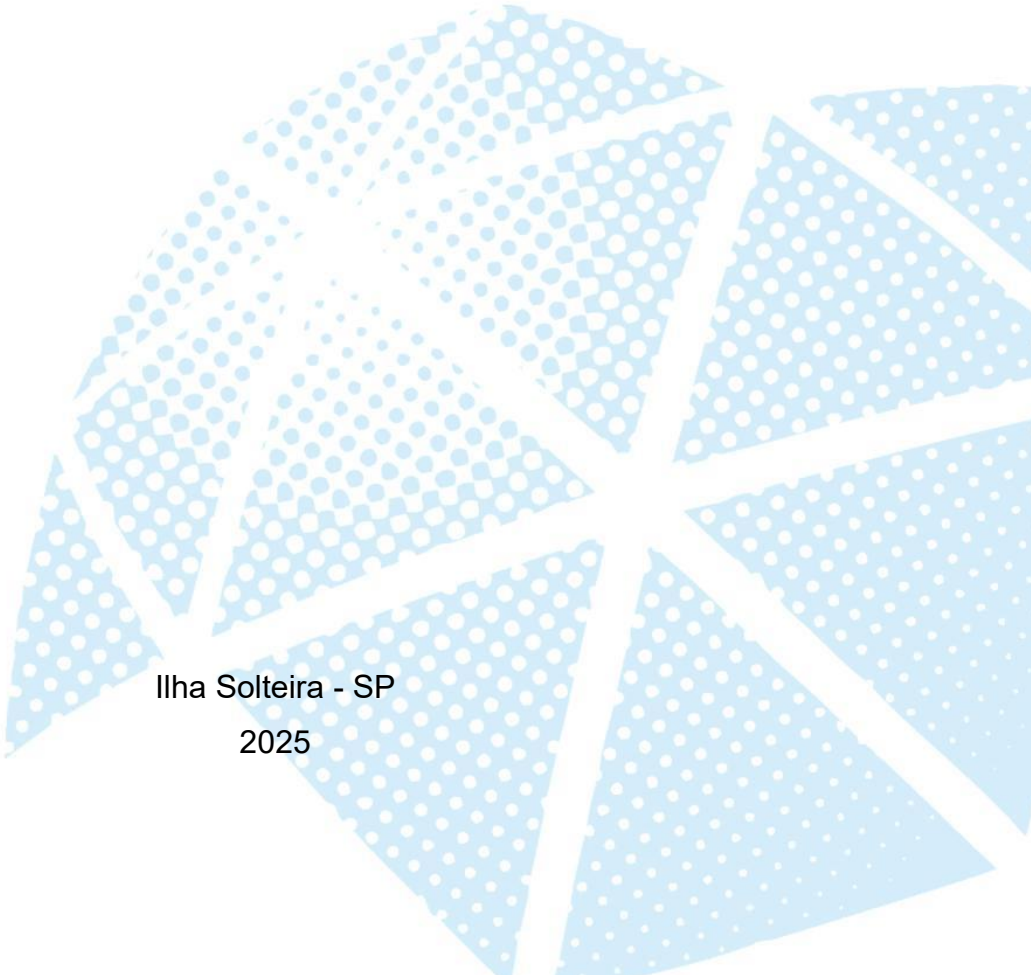
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

REBECA JUSCELINO VAZE

ANÁLISE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA AFLUENTE À USINA HIDRELÉTRICA DE ILHA SOLTEIRA



Ilha Solteira - SP
2025

REBECA JUSCELINO VAZE

ANÁLISE DE SÉRIES HIDROLÓGICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA AFLUENTE À USINA HIDRELÉTRICA DE ILHA SOLTEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), FEIS, Ilha Solteira, para obtenção do título de Grau acadêmico Bacharela em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia e Tecnologia

Orientador(a): Prof. Dra. Liliane Lazzari Albertin

Ilha Solteira - SP

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

V393a

Vaze, Rebeca Juscelino.
Análise de séries hidrológicas na bacia hidrográfica afluente à Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira / Rebeca Juscelino Vaze. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Liliane Lazzari Albertin

Inclui bibliografia

1. Séries hidrológicas. 2. UHE Ilha Solteira. 3. Precipitação. 4. Vazão.

Sandra Montibeller - CRB-8/060

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Rebeca Juscelino Vaze

Título: Análise de séries hidrológicas na bacia hidrográfica afluente à usina hidrelétrica de Ilha Solteira

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Liliane Lazzari Albertin
UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientador)

Prof. Dr. Camila G.A.G. Costa
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Prof. Dr. Eudydes Fortaci Jr.
UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira
30 / 06 / 2025

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O impacto esperado é fornecer subsídios para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, contribuindo para o planejamento da operação da usina e a segurança hídrica. Ao identificar tendências e variações nas vazões, o estudo pode apoiar decisões frente a mudanças climáticas e alterações no uso do solo, além de ampliar o conhecimento técnico sobre a bacia.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The expected impact is to provide support for a more efficient management of water resources, contributing to the planning of the plant’s operation and to water security. By identifying trends and variations in streamflows, the study can support decision-making in the face of climate change and land use changes, as well as enhance the technical understanding of the basin.

Dedico este trabalho à minha mãe, que com muito amor e luta me criou e incentivou para que eu chegasse até aqui sem desistir.

AGRADECIMENTOS

Que felicidade poder escrever esse texto e para começar quero agradecer à Deus, sem Ele eu não chegaria tão longe. Obrigada pelas oportunidades da vida. E deixo um versículo que muito me tocou nos últimos dias de escrita: “Sabemos que Deus age em todas as coisas para o bem daqueles que o amam, dos que foram chamados de acordo com o seu propósito” (Rom 8:28). Tua graça sempre vai me bastar e por isso serei eternamente grata.

À minha família, Flávia, minha mãe, e Fernando, meu paidrasto, que me criaram me ensinando a ter garra, mostrando o valor do conhecimento e foram minha motivação para seguir até o fim.

Ao meu namorado Victor, que tanto me apoiou na reta final da faculdade e principalmente durante a escrita deste trabalho.

Aos meus poucos, mas bons amigos que fiz durante a graduação, que me socorreram e deram força diversas vezes durante esses anos.

E aos professores que estiveram presente na minha formação, em especial à minha orientadora Liliane Lazzari Albertin.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar as séries hidrológicas da bacia afluente ao reservatório da Usina Hidrelétrica Ilha Solteira. Utilizou-se os dados de dez estações pluviométricas localizadas dentro da bacia, obtidas através do portal Hidroweb da ANA. A partir desses dados, calculou-se a série de precipitações médias da bacia pelo método de Thiessen. Os dados das vazões afluentes foram obtidos pelo site da ANA. A série de precipitação abrange o período de 1942 a 2024 e a série de vazão abrange o período de 1963 a 2024. Foi realizado o teste de Pettitt para verificação de ponto de mudança nas séries e o teste de Mann-Kendall para verificação da não-estacionariedade. A avaliação da alteração do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica afluente da UHE Ilha Solteira, foi realizada com os dados disponibilizados pelo MapBiomas, para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023. Houve uma alteração significativa no uso do solo da bacia, com redução da vegetação natural e aumento de áreas de agropecuária. Notou-se uma redução das formações naturais ao longo dos anos, tanto florestal como não florestal, alterando de 28,89% e em 1985 para 21,23% em 2023. Enquanto para a agropecuária, verificou-se um aumento, começando com 67,28% em 1985 e terminando com 74,89% em 2023. Como resultado concluiu-se que as séries completas de precipitação e vazão são não-estacionárias, assim como os intervalos 3 de ambas as séries e o intervalo 2 da série de precipitação sendo apenas o intervalo 2 da vazão apresentrando indícios de estacionariedade.

Palavras-chave: Séries hidrológicas; UHE Ilha Solteira; Precipitação; Vazão.

ABSTRACT

This study aims to analyze the hydrological time series of the basin affluent of the Ilha Solteira Hydroelectric Power Plant reservoir. Data from ten rain gauge stations located within the basin were used, obtained through the ANA's Hidroweb platform. Based on these data, the average precipitation series for the basin was calculated using the Thiessen polygon method. Inflow discharge data were also obtained from the ANA website. The precipitation series covers the period from 1942 to 2024, while the flow series spans from 1963 to 2024. The Pettitt test was applied to detect change points in the time series, and the Mann-Kendall test was used to assess non-stationarity. Land use and land cover changes in the Ilha Solteira basin were evaluated using data from the MapBiomas platform for the years 1985, 1995, 2005, 2015, and 2023. A significant shift in land use was observed, with a reduction in natural vegetation and an increase in agricultural and pasture areas. Natural formations, both forested and non-forested, decreased from 28,89% in 1985 to 21,23% in 2023, while agricultural areas increased from 67,28% to 74,89% over the same period. The results indicate that the full precipitation and discharge series are non-stationary, as well as the third interval of both series and the second interval of the precipitation series. Only the second interval of the discharge series showed signs of stationarity.

Keywords: Hydrological Series, HPP Ilha Solteira; Precipitation; Flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da UHE Ilha Solteira 24
Figura 2 – Bacia Hidrográfica da UHE Ilha Solteira.....25
Figura 3 – Localização das estações pluviométricas na bacia de contribuição da UHE Ilha Solteira 27
Figura 4 – Gráfico das disponibilidades temporais das estações selecionadas 28
Figura 5 – Mapa de área influência dos postos pluviométricos selecionados 33
Figura 6 – Gráfico da precipitação média mensal 34
Figura 7 – Gráfico das precipitações mínimas e máximas mensais.....34
Figura 8 – Ponto de mudança da série de precipitações totais anuais 35
Figura 9 – Ponto de mudança da série de vazões médias anuais 37
Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 1985 38
Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 1995 39
Figura 12 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2005 40
Figura 13 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2015 41
Figura 14 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2023 42
Figura 15 – Gráfico das vazões afluentes mensais.....44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos Postos Pluviométricos.....26
Tabela 2 – Intervalos considerados para o teste de Mann-Kendall.....30
Tabela 3 – Características Fisiográficas da Bacia.....32
Tabela 4 – Resultados teste de Mann-Kendall precipitação 36
Tabela 5 – Resultados teste de Mann-Kendall vazão 37
Tabela 6 – Classificação geral das subclasses representadas nos mapas.....42
Tabela 7 – Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira.....43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UHE	Usina Hidrelétrica
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 PROPOSIÇÃO 15
3 REVISÃO DA LITERATURA 16
3.1 HIDROLOGIA ESTATÍSTICA 16
3.1.1 Processos Estocásticos 16
3.1.2 Estacionariedade e Homogeneidade 18
3.1.3 Tendências em Séries Hidrológicas 19
3.1.3.1 Teste de Pettitt 19
3.1.3.2 Teste de Mann-Kendall 20
3.2 ALTERAÇÃO NO USO DO SOLO 22
4 MATERIAIS E MÉTODOS 24
4.1 ÁREA DE ESTUDO 24
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA 24
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE PRECIPITAÇÃO 26
4.4 VAZÕES AFLUENTES 29
4.5 APLICAÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS 29
4.6 ALTERAÇÃO NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO 30
4.7 SOFTWARES UTILIZADOS 30
5 RESULTADOS 32
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA 32
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE PRECIPITAÇÃO 32
5.3 APLICAÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS 35
5.3.1 Série de Precipitações 35
5.3.2 Série de Vazões 37
5.4 ALTERAÇÃO DO USO DO SOLO E DADOS MENSAIS 38
6 CONCLUSÕES 45
REFERÊNCIAS 46

1 INTRODUÇÃO

A precipitação é uma das fases mais importantes do ciclo hidrológico, portanto, é fundamental a compreensão do comportamento espaço-temporal da mesma, bem como de eventos extremos pluviométricos de forma a contribuir na gestão dos recursos naturais e otimização do uso e ocupação do solo (Silva, 2021). No Brasil, aproximadamente 60% da energia elétrica é gerada por hidrelétricas (EPE, 2024). A grande dependência das hidrelétricas para a geração de energia apresenta riscos significativos de abastecimento, uma vez que o recurso essencial para o funcionamento dessas usinas é a vazão dos rios, a qual está diretamente influenciada pelo clima e por suas variações ao longo do tempo e do espaço (Bravo et al., 2008). A análise de mudanças em séries temporais de dados hidrológicos possui uma relevância significativa tanto do ponto de vista científico quanto prático. Tradicionalmente, os sistemas de gestão de água são desenvolvidos com base na premissa de que as séries de dados hidrológicos, como vazões ou precipitações, mantêm-se estacionárias do ponto de vista estatístico. Isso significa que se assume que as características estatísticas fundamentais desses processos, como médias e variâncias, permanecem inalteradas ao longo do tempo. No entanto, essa suposição pode não se sustentar quando fatores como variabilidade climática e mudanças climáticas são consideradas. Diante dessas circunstâncias, é essencial revisar os projetos que se baseiam na estacionariedade dos eventos hidrológicos, a fim de avaliar os possíveis efeitos dessas mudanças nos sistemas hidráulicos locais (Alexandre, 2009). Nesse sentido, a Resolução nº 121/2022 da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que institui a Referência Técnica para Elaboração de Estudos Hidrológicos (RPS), recomenda que os estudos hidrológicos sejam reavaliados a cada 10 anos, ou em prazo inferior, sempre que houver indícios de alterações significativas nas condições climáticas ou de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica. Essa diretriz reforça a importância da atualização contínua dos parâmetros hidrológicos utilizados em projetos de infraestrutura hídrica e planejamento territorial, a fim de garantir sua eficácia e segurança ao longo do tempo.

Diante do exposto, a área de estudo selecionada para a presente pesquisa é a bacia hidrográfica afluente à Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, dada a sua magnitude e importância para a região em que se encontra. O estudo busca analisar as séries temporais de vazão e precipitação para identificar tendências de longo prazo e

possíveis mudanças nos padrões hidrológicos. A análise estatística desses dados pode fornecer subsídios importantes para a gestão dos recursos hídricos, permitindo o desenvolvimento de políticas mais eficientes para mitigação de impactos e planejamento sustentável.

2 PROPOSIÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos exige a compreensão detalhada do comportamento das variáveis hidrológicas ao longo do tempo, especialmente em bacias hidrográficas que abastecem grandes usinas hidrelétricas. Nesse contexto, esta pesquisa tem como objetivo analisar as séries históricas de precipitação e vazão na bacia afluente à Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, aplicando testes estatísticos como Mann-Kendall e Pettitt. A proposta visa identificar tendências e avaliar a estacionariedade das séries, permitindo uma melhor compreensão das mudanças hidrológicas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 HIDROLOGIA ESTATÍSTICA

A hidrologia é uma área da ciência que se dedica a investigar os fenômenos hidrológicos, ou seja, os processos que regem a presença, movimentação e dispersão da água no planeta. A forma como esses fenômenos se manifestam varia significativamente ao longo do tempo, devido a fatores como mudanças climáticas em escala regional e global, e alterações no uso do solo (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Essas flutuações temporais e/ou espaciais são expressas por meio de variáveis hidrológicas, que podem ser quantificadas por meio de observações ou medições. É crucial considerar que os processos hidrológicos demonstram variação tanto no tempo quanto no espaço ao quantificar essas variáveis (LANNA, 2013). A compreensão dessa dinâmica é fundamental para uma análise precisa e para a aplicação de modelos (TUCCI, 2009).

A variabilidade das variáveis hidrológicas é registrada em séries temporais, que consistem em conjuntos de observações organizados cronologicamente. Uma série temporal pode ser determinística se seus valores futuros puderem ser previstos com exatidão. Por outro lado, se a previsão exata dos valores futuros não for possível, a série é descrita por um modelo não determinístico, onde os valores são previstos com base em leis de probabilidade, caracterizando um modelo estocástico. A análise dessas séries temporais tem como objetivo fazer inferências sobre as características do processo estocástico que está sendo estudado (HIPEL & McLEOD, 1994; NAGHETTINI & PINTO, 2007). Esse tipo de análise é crucial para a gestão de recursos hídricos e para a previsão de eventos extremos (COLLISCHONN & COLLISCHONN, 2008).

3.1.1 Processos Estocásticos

Com base na premissa de que a maioria dos fenômenos hidrológicos é governada por leis de probabilidade, as equações matemáticas utilizadas para descrevê-los são denominadas processos estocásticos (HIPEL & MCLEOD, 1994). O estudo desses processos foca na identificação e interpretação da aleatoriedade

inerente a eles, fazendo uso extensivo de modelos matemáticos para essa finalidade (NAGHETINI & PINTO, 2007).

Esses modelos são classificados em quatro categorias principais: Cadeias de Markov, Equações Diferenciais Estocásticas, Processos Pontuais e Modelos de Séries Temporais. Sendo a classificação com base na natureza do tempo e do espaço de estados, que podem ser discretos ou contínuos (HIPEL & MCLEOD, 1994).

De acordo com a definição de MORETTIN & TOLOI (2004), um processo estocástico pode ser entendido como uma coleção de variáveis aleatórias, definidas em um mesmo espaço de probabilidade, conforme Equação (I). Essa família de variáveis aleatórias evolui ao longo do tempo de maneira não determinística.

$$\boldsymbol{Z} = \{\boldsymbol{Z}(\boldsymbol{t}, \boldsymbol{\omega}), \boldsymbol{t} \in \boldsymbol{T}\};\ \boldsymbol{\omega} \in \boldsymbol{\Omega} \tag{I}$$

Onde:

t: Variável pertencente ao espaço de instantes T;

$\boldsymbol{\omega}$: Evento do espaço de probabilidades Ω;

Ω: Conjunto de todos os resultados possíveis de um experimento aleatório.

Um processo estocástico pode ser interpretado de duas maneiras: como uma coleção de realizações temporais (séries de dados), onde cada realização está associada a um evento aleatório específico, ou como uma função que atribui uma variável aleatória para cada ponto no tempo.

A natureza do conjunto de tempo T determina a classificação do processo. Se T for um conjunto contável, como uma série de observações anuais ou diárias (t = 1, 2, 3, ...), o processo é dito de parâmetro discreto. Por outro lado, se o tempo puder assumir qualquer valor dentro de um intervalo contínuo de números reais, como o registro contínuo do nível de um rio, o processo é classificado como de parâmetro contínuo. Essencialmente, os processos estocásticos podem ser vistos como uma sequência de séries de dados que evoluem no tempo de forma aleatória (TOZZI, 2014; DETZEL, 2015).

Para tornar a análise matemática e a modelagem de um processo estocástico mais tratável, é comum adotar a suposição de estacionariedade (HIPEL & McLEOD, 1994). Um processo é considerado estacionário quando suas propriedades

estatísticas fundamentais permanecem constantes ao longo do tempo. Essa premissa simplifica significativamente a teoria e a aplicação dos modelos, pois implica que o comportamento estatístico do processo é invariante a deslocamentos no tempo.

3.1.2 Estacionariedade e Homogeneidade

A estacionariedade é um conceito que descreve o equilíbrio em um processo estocástico, significando que suas características estatísticas permanecem constantes ao longo do tempo. Um processo estocástico é considerado fortemente estacionário quando a distribuição de suas variáveis aleatórias não é influenciada pelo tempo. Contudo, se os momentos estatísticos da série temporal dependem das diferenças de tempo, e não do momento exato em que os dados foram coletados, o processo é chamado de fracamente estacionário (HIPEL & MCLEOD, 1994).

De acordo com Naghettini e Pinto (2007), a não-estacionariedade pode se manifestar de três formas distintas:

- Saltos: Correspondem a mudanças abruptas em um corpo hídrico, como a construção de uma barragem. Essas alterações repentinas impactam significativamente as características do processo hidrológico (TUCCI, 2009).
- Ciclos: São mais difíceis de identificar e estão relacionados a flutuações climáticas. Podem envolver padrões sazonais ou decadais que influenciam as variáveis hidrológicas.
- Tendências: Estão associadas a modificações graduais que ocorrem em uma bacia, como um processo de urbanização crescente. Essas mudanças lentas e contínuas afetam progressivamente o comportamento hidrológico (COLLISCHONN & COLLISCHONN, 2008).

Outra característica crucial na análise estatística é a homogeneidade, que pressupõe que todos os dados de uma amostra derivam de uma única população. Em séries hidrológicas, a diferenciação entre populações pode ser explicada pelo mecanismo de sua formação. Por exemplo, uma série de vazões máximas pode incluir valores resultantes de chuvas comuns e de precipitações intensas provocadas por fenômenos como o El Niño. A heterogeneidade de uma amostra hidrológica é mais facilmente detectada ao se analisar séries de dados mais longas (NAGHETTINI & PINTO, 2007). A detecção da heterogeneidade é fundamental para evitar erros na modelagem e previsão hidrológica.

3.1.3 Tendências em Séries Hidrológicas

A checagem da estacionariedade em séries hidrológicas é feita por meio de testes de hipóteses. Essas são ferramentas estatísticas criadas para verificar suposições sobre dados coletados. Nesses testes, formula-se uma hipótese nula (H_0), que será testada. Se essa hipótese for rejeitada, então a hipótese alternativa (H_1) é considerada verdadeira (TRÖGER & PANTE, 2009).

Os testes de hipóteses podem ser classificados em duas categorias principais: paramétricos e não-paramétricos. Os testes paramétricos exigem que a maioria dos parâmetros seja especificada. Por isso, são mais adequados para situações em que já se conhece a distribuição que melhor representa os dados, como a distribuição normal. Eles realizam inferências sobre as propriedades estatísticas das séries, como médias e variâncias (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Os testes não-paramétricos, conhecidos também como "testes livres de distribuição", não demandam suposições tão rígidas sobre a distribuição dos dados analisados. Matematicamente mais simples, são ideais para analisar informações de populações diversas. Os testes não-paramétricos são usados para identificar tendências nas séries, independentemente de seus momentos estatísticos (FÁVERO et al., 2009; DETZEL et al., 2011). Estes são especialmente usados quando os dados não seguem uma distribuição normal ou quando o tamanho da amostra é pequeno.

3.1.3.1 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt é um método não-paramétrico que emprega a estatística de Mann-Whitney para determinar se duas amostras provêm da mesma população (PETTITT, 1979). A métrica do teste é obtida através das Equações (II) e (III):

$$\boldsymbol{U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^{N} sgn(x_t - x_j)\ para\ t = 2, 3, \dots, N} \qquad \text{(II)}$$

$$\boldsymbol{sgn = (x)\begin{cases} 1; se\ x > 0 \\ 0; se\ x = 0 \\ -1; se\ x < 0 \end{cases}} \qquad \text{(III)}$$

A premissa fundamental, ou hipótese nula (H_0), desse teste é que não há um ponto de mudança na série de dados. O ponto de mudança t que é considerado estatisticamente significativo é aquele onde o valor absoluto da estatística $|\mathrm{Ut,N}|$ atinge seu máximo, o que é representado por k(t), conforme apresentado na Equação (IV). Isso significa que, nesse ponto, a probabilidade de as duas partes da série serem de populações diferentes é a mais alta.

$$\boldsymbol{k_{(t)} = máx_{1 \le t \le N} \left| U_{t,N} \right|} \qquad \text{(IV)}$$

O nível de significância do teste é calculado a partir da Equação (V):

$$\boldsymbol{P = 2e\left[\frac{-6(K_N)^2}{(N^3 + N^2)}\right]} \qquad \text{(V)}$$

Onde

P: Nível de significância;

K_N: Valor crítico;

N: n° de anos da série histórica.

3.1.3.2 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall, categorizado como não-paramétrico, opera com a série de dados completa, sem subdivisões. Sua finalidade é determinar se a série de dados exibe uma tendência temporal estatisticamente significativa. Este método envolve a decisão de rejeitar ou não a hipótese nula (H_0), utilizando um nível de significância (α) predefinido. A premissa fundamental é que qualquer elemento selecionado aleatoriamente da série provém de uma única população (WAGESHO et al., 2012; SALVIANO et al., 2016) A variável estatística S é calculada conforme as Equações (VI) e (VII).

$$\boldsymbol{S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i)} \qquad \text{(VI)}$$

Onde:

sgn: Sinais;

x_j: Valores futuros da série;

x_i: Valores da série.

$$\boldsymbol{sgn(x_j - x_i)} = \begin{cases} \boldsymbol{+1; se\ x_j > x_i} \\ \boldsymbol{0; se\ x_j = x_i} \\ \boldsymbol{-1; se\ x_j < x_i} \end{cases} \quad \text{(VII)}$$

Quando n ≥ 10, S pode ser comparada com uma distribuição normal, sendo a sua variância obtida pela Equação (VIII):

$$\boldsymbol{Var\ (S)} = \frac{\boldsymbol{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n} t_i(i)(i-1)(2i+5)}}{\boldsymbol{18}} \quad \text{(VIII)}$$

Onde:

t_i: quantidade de repetições de uma extensão i.

O índice Z_{MK} é calculado com base no sinal de S, conforme detalhado na Equação (VII). Este índice segue uma distribuição normal. Valores positivos de Z_{MK} indicam uma tendência crescente, enquanto valores negativos apontam para uma tendência decrescente (WAGESHO et al., 2012; SALVIANO et al., 2015). O cálculo do índice Z_{MK} para a distribuição normal é realizado através da Equação (IX).

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}; para\ S > 0} \\ \boldsymbol{Z_{MK} = 0; para\ S = 0} \\ \boldsymbol{Z_{MK} = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}}; para\ S > 0} \end{cases} \quad \text{(IX)}$$

Como se trata de um teste bicaudal, para rejeitar a hipótese nula (H_0), o valor absoluto de Z_{MK} deve ser maior que $Z_{\alpha}/2$. Isso significa que a evidência contra a hipótese nula é forte o suficiente para sugerir que existe uma tendência real na série de dados (GOCIC & TRAJKOVIC, 2013).

3.2 ALTERAÇÃO NO USO DO SOLO

O comportamento hidrológico de uma bacia é moldado por modificações em sua cobertura vegetal, sejam elas resultado de ações humanas ou de processos naturais, conforme observaram Tucci & Clarke (1997). A alteração da vegetação impacta diretamente a resposta de escoamento da bacia, desequilibrando a relação entre a precipitação e a evaporação (COSTA et al., 2003).

A formação do escoamento e sua subsequente divisão em superficial, subsuperficial e subterrâneo são influenciadas pelo tipo de solo e sua cobertura. Áreas florestadas, por exemplo, demonstram alta capacidade de infiltração e interceptação, o que reduz significativamente o escoamento superficial. Por outro lado, solos desprotegidos tendem a sofrer compactação, diminuindo sua capacidade de infiltração (TUCCI & CLARKE, 1997).

O crescimento urbano desordenado é uma das consequências do desenvolvimento e aumento da urbanização, gerando diversos impactos nas bacias hidrográficas. As alterações realizadas pelo homem modificam componentes do ciclo hidrológico local, especialmente a capacidade de infiltração do solo e a produção de escoamento superficial (SOUZA et al., 2017).

As mudanças na cobertura do solo e as variações climáticas são os principais fatores que causam alterações hidrológicas nas bacias, podendo afetar de forma significativa o fluxo da água, modificando seu padrão, magnitude, frequência e qualidade (BETHLAHMY, 1974; CHENG, 1989; MOORE & WONDZELL, 2005; CUI et al., 2012). Os impactos dessas alterações na superfície da bacia são, na maioria dos casos, analisados em relação aos seus efeitos no comportamento de enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média (TUCCI & CLARKE, 1997). De acordo com Santos et al. (2016), a alteração da cobertura vegetal em uma bacia pode levar à não estacionariedade em séries de vazões, o que significa que as características estatísticas do fluxo de água mudam ao longo do tempo.

Diversos estudos ao redor do mundo investigaram a influência da cobertura vegetal no comportamento hidrológico de bacias. Autores como Bosch & Hewlett (1982), Cui & Wei (2012) e Zhao et al. (2012) afirmam que a remoção da vegetação resulta no aumento da vazão média de longo prazo. Além disso, pesquisadores como Hsia & Koh (1983), Adnan & Atkinson (2010) e He et al. (2013) correlacionaram a não estacionariedade em séries históricas de vazões com as modificações no uso do solo.

No contexto brasileiro, Costa et al. (2003) conduziram um estudo na Bacia do Alto Tocantins e concluíram que o aumento das vazões durante o período chuvoso foi uma consequência da redução da infiltração, causada pela alteração no uso e cobertura do solo. COE et al. (2011) associaram o aumento das vazões em uma bacia hidrográfica do Rio Araguaia, no centro-leste do Brasil, ao desmatamento em conjunto com a variabilidade climática. Da mesma forma, Santos et al. (2016), em uma pesquisa na bacia do Rio Pardo, também atribuíram o aumento das vazões à substituição da vegetação natural por pastagens.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica Ilha Solteira está localizada no rio Paraná, na divisa entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Inaugurada em 1978, a usina possui uma potência instalada de aproximadamente 3.444 MW, com 20 turbinas do tipo Francis. O reservatório formado possui um volume de aproximadamente 21 bilhões de m³, sendo um dos maiores do Brasil (CTG, 2024). A localização da usina está apresentada na Figura 1. Esta barragem foi escolhida a sua importância para a região.

Figura 1 – Localização da UHE Ilha Solteira



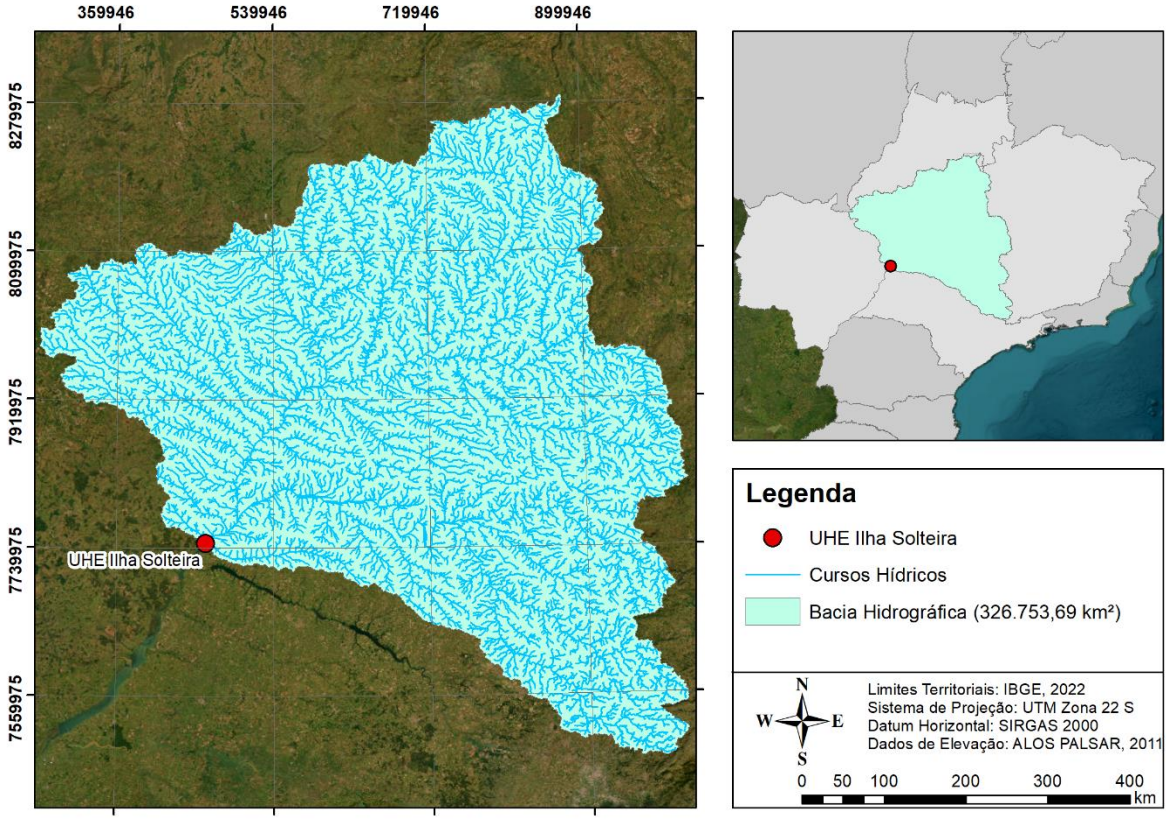
Fonte: Google Earth (2025).
Legenda: Imagem de satélite indicando a localização da UHE Ilha Solteira e da cidade de Ilha Solteira.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira foi delimitada com o uso do *Software* QGIS 3.42.3, conforme ilustrado na Figura 2, também é possível observar que a bacia abrange vários estados brasileiros e engloba outras barragens dentro de sua bacia hidrográfica. Sua caracterização baseou-se na análise de

informações fisiográficas, que permitiram descrever suas principais características. Para este estudo, foram considerados os seguintes parâmetros: área e perímetro da bacia, extensão do curso d'água principal, tempo de concentração, declividade média e aspectos relacionados ao uso e ocupação do solo.

Figura 2 – Bacia Hidrográfica da UHE Ilha Solteira



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de localização da Bacia Hidrográfica e sua drenagem, com destaque para a Usina Hidrelétrica (UHE) Ilha Solteira.

A extensão territorial de uma bacia (A) é um de seus atributos mais significativos, dado que ela indica o potencial volume total de água que pode ser produzido em seu interior. O perímetro (P), por sua vez, corresponde ao comprimento total da linha de divisa das águas que delimita e contorna a bacia hidrográfica. Esses indicadores, juntamente com a declividade média da bacia (S), foram calculados utilizando recursos disponíveis no *Software* QGIS 3.42.3.

O tempo de concentração (Tc) representa o período que a água da chuva leva para percorrer desde o ponto mais afastado da bacia até a sua saída (exutório). Para determinar o Tc, empregou-se o método de Kirpich (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013), de acordo com a Equação (X).

$$tc = 57 \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad \text{(X)}$$

Onde:

Tc: Tempo de concentração (min);

L: Comprimento do Talvegue (km);

∆h: Diferença de altitude ao longo do talvegue (m).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE PRECIPITAÇÃO

A análise do regime pluviométrico da bacia que contribui para a Usina Hidrelétrica Ilha Solteira foi conduzida com base em séries históricas de precipitação obtidas por meio do portal Hidroweb, mantido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Foram escolhidas dez estações pluviométricas situadas dentro da bacia em questão, considerando como critério principal a extensão do período de monitoramento e a menor incidência de lacunas nos dados. As informações detalhadas sobre essas estações estão organizadas na Tabela 1, enquanto a Figura 3 ilustra sua localização geográfica na bacia de estudo.

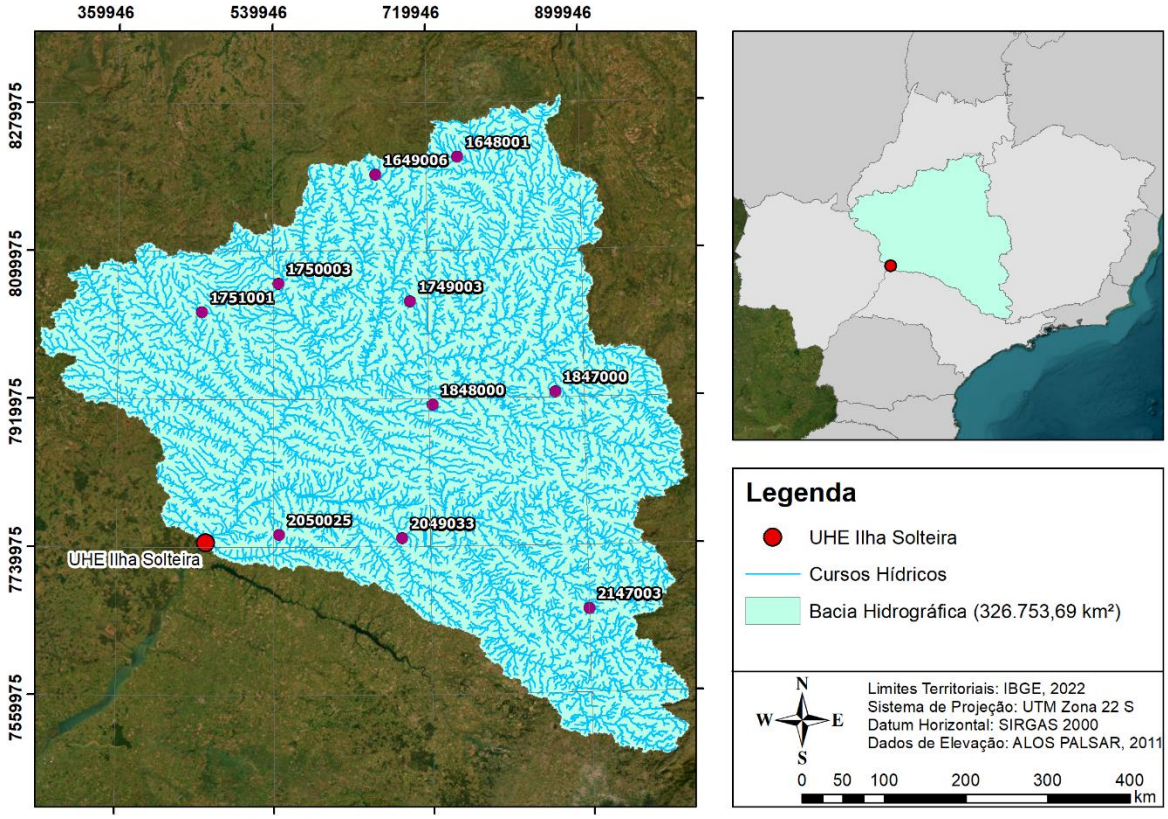
Tabela 1 – Características dos Postos Pluviométricos

Código	Nome	Município	Latitude	Longitude	Período de observação
1848000	Monte Alegre de Minas	Monte Alegre de Minas	-18.8722	-48.8694	1941-2024
2049033	ICEM (Usina Marimbondo)	ICEM	-20.3333	-49.2000	1936-2020
2147003	Santo Antônio da Alegria	Santo Antônio da Alegria	-21.1000	-47.1500	1936-2020
1649006	Inhumas	Inhumas	-16.3467	-49.4950	1947-2024
1749003	Morrinhos	Morrinhos	-17.7328	-49.1153	1973-2024
1847000	Monte Carmelo	Monte Carmelo	-18.7206	-47.5244	1941-2024
1648001	Ponte Anápolis - Brasília	Alexânia	-16.1431	-48.6000	1967-2024
1750003	Ponte Rio Verdão	Acreúna	-17.5414	-50.5561	1971-2024

1751001	Ponte Rio Doce	Jataí	-17.8564	-51.3967	1971-2024
2050025	Jales	Jales	-20.3000	-50.5500	1959-2023

Fonte: Adaptado de Hidroweb (2025).

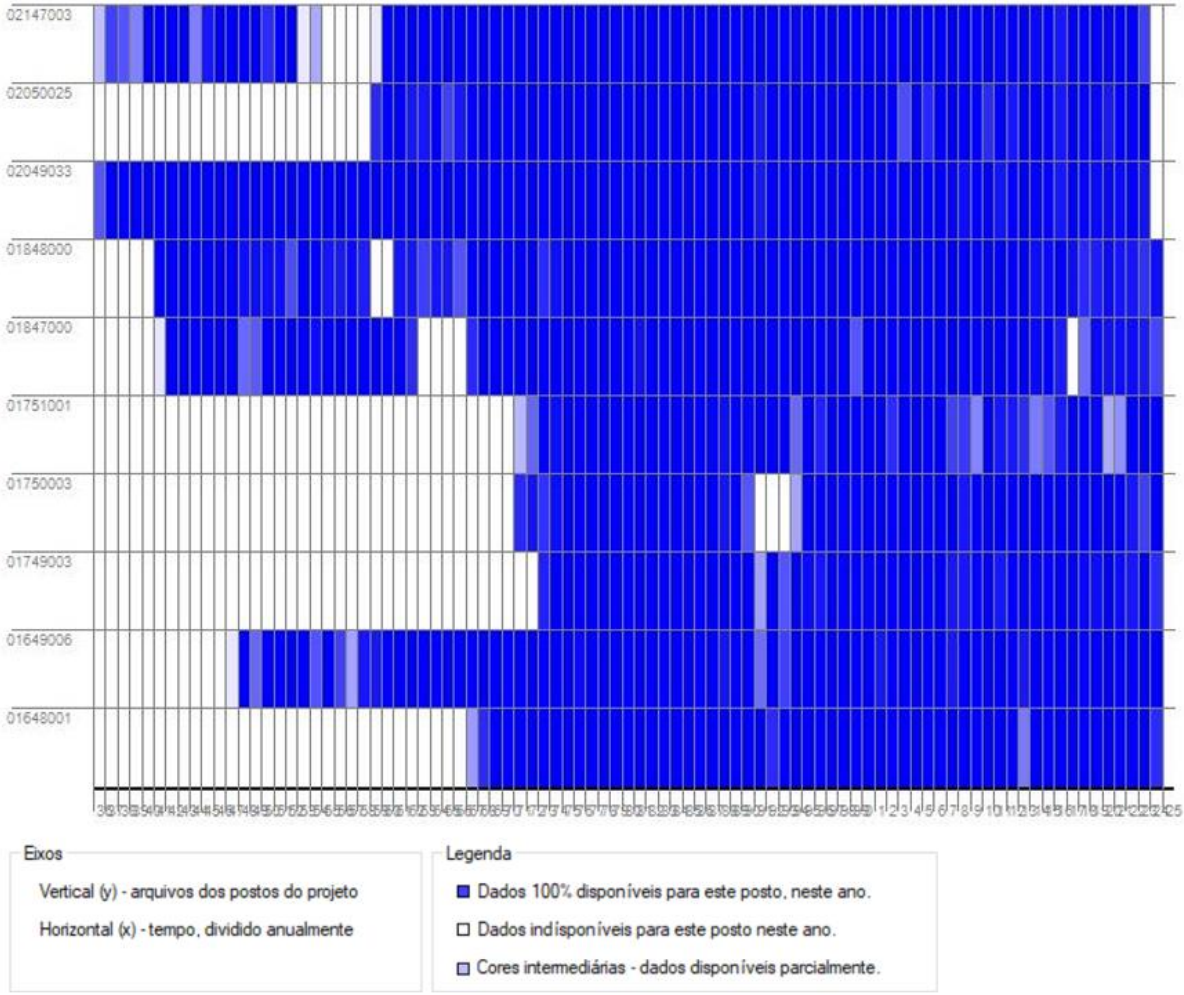
Figura 3 – Localização das estações pluviométricas na bacia de contribuição da UHE Ilha Solteira



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de localização dos postos pluviométricos utilizados no estudo.

Para verificar a continuidade e a cobertura temporal das séries, utilizou-se o software Super Manejo de Dados, a partir do qual foi possível gerar gráficos de disponibilidade, apresentados na Figura 4.

Figura 4 – Gráfico das disponibilidades temporais das estações selecionadas



Fonte: Super Manejo de Dados (2025).
Legenda: Gráfico de disponibilidade das estações, sendo cada linha representada por um posto pluviométrico.

Para o preenchimento das falhas foi utilizado o Método da Ponderação Regional (BERTONI & TUCCI, 2013), conforme Equação (XI).

$$\boldsymbol{PY = \frac{1}{n}\left(\frac{P_{X1}}{Xm_1} + \frac{P_{X2}}{Xm_2}\right)Ym} \qquad \text{(XI)}$$

Onde:

PY: Precipitação estimada em Y no intervalo que apresenta falha;

n: Número de postos;

Ym: Precipitação média do posto Y;

X_{m1} e X_{m2}: Médias dos postos X;

P_{x1} e P_{x2}: Precipitações dos postos X1 e X2 no intervalo de tempo em que Y apresenta falha.

A precipitação média da bacia foi determinada utilizando o Método de Thiessen (BERTONI & TUCCI, 2013), cujo cálculo seguiu a Equação (XII). As áreas de influência de cada posto foram geradas com o auxílio do *Software* QGIS 3.42.3.

$$\boldsymbol{Pm = \frac{1}{A} \sum A_i P_i} \qquad \text{(XII)}$$

Onde:

Pm: Precipitação média da bacia (mm);

A: Área total da bacia;

A_i: Área de influência do posto i;

P_i: Precipitação registrada no posto i.

4.4 VAZÕES AFLUENTES

As séries de vazões afluentes à UHE Ilha Solteira foram obtidas através da ANA. Os dados de vazões mensais utilizados no presente estudo são referentes ao período de 1963 a 2024. Os mesmos foram organizados em uma planilha do Excel para posterior análise estatística.

4.5 APLICAÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS

Para a verificação da estacionariedade e homogeneidade das séries hidrológicas foram utilizados dois testes estatísticos: Mann-Kendall e Pettitt. As equações dos testes foram apresentadas anteriormente na revisão da literatura. Os testes foram aplicados considerando um nível de significância de 5%.

Utilizando os registros históricos de vazões médias anuais e de totais pluviométricos anuais, foi realizada uma análise para avaliar a estacionariedade e a homogeneidade das séries. A investigação foi conduzida por meio da segmentação dos dados em três períodos distintos.

A literatura especializada, incluindo trabalhos de autores como Genta et al. (1998), Müller et al. (1998), Guetter & Prates (2002) e Batista et al. (2009), já apontava para uma alteração significativa no regime de afluências a partir da década de 1970. No entanto, para a precipitação, o ano adotado para o ponto de corte da precipitação

foi 1970 e para a série de vazão, foi 1981, ambos valores resultantes do teste de Pettitt. Na Tabela 2 abaixo estão apresentados os intervalos considerados para cada série.

Tabela 2 – Intervalos considerados para o teste de Mann-Kendall

	Série de Precipitação	**Série de Vazão**
Intervalo 1	1942-2024	1963-2024
Intervalo 2	1942-1970	1963-1981
Intervalo 3	1971-2024	1982-2024

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.6 ALTERAÇÃO NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Com o objetivo de avaliar as mudanças na ocupação do solo na bacia hidrográfica da Usina Hidrelétrica (UHE) Ilha Solteira, foram empregados os dados do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura do Solo do Brasil (MapBiomas, 2023). Utilizando o *Software* QGIS 3.42.3, foram processados os mapas de uso e ocupação do Brasil. Esses mapas são gerados a partir da classificação de imagens de satélite Landsat, resultando em um formato matricial com resolução de 30x30 metros por pixel.

Para permitir uma análise integrada e correlacionar os fenômenos, os anos selecionados para o estudo da alteração do uso do solo foram alinhados à disponibilidade dos dados hidrológicos, focando nos levantamentos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023.

4.7 SOFTWARES UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho, foram empregados diversos softwares com finalidades específicas ao longo das etapas de coleta, tratamento, análise e visualização dos dados.

A plataforma Hidroweb, mantida pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), foi utilizada como fonte para a obtenção dos dados pluviométricos históricos dos postos selecionados na área de estudo. A escolha por essa plataforma se deu pela confiabilidade, abrangência e disponibilidade pública dos dados hidrológicos.

Após a coleta, os dados foram submetidos a uma etapa de verificação e organização por meio do software SuperManejo de Dados, o qual permitiu a identificação e o tratamento de inconsistências, como falhas e valores extremos, além da uniformização das séries temporais.

As análises estatísticas e os testes aplicados nas séries de foram realizados utilizando a linguagem de programação Python. Essa etapa envolveu a aplicação de testes de tendência, homogeneidade e consistência, conforme os objetivos do estudo.

Por fim, a elaboração dos mapas e representações espaciais dos dados foi feita no software QGIS. O QGIS possibilitou a visualização espacial dos postos pluviométricos, bem como a delimitação da área de estudo e a geração de mapas interpretativos para apoio às análises.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Na Tabela 3 abaixo estão apresentadas as características fisiográficas para a bacia hidrográfica afluente à UHE Ilha Solteira.

Tabela 3 – Características Fisiográficas da Bacia

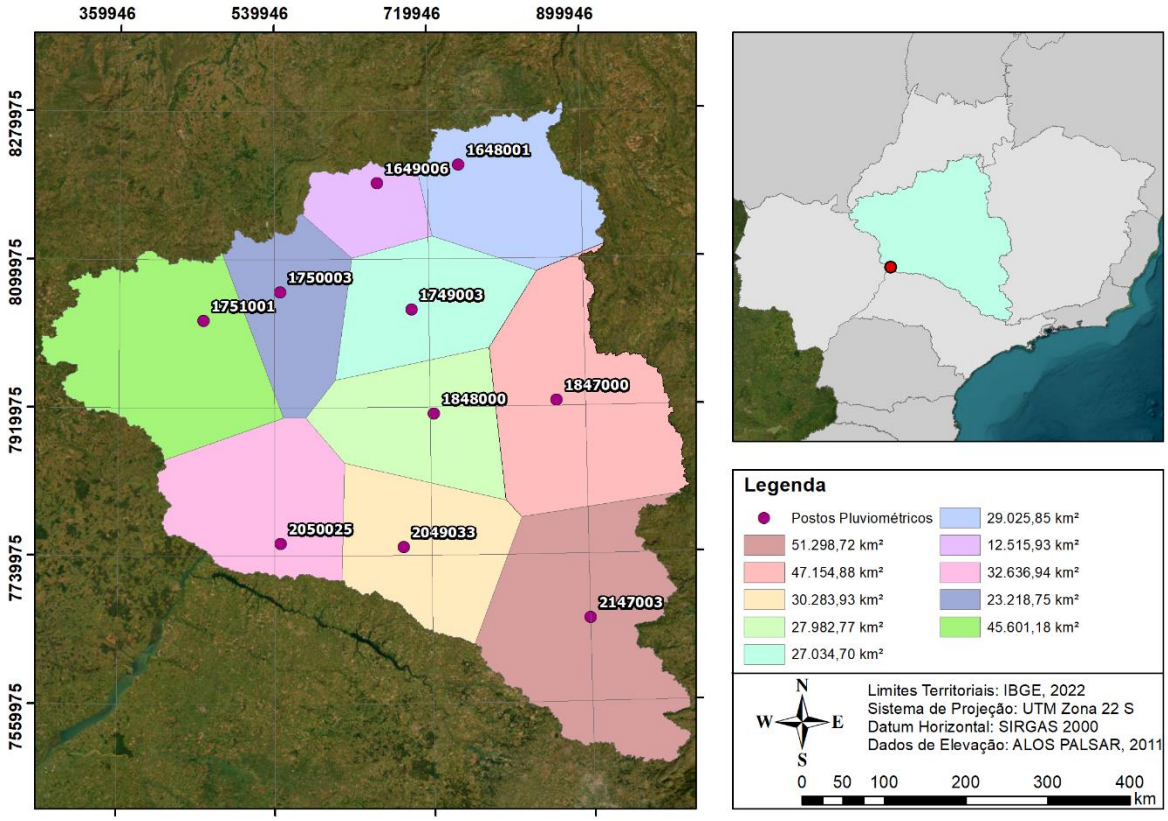
Características Fisiográficas	**Resultados**
Área de drenagem (km²)	326.753,69
Perímetro (km)	4.468,22
Comprimento do talvegue (km)	1.025,87
Declividade média (m/km)	1,627
Tempo de concentração (h)	164

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE PRECIPITAÇÃO

Na Figura 5 estão apresentadas as áreas de influência de cada posto pluviométrico, utilizadas para o cálculo da precipitação média da bacia.

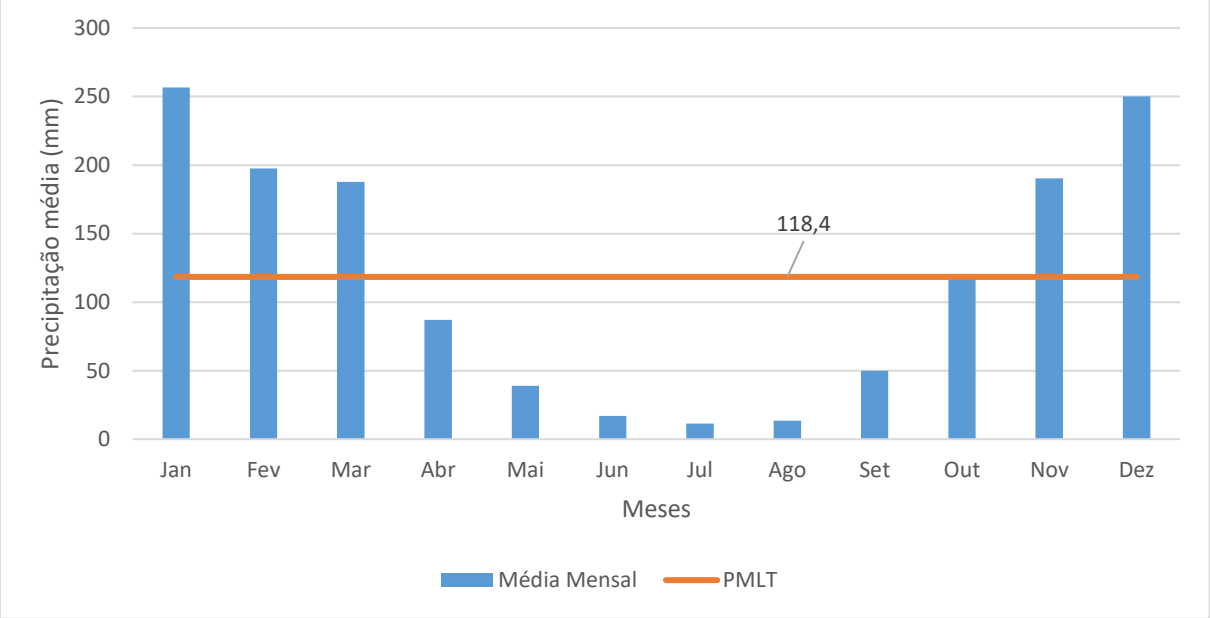
Figura 5 – Mapa de área influência dos postos pluviométricos selecionados



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Divisão das áreas de influência de cada estação utilizada.

Conforme ilustrado na Figura 6, a precipitação média mensal da bacia revela que janeiro se destaca como o mês mais chuvoso, com um valor médio de 256,70 mm. Em seguida, aparecem os meses de dezembro, fevereiro, novembro e março, com médias de 250,00 mm, 197,65 mm, 190,29 e 187,63 mm, respectivamente.

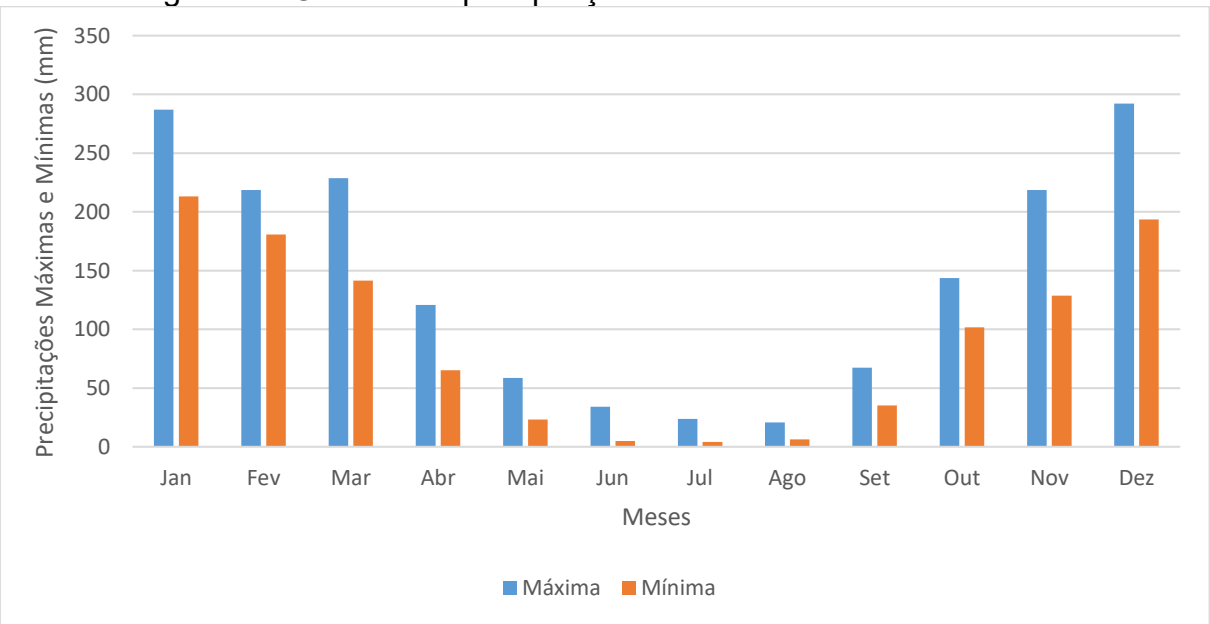
Figura 6 – Gráfico da precipitação média mensal



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Precipitação média mensal da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira, com a linha laranja representando a precipitação média de longo termo.

As precipitações máximas e mínimas mensais estão apresentadas no gráfico da Figura 7. Os meses de dezembro e janeiro possuem os maiores valores de precipitação máxima, sendo, respectivamente, 292,25 mm e 287,09 mm. Em relação as mínimas mensais os meses de julho e junho apresentam os menores valores, sendo eles 4,13 mm e 4,96 mm, respectivamente.

Figura 7 – Gráfico das precipitações mínimas e máximas mensais



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Precipitações mínimas e máximas mensais da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira.

5.3 APLICAÇÃO DOS TESTES ESTATÍSTICOS

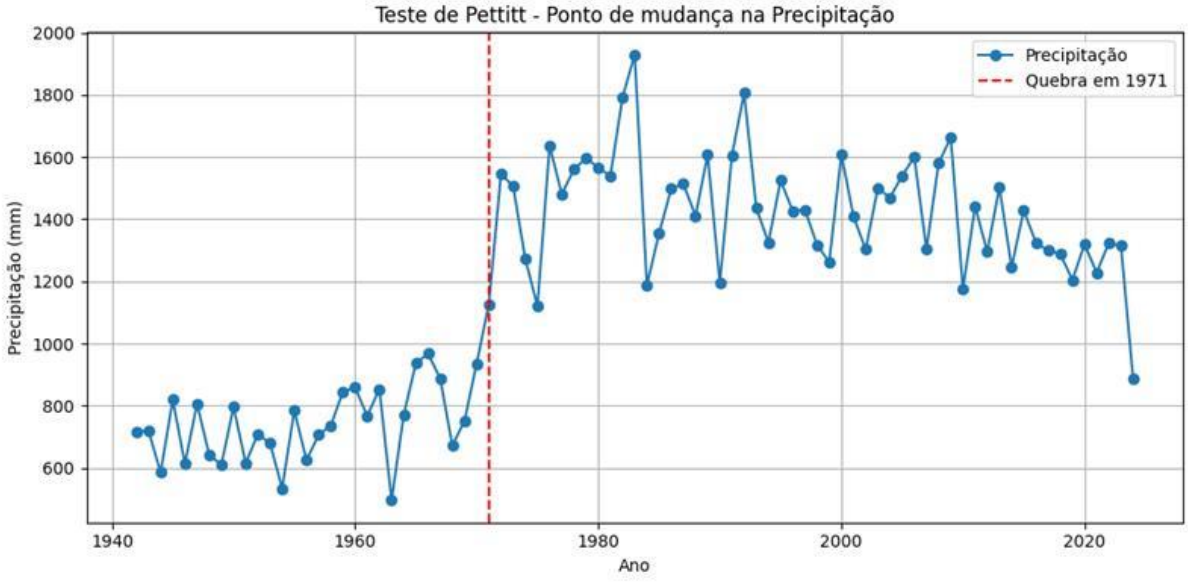
Neste capítulo são expostos os resultados obtidos a partir da aplicação dos dois testes estatísticos às séries hidrológicas analisadas.

Os testes foram avaliados com base nos respectivos valores de p. No caso do teste bilateral, esse valor indica a probabilidade de que uma estatística menor ou maior que a observada tenha sido obtida a partir da mesma população, sob a suposição de validade da hipótese nula. Como essa hipótese assume que as séries são estacionárias, valores de p mais baixos indicam maior evidência contra a estacionariedade (DETZEL et al., 2011).

5.3.1 Série de Precipitações

Para identificação do ponto de mudança nos dados de precipitações totais anuais da bacia, obtidas a partir da média encontrada pelo método de Thiessen, foi utilizado o teste de Pettitt, cujo resultado está apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Ponto de mudança da série de precipitações totais anuais



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Destacado o ano em que se teve mudança na série de precipitações totais anuais através do teste de Pettitt.

O teste de Pettitt mostrou que o ponto de mudança na série de totais anuais ocorreu no ano de 1971 ($p < 0,001$). No gráfico da Figura 8 verifica-se a diferença da tendência para o período antes e após o ponto de mudança indicado pelo teste.

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do teste de Mann-Kendall para cada intervalo.

Tabela 4 – Resultados teste de Mann-Kendall precipitação

Intervalo	p-valor	Tendência	Resultado
Intervalo 1	0,0001	Crescente	Não estacionária
Intervalo 2	0,017	Crescente	Não estacionária
Intervalo 3	0,009	Decrescente	Não estacionária

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

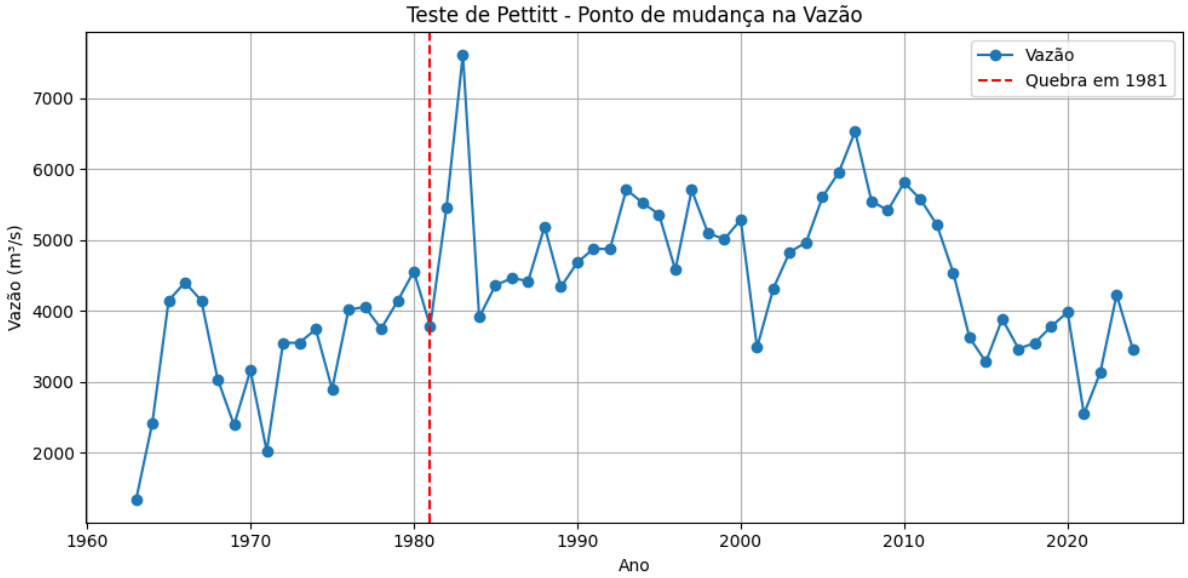
Para todos os intervalos considerados os p-valores obtidos foram bem baixos, possuindo indícios significativos de não-estacionariedade. Na análise de séries hidrológicas, as vezes há a ocorrência de mudanças abruptas nas médias, caracterizando uma heterogeneidade da série (BUISHAND, 1984).

A tendência observada para os intervalos 1 e 2 é de que a série é crescente e para o intervalo 3, a série é decrescente, confirmando o indício de não estacionariedade das séries. Groppo et al. (2005) identificaram uma tendência crescente nas séries de precipitação ao analisarem bacias hidrográficas localizadas no estado de São Paulo, considerando o período de 1947 a 1997. De forma semelhante, Pinheiro et al. (2013), em pesquisa conduzida na região Sul do Brasil, também observaram tendência positiva nos dados de precipitação, além de um aumento nos totais mensais e anuais em grande parte das estações avaliadas. Por outro lado, Rosin et al. (2015) constataram tendências fracas ou pouco significativas nas séries históricas de precipitação do estado de Mato Grosso. Já outros estudos não encontraram evidências de tendência nos dados pluviométricos analisados, como os realizados por Marengo e Alves (2005), Alexandre et al. (2010), Blain (2010) e Alcantara et al. (2019).

5.3.2 Série de Vazões

Para identificação do ponto de mudança nos dados de vazão média anual, referentes ao período de 1963 a 2024, foi utilizado o teste de Pettitt, cujo resultado está apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Ponto de mudança da série de vazões médias anuais



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Destacado o ano em que se teve mudança na série de vazões médias anuais através do teste de Pettitt.

O teste de Pettitt mostrou que o ponto de mudança na série de totais anuais ocorreu no ano de 1981 ($p < 0,001$). No gráfico da Figura 9 verifica-se a diferença da tendência para o período antes e após o ponto de mudança indicado pelo teste.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados obtidos com a aplicação do teste de Mann-Kendall para cada intervalo.

Tabela 5 – Resultados teste de Mann-Kendall vazão

Intervalo	p-valor	Tendência	Resultado
Intervalo 1	0,0246	Crescente	Não estacionária
Intervalo 2	0,0589	Sem tendência	Estacionária
Intervalo 3	0,019	Decrescente	Não estacionária

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O teste aplicado permite concluir que a série completa de dados e o intervalo 3 apresentam indícios de não estacionariedade, considerando que os p-valores obtidos

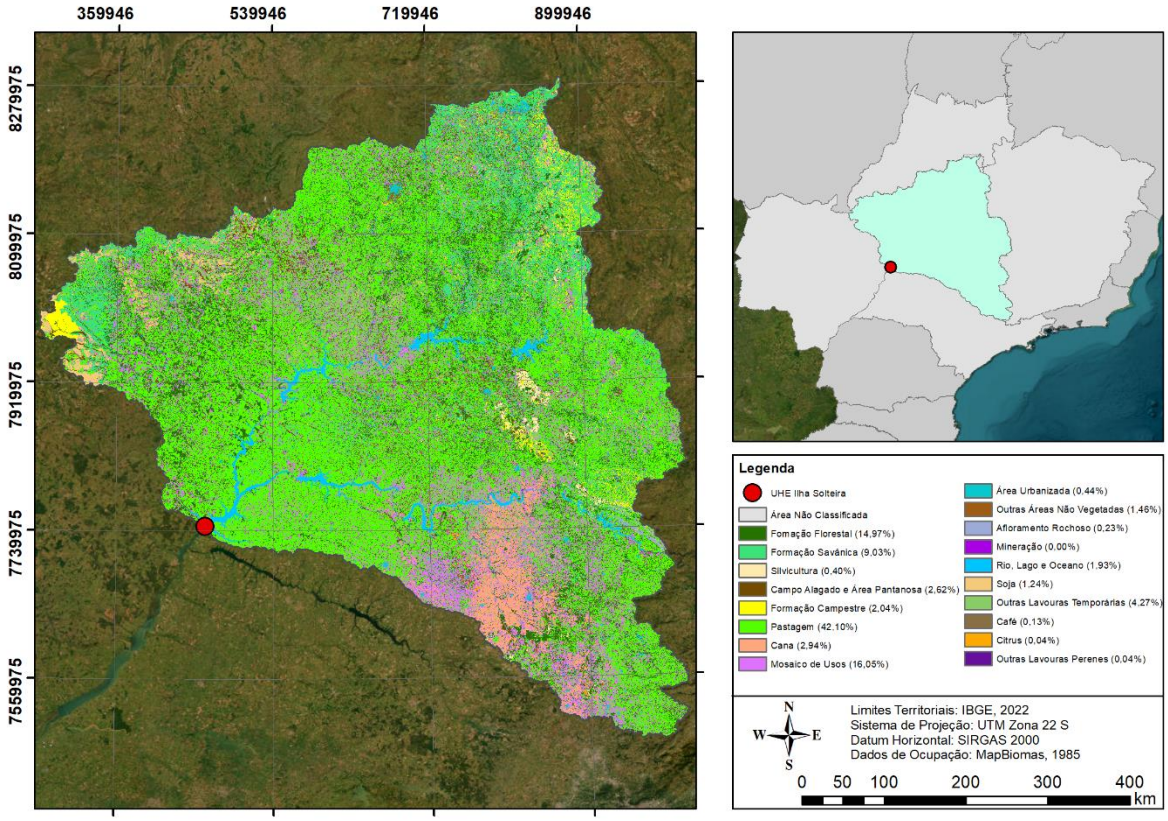
foram baixos. O período 2 apresentou um p-valor maior que os demais e não apresentou tendência, caracterizando o intervalo como estacionário. No entanto, resultados obtidos na análise de períodos mais curtos podem apresentar características tendenciosas (BATISTA et al., 2009).

Pesquisas conduzidas na América do Sul (Genta et al., 1997; Moraes et al., 1997; Müller et al., 1998; Guetter e Prates, 2002; Sáfadi, 2004, entre outros) identificaram variações nas afluências, tanto aumentos quanto reduções, em diferentes regiões. A maioria desses estudos aponta que as mudanças se tornaram perceptíveis principalmente a partir da década de 1970.

5.4 ALTERAÇÃO DO USO DO SOLO E DADOS MENSAIS

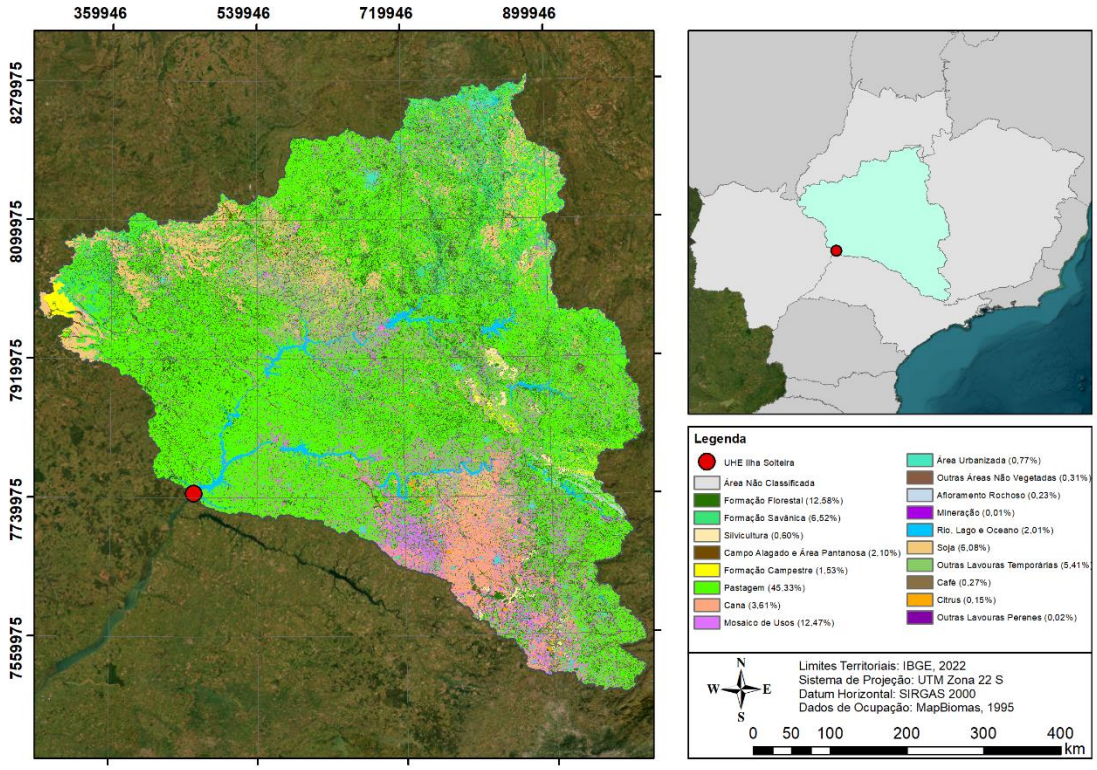
Nas Figuras 10 a 14 estão apresentados os mapas do uso e ocupação do solo da bacia, para os anos de 1985, 1995, 2005, 2015 e 2023, respectivamente.

Figura 10 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 1985



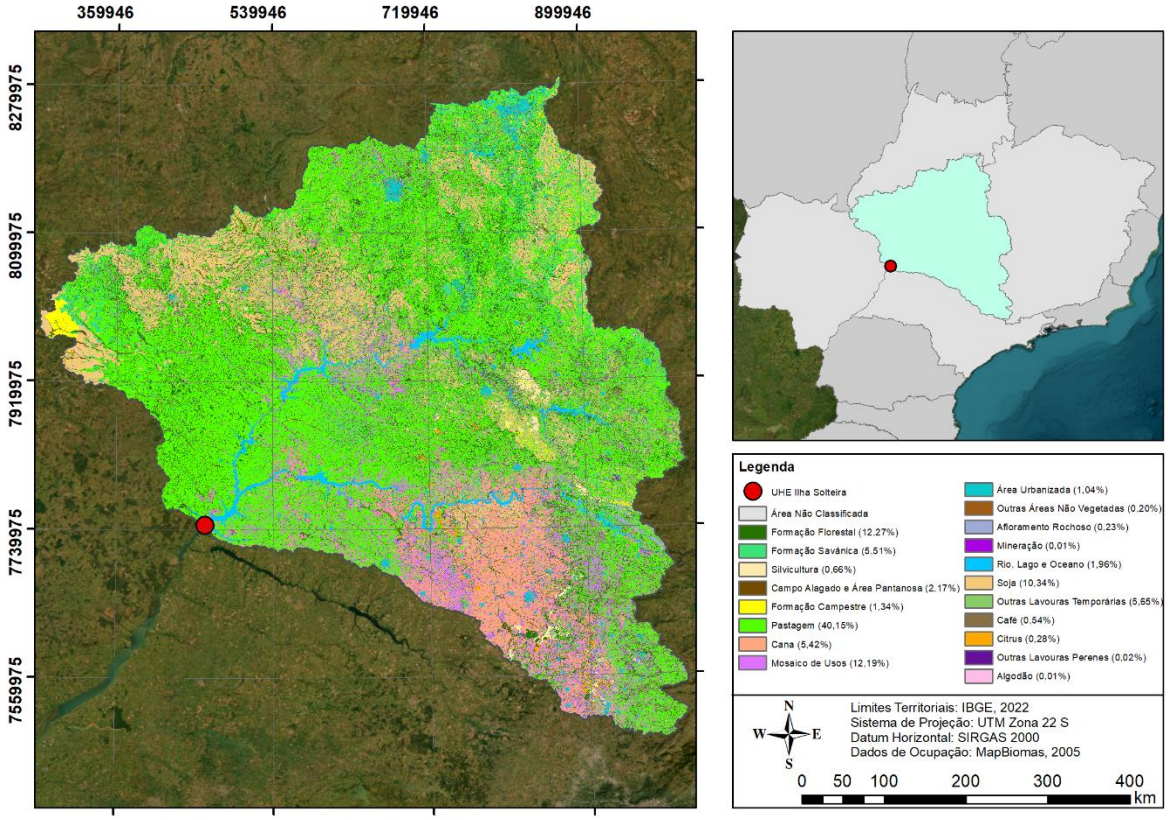
Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de uso e ocupação do solo dividido em classes com base na Coleção 9 do MapBiomas.

Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 1995



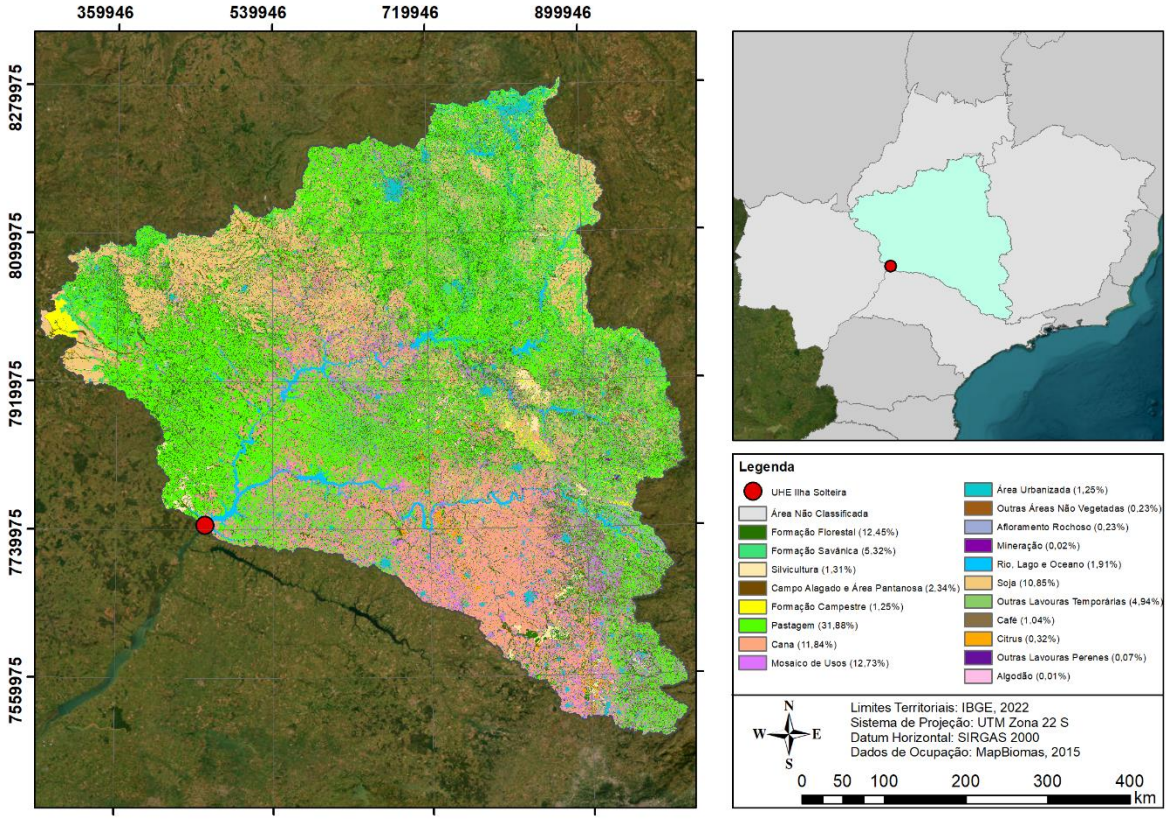
Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de uso e ocupação do solo dividido em classes com base na Coleção 9 do MapBiomas.

Figura 12 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2005



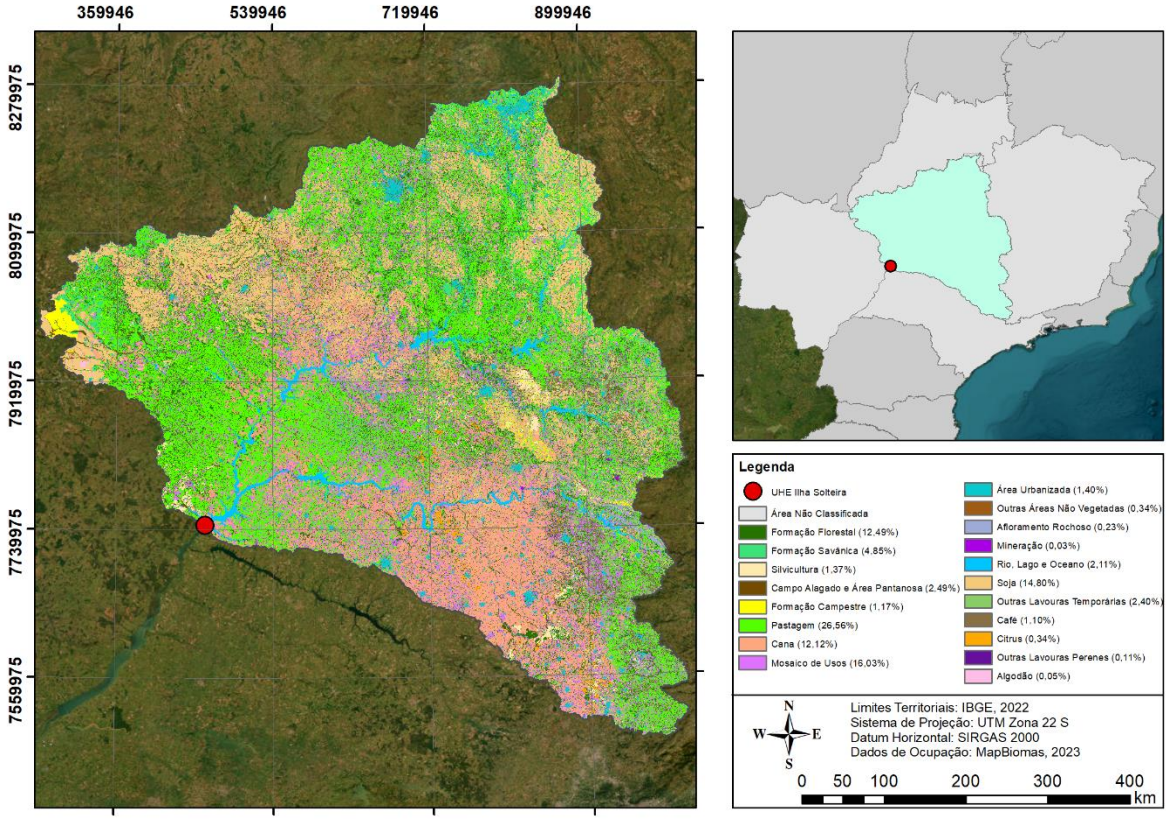
Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de uso e ocupação do solo dividido em classes com base na Coleção 9 do MapBiomas.

Figura 13 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2015



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de uso e ocupação do solo dividido em classes com base na Coleção 9 do MapBiomas.

Figura 14 – Mapa de uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira para o ano de 2023



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: Mapa de uso e ocupação do solo dividido em classes com base na Coleção 9 do MapBiomas.

Na Tabela 6 são organizadas as subclasses apresentadas no mapa em categorias mais amplas, com o objetivo de facilitar a compreensão e a análise das variações nos resultados.

Tabela 6 – Classificação geral das subclasses representadas nos mapas

Subclasses	**Classe**
Silvicultura	Agropecuária
Pastagem	
Cana	
Mosaico de Usos	
Soja	
Outras Lavouras Temporárias	
Café	
Citrus	
Outras Lavouras Perenes	
Algodão	
Formação Florestal	

Formação Savânica	Floresta
Campo Alagado e Área Pantanosa	
Formação Campestre	Formação Natural Não Florestal
Afloramento Rochoso	
Área Urbanizada	Área Não Vegetada
Outras Áreas Não Vegetadas	
Mineração	
Rio, Lago e Oceano	Corpo D'água
Área não classificada	Área não classificada

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 7 estão apresentadas as porcentagens e áreas, em km², do uso e ocupação do solo para os respectivos anos, seguindo as classes da Tabela 6. As porcentagens de área não classificadas foram menores que 0% para todos os casos, portanto, não serão apresentadas na tabela.

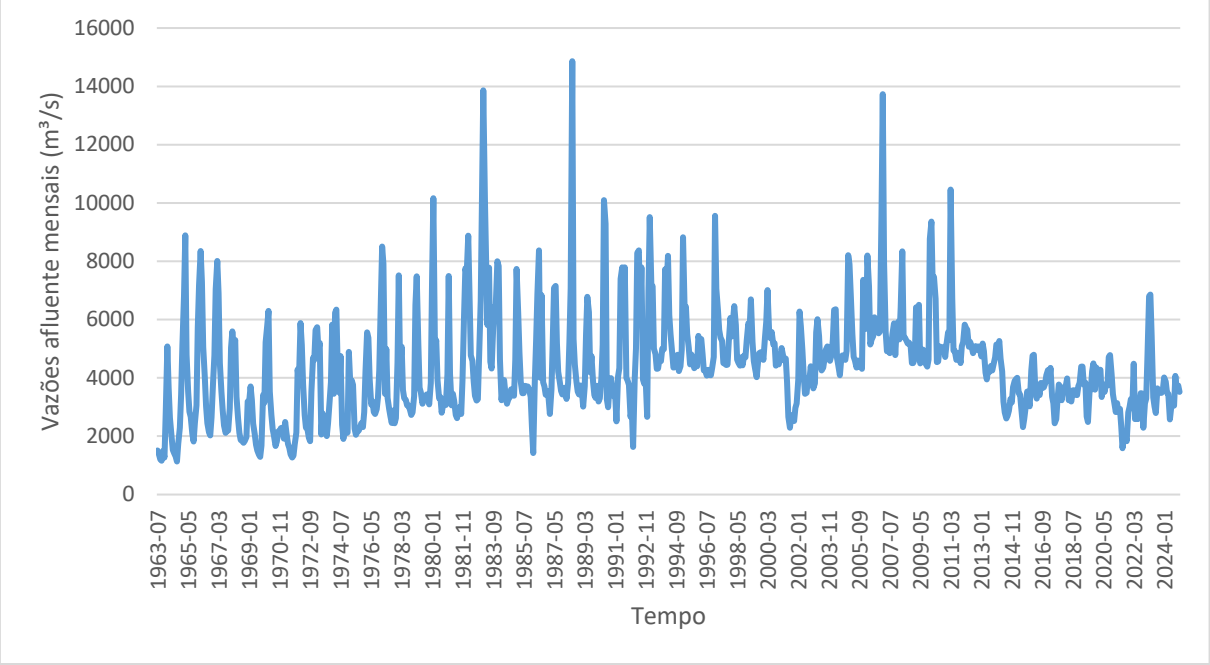
Tabela 7 – Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica da UHE Ilha Solteira

Ano	**Agropecuária**	**Floresta**	**Formação natural não florestal**	**Área não vegetada**	**Corpo d'água**
1985	67,28%	24,00%	4,89%	1,90%	1,93%
1995	73,94%	19,10%	3,86%	1,09%	2,01%
2005	75,27%	17,78%	3,74%	1,25%	1,96%
2015	75,00%	17,77%	3,82%	1,50%	1,91%
2023	74,89%	17,34%	3,89%	1,77%	2,11%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Analisando o uso e ocupação do solo na bacia de contribuição da UHE Ilha Solteira, nota-se uma redução das formações naturais ao longo dos anos, tanto florestal como não florestal, alterando de 24% e 4,89% em 1985 para 17,34% e 3,89% em 2023, respectivamente. Já para a agropecuária, verifica-se um aumento, começando com 67,28% em 1985 e terminando com 74,89% em 2023.

Figura 15 – Gráfico das vazões afluentes mensais



Fonte: Elaborado pelo autor.
Legenda: No eixo das abscissas está representada a variação no tempo e no eixo das ordenadas estão representadas as vazões afluentes médias mensais.

Analisando o gráfico da Figura 15, é possível perceber a diminuição da média das vazões por volta de 2014, associada a uma das mais severas secas já registradas no Sudeste brasileiro. De acordo com Marengo et al. (2015), essa seca foi caracterizada por déficits persistentes de precipitação e temperaturas acima da média, impactando diretamente os volumes armazenados e o regime hidrológico regional.

6 CONCLUSÕES

Os resultados dos testes estatísticos nas séries completas de precipitação e vazão estudadas, permitem concluir que ambas são não-estacionárias. Os demais intervalos da precipitação de 1942 a 1971 e 1971 a 2024, também foram caracterizados como não estacionários. O intervalo 2 da vazão de 1963 a 1981, foi o único caracterizado como estacionário, provavelmente devido ao curto período englobado, já o intervalo 3 de 1982 a 2024, foi considerado não-estacionário como os demais.

Com exceção do intervalo 2 da vazão, que pode ser tendencioso, os outros resultados foram semelhantes, sugerindo que o comportamento da vazão e da precipitação estão relacionados, considerando que os intervalos 1 obtiveram valores crescentes e o intervalo 3 valores decrescentes.

Ao longo do período analisado neste estudo, a bacia de contribuição da UHE Ilha Solteira apresentou mudanças expressivas no uso e ocupação do solo, com a diminuição das áreas de vegetação nativa e uma expansão significativa das zonas voltadas à agropecuária. Mudanças essas intimamente ligadas às vazões e precipitações.

A falta da disponibilidade de dados de uso do solo, bem como de vazões diárias e falhas em postos, impossibilita uma análise mais precisa.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, G. R. **Estudo para identificação de tendências do regime pluvial na região metropolitana de Belo Horizonte a partir de métodos estatísticos e modelos climáticos**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/REPA-82TJGL. Acesso: 11 fev. 2025.

Bravo, J.M., Collischonn, W.; Tucci, C.E.M.; Pilar, J.V.; Silva, B.C., 2008. Avaliação dos Benefícios de Previsões de Vazão na Operação de Reservatórios. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos 13** (1), 197-213. Disponível: https://abrh.s3.sa-east1.amazonaws.com/Sumarios/15/3e6a43038b5117d35b9d6604dd5cfff4_9953beba54a82f4 89a0efe620e44b42f.pdf. v13n1.p197-213. Acesso: 12 fev. 2025.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023** – Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sitespt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico723/BEN2024.pdf. Acesso: 12 fev. 2025

SILVA, M. M. **Tendências e extremos da pluviosidade na região hidrográfica do rio são Francisco**. 2021. Tese (Doutorado em Geografia e Gestão do Território) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/31585. Acesso: 12 fev. 2025.

LANNA, A. E. Elementos de estatística e probabilidade. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 5 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013. Cap no 4, p. 79 – 176.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: ABRH, 2009.

HIPEL, K. W.; McLEOD, A. I. **Times series modelling of water resources and environmental systems**. Amsterdam: Elsevier, 1994, 1054 p.

COLLISCHONN, W.; COLLISCHONN, B. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

TOZZI, Bruna Kiechaloski Miró. V**erificação da estacionariedade de séries hidrológicas de vazões na bacia do Rio Iguaçu**. 2014. 299 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná, 2014.

DETZEL, Daniel H. Marcos. **Modelagem de séries hidrológicas: uma abordagem de múltiplas escalas temporais**. 2015. 214 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade do Paraná, 2015.

TRÖGER, F. H.; PANTE, A. R. A**nálise de estacionariedade em séries de vazões naturais médias anuais de estações da bacia do rio Tapajós**. In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande, p. 1-20 2009.

FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 646 p.

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROPPO, Juliano Daniel; PELLEGRINO, Giampaolo Queiroz. **Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil**. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 1, p. 64 – 73, 2016.

WAGESHO, Negash; GOEL, N.K.; JAIN, M. K. **Investigation of non-stationary in hydro-climatic variables at Rift Valley lakes basin of Ethiopia**. Journal of Hydrology, v. 444-445, p. 113-133, jun. 2012.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. A**nalysis of changes in hydro-meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests in Serbia**. Global and Planetary Change, v. 100, p. 172-182, 2013

TUCCI, Carlos E.M; CLARKE, Robin T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento**: revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135-152, jan/jun. 1997.

COSTA, Marcos Heil; BOTTA, Aurélie; CARDILLE, Jeffrey. **Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of Tocantins River, Southeastern Amazonia**. Journal of Hydrology, v. 283, p. 206 – 2017, 2003.

SOUZA, Nayara Silva de; SOUZA, Wanderley de Jesus; CARDOSO, Jossy Mara Simões. **Caracterização hidrológica e influência da cobertura do solo nos parâmetros de vazão do Rio das Fêmeas**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 453 – 462, maio/jun 2017.

BETHLAHMY, Nedavia. **More streamflow after a bark beetle epidemic.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 28, p. 185 – 189, 1974.

CHENG, J.D. **Streamflow Changes After Clear-Cut Logging of a Pine Beetle-Infested Watershed in Southern British Columbia, Canada**. Water Resources Research, v. 25, n. 3, p. 449 – 456, 1989.

CUI, X.; LIU, S.; WEI, X. **Impacts of forest changes on hydrology: a case study of large watersheds in the upper reaches of Minjiang River watershed in China**. Hydrology and Earth System Sciences, v. 16, p. 4279 – 4290, nov. 2012.

MOORE, R. Dan; WONDZELL, S. M. **Physical hydrology and the effects of forest harvesting in the pacific northwest: a review**. Journal of the American Water Resources Association, p. 763 – 784, 2005.

BOSCH, J. M.; HEWLETT J. D. **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evaporation.** Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 55, p. 3 – 23, 1982.

ZHAO, Fangfang; XU, Zongxue; ZHANG, Lu. **Changes in streamflow regime following vegetation changes from paired catchments**. Hydrological Processes, v. 26, p. 1561 – 1573.

HSIA, Y. J.; KOH, C. C. **Water yield resulting from clearcutting a small hardwood basin in central Taiwan.** In: Hydrology of Humid Tropical Regions, Hamburg, 215 – 220, 1983.

HE, Yanhu; LIN, Kairong; CHEN, Xiaohong. **Effect of Land Use and Climate Change on Runoff in the Dongjiang Basin of South China**. Mathematical Problems in Engineering, v. 2013, p. 1 – 14, 2013.

SANTOS, C. A. et al. **Análise estatística da não estacionariedade de séries temporais de vazão máxima anual diária na bacia hidrográfica do rio Pardo.** Holos, v. 7, p. 179 – 193, 2016.

BERTONI, J.C. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 5 ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013. Cap no 5, p. 177 – 241.

GROPPO, Juliano Daniel et al. **Análise de Séries Temporais de Vazão e Precipitação em Algumas Bacias do Estado de São Paulo com Diferentes Graus de Intervenções Antrópicas.** Geociências, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181 – 193, 2005.

PINHEIRO, Adilson; GRACIANO, Regina Luiza Gouvêa; SEVERO, Dirceu Luís. **Tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 3. p. 281 – 290, 2013.

ROSIN, Cássia; AMORI, Ricardo Santos Silva; MORAIS, Tábata Saturnina Trindade de. **Análise de tendências hidrológicas na bacia do rio das Mortes.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 991 – 998, 2015.

MARENGO, José A.; ALVES, Lincoln Muniz. **Tendências hidrológicas da bacia do rio**
Paraíba do Sul. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.2, p. 215-226, mar. 2005.

MAPBIOMAS. **Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil.** Disponível em: <http://mapbiomas.org> Acesso em: 02 abr. 2025.

ALCÂNTARA, Lucas Ravellys Pyrrho et al. **Análise de tendência para dados pluviométricos no município de Toritama – PE**. Journal of Environmental Analysis and Progress, v. 4, n.2, p. 130 – 139, 2019.

BLAIN, Gabriel Constantino. **Tendências e Variações Climáticas em Séries Anuais de Precipitação Pluvial do Estado de São Paulo**. Agrometeorologia, Campinas, v. 69, n. 3, p. 765 – 770, 2010.

BATISTA, Alessandra Leite et al. **Verificação da Estacionariedade de Séries Hidrológicas no Sul-Sudeste do Brasil.** In: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – MS, p. 1 – 19, 2009.

GENTA, José L.; PEREZ-IRIBARREN, Gonzalo; MECHOSO, Carlos R. **A Recent Increasing Trend in the Streamflow of Rivers in Southeastern South America.** Journal of Climate, v. 11, p. 2858 – 2862, 1998.

MÜLLER, Ingrid Illich; KRUGER, Cláudio Marchand; KAVISKI, Eloy. **Análise de estacionariedade de séries hidrológicas na bacia incremental de Itaipu**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 51-71, out/dez. 1998.

GUETTER, Alexandre K.; PRATES, José E. **Degrau climático nas séries de vazões das bacias brasileiras**. In: Anais do XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, p. 2099-2110, 2002.

SÁFADI, Thelma**. Uso de séries temporais na análise de vazão de água na represa de Furnas**. Ciênc. Agrotec., Lavras, v. 28, n. 1, p. 142 – 148, 2004.

CTG BRASIL. **UHE Ilha Solteira**. [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.ctgbr.com.br/unidade/uhe-ilha-solteira/. Acesso em: 15 abr. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR): Dados de medição da UHE Ilha Solteira**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sar0/MedicaoSin?dropDownListEstados=26&dropDownListReservatorios=19034&dataInicial=01%2F01%2F1973&dataFinal=31%2F12%2F2024&button=Buscar. Acesso em: 23 abr. 2025.

RIBEIRO, M. E.; BORTOLIN, T. A.; MENDES, L. A.; RITA, L. C. S. S. **Análise de séries hidrológicas na bacia hidrográfica afluente à Usina Hidrelétrica Castro Alves**, RS. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 14, n. 4, p. 2042–2058, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Resolução nº 121, de 15 de março de 2022**. Dispõe sobre a Revisão Periódica de Segurança de Barragens – RPSB. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2022/121.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SELUCHI, M. E. **A seca de 2014 no sudeste do Brasil: causas e consequências**. Revista USP, São Paulo, n. 106, p. 31–44, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44.