

DOI: <https://10.59824/rmrh.v6.323>

PREVISÃO DE VAZÕES NA BACIA DE CONTRIBUIÇÃO DA ESTAÇÃO ITABIRITO LINÍGRAFO UTILIZANDO METODOLOGIA SMAP

Flow forecasting in the Itabirito Linígrafo station watershed using SMAP methodology

Thamires Khetllen Almeida Bittencourt^{1*}Múcio Eurico Correa Ribeiro²Edson de Oliveira Vieira³

RESUMO

Este estudo explora o uso do modelo de transformação chuva-vazão SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) para previsão de vazões na bacia hidrográfica da estação fluviométrica Itabirito Linígrafo, em resposta ao aumento das precipitações, intensificadas pelas mudanças climáticas. A pesquisa destaca a importância dos modelos de transformação chuva-vazão na gestão de recursos hídricos e na mitigação de desastres naturais, como enchentes devido a eventos extremos de precipitação. Após calibrado o modelo mensal, três cenários de simulação foram criados para prever o impacto de diferentes incrementos de precipitação. Os resultados obtidos indicam que pequenas variações incrementais de chuvas, acontecendo de forma recorrente, podem impactar as vazões de forma bastante expressiva. Conclui-se com o estudo que o modelo SMAP possui o potencial de ser uma ferramenta essencial para o planejamento e a resposta a eventos climáticos extremos, contribuindo para a redução dos danos associados a inundações e para a otimização do manejo de água em períodos de escassez, oferecendo subsídios importantes para a formulação de estratégias de adaptação e mitigação diante das incertezas climáticas.

Palavras-chave: SMAP, Escoamento superficial, Previsão de vazões; Mudanças climáticas.

¹Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Engenheira de Recursos Hídricos da DF+ Engenharia – e-mail: bittencourthamires@gmail.com * Autora correspondente.

²Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor titular da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – e-mail: eovieira@ica.ufmg.br

³Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) – e-mail: mecr_mucio@hotmail.com

ABSTRACT

This study examines the application of the SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) rainfall-runoff model for flow forecasting in the Itabirito Linígrafo watershed, addressing increased precipitation intensified by climate change. The research underscores the relevance of rainfall-runoff transformation models in water resource management and mitigating natural disasters, such as floods triggered by extreme rainfall events. After calibrating the monthly model, were developed three simulation scenarios to estimate the impact of different precipitation increments. Results indicate that small incremental variations in rainfall, when occurring recurrently, can significantly affect flow patterns. The study concludes that the SMAP model has strong potential as a critical tool for planning and responding to extreme climatic events. It can aid in minimizing flood-related damages, optimizing water management during periods of scarcity, and supporting the development of adaptation and mitigation strategies in the face of climate uncertainties.

Keywords: *SMAP; Runoff; Flow forecasting; Climate change.*

Data de submissão: 12/09/2024

Data de aprovação: 20/12/2024

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão impactando significativamente as precipitações em todo o mundo, alterando os padrões históricos e aumentando a ocorrência e a intensidade de eventos extremos. É notável a quantidade de desastres acontecendo no Brasil envolvendo inundações e enchentes, principalmente na região sul e sudeste do país onde, conforme dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2023), foram registrados 81% dos alagamentos. As fortes chuvas em maio de 2024 que afetaram 475 dos 497 municípios gaúchos foram duas vezes mais prováveis de acontecer devido às mudanças climáticas (Brasil, 2024).

Diante deste cenário, os modelos de previsão de vazões desempenham um papel crucial na mitigação de riscos e no planejamento de respostas eficientes diante de situações de potencial desastres. Modelos de transformação chuva-vazão como o SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) ganham destaque neste contexto, devido à sua capacidade de estimar a

resposta de uma bacia hidrográfica frente às precipitações, se tornando ferramenta importante para a gestão de recursos hídricos e prevenção de desastres.

Com a utilização de modelos de previsão, é possível que medidas preventivas sejam tomadas e as cidades possam se preparar melhor para eventos extremos, minimizando os danos causados por enchentes e deslocamento de massa ou mesmo otimizando o uso de água para irrigação reduzindo as perdas causadas pelas secas.

O modelo SMAP de transformação chuva-vazão baseia-se em princípios de balanço hídrico no solo e utiliza parâmetros como taxa de infiltração e capacidade de escoamento superficial para simular o processo de transformação chuva-vazão. O modelo pode ser ajustado para diferentes tipos de condições climáticas, e sua estrutura permite a adaptação a situações distintas. A calibração e validação é simples e considera dados observacionais, sendo útil para estudos que requerem comparações de múltiplos cenários.

O objetivo do presente estudo é prever como as vazões no exutório de uma bacia hidrográfica se comportaria em casos de acréscimos das precipitações observadas devido às mudanças climáticas. Será analisado como um modelo mensal de transformação chuva-vazão reage às variações climáticas que afetam a precipitação, tornando-o um modelo calibrado e validado que pode ser usado para prevenir desastres relacionados às mudanças climáticas na região de estudo.

Para tal, o estudo irá analisar a bacia hidrográfica da estação fluviométrica Itabirito Linígrafo, que contém 68 anos de dados fluviométricos (junho de 1956 até agosto de 2023) e 40 anos de dados pluviométricos (janeiro de 1984 até agosto de 2023). As estações analisadas são de responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e se localizam na cidade de Itabirito-MG.

2 REVISÃO DE LITERATURA

É notória a influência das mudanças climáticas devido ao aquecimento global no aumento de frequência e intensidade de eventos climáticos extremos. Enquanto a região nordeste do país enfrenta secas mais severas e prolongadas, a região sul tem sofrido mais com enchentes e inundações. Esse cenário também envolve a variabilidade climática natural, que, em interação com as mudanças de longo prazo, pode resultar em relações de causa e efeito sobre esses eventos.

A Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) disponibilizou em 2024 o estudo “Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil” (ANA, 2024). No trabalho, são avaliados cenários representativos de mudança no clima e os impactos sobre a disponibilidade hídrica no Brasil, cuja avaliação é apresentada em 3 horizontes temporais (2015 a 2040, 2041 a 2070 e 2070 a 2100). No estudo, é citada a dificuldade e importância do planejamento e projeção do futuro para que seja possível mitigar os efeitos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e controle de inundações.

As projeções de mudança climática, embora sujeitas a incertezas, oferecem um vislumbre de possíveis impactos sobre os recursos hídricos no Brasil (ANA, 2024). Diante disso, faz-se importante os estudos sobre previsibilidade para que seja possível que as cidades se preparem e possam diminuir as possíveis consequências do aquecimento global quanto às precipitações futuras.

O modelo de transformação chuva-vazão SMAP é uma ferramenta que possibilita entender e prever como as vazões podem se comportar em diferentes situações de condições climáticas.

Dentre os poucos documentos publicados sobre o modelo SMAP, o estudo de Lopes *et. al.* (1981) apresenta a metodologia utilizada de transformação chuva-vazão, as vantagens e desvantagens da utilização deste modelo e aplicações práticas. O modelo simulado por Lopes *et. al.* (1981) foi aplicado para bacias com área de drenagem inferiores a 3.500 km², e o erro em termos de volumes anuais e mensais para calibração de quatro anos de dados está na faixa de 20%. No estudo, é indicada a desvantagem das simulações hidrológicas em geral para os países menos desenvolvidos, devido à escassez de dados registrados, principalmente em intervalos menores (horários ou em fração de horas).

O número de parâmetros que dependem de calibração é reduzido na utilização deste tipo de modelo, permitindo assim a determinação de valores globais com maior facilidade. No estudo de Lopes *et. al.* (1981) foram utilizados três reservatórios lineares para representar as características de retenção da superfície, de solo e subterrânea. A conclusão foi de que o modelo se mostrou adequado para aplicações em regiões de escassez de dados, sendo capaz de simular com sucesso dados diários de vazões com base nas precipitações diárias e dados mensais de evapotranspiração potencial.

A partir das análises iniciais apresentadas por Lopes *et al.* (1981) outros estudos foram desenvolvidos utilizando a metodologia SMAP para transformação chuva-vazão. Entre eles, Buchianeri (2004) investigou a geração de série histórica de vazão utilizando o modelo SMAP objetivando analisar a disponibilidade de água na bacia do Rio Grande de Ubatuba (Ubatuba-SP). Da mesma forma, Nunes *et al.* (2014) conduziram um estudo sobre a calibração e validação do modelo SMAP para vazões mensais na bacia do Rio Piancó, localizada no estado da Paraíba, utilizando o MATLAB R2012a para a implementação do modelo de transformação chuva-vazão. Os autores citam como vantagem da metodologia SMAP a simplicidade e pequena quantidade de parâmetros a serem utilizados, sendo (para o modelo mensal) quatro deles calibráveis com base nas séries históricas de precipitação, evaporação potencial e vazão.

Buchianeri (2004) destaca que o modelo SMAP de transformação chuva-vazão é um modelo determinístico cuja calibração pode ser realizada de forma manual iterativa ou através de métodos matemáticos que otimizam a calibração de forma automática, facilitando a obtenção dos parâmetros mais adequados para a calibração e diminuindo a subjetividade do processo manual.

Diante deste cenário, destaca-se a utilização de programas que integram ferramentas de calibração manual e automática, como o Smap.Net desenvolvido pelo Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão (LabSid) da Universidade de São Paulo (USP). A calibração automática do software pode ser realizada através de algoritmos de otimização, que ajustam os parâmetros do modelo para minimizar o erro entre a vazão simulada e a vazão observada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste estudo envolve etapas necessárias para calibração e validação do modelo mensal de transformação chuva-vazão SMAP. A escolha pelo modelo mensal se justifica pela significativa redução no número de dados de entrada, o que contribui para suavizar a variabilidade inerente às medições diárias. Essa abordagem resulta em padrões sazonais mais consistentes, eliminando as flutuações diárias causadas por eventos extremos ou ruídos de medição. Adicionalmente, como o objetivo do estudo se concentra em planejamento de recursos hídricos, a análise mensal se releva mais adequada, pois permite que os resultados sejam interpretados em um contexto mais amplo.

A primeira etapa é a coleta de dados hidrológicos, como a delimitação da bacia hidrográfica de estudo, informações sobre pluviometria da região e dados de evapotranspiração potencial. Em seguida, os dados coletados foram processados e ajustados para serem utilizados no modelo, contemplando refinamentos manuais na delimitação da área de drenagem e transformação destes dados em séries temporais adequadas para a simulação.

Posteriormente foi realizada a calibração do modelo, através de ajustes dos parâmetros necessários para reproduzir o comportamento hidrológico observado na bacia durante o período estudado. Para tal, foram utilizados dados históricos de precipitação e vazão para um mesmo exutório. A calibração foi conduzida utilizando-se técnicas de otimização para minimizar as diferenças entre vazões calculadas e observadas.

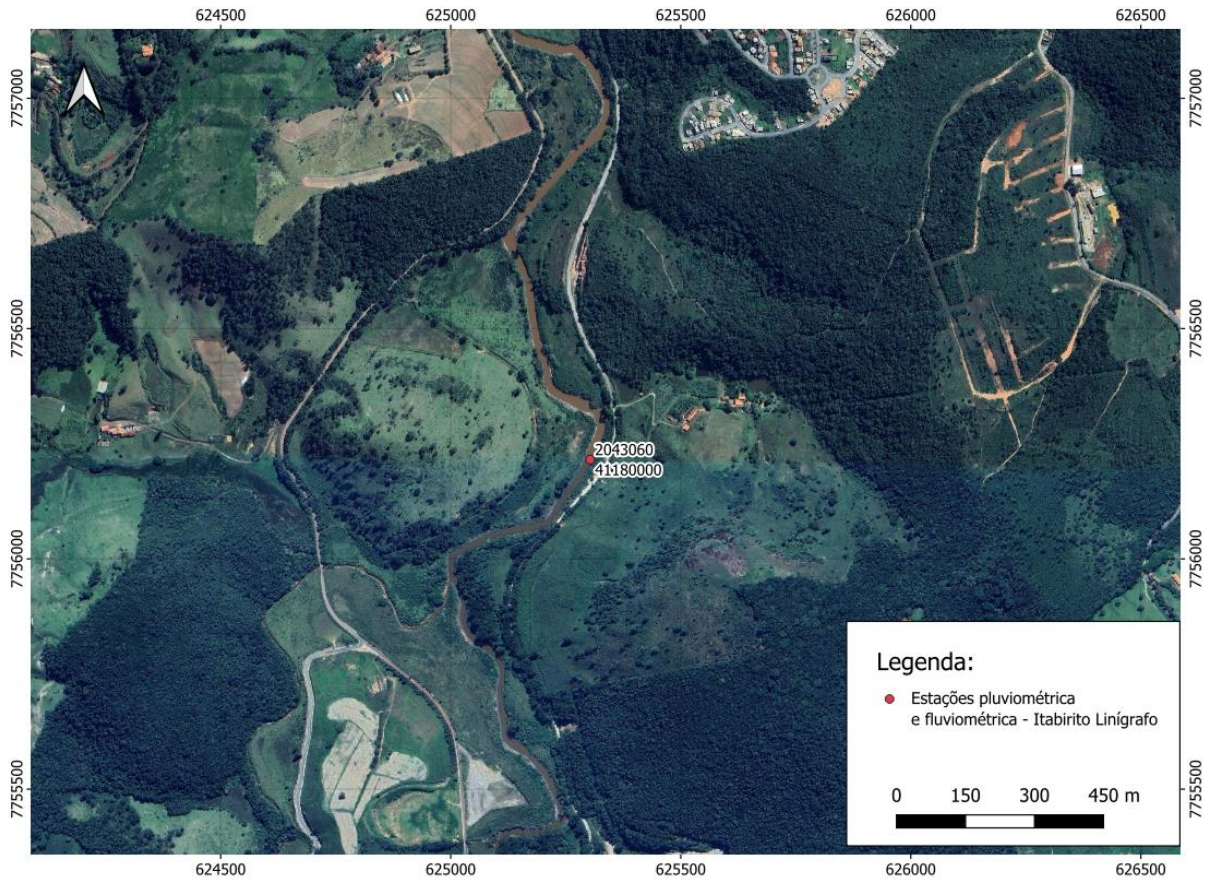
Após a obtenção de um modelo calibrado, tem-se a validação do modelo, através da inserção de outros períodos de dados conhecidos, diferentes daqueles utilizados na calibração. A validação do modelo SMAP, após a calibração, é essencial para garantir que ele não apenas ajuste bem os dados específicos usados na calibração, mas também que possua capacidade preditiva adequada e generalizável em outras situações.

A calibração ajusta o modelo para que ele funcione bem com os dados utilizados. No entanto, um modelo pode se adaptar tão especificamente a esses dados que perde a capacidade de prever novos cenários. A validação, com novos dados, verifica se o modelo pode ser aplicado com sucesso a outras situações, garantindo sua capacidade de generalização, somando ao modelo a confiança na sua aplicabilidade em outras situações diferentes daquelas utilizadas para a calibração.

3.1 Estações fluviométrica e pluviométrica

Para a calibração e validação do modelo de transformação chuva-vazão, são necessárias estações com dados de vazão e precipitação situadas em um mesmo ponto de exutório. Neste caso, foram analisadas as estações de códigos 2043060 (pluviométrica) e 41180000 (fluviométrica), ambas de propriedade da ANA com nome Itabirito Linígrafo, situadas na cidade de Itabirito (MG). As estações possuem coordenadas UTM 625491.27 longitude e 7754741.68 latitude (IMAGEM 1).

Imagem 1 – Localização das estações (pluviométrica e fluviométrica) Itabirito Linígrafo



Fonte: Elaborada pelos autores (2024)

Os dados das estações são diários e a disponibilidade de dados da estação pluviométrica vão de 1994 a 2023, enquanto da estação fluviométrica vão de 1956 a 2023. Foram analisados os dados das estações e a quantidade de falhas (dias sem dados) presente em cada uma delas, para a escolha do período a ser utilizado para calibração e validação. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 1, que apresenta apenas os anos que possuem falhas na estação fluviométrica ou pluviométrica.

Tabela 1 – Análise das falhas das estações fluviométrica e pluviométrica (Itabirito Linígrafo)

Estação fluviométrica		Estação pluviométrica	
41180000		2043060	
Ano	Número de falhas	Ano	Número de falhas
1956	26	1984	26
-	-	1985	31
-	-	1989	2
-	-	1990	173
-	-	1992	61
-	-	1993	28
-	-	2005	3
-	-	2020	18
-	-	2021	4
-	-	2022	11
-	-	2023	13

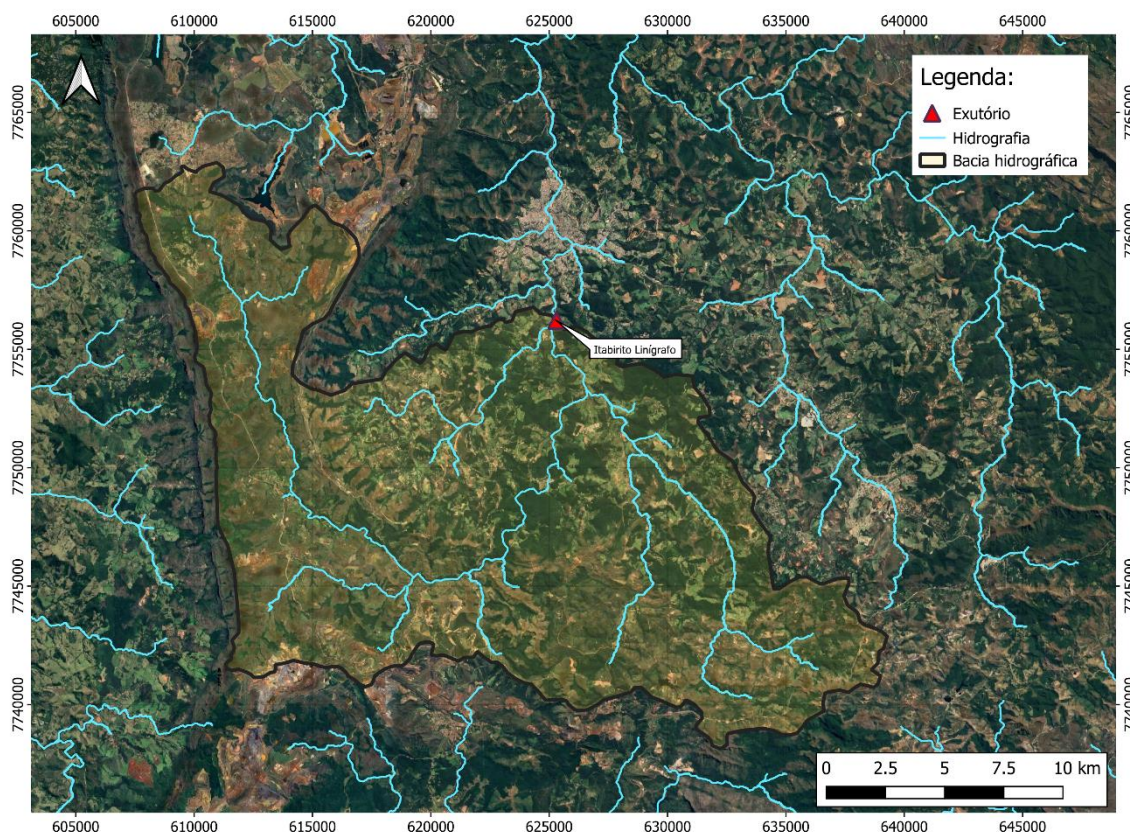
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Desta forma, é possível observar que o período mais extenso sem quantidades significativas de falhas (neste caso, considerou-se o máximo de cinco dias de falhas por ano), que abrange ambas as estações são os anos de 1994 a 2019, onde o único ano com falhas é o ano de 2005 com apenas três falhas na estação pluviométrica. Portanto, o período de 1994 a 2019 foi utilizado para calibração e validação do modelo, totalizando 26 anos de dados.

3.2 Delimitação da bacia hidrográfica

O presente estudo analisou as vazões da bacia hidrográfica da estação fluviométrica Itabirito Linígrafo, na cidade de Itabirito (MG). A bacia hidrográfica foi delimitada a partir do Modelo Digital de Elevação gratuito SRTM (IMAGEM 2).

Imagem 2 – Bacia hidrográfica da estação fluviométrica Itabirito Linígrafo



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

3.3 Calibração do Modelo

De posse dos valores de área de drenagem e dos dados mensais de precipitação, evapotranspiração e vazão para a região de estudo, foi possível calibrar o modelo através da obtenção de parâmetros que gerem uma série de vazões com os valores mais próximos possíveis aos observados.

Para tal, foi utilizado o aplicativo SMAP.net desenvolvido pelo LabSid (USP), o qual utiliza metodologia SMAP (Lopes *et al.*, 1981). O procedimento de transformação chuva-vazão do aplicativo consiste em caracterizar o solo em relação à capacidade de retenção, infiltração, evapotranspiração e geração de escoamento superficial.

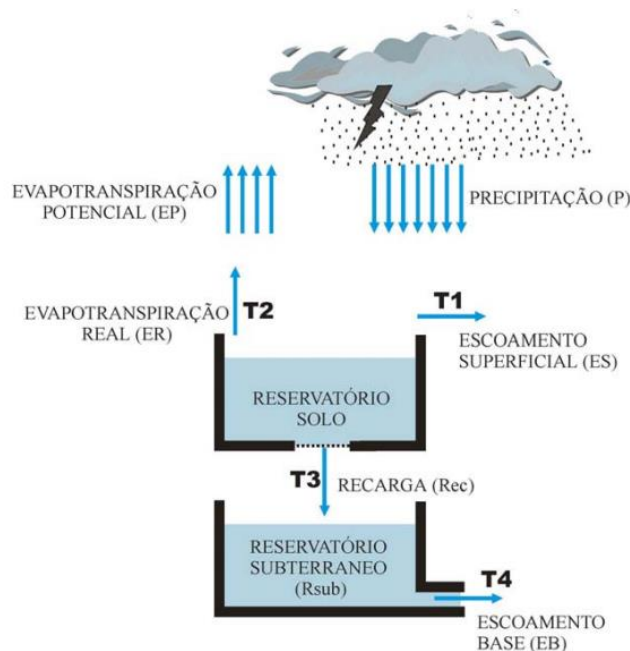
Como dados de entrada, foram inseridos os dados de precipitação e vazões observadas desde julho de 1994 a junho de 2015 e os dados de evapotranspiração das Normais Climatológicas de Belo Horizonte. Os dados de precipitação e vazão foram obtidos através do

site *Hidroweb* da ANA e correspondem às estações pluviométrica de código 2043060 e fluviométrica de código 41180000.

As estações pluviométrica e fluviométrica utilizadas com base para o estudo estão situadas no município de Itabirito-MG, localizadas nas mesmas coordenadas e possuindo, portanto, a mesma área de contribuição (IMAGEM 2).

O modelo diário conta com três parâmetros de entrada e cinco parâmetros de calibração, sendo eles ajustados em função da vazão medida. Uma ilustração do modelo é apresentado na Figura 1, destacando as cinco transformações nas transferências de água no solo.

Figura 1 – Variáveis envolvidas no modelo chuva-vazão utilizado



Fonte: BUCHIANERI (2004)

As cinco funções utilizadas na transferência entre os reservatórios dos modelos são apresentadas a seguir:

$$E_s = \frac{(P - A_i)^2}{(P - A_i + S)} \quad (1)$$

$$E_d = R_{sup} * (1 - 0,5^{1/k2t}) \quad (2)$$

$$E_r = [(P - E_s) + (E_p - (P - E_s))] * T_u * E_c \quad (3)$$

$$Rec = C_{rec} * T_u * [R_{solo} - (C_{apc} * Sat)] \quad (4)$$

$$E_b = R_{sub} * (1 - 0,5^{1/kkt}) \quad (5)$$

Em que:

- R_{solo} = Reservatório do solo, compreende o solo pouco profundo e a camada radicular, tem capacidade de armazenamento definida pela variável Sat (mm), correspondente à saturação do solo e capacidade mínima retida na zona radicular definida pela Capacidade de Campo;
- R_{sub} = reservatório de água subterrânea, responsável pela geração de escoamento de base em função da percolação da água pelas camadas (mm);
- E_p = Evapotranspiração potencial (mm);
- P = Precipitação (mm);
- E_s = parcela da precipitação que não infiltra no solo e escoar superficialmente (mm);
- E_d = Escoamento superficial (mm);
- E_r = Evapotranspiração real (mm);
- R_{ec} = Recarga do subsolo, representando a percolação da água pelas camadas (mm);
- E_b = escoamento de base gerado pelo reservatório do subsolo (mm).
- A_i = abstração inicial do solo e $S = Sat - R_{solo}$
- $k2t$ = constante de recessão do escoamento superficial
- T_u = teor de umidade do solo (R_{solo}/Sat)
- C_{apc} = capacidade de campo e C_{rec} = coeficiente de recarga de base
- kkt = constante de recessão do escoamento de base

3.4 Validação do Modelo

Para a validação do modelo, foram utilizados os dados mensais de precipitação e vazão de julho de 2015 a maio de 2019, totalizando 47 meses contínuos de dados completos e sem falhas, além dos dados de evapotranspiração dos respectivos meses. Os dados foram inseridos no aplicativo utilizando os mesmos parâmetros da calibração.

3.5 Cenários de Simulação

Após a calibração e validação do modelo SMAP de transformação chuva-vazão, foram realizadas simulações para prever o comportamento das vazões sob diferentes condições de aumento nas precipitações. Essas simulações visam analisar o impacto potencial de variabilidades e impactos de mudanças climáticas, que poderá resultar em um aumento nas precipitações ao longo dos próximos anos, e observar como um aumento de precipitação irá impactar no aumento da vazão. Para isso, foram definidos três cenários distintos de simulação, conforme descrito a seguir.

No primeiro cenário (Cenário 1), as precipitações serão aumentadas aleatoriamente entre 0,1% e 5,0%. Este cenário visa capturar pequenas variações nas precipitações que podem ocorrer devido a mudanças climáticas moderadas. A escolha desse intervalo se justifica pela necessidade de avaliar os impactos iniciais e sutis nas vazões, permitindo entender a sensibilidade do sistema a alterações menores nas condições climáticas.

No Cenário 2, o aumento nas precipitações será maior, variando entre 5% e 10%. Esse intervalo simula uma situação em que o efeito do aquecimento global se intensifica, resultando em mudanças mais significativas nos padrões de precipitação. O objetivo aqui é avaliar como o modelo responde a incrementos mais substanciais nas precipitações, simulando condições que podem se tornar mais frequentes com o agravamento das mudanças climáticas.

Por fim, o terceiro cenário considera um aumento ainda mais pronunciado nas precipitações, entre 10% e 15%. Este cenário representa um futuro em que o aquecimento global provoca alterações drásticas no regime de chuvas, levando a eventos extremos. A análise deste cenário é crucial para prever os limites operacionais e de segurança do sistema em face de mudanças climáticas severas.

Cabe ressaltar que os valores aleatórios de acréscimo dentro dos limites estabelecidos foram gerados com auxílio do software Excel, através da função “aleatório”. A definição dos três cenários com intervalos crescentes de aumento de precipitação foi planejada para cobrir diferentes possibilidades de futuros climáticos, desde alterações leves até condições extremas.

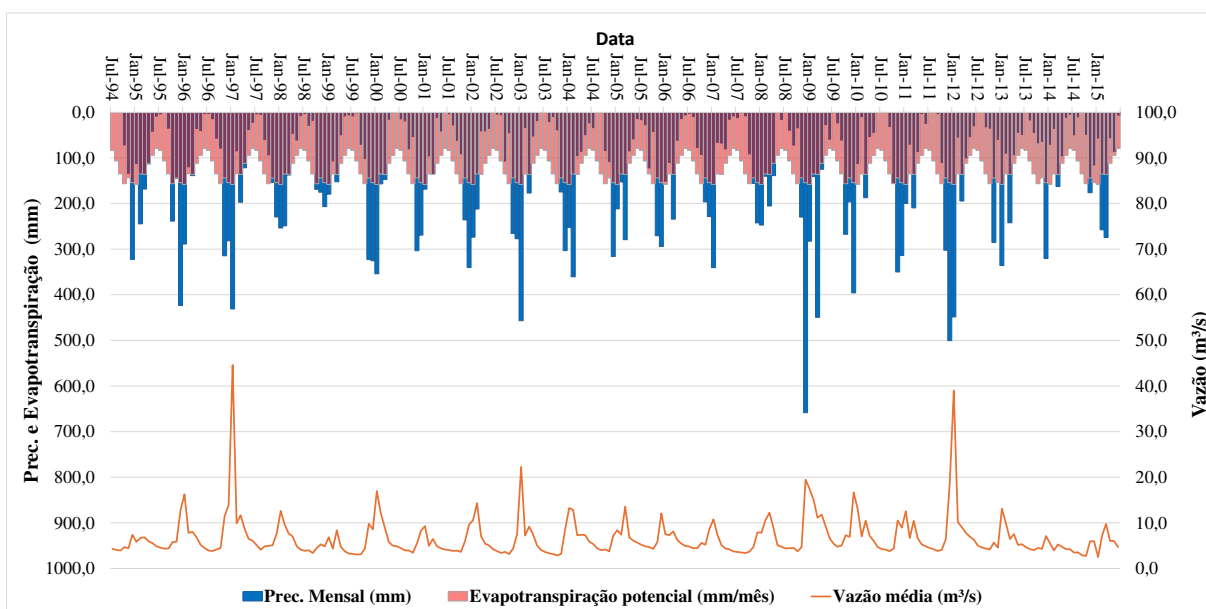
Ao variar os incrementos de forma aleatória dentro dos intervalos definidos, busca-se captar a variabilidade natural e os possíveis extremos que podem ocorrer, oferecendo uma visão dos impactos potenciais nas vazões devido às alterações de precipitações. Esses cenários

fornecem uma base para a elaboração de estratégias de mitigação e adaptação, essenciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos diante das incertezas climáticas futuras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados mensais de entrada para a calibração do modelo SMAP estão dispostos no Gráfico 1, onde é possível observar a relação entre a precipitação, evapotranspiração e a vazão observada para os meses de julho de 1994 até junho de 2015.

Gráfico 1 – Precipitação, evapotranspiração e vazão observada no período utilizado para calibração do modelo



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O modelo foi calibrado, tendo como parâmetros os valores destacados na Tabela 2, com base no disposto na seção 3.3, cujas variáveis utilizadas estão descritas.

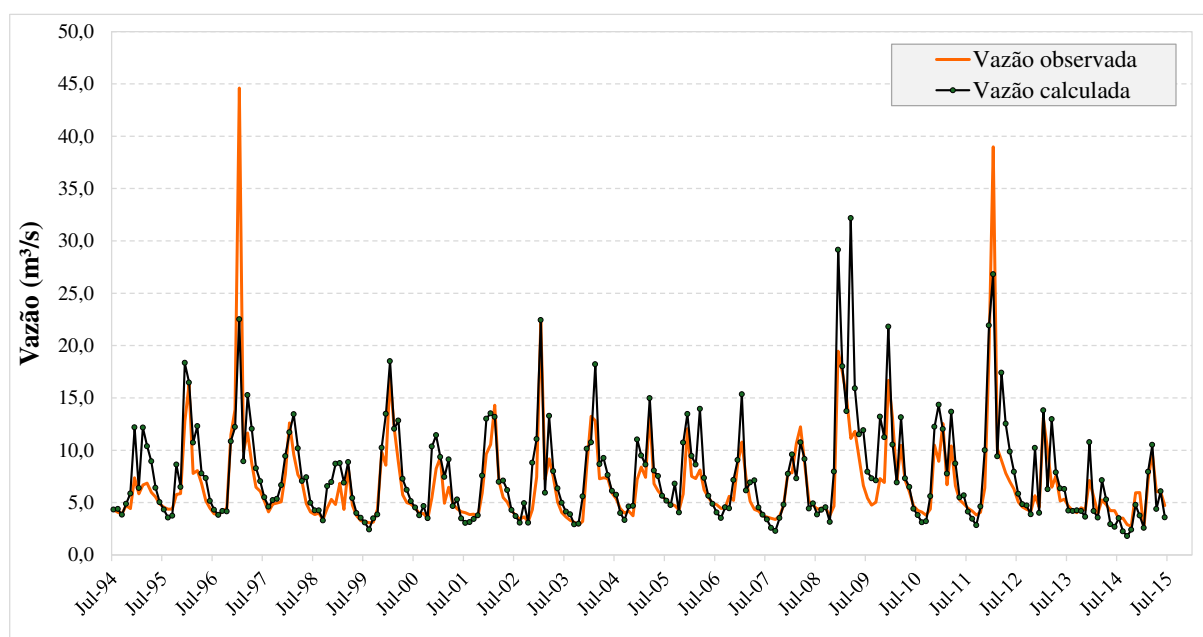
Tabela 2 – Dados de entrada para calibração do modelo SMAP

Parâmetros de calibração		Valores iniciais	
Saturação (mm)	2479,8844	Teor de umidade (%)	55,00
P_{es}	2,2000	Escoamento básico (m ³ /s)	4,31
C_{rec}	28,0000	Área de drenagem (km ²)	378,04
E_{Coef}	0,9703	-	-
Kkt (meses)	1,2738	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O resultado da calibração do modelo é apresentado no Gráfico 2, onde é possível visualizar graficamente a comparação entre as vazões observadas e àquelas calculadas por meio da calibração do software.

Gráfico 2 – Resultado gráfico da calibração do modelo

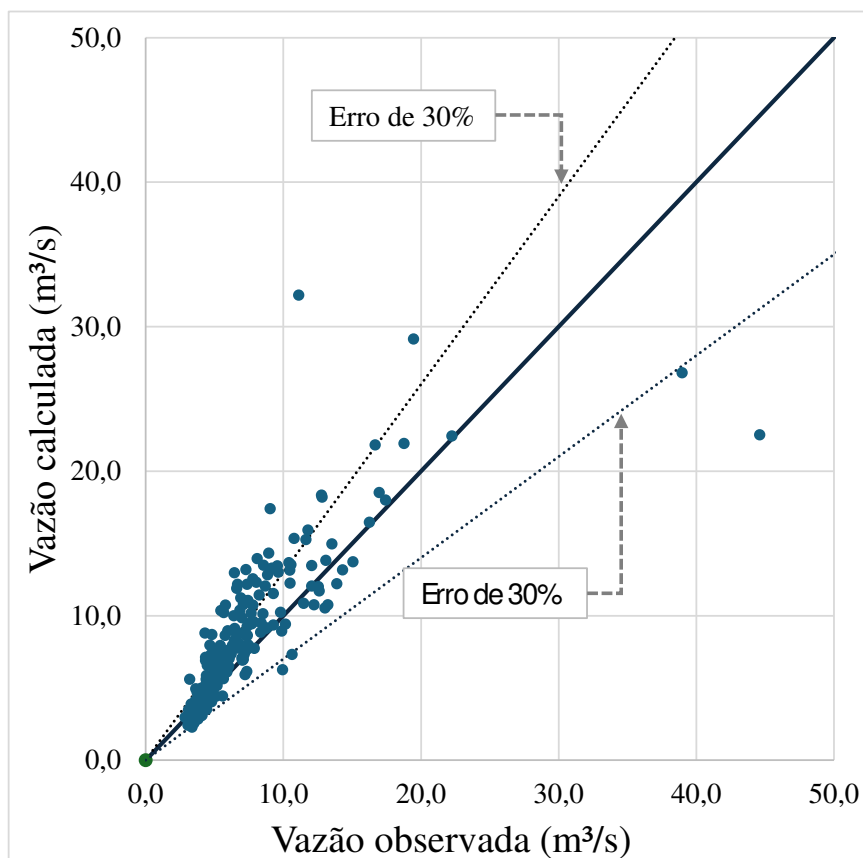


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

De forma a se analisar a aderência entre as vazões do modelo calibrado e as vazões observadas, foi realizado um gráfico de dispersão. A linha reta (abscissas = ordenadas) indica a situação ideal, onde a vazão calculada seria exatamente igual à observada. Foram também acrescentadas faixas de erros de 30% inferior e 30% superior, servindo como limites para avaliar

se as vazões calculadas estão dentro de uma margem de erro aceitável para modelos chuva-vazão em estudos exploratórios ou de gestão de recursos hídrico (Braga *et. al.*, 2005). No Gráfico 3 pode ser observado o resultado obtido.

Gráfico 3 – Comparação entre vazão calculada e observada



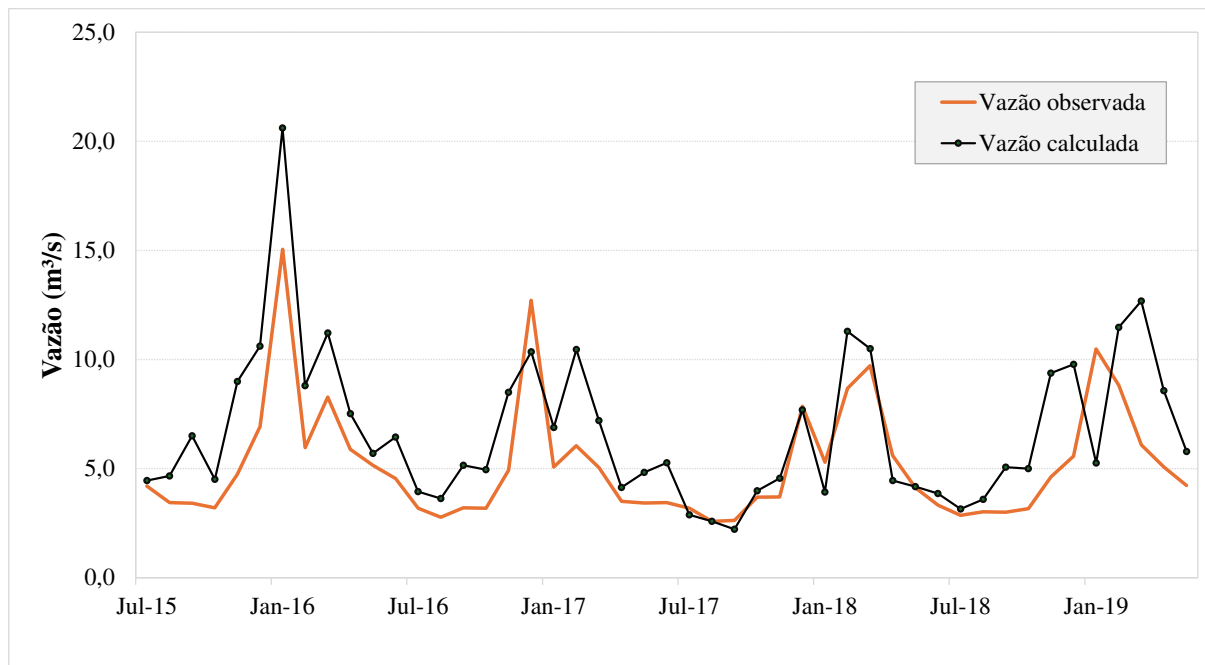
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Considerando que a maioria dos dados está presente dentro da faixa de erro de 30%, pode-se considerar que o modelo se mostra aderente aos dados observados, sendo eficaz para a previsão de vazões na bacia estudada. As discrepâncias maiores podem ser resultantes de picos não observados pelo modelo, limitações do modelo ou incertezas nos dados de entrada.

O software SMAP.net faz o cálculo do Coeficiente de Correlação de Pearson (R) para avaliar a relação linear entre as vazões observadas e simuladas pelo modelo. Um valor de R próximo a 1,0 indica uma forte correlação positiva, sugerindo uma boa reprodução do modelo. A calibração do modelo resultou em um fator de correlação de 0,81 e os resultados de

vazões calculadas obtidos pela calibração do modelo estão dispostos no Gráfico 4, junto com os valores de vazões observadas correspondentes.

Gráfico 4 – Resultado gráfico da validação do modelo

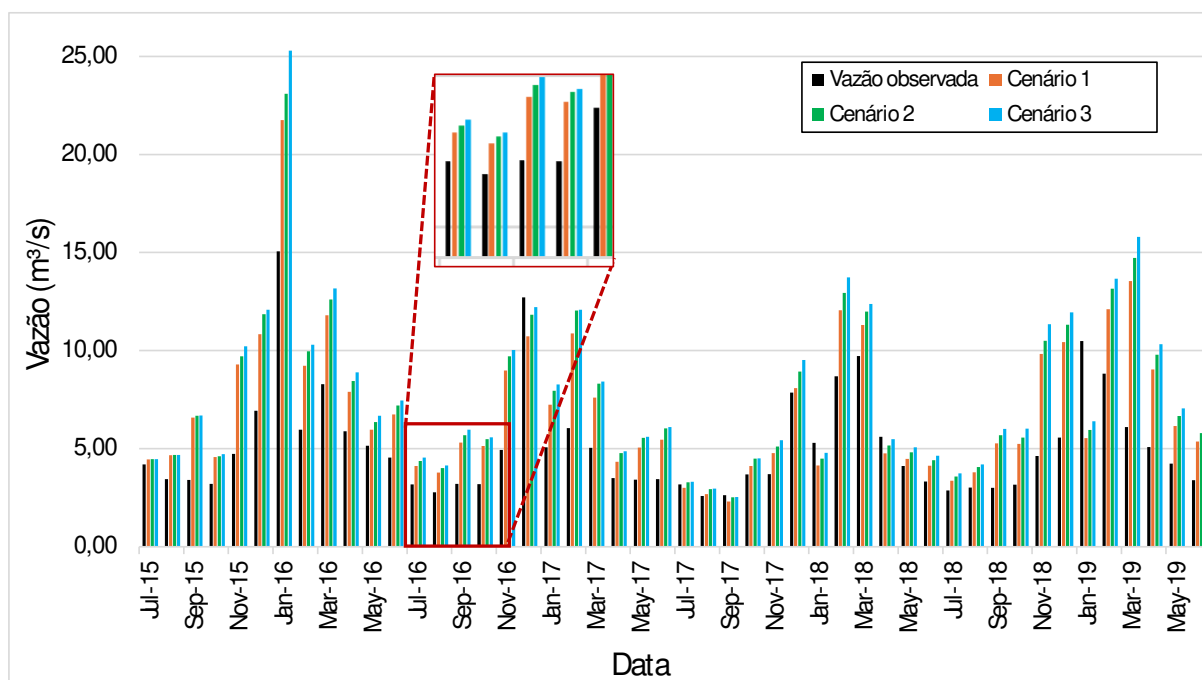


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Em seguida, foram simulados três diferentes cenários de aumento de precipitações, visando estimar como as vazões se comportam diante destes cenários. O Cenário 1 apresenta acréscimos na precipitação de 0,1 a 5%, o Cenário 2 de 5 a 10% e o Cenário 3 de 10 a 15%.

Para as simulações referentes aos três cenários, foram utilizados 4 anos de dados. Foram variadas as precipitações do período entre julho de 2015 a junho de 2019, com os acréscimos aleatórios entre os limites estabelecidos para cada cenário (GRÁFICO 5).

Gráfico 5 – Resultados gráficos das vazões obtidas para os cenários simulados



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Foi possível observar que o modelo calibrado se comportou bem para a previsão dos dados, uma vez que, mesmo com aleatoriedade entre os acréscimos de vazões, o modelo se comportou de forma previsível e aderente para os três cenários. A média de acréscimo para os Cenários 1, 2 e 3 foram de 39,5%, 49,6% e 55,6%, respectivamente.

5 CONCLUSÃO

As simulações realizadas indicam que pequenas variações nos índices de precipitação podem impactar significativamente o comportamento hidrológico de uma bacia, aumentando as vazões de forma expressiva e não linear. Uma explicação para esse acontecimento é a saturação do solo, uma vez que com precipitações maiores, a capacidade de infiltração diminui drasticamente, podendo pequenos incrementos de precipitação ocasionarem aumentos significativos de escoamento superficial, acentuando bastante o aumento das vazões.

Somado a isto, pequenos aumentos percentuais de chuva podem coincidir com eventos de alta intensidade e curta duração, os quais são comumente chamados de eventos extremos, os quais possuem maior potencial para gerar um rápido escoamento superficial. Se a

precipitação adicional ocorre durante um evento extremo, o efeito cumulativo pode levar a um aumento expressivo nas vazões.

O estudo demonstrou sensibilidade às variações propostas, o que indica a importância de se utilizar modelos calibrados e adaptáveis para a previsibilidade de vazões, especialmente em contexto de mudanças climáticas, onde eventos extremos e alterações no regime pluviométrico são cada vez mais frequentes. Embora a previsibilidade das precipitações seja um assunto bastante complexo e de difícil assertividade, o estudo serve de alerta para a sensibilidade das vazões quanto às mudanças nas precipitações.

Recomenda-se, por fim, a continuidade de estudos que explorem a aplicação de modelos como este em outras bacias hidrográficas, considerando diferentes condições de uso e ocupação do solo. Também se faz importante realizar análises mais detalhadas sobre a evapotranspiração e adotar projeções de cenários futuros de precipitação mais realistas. Isso permitirá validar e aperfeiçoar as abordagens apresentadas neste estudo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (Brasil). **Impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil**. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acesso em: 28 jul. 2024.

BRAGA, B.; FERNANDES, J. C.; BERTOLLI, C. **Hidrologia e recursos hídricos**. 2. ed. São Paulo: Editora Prentice Hall, 2005.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). **Mudança climática dobrou a probabilidade de ocorrência de chuvas extremas no Sul do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/06/mudanca-climatica-dobrou-a-probabilidade-de-ocorrencia-de-chuvas-extremas-no-sul-do-brasil>. Acesso em: 27 jul. 2024.

BUCHIANERI, V. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da Bacia do Rio Grande de Ubatuba**. 2004. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-14072004-165104/publico/viviane.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2024.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTA DE DESASTRES NATURAIS. (Brasil) - CEMADEN. **81% dos eventos registrados pelo Cemaden em 2023 ocorreram nas regiões Sul e Sudeste do país.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/81-dos-eventos-registrados-pelo-cemaden-em-2023-ocorreram-nas-regioes-sul-e-sudeste-do-pais>. Acesso em: 27 jul. 2024.

LOPES, J. E. G., BRAGA, B. P. F., CONEJO, J. G. L. SMAP: a simplified hydrologic model. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAINFALL-RUNOFF MODELING*, 1981, Mississippi. *Proceedings* [...]. Littleton: Water Resources Publications. 1981. p. 167-176.

NUNES, F. M. S. *et al.* Modelagem hidrológica via SMAP para estimativa de vazões mensais na bacia do rio Piancó. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 9, n. 3, p. 289-295. 2014. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/2948>. Acesso em: 28 jul. 2024.