), uma vez que o primeiro obteve um AIC de 5958,61 e o segundo um AIC de 5960,45 e quanto menor o valor de AIC melhor o modelo, e quando comparamos o resultado do teste de Ljung-Box o primeiro modelo se manteve na frente novamente, uma vez que o p-value do primeiro foi de 0,8519 e o do segundo modelo foi de 0,8492 e quanto maior este valor maior é a indicação que não se tem autocorrelações restantes.

Na etapa de previsão, foi utilizado o modelo SARIMA (1,0,1) x (1,0,1), com previsão de 36 meses a partir de novembro de 2015. Na Figura 3, a série temporal original é representada em preto, enquanto a segunda parte da série temporal, referente ao período de previsão, é exibida em vermelho. A linha pontilhada azul indica os resultados obtidos pelo modelo SARIMA, enquanto a faixa cinza escura representa a região em que o modelo estima 50% de confiança nas previsões. Já a faixa cinza claro corresponde à área onde o modelo considera que há 80% de probabilidade de acerto.

Figura 3: Previsão Modelo SARIMA (1,0,1)x(1,0,1).



CONCLUSÃO

Modelos estocásticos que não incorporam variáveis exógenas podem constituir alternativas úteis de apoio à tomada de decisão, especialmente em contextos onde os padrões históricos da série

apresentam estabilidade. No presente estudo, o modelo SARIMA $(1,0,1) \times (1,0,1)$ apresentou desempenho estatisticamente aceitável na previsão das vazões para um horizonte de 36 meses após novembro de 2015, reproduzindo com razoável proximidade os valores observados. A aderência visual entre os dados simulados (linha pontilhada azul) e a série histórica (linha vermelha) aponta para um bom ajuste sob condições similares às do passado. No entanto, deve-se destacar que esse tipo de abordagem assume a permanência dos padrões históricos, o que pode não se verificar diante de mudanças climáticas, ações antrópicas ou eventos extremos. Assim, embora os resultados obtidos sejam promissores, sua utilização deve ser acompanhada de análise crítica, evitando generalizações quanto à eficácia do modelo. Estudos futuros buscarão incorporar variáveis exógenas em modelos autorregressivos, com o intuito de aprimorar a capacidade preditiva, especialmente em cenários hidrológicos complexos.

referências

a) Livro

BOX, E. P. G., JENKINS, M. G., REINSEL, C. G., & LJUNG, M. G. (2016). *TIME SERIES ANALYSIS* (15th ed.). John Wiley.

b) Artigo em revista

BLÖSCHL, G. (2022). Three hypotheses on changing river flood hazards. In *Hydrology and Earth System Sciences* (Vol. 26, Issue 19, pp. 5015–5033). Copernicus Publications. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>.

CALVIN, K., DASGUPTA, D., KRINNER, G., MUKHERJI, A., THORNE, P. W., TRISOS, C., ROMERO, J., ALDUNCE, P., BARRET, K., BLANCO, G., CHEUNG, W. W. L., CONNORS, S. L., DENTON, F., DIONGUE-NIANG, A., DODMAN, D., GARSCHAGEN, M., GEDEN, O., HAYWARD, B., JONES, C., ... HA, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürgé-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... Y. Park, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

FORMIGONI, O. M., HENNING, E., MORO, G., SAMOHYL, R. W. (2013). Aplicação de um modelo SARIMA na previsão de vendas de motocicletas. *Exacta*, 11(1), 77–88. <https://doi.org/10.5585/exactaep.v11n1.3897>

HIRABAYASHI, Y., MAHENDRAN, R., KOIRALA, S., KONOSHIMA, L., YAMAZAKI, D., WATANABE, S., KIM, H., & KANAE, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>

KVOČKA, D., FALCONER, R. A., BRAY, M. (2016). Flood hazard assessment for extreme flood events. *Natural Hazards*, 84(3), 1569–1599. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2501-z>

NOJI, E. K. (1991). Natural Disasters. *Critical Care Clinics*, 7(2), 271–292. [https://doi.org/10.1016/S0749-0704\(18\)30306-3](https://doi.org/10.1016/S0749-0704(18)30306-3).

RUFAT, S., TATE, E., BURTON, C. G., & MAROOF, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470–486. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2015.09.013>.

TENG, J., JAKEMAN, A. J., VAZE, J., CROKE, B. F. W., DUTTA, D., & KIM, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90, 201–216. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2017.01.006>

WALTER, C, F. et, Al. Aplicação de um modelo SARIMA na previsão de vendas de motocicletas. *Exacta-EP*, São Paulo, V.11, n.1, p.77-88, 2013.

VALADÃO, A. C. B., & GUANÃBENS, P. F. S. (2025). Impacto das mudanças climáticas na saúde mental: uma revisão da literatura sobre ecoansiedade e educação ambiental. *REVISTA DELOS*, 18(65), e4460. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n65-105>

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal de Santa Maria através do Centro de Tecnologia, juntamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), além do esforço de todos e apoio dos membros do grupo de pesquisa em Modelagem HidroAmbiental e Ecotecnologias.